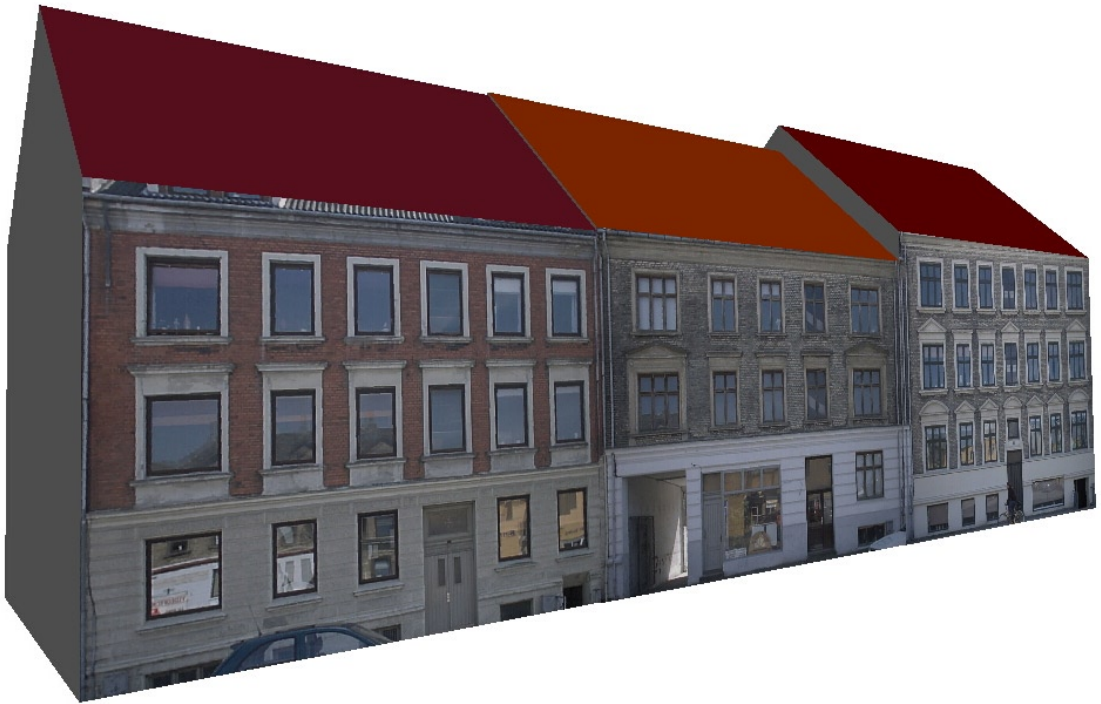


# Fotorealistiske 3D-bymodeller

- automatiseret indsamling og påsætning  
af facadebilleder



# Fotorealistiske 3D-bymodeller

- automatiseret indsamling og påsætning af facadebilleder

Afgangsprojekt af

Lise Lausten Frederiksen  
Jane Holmgaard  
Kristian Holm Vester

Landinspektørstudiet  
Aalborg Universitet  
2004

# Aalborg Universitet

Landinspektøruddannelsen  
Institut for Samfundsudvikling og Planlægning  
Fibigerstræde 11, 9220 Aalborg Øst



Titel:	Fotorealisticke 3D-bymodeller - automatiseret indsamling og påsætning af facadebilleder
Tema:	Geoinformatik
Projektperiode:	Februar 2004 - Juni 2004
Gruppemedlemmer:	Lise Lausten Frederiksen Jane Holmgaard Kristian Holm Vester
Hovedvejleder:	Jens Juhl
Bivejleder:	Joachim Höhle
Oplagstal:	8
Sidetal:	129
Appendiks:	9
Bilag:	8
CD:	1
Forside:	Fotorealisticke 3D-bymodel konstrueret af projektgruppen. Bygningerne er Østerbro 48-52 i Aalborg. Modellen er visualiseret i VRML.

## Synopsis

Dette afgangsprøveprojekt omhandler konstruktion af et mobilt kortlægningsystem til automatiseret indsamling og påsætning af facadebilleder på en eksisterende 3D-by-model. I projektet belyses endvidere de problemer, der er ved opbygningen af et mobilt kortlægningsystem.

Inden konstruktionen af det mobile kortlægnings-system analyseres hvilke krav, de danske producenter har i forbindelse med de nuværende metoder til fremstilling af fotorealisticke 3D-by-modeller. Ud fra denne analyse samt projektgruppens interesser vælges det at konstruere en bil med en positioneringsenhed og en kortlægningsenhed til indsamling af data til en fotorealisticke 3D-by-model. Som positioneringsenhed vælges tre GPS-modtagere, der måler RTK, og som kortlægningsenhed vælges et digitalt kamera.

I projektet konstrueres det mobile kortlægnings-system med beregningsrutiner til bestemmelse af kameraets ydre orientering i forhold til referencekoordinatsystemet. Endvidere udarbejdes en billedopretningsrutine, og der opstilles et løsningsforslag til en metode til korrektion for afvigelsen mellem størrelsen på facaden i 3D-by-modellen og den virkelige facade. Denne metode indebærer kantdetektering og den kan fjerne de sidste hældningsforskydninger i det oprettede facadebillede forårsaget af positioneringsenhedens manglende nøjagtighed. Da kantdetekteringsmetoden ikke implementeres i projektet, udarbejdes en alternativ metode til korrektion for afvigelsen mellem den virkelige facade og facaden i 3D-modellen, ved at angive tagudhængets størrelse. Denne metode implementeres og kontrolleres.

Det konkluderes, at den implementerede metode er anvendelig til at indsamle og oprette facadebilleder til en fotorealisticke 3D-by-model, hvis kravene til 3D-by-modellen ikke er så store. Stilles der derimod større krav til den fotorealisticke 3D-by-model, skal den ydre orientering af kameraet bestemmes bedre. Overordnet set er der stadig en del problemer, der skal løses, før det mobile kortlægnings-system med fordel kan anvendes i praksis.

## Abstract

This master thesis regards the development of a mobile mapping system for the acquisition and application of façade images on an existing 3D urban model. The problems concerning the development of the system are also presented.

Before developing the mobile mapping system an analysis of the requirements to the current methods for production of photorealistic 3D urban model is carried out. The analysis is performed from the Danish producers' point of view. Based on this analysis and the project group's own interests, it is decided to develop a road vehicle equipped with a positioning unit and a mapping unit. The vehicle is used for collecting data for a photorealistic 3D urban model. Three GPS receivers are chosen as a positioning unit and a digital camera is chosen for mapping unit.

A method for determining the exterior orientation of the camera in the reference coordinate system and a method for rectifying the façade images is developed. A solution is suggested to compensate for the divergence between the size of the façade in the 3D urban model and the actual size of the façade a solution is suggested. The solution is based on edge detection and it solves the remaining errors from the rectification caused by the positioning units' lack of accuracy. The suggested solution that employs edge detection is described; however, it is not implemented. Instead a second method is suggested. This approach considers and solves the error caused by the discrepancy in size between the façades in the 3D urban model and the actual building. This is carried out by specifying the size of the eaves of the building. This method is implemented and verified.

It is concluded that the implemented method is useful for data acquisition and image rectification when the demands placed on the photorealistic 3D urban model are low. If a client has higher demands, the exterior orientation of the camera must be improved. The development of the mobile mapping system leaves some problems unresolved that should be dealt with further before this mobile mapping system is ready for use.



# Forord

Denne rapport er udarbejdet af gruppe 2 på landinspektørstudiets 10. semester ved Aalborg Universitet. Rapporten er udarbejdet i foråret 2004 og afslutter projektgruppens uddannelse til landinspektør.

Rapporten omhandler udarbejdelse af et mobilt kortlægningssystem til indsamling og påsætning af facadebilleder på eksisterende 3D-bymodeller, og herunder arbejdes der blandt andet med GPS og fotogrammetri. Rapporten henvender sig til personer med interesse og viden inden for dette område.

Kildehenvisninger foretages ved hjælp af Harvard-metoden, hvilket vil sige [Forfatterens efternavn, udgivelsesår, sidetal]. Kildehenvisningerne i rapporten vil hovedsageligt følge ovenstående metode, men kan variere, alt efter om der henvises til bøger, forelæsninger etc. Ved henvisning til hjemmesider henvises der i teksten til hovedsiden på hjemmesiden, mens hele internetadressen er at finde i litteraturlisten. Forskellige henvisninger til samme hovedhjemmeside nummereres fortløbende.

Kilder, der henviser til én sætning, angives i sætningen indenfor punktummet. Kilder, der henviser til et enkelt afsnit, angives efter punktummet i afsnittets sidste sætning. Kilder, der henviser til flere afsnit, er placeret en linie efter sidste afsnit.

Illustrationer såsom billeder, tabeller og figurer etc. er alle benævnt "figur", og nummereringen af figurerne foretages fortløbende indenfor hvert kapitel. Figurer uden kildehenvisninger er udarbejdet af projektgruppen selv.

Der er udarbejdet en ordliste, som forklarer visse begreber anvendt i forbindelse med rapporten. Denne ordliste er at finde i bilag 8. Ord, der forklares i ordlisten, er i rapporten markeret med "!", for eksempel "Clusteranalyse!"

I bilag 1 forefindes en cd-rom med diverse matlabscripts, artikler henvist til i rapporten, etc. Strukturen på cd-rommen ses endvidere i bilag 1.

Der rettes en tak til Søren Buch, BlomInfo, og Johnny Koust Rasmussen, COWI, for information om udarbejdelsen af fotorealistiske 3D-bymodeller i deres respektive firmaer.

Aalborg d. 17. juli 2004

---

Lise Lausten Frederiksen

---

Jane Holmgaard

---

Kristian Holm Vester



---

# Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Indledning .....</b>	<b>1</b>
1.1	Mobile kortlægningssystemer.....	1
1.2	Fotorealistiske 3D-bymodeller.....	2
1.3	Initierende problemstilling .....	4
1.4	Rapportens opbygning .....	4
<b>2</b>	<b>Fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller .....</b>	<b>7</b>
2.1	Fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller i Danmark .....	7
2.1.1	Aktører og anvendelse .....	7
2.1.2	Efterspørgsel efter fotorealistiske 3D-bymodeller .....	8
2.1.3	Fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller.....	9
2.1.4	Vurdering af de nuværende metoder til fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller.....	13
2.1.5	Skråfotos.....	15
2.1.6	Vurdering af anvendelse af skråfotos til fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller.....	16
2.2	Automatiserede metoder til fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller i udlandet.....	17
2.2.1	MKS til konstruktion af fotorealistiske 3D-bymodeller.....	17
2.2.2	Øvrige automatiserede systemer og metoder .....	19
2.2.3	Vurdering af MKS til konstruktion af fotorealistiske 3D-bymodeller .....	20
2.3	Konceptvurdering .....	21
2.3.1	Krav til nye fremstillingsprocedurer og den fotorealistiske 3D-bymodel.....	22
2.3.2	Vurdering af krav i forhold til mulige MKS'er .....	23
2.4	Delkonklusion.....	28
<b>3</b>	<b>Problemformulering.....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>Systemanalyse .....</b>	<b>33</b>
4.1	Indledende overvejelser om krav til systemet.....	33
4.2	Kortlægningsenhed.....	36
4.2.1	Krav til kamera.....	36
4.2.2	Kameraer til rådighed.....	37
4.2.3	Kameravalg.....	39
4.3	Positioneringsenheden .....	40
4.3.1	Instrumenter .....	40
4.3.2	Kombinationsmuligheder.....	45
4.3.3	Valg af instrumenter til positioneringsenhed.....	46
4.4	Positionsbestemmelse i et kørende MKS.....	48
4.5	Samlet system.....	49
4.6	Delkonklusion.....	49



---

<b>5</b>	<b>Design af mobilt kortlægningsystem.....</b>	<b>51</b>
5.1	Systemets delfunktioner .....	51
5.2	Valg af koordinatsystemer.....	52
5.3	Konstruktion af det mobile kortlægningsystem .....	53
5.4	Systemkalibrering .....	56
5.4.1	Indre orientering .....	56
5.4.2	Ydre orientering.....	56
5.5	Bestemmelse af bilens position og orientering i forhold til referenc koordinatsystemet .....	65
5.6	Test af rotationsbestemmelse med multiantennesystemet .....	68
5.6.1	Teoretisk opnåelig spredning.....	69
5.6.2	Testens planlægning og udførelse.....	72
5.6.3	Resultater .....	73
5.7	Delkonklusion.....	77
<b>6</b>	<b>Design af billedbehandlingsrutine .....</b>	<b>79</b>
6.1	Samlet billedbehandlingsrutine .....	79
6.2	Geokodning.....	80
6.3	Opretning af billeder.....	81
6.4	Dannelse af mosaikker.....	84
6.5	Klargøring af billeder.....	85
6.5.1	Løsningsmodel.....	86
6.5.2	Detektering af kantpixler .....	88
6.5.3	Detektering af facadeafgrænsning i billede .....	91
6.5.4	Endelig opretning og korrektion.....	97
6.6	Påsætning af billeder på 3D-bymodel .....	98
6.7	Alternativ løsningsmodel .....	98
6.8	Delkonklusion.....	102
<b>7</b>	<b>Implementering .....</b>	<b>105</b>
7.1	Prototypen .....	105
7.2	Test af prototypen .....	105
7.3	Vurdering af billedopretning .....	108
7.4	Vurdering af GPS-bestemt ydre orientering til billedopretning.....	109
7.4.1	Vurdering af seks facader ved anvendelse af én GPS-epoke.....	110
7.4.2	Vurdering af én facade med forskellige GPS-epoker .....	111
7.5	Vurdering af det samlede system .....	115
<b>8</b>	<b>Konklusion .....</b>	<b>119</b>
8.1	Svar på problemformulering.....	119
8.2	Forbedringsmuligheder.....	122
8.3	Afrunding .....	123
<b>8</b>	<b>Litteraturliste.....</b>	<b>125</b>

---

**Appendiks A: Muligheder for måling med GPS og Galileo i bymiljø**

**Appendiks B: Terrestrisk rumlig fremskæring**

**Appendiks C: Koordinatsystemer**

**Appendiks D: Rotationsmatricer og koordinatomregning**

**Appendiks E: Fejlkilder ved GPS**

**Appendiks F: Udjævningsteknikker**

**Appendiks G: Hough transformation**

**Appendiks H: Filtrering**

**Appendiks I: Detektering af kantpixler**

**Bilag 1: CD**

**Bilag 2: Interviewspørgsmål til BlomInfo A/S og COWI A/S**

**Bilag 3: Opretning af facadebilleder**

**Bilag 4: Inertial Measurement System**

**Bilag 5: Døde områder**

**Bilag 6: Resultat fra detektering af kantpixler**

**Bilag 7: Diagram over den samlede proces i det færdige implementerede system**

**Bilag 8: Ordliste**



# 1 Indledning

Nærværende afgangsprøve handler om sensorintegration i et mobilt kortlægningssystem som værktøj til konstruering af fotorealisticke 3D-by-modeller.

Projektidéen udspringer af projektgruppens arbejde på 9. semester, som omhandlede automatiseret 3D-bygningsmodellering. I forbindelse med dette arbejde fandt projektgruppen ud af, at der er interesse for fotorealisticke 3D-bymodeller. På baggrund af dette samt projektgruppens interesse for at fortsætte arbejdet med 3D-bymodeller ønsker projektgruppen således i dette projekt at beskæftige sig med påsætning af billeder på en 3D-bymodel.

Påsætningen af billederne på 3D-bymodellen bør foregå så automatisk som muligt. Projektarbejdet på 9. semester har gjort projektgruppen opmærksom på, at der i kortlægningsbranchen er et stort ønske om at automatisere processerne i forbindelse med kortlægning. Automatiserede processer kan være med til at effektivisere dataindsamlingen og databehandlingen, således at de firmaer, der udfører kortlægningen, kan opnå en tidsbesparelse og derved sælge produkterne billigere. Projektgruppen har fra begyndelsen af projektarbejdet fattet interesse for sensorintegration i et mobilt kortlægningssystem, og mener, at dette kan være et led i effektiviseringen af indsamling og bearbejdning af facadebilleder til påsætning på en 3D-bymodel.

## 1.1 Mobile kortlægningssystemer

Mobile kortlægningssystemer er i resten af rapporten benævnt ved forkortelsen "MKS". Udviklingen

af de første MKS'er blev igangsat af blandt andet "Centre for Mapping" i USA. Her definerede man et MKS, som værende "*en bevægelig platform, hvorpå der er integreret flere sensorer/måleinstrumenter til bestemmelse af en tredimensionel position til både platformen og det indsamlede data*". Citatet er oversat fra engelsk. Senere er definitionen blevet udvidet til også at omhandle løbende kalibrering af udstyr og kontrolrutiner af indsamlet data. Projektgruppen anvender også denne definition af et MKS. [Zhang m.fl., 2003, s. 5]

Oftest inddeles de sensorer, der er placeret på platformen, i to kategorier: Positioneringsenheder og kortlægningenheder. Positioneringsenhederne kan for eksempel være GPS (Global Positioning System), IMU (Inertial Measurement Unit), odometer, inklinometer, etc., mens kortlægningenhederne kan være videokamera, stillbilledkamera eller laserscanner. [Zhang m.fl., 2003, s. 5]

Kernen i et MKS er at kunne bestemme den ydre orientering, det vil sige positionen og orienteringen, af kortlægningenheden til et givent tidspunkt.

Det første MKS blev opfundet i begyndelsen af 1980'erne, og blev anvendt til kortlægning af vejudstyr langs motorveje. Systemet erstattede de traditionelle opmålingsmetoder, der ellers var blevet anvendt, og var lidt af en revolution inden for kortlægning, da indsamlingen af data nu blev foretaget hurtigere. I takt med at GPS har gjort sit indtog, at kameraer er blevet digitale samt den generelle instrumentudvikling, er der siden udviklet mange MKS'er med forskellige formål og nøjagtigheder. MKS'er anvendes for eksempel

til kortlægning af laviner og gletschere, hvor platformen er en helikopter, og kortlægningsenheden er et kamera. Et MKS kan også anvendes til turistinformation, hvor for eksempel GPS og kompas bestemmer position og orientering af turisten, og via en PDA! får turisten således oplysninger om bestemte turistattraktioner [Böhm m.fl., 2001, s. 1-6]. Der, hvor MKS nok er mest anvendt, er i flyfotogrammetrien, hvor GPS og Inertial Navigation System (INS)! anvendes til bestemmelse af kameraets position og ydre orientering i eksponeringstidspunktet, og i luftbåren laserscanning, hvor GPS og INS anvendes til bestemmelse af laserscannerens position og orientering ved udsendelse af laserstrålerne. [Zhang m.fl., 2003, s. 5-6]

I Danmark anvendes MKS af for eksempel Vejdirektoratet til opmåling af for eksempel kantsten og vejmidter. Ved integration af videokamera, GPS, odometer, kompas og gyro indsamles information om disse objekter. Metodens nøjagtighed kan ifølge vejdirektoratet sammenlignes med de nøjagtigheder, der kan opnås med traditionel landmåling og fotogrammetri. [www.vejdirektoratet.dk, 03.03.2004]. På landinspektørstudiet på Aalborg Universitet er der også tidligere arbejdet med MKS. I et afgangprojekt fra 2002 arbejdes der med sensorintegration til registrering af vejdstyr, som for eksempel skilte [Jensen m.fl., 2002]. I projektet udvikles der et MKS ved at integrere kamera og GPS-antener, og teknologien findes anvendelig til registrering af vejdstyr.

Projektgruppen har en teori om, at integration af forskellige sensorer i et MKS også er anvendelig til at sætte billeder på en 3D-bymodel. Endvidere er projektgruppen gennem landinspektøruddannelsen blevet præsenteret for forskellige opmålingsinstrumenter og -metoder i forbindelse med undervisning i landmåling og fotogrammetri. Projektgruppen finder det derfor nu interessant at prøve at integrere flere forskellige instrumenter og metoder i én enhed - i et MKS.

## 1.2 Fotorealistiske 3D-bymodeller

3D-by- og landskabsmodeller er i de seneste år indenfor den geografiske dataverden blevet et varmt emne og har fundet stor anvendelse inden for mange områder. Anvendelserne er mange, hvad enten der er tale om en 3D-model bestående af for eksempel en Digital Terrain Model (DTM)!, eller en 3D-bymodel, hvor bygningerne er blevet modelleret ud fra enten laserscanningsdata eller fotogrammetri og således fremstår som selvstændige objekter.

3D-modellerne anvendes for eksempel til modellering af oversvømmelser omkring floder, til forskellige former for redningstjenester, til bilnavigation, til vurdering af placering af mobilmaster ved hjælp af analyse af radiobølgers udbredelse, til miljøanalyser, til vurdering af udsigts- og skyggeforhold omkring bygninger, til visualiseringsformål, etc. [Rasmussen, 2003, s. 16].

Specielt 3D-bymodellerne anvendes til forskellige visualiseringsformål. Dette gælder for eksempel i forbindelse med planlægning, arkitektkonkurrencer, etc.

På nuværende tidspunkt går trenden mod, at 3D-bymodellerne skal være fotorealistiske [www.geoforum.dk, 27.02.2004].

Fotorealistiske 3D-bymodeller anvendes på nuværende tidspunkt i for eksempel ejendomshandel, hvor potentielle købere på ejendomsmæglerens hjemmeside kan "flyve" omkring en given bolig, og således få et indtryk af omgivelserne. Samme teknik anvendes også på Nordjyllands Amts hjemmeside, hvor borgerne kan tage en "flyvetur" rundt i Nordjylland. Et udsnit af Nordjyllands Amts 3D-model ses på figur 1.1.

Der er i dag flere kommuner, der har 3D-bymodeller, for eksempel Århus, Aalborg, Silkeborg og København. Københavns Kommune har en fuld



Figur 1.1: Udsnit af Nordjyllands Amts 3D-model. Udsnittet er fra Nytorv i Aalborg. [www.3d.nja.dk, 05.03.2004]



Figur 1.2: Udsnit af Københavns Kommunes 3D-bymodel. Udsnittet er fra Nansensgade. [www.blominfo.dk, 05.03.2004]

3D-bymodel af hele kommunen, hvor dele af den har et fotorealistisk udseende. Meningen er, at den skal anvendes til behandling af byggesager, hvor for eksempel fremtidige bygninger skal vurderes i forhold til omgivelserne med hensyn til skygge- og udsigtsforhold. 3D-bymodellen skal endvidere lægges på internettet ved lokalplanlægning og byfornyelse, og kommunen håber således at borgerne bliver mere interesserede i byplanlægningen og derved opnå en bredere debat ved høringer og lignende. [www.politiken.dk, 24.02.2004]. Et udsnit af Københavns fotorealistiske 3D-bymodel ses på figur 1.2.

Computerindustrien har også interesse i anvendelse af fotorealistiske 3D-bymodeller. Her bliver der brugt store summer på at optimere integrationen af de store mængder data fra de fotorealistiske 3D-bymodeller i computerspil. [www.geoforum.dk, 27.02.2004]

Endelig anvendes fotorealistiske 3D-bymodeller også som reklameværktøj i markedsføringen af geografiske områder. Det gælder for eksempel for Ruhr-distriktet, der i 2006 skal være vært for nogle fodboldkampe ved VM. En fotorealistisk 3D-bymodel over området er netop ved at blive konstrueret, og denne skal blandt andet anvendes i reklameøjemed. [www.geoforum.dk, 27.02.2004]

Der findes flere forskellige typer af fotorealistiske 3D-bymodeller. Figur 1.1 viser en fotorealistisk 3D-bymodel, der er dannet ud fra en højdemodel, et 2D-vektorkort til plan afgrænsning samt et ortofoto fra luften, der er draperet hen over højdemodellen. En anden form for fotorealistisk 3D-bymodel opnås ved at kombinere en 3D-tråd- eller flademodel af bygningerne med fototekstur i form af et ortofoto fra luften og facadebilleder, jf. figur 1.2.

Ved at sammenligne de to typer af fotorealistiske 3D-bymodeller ses det, at den sidstnævnte er langt den mest detaljerede og den, som ligner virkeligheden mest. Forskellen mellem de to typer fotorealistiske 3D-bymodeller, at bygningerne i den sidstnævnte type er modelleret, så hver facade kan betragtes som et selvstændigt objekt samt indeholder facadebilleder.

Det projektgruppen i det følgende vil beskæftige sig med, er en 3D-bymodel af den sidstnævnte type. Projektgruppen ønsker at beskæftige sig med påsætning af facadebilleder, og ikke hverken drapering af ortofotos på en DTM eller selve den geometriske konstruktion af 3D-bymodellen. Som udgangspunkt i projektarbejdet arbejdes der derfor med en eksisterende 3D-bymodel, hvor hver facade betragtes som et selvstændigt objekt.

## 1.3 Initierende problemstilling

Den initierende problemstilling er, at projektgruppen finder det spændende at arbejde med MKS'er samt påsætning af facadebilleder på en eksisterende 3D-bymodel. Projektgruppen har en idé om, at et MKS kan anvendes til påsætning af facadebilleder på en 3D-bymodel i tæt bebyggelse, såsom midtbyområder, og projektgruppen ønsker gennem projektarbejdet at afprøve idéen. Projektgruppen ønsker i projektet at beskæftige sig med hele processen fra opbygningen af et MKS, der kan anvendes til indsamling af facadefotos, til selve påsætningen af billeder på 3D-bymodellen. Af tidsmæssige årsager ser projektgruppen det desværre ikke muligt at blive fuldt fortrolig med alle delelementer i processen, og projektgruppens ønske med projektet er derfor at opnå kendskab til delelementerne i processen samt de forskellige problemer, der vil opstå ved konstruktionen af et samlet system.

Som indgangsvinkel til projektet undersøges derfor de krav, der er til indsamlings-, bearbejdnings- og påsætningsprocesserne ved de nuværende fremstillingsmetoder af fotorealistiske 3D-bymodeller, for således at kunne tage højde for disse, hvis processerne skal automatiseres.

Desuden ønsker projektgruppen at undersøge hvilke metoder, der andre steder i verden er taget i anvendelse, for at automatisere førnævnte processer.

## 1.4 Rapportens opbygning

Som det fremgår af indledningen og den initierende problemstilling, er projektets omdrejningspunkt udvikling af et samlet system bestående af et MKS til indsamling af billeder samt rutiner til påsætning af billederne på en 3D-bymodel. For at holde styr på de forskellige problemstillinger, der vil opstå undervejs i projektet, har projektgruppen set en fordel i at opbygge projektet og dermed rapporten metodisk. Det vælges at anvende

metoden "Struktureret Analyse". Struktureret Analyse er en metode, der traditionelt anvendes til udvikling af administrative EDB-systemer, men da der grundlæggende også er tale om udvikling af et system i dette projekt, ser projektgruppen ingen hindring for, at metoden også kan anvendes i dette projekt. De overordnede dele i Struktureret Analyse er:

- Foranalyse
- Systemanalyse
- Systemdesign
- Implementering
- Vedligeholdelse

Struktureret analyse anvendes ikke slavisk i projektet, men ovenstående punkter bruges til at inddele arbejdet i en række overskuelige dele.

I foranalysen klarlægges, om der overhovedet er grundlag for at fortsætte systemudviklingen. Foranalysen anvendes også til at se på eksisterende systemer af samme karakter.

Systemanalysen skal anvendes til at fastlægge mål og krav til systemet, samt til indsamling af information og viden om problemområdet. I systemanalysen undersøges således de tekniske muligheder, der er for udvikling af systemet, og mere konkret opstilles et løsningsforslag.

Systemdesignet indebærer den fysiske konstruktion af systemet.

Implementeringen vedrører realiseringen af systemet. Herunder vil systemet blive testet på et kontrolfelt, og resultaterne vil blive præsenteret.

Vedligeholdelse af systemet skal løbende foregå, blandt andet i begyndelsen efter implementeringen hvor der sandsynligvis vil være en del fejl at

rette, men også med hensyn til implementering af løbende forbedringer og reparationer af systemet.

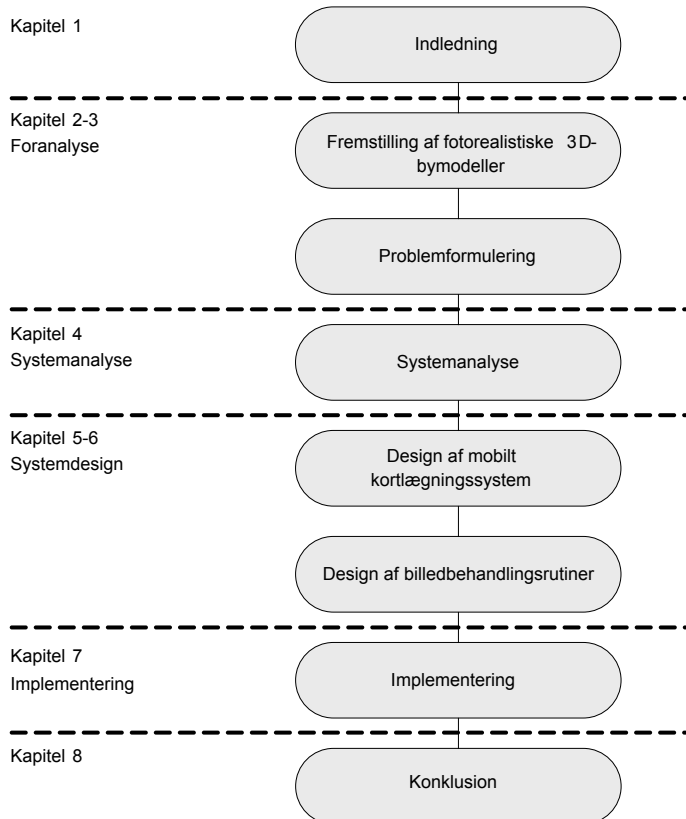
[Delskov m.fl., 1994, s. 29-35]

Systemudvikling er en iterativ proces, hvor der hele tiden opnås erfaringer, som kan bruges til forbedring af systemet. Dette projekt omfatter udvikling af en prototype. Det betyder, at der

opnås grundlæggende erfaringer, som i følgende udviklingstrin bør implementeres i systemet.

Projektgruppens arbejde omfatter udvikling af en prototype, som vil blive implementeret, men selve vedligeholdelsen af systemet afgrænses der fra, da dette først vil være hensigtsmæssigt i følgende udviklingstrin.

Et flowdiagram over rapporten ses på figur 1.3.



Figur 1.3: Flowdiagram over kapitler i rapporten.





## 2 Fremstilling af fotorealisticke 3D-bymodeller

Et af formålene med dette kapitel er at undersøge, hvordan fotorealisticke 3D-bymodeller fremstilles i dag med henblik på at identificere de problemstillinger, der gør sig gældende ved de nuværende fremstillingsmetoder. Der tages udgangspunkt i fremstillingen af fotorealisticke 3D-bymodeller i Danmark. De problemstillinger, der klarlægges i kapitlet, skal således indgå i overvejelserne omkring konstruktionen af et MKS til automatiseringen af indsamlings-, bearbejdnings- og påsætningsprocesserne. Et andet formål med kapitlet er at hente inspiration til automatisering af processerne. Dette gøres ved at undersøge allerede konstruerede MKS'er, samt software og billedbehandlingsmetoder, der kan anvendes til automatiseringen af processerne. Der tages primært udgangspunkt i metoder udviklet i udlandet, hvor der arbejdes med MKS og sensorintegration.

For at undersøge hvordan der fremstilles fotorealisticke 3D-bymodeller i Danmark, har projektgruppen anvendt viden opnået gennem projektarbejdet på 9. semester samt interviews med Production & Development Manager Søren Buch fra kortlægnings- og GIS-firmaet BlomInfo A/S og Johnny Koust Rasmussen fra ingeniørfirmaet COWI A/S. Firmaerne BlomInfo og COWI er valgt, da projektgruppen har kendskab til, at disse firmaer er hovedproducenterne inden for fotorealisticke 3D-bymodeller i Danmark.

Inden de beskrevne interviews fandt sted, var projektgruppens spørgsmål fremsendt per e-mail til deltagerne. De beskrevne interviews foregik ved telefonsamtale eller personligt møde. Projektgruppens spørgsmål til de interviewede fremgår

af bilag 2, mens de fulde interviews med BlomInfo og COWI fremgår af bilag 1.a.

Redegørelsen for den automatiserede fremstilling af fotorealisticke 3D-bymodeller ved hjælp af MKS, fotogrammetriske metoder og billedbehandlingsmetoder bygger på litteraturstudier samt indtryk fra InterGEO-messen i Hamburg i september 2003.

### 2.1 Fremstilling af fotorealisticke 3D-bymodeller i Danmark

I det følgende beskrives kort de danske aktører og anvendelsesområder samt efterspørgslen i forbindelse med fotorealisticke 3D-bymodeller for at skabe et overblik over status på området i Danmark. Derefter redegøres for, hvordan disse fremstilles og hvilke fremtidsmuligheder de adspurgte firmaer ser inden for udviklingen af fremstillingsmetoderne. Det følgende bygger, hvis ikke andet er angivet, på de gennemførte interviews. Det vil sige, der angives kun kilder i de tilfælde, hvor oplysningerne ikke stammer fra et interviewene.

#### 2.1.1 Aktører og anvendelse

I Danmark er det hovedsageligt BlomInfo og COWI, der udbyder og fremstiller fotorealisticke 3D-bymodeller. Kunderne er i langt de fleste tilfælde kommuner, og 3D-bymodellerne anvendes hovedsageligt til visualisering i forbindelse med planlægningsformål. Det kan være i forbindelse med kontakt til borgerne i form af for eksempel borgermøder og præsentation af lokalplaner. Ideen er, at de fotorealisticke 3D-bymodeller skal

være med til at øge dialogen mellem kommune og borger ved for eksempel høringer og lignende.

3D-bymodellerne anvendes også i dialogen mellem fagfolk og politikere og som grundlag for diskussion politikerne imellem. Målgruppen for de fotorealisticke 3D-bymodeller er altså hovedsageligt borgere og politikere, der har lettere ved at relatere sig til de fotorealisticke 3D-bymodeller end til 3D-tråd- eller flademodeller af byen eller 2D kort, idet de fotorealisticke 3D-bymodeller giver et langt bedre billede af virkeligheden end de øvrige modeller og kort.

De fotorealisticke 3D-bymodeller anvendes ligeledes ved udskrivning af arkitektkonkurrencer, hvor arkitektens forslag vurderes i forhold til omgivelserne i den fotorealisticke 3D-bymodel. Endelig anvendes 3D-bymodellerne i visse kommuner til byggesagsbehandling.

De nævnte anvendelser giver indtryk af, at de fotorealisticke 3D-bymodeller ofte anvendes til visualisering af bygninger i indre byområder. Det er i sådanne områder og ikke i for eksempel parcelhusområder, systemet skal anvendes. Endvidere giver anvendelserne indtryk af, at 3D-bymodellerne skal være egnede til visualisering fra gadeplan, hvorfor dette vil være et krav til systemet.

## 2.1.2 Efterspørgsel efter fotorealisticke 3D-bymodeller

Fremstillingen af fotorealisticke 3D-bymodeller har hos de adspurgte firmaer kun foregået et par år. Derfor er der endnu ikke fremstillet så mange 3D-bymodeller af denne type. Det har ikke været muligt at få et konkret tal på, hvor mange fotorealisticke 3D-bymodeller, der er fremstillet i Danmark. Hos BlomInfo oplyses dog, at man i alt har taget omkring 4000 billeder fordelt på større og mindre opgaver. De store opgaver indeholder mellem 1000-2000 facadebilleder, mens mindre opgaver kan indeholde omkring 200 facadebilleder. Hos firmaet forventer man dog, at komme til

at lave meget i forbindelse med fotorealisticke 3D-bymodeller efterhånden som folk får øjnene op for mulighederne. I dag er der størst efterspørgsel efter 3D-bymodellerne uden billeder, men efterhånden som 3D-bymodellen anvendes af kunden, opstår interesse eller behov for facadebilleder på 3D-bymodellerne. Årsagen er, at de fagfolk, der arbejder med 3D-bymodellerne, ikke mener at have behov for billederne i det daglige arbejde, men ved kommunikation med andre mennesker uden samme faglige baggrund, opstår behovet for mere realistiske modeller; fotorealisticke 3D-bymodeller. BlomInfo er overbevist om, at der er en fremtid inden for fremstilling af disse 3D-bymodeller og mener også, det er realistisk, selvom det nuværende anvendelsesområde er forholdsvist smalt.

På baggrund af interviewene kan det konstateres, at de fotorealisticke 3D-bymodeller er særdeles anvendelige i byfornyelsessager. Der arbejdes meget med byfornyelse i kommunerne, og her ses et stort marked for anvendelse af de fotorealisticke 3D-bymodeller. Desuden er projektgruppen af den overbevisning, at markedet udvider sig efterhånden som kendskabet til mulighederne øges. Som nævnt i indledningen er der mange muligheder for anvendelse af fotorealisticke 3D-bymodeller. Det altafgørende for udbredelsen af de fotorealisticke 3D-bymodeller er sandsynligvis prisen. Som det fremgår af figur 2.1, er det påsætningen af facadefotos, der er den dyreste post ved fremstillingen af de fotorealisticke 3D-bymodeller. Derfor er det hensigtsmæssigt at fremstillingsprocedurerne effektiviseres, således at rammerne for en større efterspørgsel skabes.

	Pris uden moms
3D-tråd- eller flademodel	350-550 kr./hektar
Facadefotos, alm. bygning	300-600 kr./bygning
Facadefotos, landmarks!	1000-3000 kr./bygning

Figur 2.1: Priser på fotorealisticke 3D-bymodel. Selve 3D-tråd- eller flademodellen er ikke så dyr, mens det er dyrt at få billeder sat på 3D-bymodellen. [Seminar om 3D-bymodeller, COWI, 03.06.2004]

### 2.1.3 Fremstilling af fotorealisticke 3D-bymodeller

Fremstillingen af de fotorealisticke 3D-bymodeller foregår stort set ens hos BlomInfo og COWI. Først konstrueres et datagrundlag i form af en 3D-trådmodel af bygningerne. Trådmodellen omdannes til en flademodel. Derefter foretages en påsætning af ortofotos på bygningernes tage samt på en DTM, der udgør en model af terrænet i området. Der foretages også en påsætning af facadebilleder, der er indsamlet terrestrisk og uafhængigt af indsamlingen af data til konstruktion af 3D-bymodellen. Endelig er der mulighed for at udvide 3D-bymodellen med diverse udstyr, så som træer, buske, bænke etc. 3D-bymodellerne visualiseres enten som en navigerbar model!, hvor brugeren frit kan bevæge sig rundt eller som en dynamisk model! i form af en film, hvor brugeren ledes rundt i 3D-bymodellen ad en forud bestemt rute.

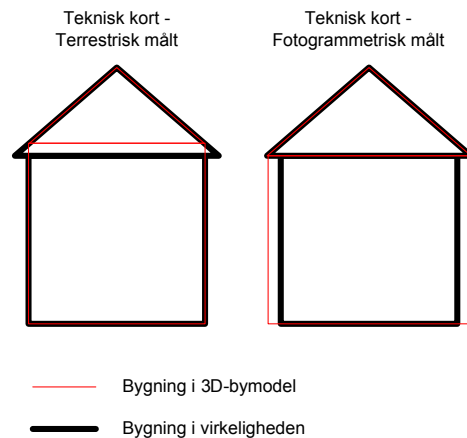
I det følgende beskæftiger projektgruppen sig kun med datagrundlaget; det vil sige 3D-bymodellen samt indsamling og påsætning af facadebilleder.

#### 3D-bymodel

Både BlomInfo og COWI anvender en eksisterende 3D-bymodel som grundlag for de fotorealisticke 3D-bymodeller. Disse 3D-bymodeller er i begge tilfælde fremkommet ved fremstilling af trådmodeller ved at kombinere en DTM, bygningspolygoner fra den aktuelle kommunes tekniske kort samt en detaljeret fotogrammetrisk måling af tagkonstruktionerne. Det vil sige, at tagene konstrueres fotogrammetrisk, mens det tekniske kort bestemmer bygningsafgrænsningen i planet og DTM'en bestemmer bygningsafgrænsningen mod terræn. Det tekniske kort projiceres så at sige op til taget på bygningen. Det tekniske kort anvendes til at definere bygningsafgrænsningen uanset om bygningerne, som det oftest er tilfældet, er målt fotogrammetrisk til tagudhæng eller om bygningerne, som det i kun få eksempler er tilfældet, er

målt terrestrisk til fri mur over sokkel. På denne måde opnås, at det tekniske kort og 3D-bymodellen altid er i overensstemmelse med hinanden.

I begge tilfælde er der dog problemer med, at bygningerne i 3D-bymodellen ikke er i overensstemmelse med virkeligheden, jf. figur 2.2. Er bygningerne i det tekniske kort målt til sokkel, bliver facaderne på bygningerne i modellen højere end i virkeligheden, og er bygningerne i det tekniske kort målt til tagudhæng, bliver bygningerne i modellen bredere og længere end i virkeligheden. Dette kan være et problem, når facadebilleder skal påsættes 3D-bymodellen, idet bygningernes afgrænsning i facadebillederne ikke stemmer overens med afgrænsningen i 3D-bymodellen. Denne problemstilling kaldes i det efterfølgende for tagudhængsproblematikken. Som en konsekvens af dette, strækkes i billederne, således de passer til facaden i modellen, og der opstår således et affinitetsproblem, idet målforholdet i de påsatte billeder vil variere.



Figur 2.2:

Bygningerne viser princippet ved konstruktion af bygninger i 3D-bymodeller. Det tekniske kort projiceres op til taget, der er fremstillet fotogrammetrisk. Er bygningen konstrueret efter et teknisk kort fremstillet ved terrestrisk måling, bliver facaden i modellen højere end i virkeligheden. Er bygningen konstrueret efter et teknisk kort fremstillet fotogrammetrisk, der er målt til tagudhæng bliver facaderne i modellen bredere og længere end i virkeligheden.

Det er ikke oplyst, hvilken DTM BlomInfo og COWI benytter i forbindelse med 3D-bymodellerne, men afhængig af hvordan den anvendte DTM er fremstillet, kan disse have forskellige nøjagtigheder og derved påvirke højden af de modellerede bygninger. Dette har indflydelse på modellens nøjagtighed, og får således også betydning for påsætningen af billeder. Er bygningerne i modellen således højere eller lavere end i virkeligheden, stemmer højden af facaden i billedet ikke med højden i modellen.

Der findes i Danmark ingen fælles standarder for 3D-bymodeller. Derfor har BlomInfo udarbejdet en specifikation, der bygger på forskellige standarder for tekniske kort, hvorefter bygningerne modelleres. Specifikationen fortæller, hvad kunden kan forvente med hensyn til nøjagtighed og detaljeringsgrad, og fungerer som en aftale mellem BlomInfo og kunderne. Spredningen for veldefinerede punkter i 3D-bymodellerne er 10-15 cm i plan og højde. Denne spredning giver ligesom tagudhængsproblematikken også anledning til problemer i forbindelse med uoverensstemmelsen mellem 3D-bymodel og virkelighed. Hos COWI anvendes lignende modeller.

I forbindelse med konstrueringen af 3D-bymodeller, hvor de tekniske kort anvendes, kan der opstå problemer, hvis de tekniske kort ikke følger standarderne for tekniske kort. Hvis bygningspolygonerne for eksempel ikke er lukkede eller overlapper hinanden, vil dette smitte af på 3D-bymodellen. Projektgruppen beskæftiger sig ikke yderligere med denne problemstilling, og det forudsættes således, at 3D-bymodellerne ikke er under indflydelse af sådanne fejl. Endelig skal det nævnes, at den generalisering, der foretages i forbindelse med konstruering af tekniske kort, får samme indvirkning på 3D-bymodellerne.

### Indsamling af facadebilleder

Indsamlingen af facadebilleder foregår stort set ens hos BlomInfo og COWI. Den foregår

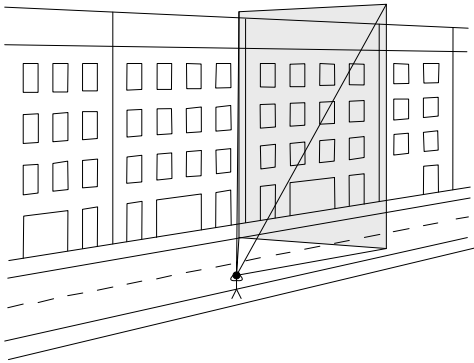
manuelt ved, at en person går rundt i gaderne med et kamera og tager billeder af de enkelte bygningsfacader. Dataindsamlingen foregår med digitale amatørkameraer med en forholdsvis høj opløsning; hos BlomInfo har kameraet 5 megapixels, og der tages farvebilleder. Det er ikke oplyst, hvilke kameraer de pågældende firmaer benytter. Det påpeges hos BlomInfo, at det tilstræbes, at facadefotograferingen foregår på en sådan måde,

- at hver bygningsfacade kan være på ét billede,
- at den geometriske opløsning! er af en acceptabel størrelse (ofte  $\leq 5$  cm), og
- at der ikke er generende genstande som biler, personer og lignende foran facaden i optagetidspunktet.

Disse "regler" er vigtige for at lette den efterfølgende databehandling, og kommenteres i det følgende.

Kan hele bygningsfacaden ikke være på ét billede, skal der ved den efterfølgende databehandling dannes en mosaik mellem to eller flere billeder, hvilket er tidskrævende. Problemet er ofte, at det i byen ikke er muligt at komme tilstrækkelig langt væk fra facaderne, til at hele facaden kan være på ét billede. Bygningerne er simpelthen for høje eller for brede, og gaderne er smalle. For at undgå denne problematik videst muligt, fotograferes langt de fleste facader skråt på facaden fra den modsatte side af gaden fra en position til højre eller venstre for facaden, jf. figur 2.3. Det er sjældent, at billederne tages vinkelret på facaderne, men hvis hele bygningsfacaden kan være i ét billede taget vinkelret på facaden, foretrækkes det.

Problematikken betyder, at det for hver facade overvejes, hvorfra det er mest hensigtsmæssigt at fotografere, og ofte vil man ifølge BlomInfo komme til at stå meget tæt på modsat liggende bygninger.



Figur 2.3: Bygningsfacaderne fotograferes oftest skråt på facaden til højre eller venstre for facaden, for at hele bygningsfacaden kan være i ét billede.

Der tilstræbes som standard hos BlomInfo en geometrisk opløsning på under 5 cm i hele billedet i det færdige produkt. De 5 cm er valgt, fordi man hos BlomInfo finder opløsningen acceptabel, da man med denne opløsning oftest kan se de nødvendige detaljer; for eksempel sprosserne i vinduerne. For at sikre, at denne opløsning kan opnås, fotograferes normalt således, at der opnås en betydelig bedre opløsning end de 5 cm - ofte fotograferes der med 1 cm opløsning. I den forbindelse er det vigtigt, at kravet om 5 cm overholdes i hele billedet. Da afstanden til bygningsfacaden har betydning for den geometriske opløsning af billederne, har man i firmaet en tommelfingerregel, der fortæller i hvilken afstand fra facaderne, billederne bør tages. Både hos BlomInfo og COWI har kunden mulighed for at vælge, hvilken geometrisk opløsning facadebillederne skal have.

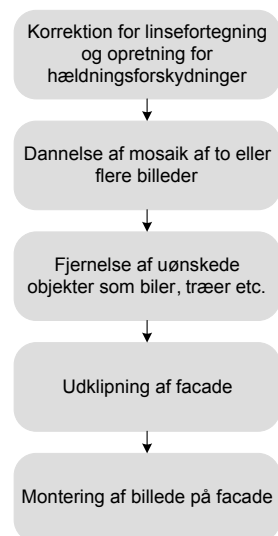
Hos BlomInfo har man mulighed for at skifte mellem to forskellige linser. Den ene linse er en normalvinkellinse. Den anden linse er en vidvinkellinse, som er en fordel at anvende, hvis facaderne er store. Omvendt betyder brug af denne linse større efterbehandling af billederne, idet billederne bliver tøndeformede, hvilket ikke er hensigtsmæssigt. Billederne taget med vidvinkellinsen korrigeres for linsefortegning i modsætning til billeder taget med normalvinkellinsen. Derfor tilstræbes så vidt muligt at anvende normalvinkellinsen.

Endelig er det vigtigt så vidt muligt at fotografere uden generende genstande, for eksempel biler og træer, foran bygningsfacaden, idet kunderne ofte ønsker at se facaderne alene.

Når billederne tages i marken, noteres samtidigt på et kort, hvilket billede der tilhører hvilken facade.

## Påsætning af facadebilleder

Påsætningen af facadebilleder på bygningerne i 3D-bymodellen foregår også stort set ens hos BlomInfo og COWI. Der anvendes en række forskellige softwareprodukter til billedbehandling og påsætningen; Adobe Photoshop, Paint Shop Pro, 3D Studio Max, Turn Tool og Skyline alt efter hvad den enkelte opgave kræver.



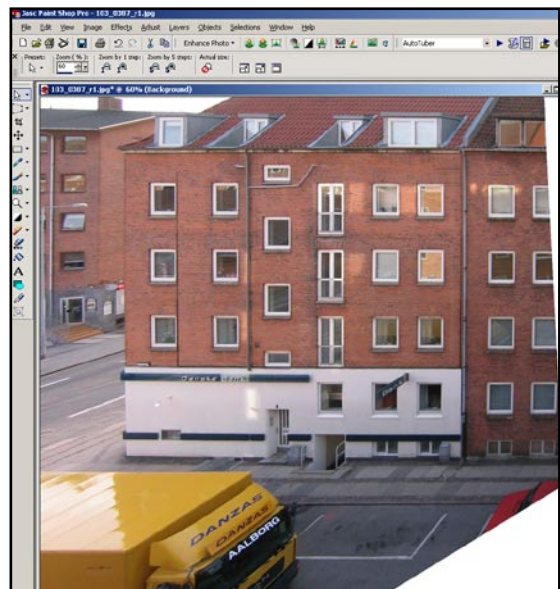
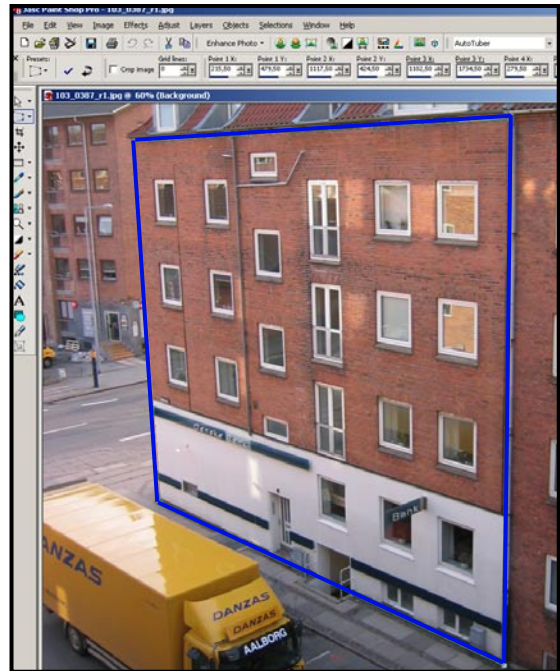
Figur 2.4: Samlet billedbehandlings- og påsætningsproces.

Fælles for begge firmaer er, at der foretages en billedbehandling, jf. figur 2.4. Denne billedbehandling omfatter opretning af billederne, idet de er taget skråt for facaderne og en korrektion for linsefortegning, hvis billederne er optaget med et vidvinkel kamera. Der oprettes derimod ikke for

højdeforskydninger, idet facaderne opfattes som værende plane. Da det ikke altid er tilfældet i virkeligheden, kan der forekomme fejl i de oprettede billeder. Der oprettes altså for hældningsforskydninger og korrigeres for linsefortegning. Det sker hos BlomInfo i Photoshop og Paint Shop Pro, der har foruddefinerede funktioner til dette formål, jf. figur 2.5, der viser et eksempel på opretning i Paint Shop Pro. Korrektur for linsefortegning sker uden kendskab til kameraets indre orientering, men ved at anvende de standardkorrektionsmuligheder, der ligger i det anvendte software. Man har dog senere hos BlomInfo i samarbejde med studerende fra DTU, der arbejdede med at automatisere påsætningsprocessen, gjort forsøg med at oprette billederne på fotogrammetrisk vis ved at måle paspunkter i billederne. Som paspunkter blev bygningshjørnerne fra 3D-bymodellen anvendt. Der blev desuden anvendt et kalibreret kamera og korrigeret for linsefortegning på fotogrammetrisk vis. Resultatet af studenterprojektet er et software til opretning af facadebillederne, som BlomInfo har til hensigt at tage i brug. Projektgruppen finder idéen udmærket, men det vil efter projektgruppens vurdering sandsynligvis ikke ændre meget ved den anvendte tid på databehandlingen. Den overordnede arbejdsgang er stadig den samme - forskellen er hovedsageligt at det eksisterende software skiftes ud med nyt software, der anvender mere fotogrammetriske metoder.

Hvis en facade ikke dækkes af ét billede, men to eller flere billeder, skal disse billeder sættes sammen i en mosaik inden monteringen på bygningen i 3D-bymodellen. Dette sker også i Photoshop eller Paint Shop Pro. Da det dog er en besværlig proces, gør man alt for at tilstræbe, at facaderne kan være i ét billede ved fotograferingen, men det kan altså være nødvendigt.

Når billederne er blevet oprettet, fjernes, hvis kunden ønsker det, generende objekter som biler, træer og lignende, hvorefter facaderne klippes ud af billederne.



Figur 2.5: Opretning for hældningsforskydninger i Paint Shop Pro 8. Øverst ses det oprindelige billede. Der defineres et område i billedet, som burde være rektangulært; i dette tilfælde en bygningsfacade, og programmet udfører oprettningen. Nederst ses den oprettede bygningsfacade.

På grund af tagudhængsproblematikken og nøjagtigheden af 3D-bymodellen opstår et affinitetsproblem. Derfor skal der strækkes billederne, så de passer med bygningerne. Dette går selvfølgelig ud over nøjagtigheden i billederne, men betyder ifølge COWI ikke noget for det visuelle indtryk. Strækningen af billederne foregår samtidig med monteringen af billederne på 3D-bymodellen.

Billederne monteres på facaderne i 3D-bymodellen i 3D Studio Max eller Skyline, der har funktioner til dette formål. Hos BlomInfo monteres billederne med oprindelig pixelstørrelse, mens den endelige fotorealistiske 3D-bymodel som standard resamples til at have en opløsning på 5 cm. Hvis kunden ønsker en større opløsning, kan dette også lade sig gøre. 3D-bymodellen visualiseres i Turn Tool eller Skyline.

Påsætningen af facadebilleder på 3D-bymodeller foregår hos BlomInfo ved større opgaver i et lavprisland i Østen. Mindre opgaver gennemføres hjemme i Danmark.

Påsætningen af facadebilleder består som ovenfor beskrevet af mange trin og er en forholdsvis langsom proces. Selve fotograferingen tager kun få minutter, og det er altså al den efterfølgende databehandling, der er flaskehalsen i denne proces. Mængden af efterbehandlingen af billederne afhænger af, hvordan fotograferingen er foretaget, hvorfor en hensigtsmæssig dataindsamlingsprocedure er vigtig.

## 2.1.4 Vurdering af de nuværende metoder til fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller

I figur 2.6 oplystes de fordele og ulemper projektgruppen har fundet ved de fremstillingsprocesser der anvendes til indsamling og påsætning af facadebilleder i Danmark i dag. Det mest karakteristiske ved de anvendte fremstillingsprocesser er, at der foretages meget manuelt arbejde. Det gælder både under indsamlingen, hvor fotografen går rundt og tager billeder, men specielt under databehandlingen, hvor for eksempel edi-

Nuværende fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller		
	Fordele	Ulemper
Dataindsamling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subjektiv vurdering under fotografering betyder, at man får netop det ønskede billede - letter databehandlingen</li> <li>• Fleksibelt da man kan indsamle billeder i stort set alle situationer samt indsamle billeder af høje bygninger</li> <li>• Mulighed for at undgå døde områder</li> <li>• Mulighed for geometrisk opløsning på 5 cm og derunder</li> <li>• Enkelt og billigt udstyr</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meget manuelt arbejde</li> </ul>
Databehandling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subjektiv vurdering og manuel editering under databehandling gør at facaderne i facadebillederne kan udklippes præcist, og at der kan fjernes biler, mennesker etc. fra billederne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subjektiv vurdering og manuelt arbejde under databehandling særdeles tidskrævende</li> <li>• Der anvendes mange forskellige programmer for at gennemføre billedbehandling og påsætning af billeder</li> </ul>
Færdig 3D-bymodel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Færdig 3D-bymodel god til visualisering i gadeplan, da billederne er taget fra gadeplan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facaderne i 3D-bymodellen har ikke den korrekte størrelse, hvorfor facaderne i billederne ikke stemmer med facaderne i 3D-bymodellen</li> </ul>

Figur 2.6: Fordele og ulemper ved de metoder, der anvendes i Danmark i dag ved fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller.



terings-, opretnings-, klipnings- og påsætningsarbejdet foregår manuelt, hvilket er særdeles tidskrævende. Det er karakteristisk, at der under de beskrevne arbejdsprocesser foretages en subjektiv vurdering af den enkelte facade og det enkelte billede under henholdsvis indsamlingen og databehandlingen. Den subjektive vurdering betyder først og fremmest, at der kan spares tid ved databehandlingen, hvis billederne er taget hensigtsmæssigt, og at udklipningen af facaderne i billederne kan foregå præcist. Omvendt er den subjektive vurdering også medvirkende til at gøre metoden tidskrævende.

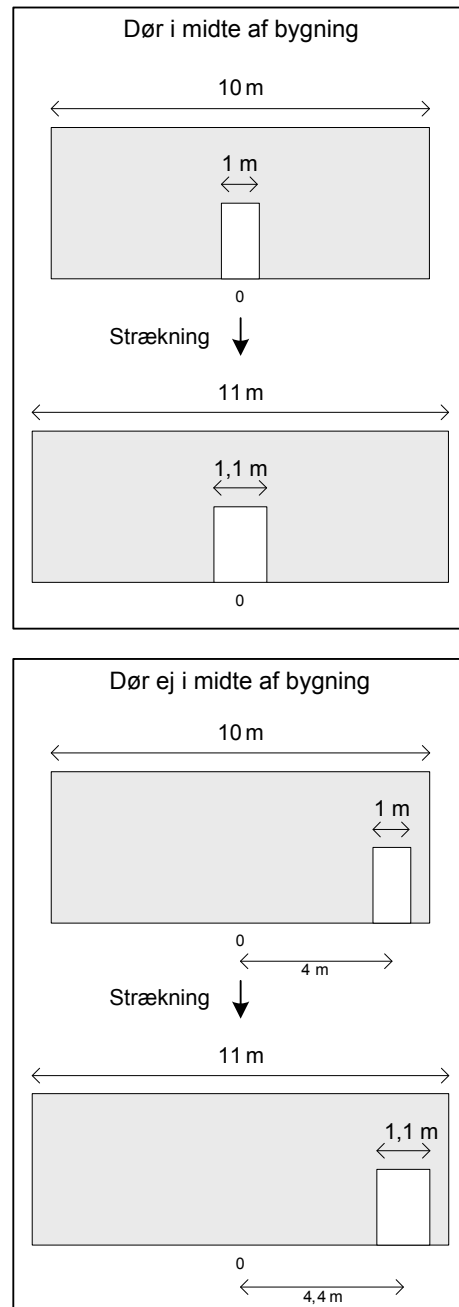
En af de store fordele ved den anvendte dataindsamlingsmetode er, at den er særdeles fleksibel. Det er muligt at tage billeder stort set over alt; også i smalle gader og baggårde og af bygninger, der er høje eller ikke ligger direkte op ad veje. Metoden indebærer således, at det er muligt i hvert enkelt tilfælde at vurdere, hvordan den enkelte facade bedst fotograferes.

Der vil altid forekomme områder på bygningerne, der ikke kommer med på billederne, fordi for eksempel en altan eller andre objekter skygger.

Da billederne optages terrestrisk, er der mulighed for at opnå en geometrisk opløsning på 5 cm og derunder, hvilket ofte er et krav fra kunden. Endelig er det indsamlingsudstyr, der anvendes, billigt og enkelt.

Databehandlingen foregår i flere forskellige programmer, hvilket er med til at besværliggøre databehandlingen.

Endelig kan det konkluderes, at de anvendte fremstillingsmetoder betyder, at der er mulighed for at opnå fotorealisticke 3D-bymodeller, der er velegnede til visualisering i gadeplan. Dog er det en ulempe, at 3D-bymodellen ikke stemmer overens med virkeligheden, hvorfor facadebillederne skal strækkes; og derved deformeres i forhold til virkeligheden for at passe til 3D-bymodellen. Det har



Figur 2.7: Eksempel på konsekvens af horisontal strækning af facadebillede med geometrisk opløsning på 5 cm. Facadebilledet strækkes fra 10 m til 11 m. Derved øges dørens bredde fra 1 m til 1,1 m. Afhængig af, hvor døren sidder i bygningen, sker der ligeledes en flytning af døren.

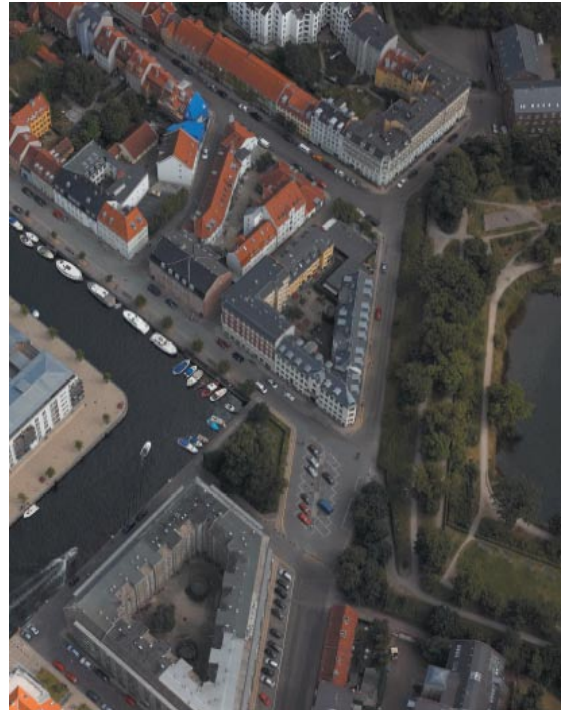
dog, som COWI udtaler, ikke nogen fremtrædende betydning for visualiseringen, hvilket følgende eksempel også viser. Er facaden i virkeligheden 10 m lang og facaden i 3D-bymodellen 11 m lang på grund af  $\frac{1}{2}$  meters tagudhæng i hver side, bliver en dør i billedet, der i virkeligheden skulle være 1 m i stedet 1,1 meter. Afhængig af, hvor døren befinder sig, sker der også en flytning af døren. Er døren i midten af bygningen, sker der ingen flytning, men er døren placeret for eksempel 4 m fra midten af muren, sker der en flytning på 40 cm, jf. figur 2.7. Denne problemstilling er altid gældende, når der ikke er overensstemmelse mellem 3D-bymodel og virkeligheden.

Afslutningsvis kan det konkluderes, at de anvendte metoder til fremstilling af fotorealisticke 3D-bymodeller giver et resultat, som BlomInfo og COWI er tilfredse med, men projektgruppen mener, at fremstillingsprocesserne bør kunne effektiviseres.

## 2.1.5 Skråfotos

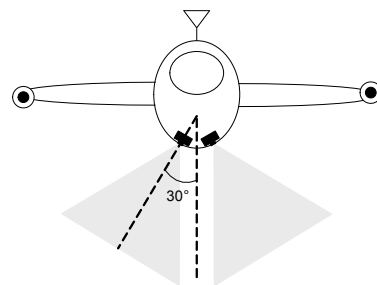
Hos COWI ser man nye muligheder for indsamling af billeder til blandt andet fotorealisticke 3D-bymodeller. Firmaet tilbyder et produkt, der kaldes "skråfotos". Figur 2.8 viser et eksempel på et skråfoto. Disse skråfotos er taget i fly med digitale metriske kameraer på 22 megapixels i flyvehøjder ned til ca. 450 m, hvilket giver en opløsning på ned til 5 cm. Ved optagelse af skråfotos flyves nord/syd og øst/vest i et kvadratnet, hvorved samme punkt på jorden typisk fotograferes fra fire retninger. [CD fra COWI]. Navnet "skråfoto" kommer af, at der er monteret to kameraer i flyet, som hver især har en hældning på ca. 30 grader i forhold til lodret, jf. figur 2.9. Der er i flyet monteret en GPS-modtager, hvorfor man kender positionen af kameraerne på centimeterniveau. Det er ikke oplyst hvilke kameraer, der anvendes til skråfotos.

Man har hos COWI forsøgt at anvende billederne til facadepåsætning. Denne påsætning er foregået manuelt ved at anvende samme metoder



Figur 2.8: Skråfoto fra et område i København. [CD fra COWI]

som anvendt ved de terrestriske facadebilleder, jf. 2.1.3 Fremstilling af fotorealisticke 3D-bymodeller. Endvidere har projektgruppen på et seminar om 3D-bymodeller hos COWI erfaret, at de har forsøgt at automatisere påsætningsprocessen. Dette gøres ved først at finde den ydre orientering af skråfotoet ved anvendelse af for eksempel bygningshjørnerne som paspunkter, og derefter udtrække og oprette hver enkelt facade på baggrund af bygningernes hjørner.



Figur 2.9: Illustration af placering og orientering af kameraer i fly ved optagelse af skråfotos.



Figur 2.10: Med anvendelse af skråfotos er det muligt at tage billederne, så forbipasserende, biler etc. undgås. [CD fra COWI]

COWI ser flere fordele ved anvendelse af skråbilleder frem for terrestriske billeder; dataindsamlingen foregår hurtigere, og der er mulighed for at tage billederne, uden at forbipasserende skygger for facaden, jf. figur 2.10. Projektgruppen mener dog, at der vil kunne forekomme problemer i smalle baggårde, hvor alle facaderne muligvis ikke vil blive fotograferet. Der vil ligeledes stadig være problemer med træer og lignende som skygger. En anden ulempe er, at altaner, tagudhæng og

lignende vil skygge for bygningsmuren, idet billederne er taget oppe fra. Der vil således forekomme "døde" områder. Der vil dog også forekomme døde områder ved terrestrisk fotografering, men de er større for skråfotos. I bilag 5 præsenteres forskellige eksempler med beregning af størrelsen af døde områder ved henholdsvis skråfotos og terrestriske fotos. Det ses heri, at der er størst risiko for store døde områder ved skråfotos. Endvidere ses eksempler på opretning af facader fra henholdsvis skråfotos og terrestriske billeder i bilag 3, hvori forskellen på størrelsen af døde områder i henholdsvis skråfotos og terrestriske fotos ses.

### 2.1.6 Vurdering af anvendelse af skråfotos til fremstilling af fotorealisticke 3D-bymodeller

COWI har i første omgang lagt vægt på at effektivisere dataindsamlingen og har til hensigt at anvende skråfotos indsamlet med fly til påsætning af facadebilleder på 3D-bymodellerne. Indsamlingen af skråfotos med fly kan betegnes som et MKS, idet der registreres GPS-positioner til billederne.

Skråfotos til fotorealisticke 3D-bymodeller		
	Fordele	Ulemper
Dataindsamling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effektiv dataindsamling</li> <li>• Delvis undgå at biler, forbipasserende mennesker etc. skygger for facaden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ej fleksibel dataindsamling, da der vil forekomme tilfælde hvor facader ikke kan fotograferes (for eksempel smalle baggårde)</li> <li>• Opløsning på 5 cm eller lavere, hvilket betyder, at der ikke kan leveres bedre opløsning på den fotorealisticke 3D-bymodel end dette, hvis kunden ønsker det</li> <li>• Der opstår døde områder, der kan ses fra gadeplan pga. altaner, tagudhæng etc. der skygger for bygningsmuren, når billederne tages fra luften</li> <li>• Omkostningsfuldt udstyr</li> </ul>
Databehandling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mulighed for at automatisere påsætningen af billeder, hvis den ydre orientering af skråfotoene kendes.</li> </ul>	
Færdig model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bedst egnet til visualisering fra luften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facaderne i 3D-modellen har ikke den korrekte størrelse, hvorfor facaderne i billederne ikke stemmer med facaderne i 3D-modellerne</li> </ul>

Figur 2.11: Fordele og ulemper ved anvendelse af skråfotos til at fremstille fotorealisticke 3D-bymodeller.

Der er både fordele og ulemper ved anvendelse af skråfotos, jf. figur 2.11. De beskrevne fordele og ulemper omhandler hovedsageligt dataindsamlingen, som er særdeles effektiv, idet den foregår hurtigt med fly. Desuden er det sandsynligvis muligt at undgå at biler etc. skygger for facaderne på billederne, idet de tages oppe fra. Dette vil lette editeringen af billederne betydeligt. Der er dog flere ulemper ved dataindsamlingen. Der vil kunne forekomme tilfælde, hvor der ikke kan fotograferes; for eksempel i smalle baggårde eller lignende. Desuden kan der kun opnås opløsninger ned til 5 cm. Det vil sandsynligvis være tilstrækkeligt i mange tilfælde, men ønsker kunden en højere opløsning, er det ikke muligt. Da billederne optages fra fly, vil der opstå døde områder ved tagudhæng, altaner etc. Det betyder for eksempel, at der vil være en del af facaden ved tagudhæng, der ikke kommer med på billedet. Derfor vil facaden i billedet blive lavere end i virkeligheden. Et eksempel på dette ses af bilag 3, figur 6.

Udstyret til dataindsamlingen er forholdsvis omkostningsfuldt, idet der kræves fly. Det betyder, at indsamlingsmetoden egner sig bedst til større opgaver, da det sandsynligvis ikke kan betale sig at starte flyet op for mindre opgaver.

Afslutningsvis kan det konkluderes, at anvendelse af skråfotos kan være medvirkende til at effektivisere fremstillingen af fotorealisticke 3D-bymodeller betydeligt, såfremt databehandlingen automatiseres. Den færdige fotorealisticke 3D-bymodel vil sandsynligvis bedst egne sig til visualisering fra luften, idet opløsningen er forholdsvis lav, og der kan forekomme mange døde områder i billederne, hvilket medfører, at facaderne ser forkerte ud.

## 2.2 Automatiserede metoder til fremstilling af fotorealisticke 3D-bymodeller i udlandet

I dette afsnit undersøges eksisterende metoder, der anvendes eller kan anvendes til at

automatisere processerne ved konstruktion af fotorealisticke 3D-bymodeller. Dette gøres for at hente inspiration til automatiseringen af nogle af de processer, der blev beskrevet i afsnit 2.1. Nogle af de beskrevne metoder anvendes direkte til konstruktion af fotorealisticke 3D-bymodeller, mens andre metoder anvendes i forbindelse med andre formål. Der tages primært udgangspunkt i metoder udviklet i udlandet, hvor der arbejdes med MKS og sensorintegration i større omfang end i Danmark.

I det følgende beskrives et komplet system, der anvendes til konstruktion af 3D-bymodeller. Systemet består af både hardware og software. Endvidere beskrives også andre systemer, der anvender forskellige principper, som eventuelt vil være anvendeligt i et MKS.

Fleere af systemerne beskrives ud fra reklamemateriale, hvilket gør det svært at få et objektivt billede af systemerne. For eksempel er det svært at gennemskue, hvor automatisk de forskellige processer rent faktisk foregår. Det har ikke været muligt at få yderligere information ved hjælp af internettet eller ved henvendelse til producenterne.

### 2.2.1 MKS til konstruktion af fotorealisticke 3D-bymodeller

På InterGEO messen i Hamburg 2003 blev projektgruppen præsenteret for et MKS til automatiseret generering af fotorealisticke 3D-bymodeller. Systemet, der hedder Citygrid, anvendes til modellering af 3D-bymodellerne samt til påsætning af billeder på 3D-bymodellen. Systemet er udviklet af blandt andet det østrigske firma GeoData og Graz Tekniske Universitet. Citygrid består af et hardwaremodul, der anvendes til dataindsamlingen samt flere softwaremoduler, der anvendes til den efterfølgende databehandling, blandt andet orientering og modellering, af de indsamlede data. Systemet vil i det følgende blive beskrevet med hensyn til dataindsamling og påsætning af billeder på af facaderne.

## Dataindsamling

MKS'et består af en bil påmonteret én GPS-antenne, to digitale kameraer samt en laserscanner. GPS-antennen anvendes til positionering af MKS'et, og kameraerne tager de billeder, der skal sættes på 3D-bymodellen. Laserscanneren anvendes blandt andet til facadescanninger, således at billederne kan korrigeres for højdeforskydninger forårsaget af altaner, etc. Billederne påsættes efterfølgende som ortofotos. [CityGrid Scanner]

De to digitale kameraer er monteret på en sådan måde, at systemet med en afstand på 5 m mellem køretøj og facade kan fotografere en 17 m høj bygning. Kameraernes geometriske opløsning er ved en afstand på 10 meter mindre end 1 cm. Som laserscanneren er monteret i MKS'et kan laserscanneren scanne 360° om horisontalaksen, hvilket betyder, at der i princippet kan scannes så høje bygninger, der ønskes. På figur 2.12 kan dataindsamlingsystemet fra Citygrid ses. [Forkert m.fl., 2003, s. 4].

Der er foretaget en fotogrammetrisk kalibrering af kameraerne, således at de optagne billeder kan korrigeres for linsefortegning. Endvidere er systemet kalibreret således, at den relative orientering



Figur 2.12: MKS fra Citygrid bestående af laserscanner, digitalt kamera samt GPS-antenne. [CityGrid Scanner]

mellem instrumenterne er kendt. Det betyder, at observationer fra kamera, GPS og laserscanner er synkroniseret, så der kan bestemmes en korrekt position og orientering af kortlægningseenhederne, når der køres. [Bauer m.fl., 2001, s. 2]

Systemet kan indsamle data ved to forskellige metoder: "Continuous-mode" og "Stop-and-go-mode".

Med Continuous-mode kører bilen med en hastighed på cirka 5 km/t, mens facaderne scannes og fotograferes. [CityGrid Scanner]

Metoden Stop-and-go er mere langsommelig end den anden indsamlingsmetode. Dataindsamlingen udføres hovedsageligt, når bilen holder stille, og der foretages ved hver opstilling en 360° scanning og fotografering af omgivelserne. Mellem hver opstilling sikres et overlap på 50 % mellem laserscanningerne, således at der kan foretages en relativ orientering af laserscanningerne, hvilket er en fordel, hvis der for eksempel er GPS-udfald. [CityGrid Scanner], [Nauschnegg m.fl., 2001, s. 5-7]

Continuous-mode egner sig godt til hurtige facadeopmålinger, der blandt andet skal anvendes til visualiseringsformål, hvor nøjagtigheden ikke behøver være så god. Stop-and-go anvendes til opmåling af for eksempel bevaringsværdige, historiske bygninger, hvor modellerne skal være mere præcise. [CityGrid Scanner]

Positionen af bilen og dermed kameraerne og laserscanneren bestemmes i 50-60 % af tilfældene af GPS. I de øvrige tilfælde er det på grund af dårlige GPS-forhold, såsom høje bygninger og multipath, nødvendigt at interpolere positioner til kameraerne og laserscanneren. Dette gøres på baggrund af vellykkede GPS-positioner samt den tilbagelagte afstand, der fås fra bilens odometer og kursen, som beregnes ud fra GPS-positionerne. [Nauschnegg m.fl., 2001, s. 5-7]

## Modellering og facadepåsætning

Når dataene er indsamlet, skal de efterbehandles i softwaremodulerne. [Citygrid Modeller]

Billederne, der er indsamlet ved hjælp af MKS'et, skal påsættes en eksisterende 3D-bymodel. På baggrund af laserscanningerne og billederne konstrueres true ortofotos!, der påsættes facaderne. Hvor der kræves flere billeder for at dække facaden, sammensættes disse automatisk. Sammensætningen af billederne foretages ved at finde fællespunkter i billederne, hvorefter billederne transformeres sammen over fællespunkterne til en samlet billedmosaik. [Bauer m.fl., 2001, s. 5, 6]

Ved bestemmelse af den ydre orientering af kameraerne kan billederne sættes på 3D-bymodellen. En tilnærmet ydre orientering af kameraerne kan bestemmes på baggrund af GPS-observationerne samt antagelser om, at bilen ikke hælder i referencekoordinatsystemet. Således geokodes billederne til facaderne i 3D-bymodellen. En endelig ydre orientering findes derefter ved interaktivt at identificere bygningens hjørnekoordinater i billedet, som efterfølgende tilpasses 3D-bymodellen.

### 2.2.2 Øvrige automatiserede systemer og metoder

På University of Tokyo er der udviklet et MKS, der anvendes til indsamling af laserscanningsdata til generering af selve 3D-bymodellerne. På et køretøj er der således sat tre laserscannere. Det spændende ved dette MKS er, at der til bestemmelsen af orienteringen af dataene anvendes et lidt andet princip, end det der anvendes i Citygrid. Til positionering og orientering af kortlægningsenhederne anvendes både GPS, IMU og odometer. I realiteten er det således ikke nødvendigt med måling af paspunkter, hvilket var tilfældet med Citygrid. [Manandhar m.fl., 2002]

På samme måde er der fremstillet et MKS i Schweiz i forbindelse med kortlægning af laviner. Incitamentet for konstruktionen af et MKS til denne

anvendelse er at undgå farefulde ekspeditioner i forbindelse med placering af paspunkter i lavineområderne. MKS'et indeholder i lighed med ovenstående GPS og IMU som positioneringsenhed til kortlægningsenheden, som er et kamera. MKS'et anvendes i en helikopter, men er dog mere fleksibelt end ovenstående system, i og med at udstyret kan afmonteres, således en person kan sidde med udstyret i en helikopter, jf. figur 2.13. Det er således muligt for personen at tage billeder af det ønskede område, mens positionen og orienteringen af kameraet stadig kan bestemmes. Systemet er således ikke begrænset af at være fastmonteret på en fast platform. [Skaloud m.fl., 2002, s. 1-6]

Forskere fra University of Berkeley har ligeledes konstrueret et MKS bestående af en bil, laserscanner samt kamera til konstruktion af 3D-bymodeller samt påsætning af billeder. Dette system skiller sig ud ved, at der ikke anvendes GPS til bestemmelse af køretøjets position. I stedet findes positionen af køretøjet ved hjælp af et kort. Kortet er konstrueret på baggrund af en DSM!, som angiver den højde, som køretøjet befinder sig i, mens et luftfoto er grundlaget for den plane position. I luftfotoet er bygningskanterne identificeret, og i kortet består således af en DTM og bygningskanter. Ved hjælp af laserscanneren på køretøjet bestemmes afstanden til facaderne, og ved at sammenholde den scannede facade med bygningskanterne i

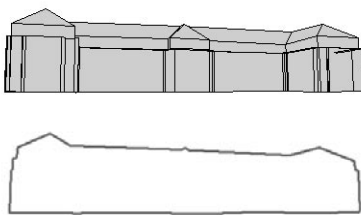


Figur 2.13: En person i helikopteren kan sidde med MKS'et bestående af kamera, GPS og IMU, hvilket gør systemet fleksibelt. [Vallet, 2000, s. 5]



kortet, kan køretøjets position bestemmes. [Früh m.fl, 2003]

På University of Stuttgart har forskere arbejdet med 3D-bymodeller og sensorintegration i et turistinformationssystem. Turistinformationssystemet er en Location Based Service!, hvor turisten via en PDA får oplysninger om seværdige bygninger. Systemet består foruden PDA'en af et kamera, en GPS-modtager, der måler på koden, et kompas og et tiltmeter. Systemet er monteret på turisten. Ved hjælp af GPS-modtageren, kompasset og tiltmeteret, bestemmes en omtrentlig position og orientering af kameraet, idet turisten tager et billede af en bestemt bygning. Kameraets og dermed turistens position kan med førnævnte udstyr bestemmes med en nøjagtighed på 7-10 m, mens orienteringen kan bestemmes med en nøjagtighed på 1° - 2°. For at være sikker på, at turisten får de rigtige oplysninger om den rigtige bygning, skal positionen og orienteringen forbedres, hvilket gøres ved hjælp af billedbehandling. Fra kameraets omtrentlige position og orientering udtrækkes en silhuet af den bygning, som kameraet peger på, fra en CAD-model af bygningerne, der er lagret på PDA'en, jf. figur 2.14. CAD-modellen ligger i et referencesystem, så kameraet kan geokodes til CAD-modellen. Således kendes den geometriske figur, der skal ledes efter i billedet. Ved hjælp af en billedbehandlingsmetode findes samme bygning i billedet. Billedet tilpasses silhuetten fra CAD-modellen, jf. figur 2.15, og ved hjælp af tilbageskæring forbedres kameraets og dermed



Figur 2.14: Øverst ses en CAD-model af bygningen set fra kameraets omtrentlige position og orientering. Nederst ses silhuetten af samme bygning fra samme punkt.



Figur 2.15: Til venstre ses silhuetten projiceret ind på billedet, der har en omtrentlig ydre orientering. Til højre ses silhuetten efter at kameraets ydre orientering er forbedret.

turistens ydre orientering. Således får turisten de korrekte oplysninger. [Böhm m.fl., 2001]

### 2.2.3 Vurdering af MKS til konstruktion af fotorealistiske 3D-bymodeller

I udlandet findes flere forskellige automatiserede systemer til konstruering af fotorealistiske 3D-bymodeller. Fælles for systemerne er, at der anvendes instrumenter til bestemmelse af positionen og den ydre orientering af en given kortlægningseenhed. Instrumenterne er monteret på forskellige platforme: Helikopter, person og bil. Det, der gør systemet med helikopteren som platform spændende, er, at en person kan anvende MKS'et, og således gøre systemet mere fleksibelt. Helikopteren som platform behandles ikke yderligere i det følgende. En person som platform er meget spændende, da det gør systemet fleksibelt. Et MKS med en person som platform vurderes at have de samme fordele ved dataindsamlingen som dem, der er gældende for den nuværende metode til indsamling af billeder, jf. figur 2.6. Men i modsætning til den nuværende metode, kan databehandlingen lettes, da den ydre orientering kendes. I det følgende vurderes en bil som platform til et MKS.

I et af de systemer, der er beskrevet i det foregående, indsamles også laserscanningsdata til konstruering af true ortofotos. Projektgruppen finder ideen god, så billederne kan oprettes for både hældnings- og højdeforskydninger. I det følgende tænkes MKS dog kun anvendt til indsamling af billeder.

Mobilt kortlægningssystem til fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller		
	Fordele	Ulemper
Dataindsamling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effektiv dataindsamling</li> <li>• System velegnet til gadeforløb</li> <li>• Mulighed for at dække døde områder</li> <li>• Mulighed for høj geometrisk opløsning under 5 cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ej fleksibelt da der vil forekomme tilfælde hvor facader ikke kan fotograferes (for eksempel baggårde, bygninger der ikke er i nærheden af vej, høje bygninger der ikke kan være i kameraernes synsfelt etc.)</li> <li>• Ikke mulighed for subjektiv vurdering da dataindsamlingen foregår automatisk. Betyder at, der for eksempel ikke er muligt at undgå forbigående, at vurdere om hele bygningen er i ét billede etc.</li> <li>• Komplekst system</li> </ul>
Databehandling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mulighed for at automatisere påsætningen af billeder, hvis den ydre orientering af billederne kendes.</li> </ul>	
Færdig model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• God til visualisering i gadeplan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facaderne i 3D-modellen har ikke den korrekte størrelse, hvorfor facaderne i billederne ikke stemmer med facaderne i 3D-modellerne</li> </ul>

Figur 2.16: Fordele og ulemper ved anvendelse af MKS, hvor en bil er platform, til fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller.

MKS'er, hvor platformen er en bil, har i forbindelse med påsætning af billeder en række fordele og ulemper, jf. figur 2.16. Generelt er ideen med MKS i denne forbindelse automatisk at få en ydre orientering til kameraet, som billederne tages med, for således at anvende denne i forbindelse med databehandlingen og påsætningen af billederne. Projektgruppen anser MKS som et anvendeligt værktøj til dataindsamling, idet den er effektiv. En ulempe ved et MKS, hvor platformen er en bil, er, at det ikke er muligt at fotografere alle facader, og det er heller ikke muligt at undgå uønskede objekter, da der ingen subjektiv vurdering foretages.

Ved anvendelse af MKS kan databehandlingen tænkes at foregå ved den metode, der er nævnt i forbindelse med databehandlingen af skråfotos. Det fremgår ikke hvilke metoder, der anvendes i metoderne beskrevet i 2.2 *Automatiserede metoder til fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller i udlandet*.

## 2.3 Konceptvurdering

Projektgruppen kan på baggrund af foranalysen se nogle fordele i konstruktion af et MKS til automatisering af procedurerne omkring fremstillingen af 3D-bymodeller til visualiseringsformål.

Af foranalysen kan projektgruppen se tre mulige platforme, der kan anvendes ved konstruktionen af et MKS. Disse tre platforme er et fly, som det var tilfældet med COWI's skråfotos, en bil, som det var tilfældet med for eksempel CityGrid og en person, som det var tilfældet med systemet udviklet i Schweiz til kortlægning af laviner samt turistinformationssystemet. Disse tre muligheder arbejdes der videre med i resten af kapitlet. Det ønskes at vurdere disse tre muligheder, og finde ud af hvilken der er mest hensigtsmæssig at implementere i et MKS.

Projektgruppen har anvendt en metode til vurdering af de muligheder, der er for konstruering af et MKS i forhold til de opstillede krav. Metoden hedder "Concept Selection", og anvendes ved udvikling af diverse systemer og produkter. Metoden er anvendelig i begyndelsen af udviklingsperioden, hvor der foreligger forskellige konceptidéer til løsning af et bestemt problem. Ved at opstille en række krav, som det endelige system/produkt skal opfylde, kan det vurderes, hvor godt de forskellige konceptidéer kan opfylde de opstillede krav. På baggrund af disse vurderinger kan det besluttes, hvilket koncept, der er bedst til løsning af problemet, og således skal arbejdes videre med. [Ulrich, 2004, s. 123-140]



Konceptidéerne vurderes i forhold til en reference. I dette tilfælde er referencen den nuværende metode, der anvendes til indsamling, bearbejdning og påsætning af billeder, og det vurderes således, hvordan den pågældende konceptidé kan opfylde kravet i forhold til referencen. Til vurdering af dette anvendes pointskalaen:

- 1 meget værre end referencen
- 2 værre end referencen
- 3 det samme som referencen
- 4 bedre end referencen
- 5 meget bedre end referencen

De opstillede krav til det nye system prioriteres af projektgruppen og vægtes derefter.

For nærmere information om metoden, henvises til [Ulrich, 2004]

Det følgende vil omhandle en opstilling af krav til et fremtidigt system. Det vurderes efterfølgende hvordan de opstillede krav kan opfyldes i de tre ovenstående muligheder for konstruktion af MKS, og det konkluderes hvilken af de tre muligheder, der vil være mest hensigtsmæssig at implementere.

### 2.3.1 Krav til nye fremstillingsprocedurer og den fotorealistiske 3D-bymodel

Ud fra interviewene med BlomInfo og COWI og den foregående analyse opstilles en række krav til fremtidige fremstillingsprocedurer og den færdige fotorealistiske 3D-bymodel, jf. figur 2.17. Kravene diskuteres og kommenteres i det følgende.

#### Krav til dataindsamlingen

Det er vigtigt for fremstillingen af fotorealistiske 3D-bymodeller, at indsamlingen af billeder fore-

	Krav
Dataindsamling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effektiv</li> <li>• Fleksibel</li> <li>• Tilfredsstillende opløsning (ca. 1 cm)</li> <li>• Undgå biler, forbipasserende, træer etc.</li> </ul>
Databehandling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effektiv</li> </ul>
Færdig model	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velegnet til visualisering fra gadeplan</li> <li>• Genkendelig</li> </ul>

Figur 2.17: Krav til fremstillingsprocedurer og færdig fotorealistisk 3D-bymodel.

går på en effektiv måde, således fremstillingen er så lidt tidskrævende som muligt. Projektgruppen fornemmer, at man hos BlomInfo stort set er tilfreds med de metoder, der anvendes i dag, idet det er databehandlingen, der sluger langt mest tid. Hos COWI ser man gerne dataindsamlingen effektiviseret og har derfor påbegyndt anvendelsen af skråfotos. Selvom databehandlingen tager langt mere tid end dataindsamlingen, mener projektgruppen stadig, det er meget vigtigt at se på alle dele af fremstillingsprocessen for at effektivisere alle trin. Derfor er det et krav til et fremtidigt indsamlingssystem, at det skal være effektivt.

For at 3D-bymodellerne kan virke så virkelighedstro som muligt, er det hensigtsmæssigt, at der er billeder på alle facader i 3D-bymodellen. Derfor er det vigtigt, at indsamlingsprocessen er fleksibel, således at det kan lade sig gøre at tage billeder i så mange situationer som muligt; både langs veje, men også i baggårde, i smalle gyder, i tilfælde af høje bygninger etc. Det kan selvfølgelig diskuteres, om det er nødvendigt, at der er facadebilleder på alle facader i for eksempel baggårde, hvis disse ikke er relevante i forhold til det, 3D-bymodellen skal anvendes til. I sådanne tilfælde kan der blot lægges tekstur på de irrelevante facader. Kravet om fleksibilitet afhænger altså meget af, hvad kunderne kræver, men som hovedregel mener projektgruppen, at et indsamlingssystem skal

være fleksibelt, således at muligheden for at indsamle billeder til en fuldstændig fotorealistisk 3D-bymodel foreligger.

Projektgruppen har opsat et krav om, at den geometriske opløsning af facadebillederne i den færdige 3D-bymodel, skal være 5 cm eller derunder. Billederne skal således tages med en bedre opløsning end de 5 cm, og projektgruppen sætter således det krav, at billederne skal tages med en opløsning på ca. 1 cm. Dette giver kunderne mulighed for at vælge en færdig fotorealistisk 3D-bymodel med en opløsning på ned til 1 cm.

Det er hensigtsmæssigt ved dataindsamlingen at tilstræbe, at der kommer så få biler, forbipasserende etc. med på facadebillederne. Årsagen er, at det normalvis ønskes, at disse elementer ikke forekommer på facadebillederne. Er der alligevel biler, forbipasserende etc. på billederne, vil de normalvis blive fraediteret, hvilket er tidskrævende.

### Krav til databehandling

Under analysen har projektgruppen erfaret, at databehandlingsprocessen er særdeles tidskrævende, og det er således et krav, at den fremtidige databehandling skal være effektiv. Databehandlingen omfatter korrektion for linsefortegning, opretning for hældningsforskydninger, dannelse af mosaikker, editering af uønskede objekter, udklipning og montering af facaderne i billederne. Disse arbejdsprocesser skal således automatiseres, hvis det er muligt.

I forbindelse med automatisering af databehandlingen mener projektgruppen, at det er muligt at automatisere korrektionen for linsefortegning, opretning af hældningsforskydninger, dannelse af mosaikker samt udklipning og montering af facader på 3D-bymodellen. Fraeditering af uønskede objekter er ikke muligt at foretage automatisk, men som før nævnt bør det tilstræbes at undgå disse objekter ved dataindsamlingen, således at dette trin ikke nødvendigvis skal gennemgås.

### Krav til den færdige fotorealistiske 3D-bymodel

Kravene til de fotorealistiske 3D-bymodeller afhænger af, hvad 3D-bymodellen skal bruges til, de økonomiske midler og hvad kunden ønsker.

De krav, som projektgruppen har opstillet i figur 2.17, er valgt på baggrund af interview med Blom-Info, hvor igennem projektgruppen har fået en fornemmelse af, at kravene i de fleste tilfælde er således. Man kunne altså vælge mange forskellige mere eller mindre skrappe krav til den færdige 3D-bymodel, men projektgruppen har valgt at tage udgangspunkt i nedenstående to krav.

Den fotorealistiske 3D-bymodel skal være velegnet til visualisering fra gadeplan, idet vurderinger af for eksempel ændringer i bybilledet i mange tilfælde bedst vurderes i gadeplan, hvilket er det plan, hvorfra borgerne også i virkeligheden oplever ændringerne i deres daglige færden.

Den fotorealistiske 3D-bymodel skal være genkendelig. Dette dækker i virkeligheden over mange ting, såsom at der skal være så få døde områder som muligt; det vil sige, at de vigtigste detaljer på bygningerne skal kunne ses. Endvidere skal billederne være oprettet, uønskede objekter skal være fraediteret og facadernes kanter i billederne skal passe med kanterne i virkeligheden. For at kunne se detaljer som sprosser i vinduer og lignende, skal den geometriske opløsning være 5 cm eller derunder.

### 2.3.2 Vurdering af krav i forhold til mulige MKS'er

De tre muligheder for konstruering af et MKS, som projektgruppen har fundet, skal vurderes i forhold til de opstillede krav. Formålet er at finde den mulighed, der bedst kan opfylde kravene til det fremtidige system.

De tre muligheder for konstruering af MKS er som før nævnt et MKS, med henholdsvis en operatør,

en bil og et fly som platform. De tre muligheder benævnes i det følgende henholdsvis "Operatør", "Bil" og "Fly".

I figur 2.18 ses et skema, hvor de forskellige krav er oplyst sammen med referencen og de tre forskellige konceptidéer. I skemaet er der også angivet vægte for de forskellige krav. I det følgende kommenteres skemaet, hvor vægtningen af de enkelte krav samt vurderingen af de enkelte konceptidéer diskuteres.

### Vurdering af krav til dataindsamling

Et krav til det nye system er, at det skal være effektivt. Projektgruppen har valgt at nedvægte denne i forhold til gennemsnitsvægten, som er ca. 14 %, da projektgruppen vurderer, at det ikke er her, der er størst ønske om forbedringer. I forhold til referencen vurderes operatøren at være mere effektiv end den nuværende metode, idet der ikke skal føres målebog over hvorfra billederne tages. Også bilen vurderes at være mere effektiv til dataindsamling end referencen, og dataindsamlingshastigheden øges betydeligt med fly, hvorfor denne vurderes at være meget mere effektiv. Projektgruppen har skønnet, hvor lang tid der egentlig bruges på dataindsamling ved de forskellige metoder. Projektgruppen skønner, at dataindsamlingen ved den nuværende metode tager ca. 2 min/billede, idet operatøren skal have tid til at bevæge sig fra det ene billede til det andet, vurdere hvorfra billedet bedst tages fra samt føre målebog. Dette svarer til ca. 200 billeder/dag, og er der én facade af ca. 20 meter på hvert billede, svarer dette til en strækning på ca. 4 km. Den tilbagelagte strækning per dag vil øges en smule, hvis der anvendes et MKS, hvor platformen er en operatør. Projektgruppen har ikke nogen erfaring eller konkrete tal for tidsforbruget ved anvendelse af bil, men i artiklen [Früh m.fl., 2003, s. 8] beskrives et eksempel på dataindsamling af blandt andet facadebilleder med en bil i en trafikeret by. Her blev indsamlet billeder fra en strækning på 8 km på 25 min. Dette svarer til en strækning på ca.

120 km på en dag, hvilket er betydeligt mere end, hvad der kan opnås ved den nuværende dataindsamlingsmetode. Indsamlingshastigheden kan øges yderligere med fly.

Dataindsamlingen skal også være fleksibel. Dette krav vægtes over gennemsnittet, da projektgruppen finder det vigtigt, at billedet kan tages fra en bestemt vinkel, hvis bygningen af en eller anden årsag ikke kan være i billedet ved fotografering fra den planlagte placering, eller der holder biler, etc. foran facaden. Da dette problem efter projektgruppens vurdering ofte vil forekomme, er dette krav vigtigt. Operatøren vurderes i dette tilfælde at være lige så fleksibel som referencen. Flyet vurderes at være mindre fleksibelt end referencen, da man ved dataindsamlingen ikke kan være sikker på, at alle facader er i på et billede. Dette kan først tjekkes under databehandlingen. Der kan for eksempel være smalle gader eller baggårde, der ikke er i billedet, og det betyder, at 3D-bymodellen ikke vil blive fuldstændig. Bilen vurderes at være meget mindre fleksibel end referencen, idet der kan være problemer med holdende biler og træer foran bygningen samt baggårde, hvor bilen ikke kan komme ind.

Billederne, der tages, skal have en tilfredsstillende opløsning, hvilket projektgruppen har defineret som ca. 1 cm. Kravet vægtes under gennemsnittet, da projektgruppen finder, at en mindre dispensation fra dette krav stadig kan give en genkendelig 3D-bymodel. Det vil være muligt at få en tilfredsstillende opløsning med både operatøren og bilen, mens flyet ofte ikke vil kunne opfylde dette krav.

Ved dataindsamlingen skal biler, forbigående, etc. så vidt mulig undgås. Kravet findes vigtigt, da en hensigtsmæssig dataindsamling, hvor biler, etc. undgås, vil lette databehandlingen bagefter. Kravet vægtes derfor en smule over gennemsnittet. Det vurderes, at operatøren er lige så god til at undgå biler, etc. som referencen. Efter at have undersøgt nogle skråfotos, vurderes det, at flyet er

		Nuværende (reference)			MKS								
		Point	Vægtet score		Person		Fly (skråfotos)		Bil				
<b>Indsamling</b>	Vægt [%]												
	Effektiv	10	30	4	40	5	50	4	40				
	Fleksibel	20	60	3	60	2	40	1	20				
	Tilfredsstillende opløsning (ca. 1 cm)	10	30	3	30	1	10	3	30				
<b>Behandling</b>	Undgå biler, forbipasserende, træer, etc.	15	45	3	45	4	60	2	30				
	Effektiv	25	75	4	100	5	125	4	100				
<b>Færdig 3D-bymodel</b>	Velegnet til visualisering fra gadeplan	5	15	3	15	1	5	3	15				
	Genkendelig	15	45	3	45	2	30	3	45				
	Total score	100	<b>300</b>		<b>335</b>		<b>320</b>		<b>280</b>				
	Placering		3		1		2		4				

Figur 2.18: De forskellige krav op-listet i et skema sammen med de nye koncepter, der vurderes i forhold til den nuværende metode til indsamling og påsætning af billeder som reference.

godt til at undgå biler, forbipasserende, træer, etc., hvorfor denne konceptidé får højere point end referencen. Omvendt får bilen dårligere point, da der fotograferes "dumt" fra gadeplan, hvor netop de forbipasserende, bilerne, etc. befinder sig.

### Vurdering af krav til databehandling

Projektgruppen har valgt at vægte databehandlingen højt, idet der er her, der ifølge BlomInfo og COWI er størst behov for effektivisering.

I forbindelse med databehandlingen, skal det først nævnes, at projektgruppen ikke har nogen konkrete forudsætninger for at vurdere hverken det nuværende og det fremtidige tidsforbrug på databehandlingen. For dog alligevel at kunne sige lidt om tidsforbruget har projektgruppen foretaget et skøn over, hvad tidsforbruget ved den nuværende metode er.

Da det er meget forskelligt, hvor meget det enkelte billederne skal behandles, før det påsættes 3D-bymodellen, må tidsforbruget på det enkelte billede også være meget forskelligt. De mest tidskrævende processer under databehandlingen er efter projektgruppens mening dannelse af mosaikker og fraediteringen af uønskede objekter på billederne. Ud fra alle de beskrevne trin billederne skal igennem, vurderes databehandlingen per billede at tage mellem 10 og 40 minutter. Dette svarer til databehandling af mellem 10 og 40 billeder per dag. Projektgruppen har en ide om, at denne tid kan reduceres ved automatisering som følge af, at den ydre orientering af billedet kan bestemmes ved hjælp af et MKS. Projektgruppen mener som før nævnt, at der er mulighed for at automatisere korrektionen for linsefortegning, opretningen for hældningsforskydninger, dannelse af mosaikker og udklipningen af facaderne i billederne. Projektgruppen har dog ingen erfaringer, der viser, hvor godt disse processer kan gennemføres automatisk; for eksempel hvor godt udklipningen af facaderne kan foregå ved automatiserede processer. Den omtalte automa-

tisering vil sandsynligvis betyde en reducere af tidsforbruget, men omvendt vil behovet for kontrol af 3D-bymodellen måske øges.

Ved alle tre konceptidéer vurderer projektgruppen, at databehandlingen kan foregå mere effektivt, da den ydre orientering af billederne i alle tilfælde bestemmes. Endvidere vurderes det, at der ikke vil være så mange biler, forbipasserende, etc. på billederne taget med fly, hvorfor der ikke skal bruges så meget tid på at fraeditere uønskede objekter. Derfor vurderes flyet at være meget bedre end referencen i dette tilfælde.

### Vurdering af krav til færdig 3D-bymodel

Der er to krav angående den færdige 3D-bymodel, hvor det ene krav er, at 3D-bymodellen skal være velegnet til visualisering fra gadeplan, og det andet er, at 3D-bymodellen skal være genkendelig. Projektgruppen har valgt at nedprioritere, at 3D-bymodellen skal være velegnet til visualisering fra gadeplan, bare den er genkendelig.

Kravet om at 3D-bymodellen skal være velegnet til visualisering fra gadeplan opfyldes bedst, hvis billederne er taget fra gadeplan. Det hænger for det første sammen med, at der ved flyfotografering kan opstå store døde områder på facaderne i tilfælde af, at facaden indeholder for eksempel altaner, etc. I bilag 5 er der beregnet forskellige eksempler på størrelsen af døde områder, når billeder tages fra henholdsvis jorden og luften. Det ses her, at der er størst risiko for døde områder, når billedet er taget fra luften. Endvidere viser bilag 3 forskellige eksempler på oprettede billeder taget fra henholdsvis jorden og luften. Det ses i dette bilag, at terrestriske fotos klart er mest velegnede til visualisering fra gadeplan. For det første er omfanget af døde områder i terrestriske billeder mindre end i luftfotos. For det andet kan oprettede facader i luftfotos give indtryk af, at bygningen ses fra oven, hvis der for eksempel er karnapper på facaden, jf. figur 2.19. Dette kan godt forvirre, hvis 3D-bymodellen skal anvendes

ved visualisering fra gadeplan. Oprettede facader med altaner i terrestriske billeder giver indtryk af at være set nedefra, hvilket giver mere mening i en 3D-bymodel til visualisering fra gadeplan, jf. figur 2.19.

Projektgruppen har på baggrund af ovenstående betragtninger vurderet, at billeder taget af henholdsvis en operatør eller fra en bil vil være ligeså gode, som billeder taget ved den nuværende metode, mens billeder taget fra fly er meget dårligere at anvende på en 3D-bymodel, der skal anvendes til visualisering fra gadeplan.

Som før antydet vægter projektgruppen det højt, at 3D-bymodellen skal være genkendelig. Projektgruppen vurderer, at billeder taget fra jorden af en operatør eller en bil, vil give lige så genkendelige billeder, som referencen. På trods af at flyet vil give billeder, der er mindre anvendelige til visualisering fra gadeplan, vil det stadig være muligt at få genkendelige facader. Det vurderes dog, at flyet vil give mindre genkendelige billeder end referencen.

## Resultat af konceptvurdering

Når de forskellige krav er vurderet i forhold til de tre konceptidéer, tælles pointene sammen. Som det ses af figur 2.18 lader det til, at den bedste metode til automatisering af de forskellige procedurer i forbindelse med indsamling og bearbejdning af data til en 3D-bymodel, der skal anvendes til visualiseringsformål fra gadeplan, er et MKS, hvor platformen er en operatør. På andenpladsen kommer flyet, på tredjepladsen kommer den nuværende metode, mens et MKS, hvor platformen er en bil, er på sidstepladsen.

Selvom metoden giver et resultat, skal dette tages med et forbehold, da det er marginaler, der afgør hvilken metode, der rangerer højest. Projektgruppen har fundet det svært at vægte de forskellige krav, idet alle kravene synes vigtige. Projektgruppen har foretaget en subjektiv vægtning, og andre personer ville sikkert angive andre vægte eller have opstillet andre/yderligere krav, hvilket måske ville give et andet resultat. Resultatet betragtes dog som en indikator på, hvilket koncept, der er bedst til automatisering af de forskellige procedu-



Figur 2.19: Til venstre ses en oprettet facade fra et terrestrisk foto. Altanerne giver indtryk af, at bygningen ses fra gadeplan. Til højre ses en oprettet facade fra et skråfoto. Her giver karnaperne indtryk af, at facaden ses fra oven. [CD fra COWI]

rer i forbindelse med indsamling og bearbejdning af facadebilleder til en 3D-bymodel, der skal anvendes til visualiseringsformål fra gadeplan, og som således vil være bedst at arbejde videre med.

Projektgruppen kan se fornuften i at den bedste løsning er et MKS, hvor platformen er en person. Dette koncept kombinerer den fleksibilitet det giver, at en operatør foretager indsamlingen af data med de muligheder, der er for automatisering af databehandlingsprocesserne.

At den dårligste løsning er bilen giver også mening, da den "dumt" tager billeder af facaderne på jorden, og det er således ikke muligt at tage højde for flere af de vigtige krav, som omhandler at billederne skal tages med omhu.

Det skal nævnes, at projektgruppen vurderer, at flyet er god til store opgaver, hvor bilen og personen er bedre til mindre opgaver. På nuværende tidspunkt er det hovedsageligt kommuner, der køber de fotorealisticke 3D-bymodeller. Projektgruppen mener, at kommuner ofte vil være kunder til mindre opgaver, hvorfor flyet ikke findes anvendeligt som platform.

## 2.4 Delkonklusion

På baggrund af de forrige afsnit kan det konkluderes, at der er stor interesse for automatisering af indsamlings- og påsætningsprocedurerne i forbindelse med påsætning af facadebilleder på fotorealisticke 3D-bymodeller. Det gælder ikke kun i Danmark, hvor både indsamlingen og påsætningen endnu foregår manuelt, men også i udlandet, hvor der forskes inden for området. I udlandet eksisterer der allerede systemer til fremstilling af fotorealisticke 3D-bymodeller, hvor processerne er automatiseret.

Projektgruppen har gennem foranalysen opnået indsigt i de forskellige trin, der er ved fremstillingen af fotorealisticke 3D-bymodeller. Endvidere er det vist, at de forskellige trin i indsamlings- og

bearbejdningsprocessen kan automatiseres ved integration af forskellige instrumenter i et MKS. De forskellige systemer kan anvendes i det videre arbejde som inspiration til opbygningen af et MKS.

Endelig har foranalysen vist, at et MKS med en person som platform er den metode, der egner sig bedst til automatisering af de forskellige trin i fremstillingsprocessen af fotorealisticke 3D-bymodeller.

## 3 Problemformulering

Problemformuleringen tager udspiring i foranalysen samt projektgruppens interesser.

Foranalysen har vist, at der i Danmark er interesse for fotorealistiske 3D-bymodeller til visualiseringsformål, og at der fra producenternes side er interesse for automatisering af processerne omkring indsamling og bearbejdning af facadebilleder til påsætning på en 3D-bymodel. En automatisering vil nedbringe prisen på de fotorealistiske 3D-bymodeller, hvilket kan øge efterspørgslen. Projektgruppen er af den overbevisning, at indsamlingen af billeder samt den del af databehandlingen, der omfatter korrektion for linsefortegning, opretning for hældningsforskydninger, dannelse af mosaikker samt udklipning og montering af facadebillederne på en 3D-bymodel kan effektiviseres, hvis dataindsamlingen foregår med et mobilt kortlægningssystem.

Foranalysen har vist, at en person er den bedste platform for et MKS, men projektgruppen har på trods heraf valgt at anvende en bil, da projektgruppen finder denne platform spændende. Endvidere vil nogle af de principper, der anvendes ved konstrueringen af et MKS med bil som platform, kunne anvendes i MKS'er, der anvender andre platforme. Konstrueringen af et MKS med bil som platform vil således give nogle grundlæggende erfaringer og værktøjer, der kan anvendes i andre MKS'er.

I problemformuleringen tages der udgangspunkt i tiltag, der kan automatisere fremstillingen af fotorealistiske 3D-bymodeller til visualiseringsformål i Danmark samt projektgruppens interesse for at arbejde med fotorealistiske 3D-bymodeller og

sensorintegration i form af et MKS, der anvender en bil som platform. Dette leder frem til projektets problemformulering:

Hvordan kan der konstrueres et system til automatiseret indsamling og påsætning af facadebilleder på en eksisterende 3D-bymodel, hvor dataindsamlingen foregår ved hjælp af et mobilt kortlægningssystem med en bil som platform, og hvilke problemer er der ved konstrueringen af systemet?

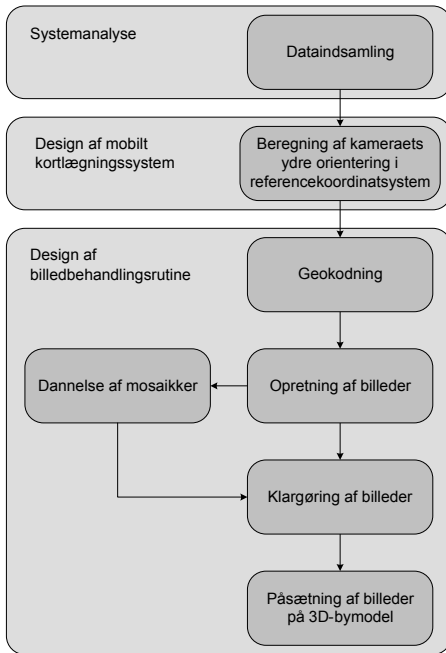
### Overordnet idé

Projektgruppen har fra begyndelsen af projektperioden haft en overordnet idé til konstruktion af et system bestående af et MKS til dataindsamling samt rutiner til den efterfølgende databehandling, der gennem projektarbejdet ønskes afprøvet. Den overordnede idé fremgår af figur 3.1. Inddelingen i figuren henviser til de kapitler i rapporten, som de forskellige dele vil blive beskrevet i.

Den overordnede idé er, at der ved integration af en eller flere sensorer i et MKS skal indsamles data, således at den ydre orientering af kameraet kan bestemmes i et referencekoordinatsystem, hver gang det udløses.

Når billederne er taget, og der er bestemt en tilhørende ydre orientering, skal der udvikles en rutine, der på baggrund af den ydre orientering kan geokode de optagne billeder til de tilhørende facader i 3D-bymodellen. Med geokodning menes, at det findes ud af, hvilke billeder, der hører til hvilke facader i 3D-bymodellen. Geokodningen anvendes til flere ting, hvilket fremgår af det følgende.





Figur 3.1: Diagram over projektgruppens overordnede idé. De tre store kasser henviser til de kapitler, hvori delelementerne behandles.

Når geokodningen er foretaget, oprettes det enkelte billede ved hjælp af den ydre orientering samt referencekoordinaterne til facaden i 3D-bymodellen. Koordinaterne til facaden er fundet ved geokodningen.

Som nævnt i foranalysen, kan der være problemer med at facaderne kan være i ét billede. Derfor skal problemstillingen med dannelse af mosaikker overvejes i det automatiserede system. De billeder, der tilhører samme facade i 3D-bymodellen, skal efter opretningen af de enkelte billeder, sættes sammen til en billedmosaik, således at der til hver facade i 3D-bymodellen hører ét billede. Dette er hensigtsmæssigt ved påsætningen af billedet på 3D-bymodellen.

Inden påsætningen af facadebilledet på 3D-bymodellen, er der to problemer, der skal løses først. Det første problem er, at der kan være hældnings-

forskydninger tilbage i det oprettede billede, da den ydre orientering ikke kan bestemmes perfekt. Hvor godt den ydre orientering kan bestemmes afhænger selvfølgelig af valget af instrumenter til integration i MKS'et, men ligegyldigt hvilke instrumenter, der vælges til bestemmelse af den ydre orientering, kan den ydre orientering ikke bestemmes korrekt, hvilket medfører, at billedet aldrig oprettes korrekt. Det andet problem opstår ved udklipning og påsætningen af facadebilledet på 3D-bymodellen. Problemet er, at facaden i billedet ikke passer til facaden i 3D-bymodellen på grund af tagudhængsproblematikken, jf. figur 2.2, samt spredningen på koordinaterne i 3D-bymodellen, og derfor skal billedet tilpasses facaden i 3D-bymodellen.

Til løsning af de to problemer, har projektgruppen tænkt sig at anvende en metode, der minder om den metode, der anvendes i turistinformationssystemet, jf. 2.2.2 Øvrige automatiserede systemer og metoder. Her findes facadens afgrænsning i billedet, hvorefter den tilpasses facaden i 3D-bymodellen.

Ovenstående er blot en beskrivelse af den overordnede idé, og idéen vil således blive beskrevet mere detaljeret i de enkelte kapitler. I bilag 7 findes et mere detaljeret diagram over metoden, som kan være anvendelig ved læsning af de efterfølgende kapitler.

## Afgrænsning

Som udgangspunkt ønsker projektgruppen at arbejde med alle delelementer nævnt i den overordnede idé. Projektgruppen har dog en begrænset tid til rådighed, og kan som følge deraf desværre ikke nå dybt ned i alle emner. Det betyder, at der ikke vil foreligge et samlet og færdigt system, der kan foretage alle processer beskrevet i den overordnede idé. De emner der ikke arbejdes i dybden med, vil således blive beskrevet teoretisk i rapporten, og problemerne vil forsøges klarlagt.

Projektgruppen afgrænser sig fra at beskæftige sig med visualisering af 3D-bymodellen. Det forudsættes således, at de programmer, der i dag anvendes til visualisering af 3D-bymodeller, kan integreres i det nye system, der udvikles i projektet.

Endvidere afgrænser der fra, hvordan det indsamlede data lagres optimalt i en database sammen med facaderne i 3D-bymodellen.

Der er endvidere afgrænset fra overvejelserne omkring hvilket software, der er bedst egnet til programmering af rutinerne. Projektgruppen har valgt at anvende Matlab til programmering af de forskellige rutiner, da det er et program projektgruppen før har anvendt og således er bekendt med. Endvidere er Matlab egnet til hurtigt at afprøve forskellige ting i, da det indeholder mange foruddefinerede funktioner. En ulempe ved Matlab er beregningstiden, men da projektet ikke omhandler optimering af software, ses der bort fra denne ulempe.

Der foretages endvidere løbende afgrænsninger i rapporten.



## 4 Systemanalyse

I Struktureret Analyse anvendes systemanalysen til at fastlægge krav og mål til det nye system samt at indsamle information og viden om problemområdet. I systemanalysen undersøges således de tekniske muligheder, der er for udvikling af systemet og mere konkret opstilles et løsningsforslag. [Delskov m.fl., 1994, s. 30]

I det følgende vil kravene til det mobile kortlægningssystem, som anvender en bil som platform, overordnet blive afdækket. Når kravene er afdækket undersøges forskelligt udstyr, der kan anvendes som henholdsvis positionerings- og kortlægningseenhed, der kan anvendes til at opfylde kravene til MKS'et. Der vælges udstyr, og endelig redegøres der for det samlede system.

### 4.1 Indledende overvejelser om krav til systemet

Inden der kan vælges instrumenter til MKS'et, skal der opstilles en række krav til systemet.

Som det fremgår af foranalysen, fremstilles foto-realistiske 3D-bymodeller ofte i tætte byområder. Det betyder, at MKS'et skal opbygges således, at det kan anvendes i tæt by. Positioneringsinstrumenterne skal derfor vælges, således at positionerne kan bestemmes i byer, hvor bygningerne er høje og står tæt.

Der skal bestemmes en hastighed, som bilen skal køre med. Dette skal gøres med henblik på at finde ud af, hvor ofte kameraet skal udløses. Projektgruppen har besluttet, at bilen skal køre med 20 km/t, da dette vurderes ikke at sænke den øvrige trafik betragteligt i byområderne. I

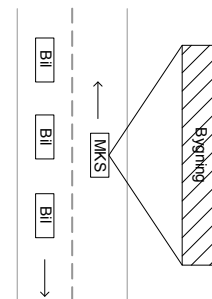
tætbyen kan der ofte ikke køres hurtigere end 20-30 km/t. Hvor tit kameraet skal udløses ved denne hastighed, afhænger af det valgte kameras åbningsvinkel.

At bygningerne er høje og står tæt, stiller også begrænsninger for, hvor langt MKS'et kan køre fra bygningerne. Det findes mest hensigtsmæssigt, at MKS'et skal tage billeder af de facader, der ligger til højre for bilen i bilens kørselsretning. Skulle billederne tages af de modstående bygninger, ville trafikken i den anden vejbane genere ved fotograferingen, idet der er større risiko for, at bilerne kommer med på billedet, jf. figur 4.1. Projektgruppen forudsætter, at det som hovedregel er muligt at køre 5 m fra facaden. Denne afstand vil blive anvendt ved efterfølgende beregninger.

Det er endvidere hensigtsmæssigt at overveje, hvor store bygninger generelt er. Det er svært at vurdere den generelle højde af bygninger, så projektgruppen har forudsat, at bygninger er 15 m høje, hvilket cirka svarer til en fem-etagers bygning, velvidende at der findes tilfælde, hvor disse dimensioner overskrides. Da der køres, mens der tages billeder, kan det ikke forventes, at der

Figur 4.1:

For at undgå at trafikken i den modstående vejbane kommer med på billederne, er det hensigtsmæssigt at fotografere de facader, der ligger til højre for bilen i bilens kørselsretning.

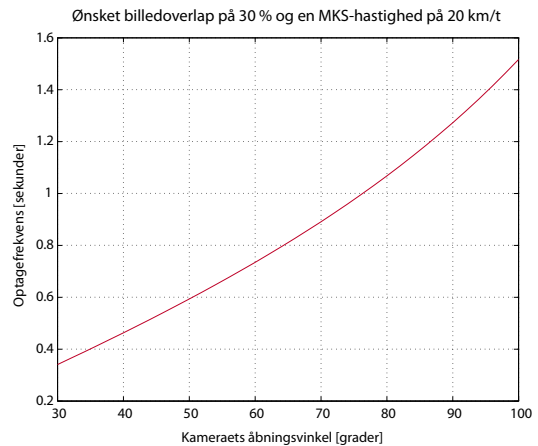


fotograferes én facade per billede. Det betyder, at nogle billeder skal sættes sammen til mosaikker, hvilket kræver et overlap mellem tilstødende billeder. Billederne skal således tages med overlap. Projektgruppen har valgt, at billederne skal tages med et overlap på 30 %, hvilket er nok til dannelse af mosaikker. Kameraets optagefrekvens skal således beregnes ud fra dette ønskede overlap. Optagefrekvensen afhænger af kameraets åbningsvinkel. I figur 4.2 er optagefrekvensen vist som en funktion af kameraets åbningsvinkel. Beregningen er foretaget med en afstand til facaden på 5 m og en hastighed på 20 km/t. Er åbningsvinklen for eksempel 75°, skal kameraet tage et billede hvert sekund.

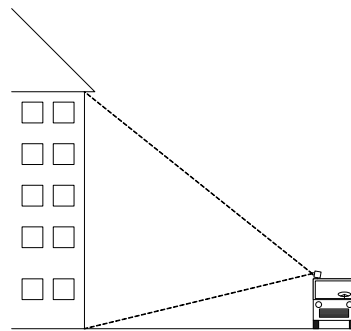
Vælges det at implementere ét kamera i MKS'et, skal der vælges et, der ved en afstand på 5 m fra facaden kan dække en facade, der er 15 m høj. En mulighed for at imødekomme problemet med de høje facader, er at montere kameraet en smule skråt på MKS'et, jf. figur 4.3. Endvidere vil det være en idé at anvende et kamera, der har en stor åbningsvinkel. En alternativ idé er at montere flere kameraer på bilen, så højere og bredere facader kan dækkes, jf. figur 4.4.

Som nævnt i foranalysen, kan der ofte, når der anvendes et "dumt" kørende system, være problemer med holdende biler foran facaderne. En måde hvorpå dette problem kan undgås i nogle tilfælde, er at montere kameraet højt over bilen, jf. figur 4.5. Kameraet skal selvfølgelig monteres i en sådan højde, at det stadig er muligt at køre under broer.

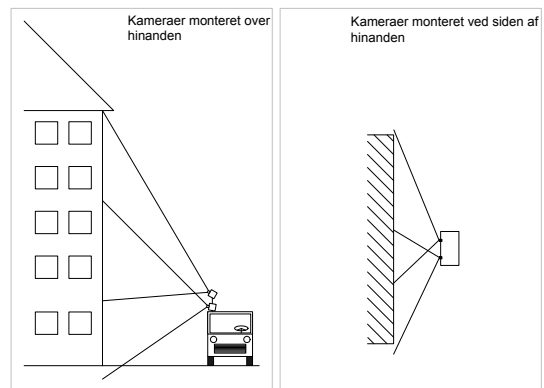
Projektgruppen har påtænkt at finde facadens afgrænsning i billedet ved hjælp af kantdetektering. Projektgruppen har en formodning om, at et kantdetekteringsfilter vil finde mange kanter i billedet. Da det kun er facadens kanter, der ønskes, vil det være smart, hvis søgeområdet i billedet kan afgrænses. En afgrænsning af søgeområdet kræver, at den ydre orientering af kameraet bestemmes med en given nøjagtighed, hvilket stiller krav til



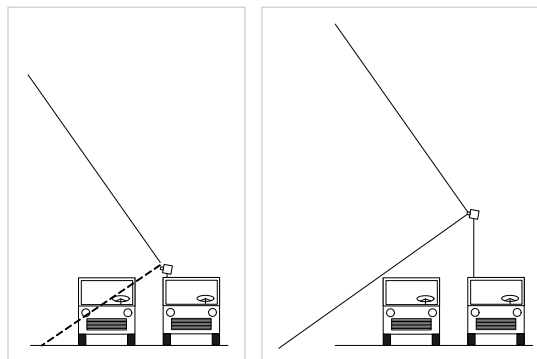
Figur 4.2: Kameraets optagefrekvens som funktion af kameraets åbningsvinkel. Beregningen er foretaget i matlabscriptet "overlap.m", jf. bilag 1C.



Figur 4.3: Kameraet monteres skråt på MKS'et, således at det ikke kommer for meget terræn med i billedet og udnyttes bedst muligt.



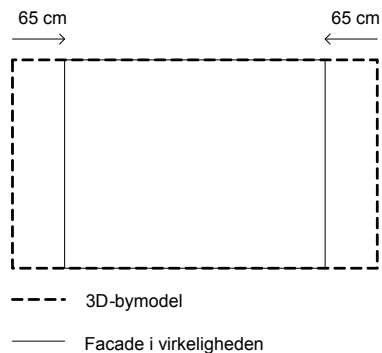
Figur 4.4: Flere kameraer monteret over hinanden vil kunne dække højere facader. Flere kameraer monteret ved siden af hinanden vil kunne dække et bredere område.



Figur 4.5: Monteres kameraet højt, er det muligt at undgå nogle af de biler, der holder foran bygningerne.

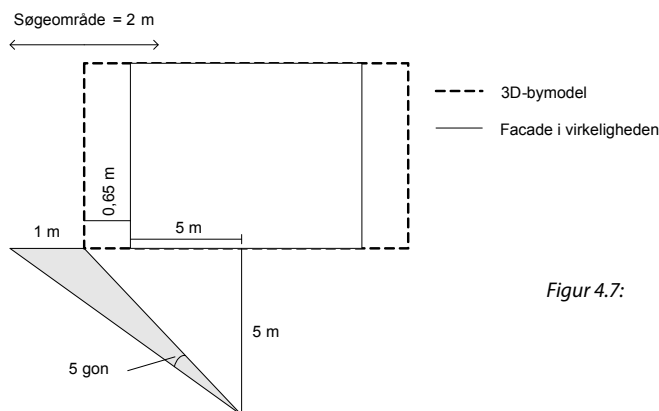
positioneringsinstrumenterne. Der skal således opstilles krav til positioneringsinstrumenternes nøjagtighed.

Hvis den ydre orientering som udgangspunkt betragtes som værende korrekt, og facadekanterne fra 3D-bymodellen projiceres ind i billedet, kan facadekanterne fra 3D-bymodellen anvendes som udgangspunkt for søgeområdet i billedet. På grund af tagudhængsproblematikken samt nøjagtigheden på koordinaterne i 3D-bymodellen, vil der være en fejl mellem facadekanterne i billedet og facadekanterne i 3D-bymodellen. Hvis det forudsættes, at et tagudhæng er  $\frac{1}{2}$  meter, og at spredningen på koordinaterne i 3D-bymodellen er 0,15 meter, betyder det, at der maksimalt skal søges 0,65 m i hver side ind mod midten af billedet, jf. figur 4.6.



Figur 4.6: Er den ydre orientering bestemt perfekt, er søgeområdet i billedet defineret som 0,65 m i hver side af bygningen. Facaden er set forfra.

Da den ydre orientering ikke kan bestemmes perfekt, kan søgeområdet således ikke længere defineres som 0,65 m i hver side. Det må derfor defineres hvor stort et søgeområde, der tillades i billedet, og således beregnes hvor "dårlig" den ydre orientering kan tillades at blive bestemt. Angives et for stort søgeområde risikeres det, at der findes mange kanter fra vinduer, døre og måske endda mursten. Projektgruppen har dog ingen forudsætning for at angive størrelsen på et "perfekt" søgeområde, men har besluttet, at søgningen efter kanter skal foretages i et søgeområde på 2 m, jf. figur 4.7. Der kan således beregnes en tilladt fejl i vinkelbestemmelsen. Ved beregningen anvendes forudsætningerne om en afstand til facaden på 5 m og en 10 m bred facade. Den tilladte fejl beregnes til 5 gon. Der bør dog også gives lidt usikkerhed til bestemmelsen



Figur 4.7: Hvis der tillades et søgeområde på 2 m, giver dette en tilladt fejl i vinkelbestemmelsen på 5 gon. Facaden er set forfra.

af kameraets position, da denne heller ikke kan forventes at blive bestemt perfekt. Det beslattes derfor, at positionen skal bestemmes inden for 20 cm, og vinklerne skal bestemmes inden for 4 gon. Det skal i den forbindelse nævnes, at køres der længere fra facaden, så øges kravet til positions- og vinkelbestemmelsen.

## 4.2 Kortlægningsenhed

Indsamlingen af billederne til 3D-bymodellens facader kan foregå med forskellige typer digitale kameraer. Inden det bestemmes hvilket kameraudstyr, der skal anvendes i projektet, må kravene til kameraerne først klarlægges. Da der skal foretages efterfølgende billedbehandling, vil kun digitalt kameraudstyr blive taget i betragtning, da digitale billeder kan anvendes direkte i en automatiseret proces.

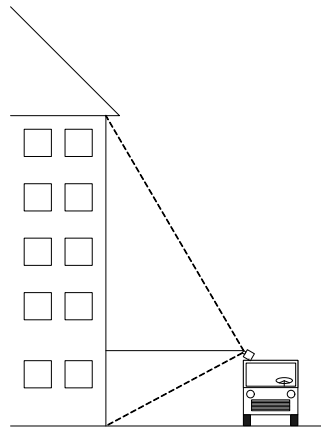
### 4.2.1 Krav til kamera

I det følgende beskrives de krav og egenskaber, der stilles til kameraudstyret, der skal anvendes i MKS'et.

#### Linser og billedopløsning

Kameraets optik, billedformat og pixelstørrelse har betydning for, hvor meget der kan komme med på billederne, og hvor detaljerede billederne kan blive.

Projektgruppen ønsker et kamera med så stor åbningsvinkel som muligt, for at kunne dække så meget som muligt. Åbningsvinklen på linsen kan beregnes trigonometrisk ud fra kamerakonstanten og størrelsen af CCD'en. Tages der udgangspunkt i kravene fra 4.1 *Indledende overvejelser om krav til systemet*, hvor det bestemmes, at MKS'et skal køre 5 m fra facaden, og at kameraet fra denne afstand skal kunne fotografere en 15 m høj facade, kan den minimale åbningsvinkel beregnes trigono-



Figur 4.8: Kameraets minimale åbningsvinkel bliver ca. 91°.

metrisk, så hele facaden er indeholdt i billedet. Den teoretiske minimale åbningsvinkel bliver ved denne beregning cirka 91°. Ved beregningen er der taget højde for, at kameraet er monteret skråt på MKS'et, og at kameraet er placeret 2 m over jorden, jf. figur 4.8. Et krav til kameraet er således, at det skal have en åbningsvinkel på 91°.

Et andet krav til kameraet er, at det skal have fast fokusering og fast zoom, således det kun kræver ét sæt kalibreringsparametre til kameraet. I den forbindelse skal kameraet kunne håndtere, at der kan køres i forskellige afstande til facaderne, hvilket betyder, at dybdeskarpheden i kameraet dækker et rimeligt interval.

Endelig skal det være muligt at opnå en geometrisk opløsning i billedet på ca. 1 cm i en afstand af 5 m fra facaden. I de følgende beregninger, beregnes den geometriske opløsning vinkelret på facaden.

#### Tidsstempling

En af de afgørende forudsætninger, for at et kørende MKS vil fungere er, at der kan registreres en tid til både kamera og de instrumenter, der bestemmer kameraets ydre orientering, for at få

den rigtige ydre orientering til kameraet. Denne forudsætning har projektgruppen defineret som observationernes tidsstempling.

Det er således nødvendigt at kende tidspunktet for billedets eksponering. Projektgruppen er kommet frem til, at tidsstempling for kameraet kan foretages ud fra to principper:

- Fælles tidsstempling
- Lokal tidsstempling

Fælles tidsstempling skal forstås således, at alle observationer fra instrumenterne i MKS'et lagres løbende centralt i en fælles registreringsenhed, som for eksempel en PC. Herved kan billedet refereres til positioneringsenhedens observationer. Referencen kan foregå ved en fællestid som for eksempel PC'ens tid.

Den anden mulighed, som projektgruppen ser for at registrere tidspunktet for eksponeringen, er, at anvende kameraets ur. Dette kalder projektgruppen lokal tidsstempling, da tidsstemplingen foregår lokalt i kortlægningsenheden. Ved denne løsning er det ikke nødvendigt at forbinde kameraet elektronisk med en anden enhed som beskrevet ved den fælles tidsstempling. Visse kameraer kan i forbindelse med lagringen af billederne i billedfilens header! også tilføje kameraets indstillinger for eksponeringen samt dato og tid. For at finde kameraets position i eksponeringsøjeblikket, skal tiden i headeren sammenholdes med den tid, der registreres i forbindelse med observationerne fra positioneringsenheden.

Ved begge typer af tidsstemplinger vil der være problemer med, at urene i henholdsvis kameraet og positioneringsinstrumenterne ikke har samme stand og gang, hvilket har indflydelse på nøjagtigheden af tidsstemplingen. Også udstyrets evne til at registrere tidspunkterne har indflydelse på nøjagtigheden af tidsstemplingen. Disse forhold skal således undersøges nærmere i forbindelse

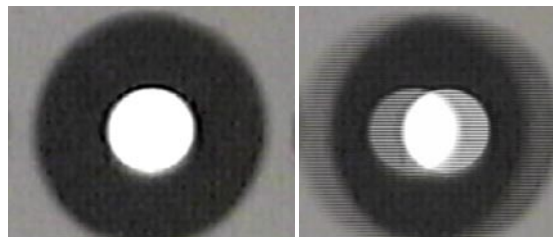
med integreringen af instrumenterne.

Det er således et krav til kameraet, at der kan registreres en tid til kameraet i eksponeringsøjeblikket.

## 4.2.2 Kameraer til rådighed

Ud fra ovenstående beskrivelser er de krav, der stilles til kameraet til et MKS, blevet belyst. I det følgende vil de digitale kameraer, som projektgruppen har mulighed for at anvende i dette projekt, blive sammenholdt med de krav, der er opstillet i det forrige.

Projektgruppen har mulighed for at anvende et videokamera. Videokameraer evner at tage mange billeder i sekundet. Almindelige videokameraer tager billeder med 50 Hz, men ofte benytter kameraet interlacing. Interlacing betyder, at kameraet skiftevis optager med alle de lige og de ulige rækker af pixler på CCD'en. På denne måde optages 50 halvbilleder per sekund, som kan sammensættes til 25 helbilleder. På figur 4.9 ses et rå interlaced helbillede af et refleksmærke i bevægelse, refleksen er forskudt i hver anden række, grundet tidsforskellen mellem de to billeders eksponering. Denne problematik er nødvendig at overveje, hvis et videokamera med interlacing skal anvendes. Projektgruppen har erfaret fra et tidligere projekt, at konverteringen af halvbilleder til helbilleder, er en tidskrævende proces, hvis der ikke medfølger et software anvendeligt til formålet. Ved konverteringen af billederne fra halvbil-



Figur 4.9: Det venstre billede viser et refleksmålemærke, hvor der er kompenseret for interlacing, og det højre et hvor der ikke er kompenseret for interlacing. [Eriksen m.fl., 2003]



leder til helbilleder sker der også en manipulation, således at helbilledets lige og ulige rækker ikke vil komme til at se forskudt ud i forhold til hinanden. Det medfører, at tidspunktet for billedet ikke kan bestemmes helt nøjagtigt, men denne fejl vil være konstant og mulig at eliminere.

Det er også muligt at købe videokameraer, der benytter sig af helbilleder. Disse kan tage 50 helbilleder i sekundet, hvilket vil lette efterbejdningen af billederne. Disse videokameraer ligger dog i en højere prisklasse.

Projektgruppen har rådighed over tre forskellige digitale kameraer og et digitalt videokamera. I den kameraerne undersøges nærmere, fravælges videokameraet. Dette begrundes med, at dette anvender interlacing, og den efterfølgende proces med konverteringen af halvbillederne til helbilleder vil blive for tidskrævende i denne projektperiode. Skulle der anvendes et videokamera i et MKS, ville det ikke være fornuftigt at anvende et kamera, der benytter sig af interlacing, medmindre det rigtige software til konvertering til helbilleder er til rådighed. Kameraerne, der vil blive undersøgt, er følgende:

- Rollei d7 metric
- Nikon D100
- Kodak DCS PRO 14N

### Rollei d7 metric

Rollei d7 metric er et metrisk digitalt kamera, hvor den indre orientering er kendt. Kameraets linse muliggør ikke zoomfunktionalitet og har fast fokusering i intervallet 0,6 m til  $\infty$ . Linsens åbningsvinkel er beregnet til  $61^\circ \times 51^\circ$  i forhold til billedets format ud fra en kamerakonstant på 7,57 mm og en CCD med dimensionerne  $8,96 \times 7,168$  mm. Pixelstørrelsen er 7 $\mu$ m.

Det er et krav til kameraet, at den minimale åb-

ningsvinkel skal være  $91^\circ$ , hvilket Rollei ikke kan opfylde. Det betyder, at der skal anvendes flere kameraer på MKS'et, hvis det i en afstand på 5 m til facaden skal være muligt at fotografere 15 m høje facader.

Opløsningen er på 1,3 megapixels, hvilket ikke er meget sammenlignet med de digitale kameraer, der ellers kan købes i dag. Beregnes afstanden mellem facaden og kameraet, således at den geometriske opløsning bliver 1 cm, bliver afstanden 11 m. Opløsningen konkluderes at være tilstrækkelig, da MKS'et skal anvendes i en afstand af 5 m fra facaden.

Af figur 4.2 kan det aflæses hvor ofte kameraet skal udløses, hvis der skal opnås et overlap på 30 %. Der aflæses i figuren med hensyn til den største åbningsvinkel, det vil sige  $61^\circ$ . Det ses af figuren, at kameraet skal udløses hvert 0,7 sekund. Med Rollei d7 metric er det kun muligt at tage ét billede hvert femte sekund, både når billedet tages manuelt og med det tilhørende software [Jensen m.fl., 2002, s. 81]. Det betyder, at skal Rollei kameraet anvendes, kan der ikke køres 20 km/t, med mindre der anvendes flere kameraer.

Med kameraet er det muligt at benytte sig både af fælles og lokal tidsstempling. Med til kameraet hører der foruden producentens standardsoftware et funktionsbibliotek. Dette muliggør, at det i udviklingsmiljøet C++ er muligt at skrive et program, der kan indstille kameraets funktioner såsom blitz, blænde samt at udløse kameraet fra en PC. Endvidere er det muligt at registrere tiden for eksponeringen i billedfilens header.

[Rollei d-flex]

### Nikon D100

Kameraet Nikon D100 er et semiprofessionelt digitalt kamera med 12-24 mm zoomlinse. Linsen er en vidvinkellinse, og linsens åbningsvinkel er beregnet til  $89^\circ \times 66^\circ$  i forhold til billedets format

ud fra en brændvidde på 12 mm og en CCD med dimensionen  $23,7 \times 15,6$  mm. Pixelstørrelsen er  $7,8 \mu\text{m}$ . Det er muligt at slå zoom-funktionen fra. Linsen har endvidere autofokus, men kan låses, så der opnås fast fokusering i et acceptabelt interval.

Hvis Nikon kameraet vendes på højkant ved montering i MKS'et, er det lige før, at Nikon opfylder kravet til en minimal åbningsvinkel på  $91^\circ$ , idet kameraets har en åbningsvinkel på  $89^\circ$ .

Kameraets maksimale opløsning er på 6 megapixels. Beregnes afstanden mellem facaden og kameraet, således at den geometriske opløsning bliver 1 cm, bliver afstanden 15 m. Opløsningen er således acceptabel.

Aflæses optagefrekvensen for Nikon i figur 4.2 på baggrund af den største vinkel på  $89^\circ$ , ses det, at kameraet skal udløses hvert 1,3 sekund. Kameraet kan tage billeder med en frekvens på 0,3 sekunder, hvilket betyder, at kameraet kan anvendes, når MKS'et kører 20 km/t.

Til kameraet hører der et software, der muliggør, at kameraet kan styres fra en PC. Billederne kan ligeledes gemmes direkte på PC'en, så lagerkapaciteten kan øges væsentligt i forhold til kameraets hukommelse. Med kameraet er det muligt at gemme tiden for billedet i billedfilens header.

[Nikon D100]

### Kodak DCS PRO 14N

Kodak DCS PRO 14N har to linser med henholdsvis en brændvidde på 35 mm og 85 mm. Ønskes den maksimale åbningsvinkel skal linsen med brændvidden på 35 mm anvendes. Linsens åbningsvinkel er beregnet til  $53^\circ \times 38^\circ$  i forhold til billedets format ud fra en brændvidde på 35 mm og en CCD størrelse på  $36 \times 24$  mm. Pixelstørrelsen er  $7,7 \mu\text{m}$ . Det er muligt at slå zoom-funktionen fra. Linsen har endvidere autofokus, men kan låses, så der opnås fast fokusering i et acceptabelt interval.

Kodak kameraet kan ikke opfylde kravet om en åbningsvinkel på  $91^\circ$ . Kameraets største vinkel er  $53^\circ$ . Der skal således anvendes flere kameraer på MKS'et, hvis det i en afstand på 5 m til facaden skal være muligt at fotografere 15 m høje facader.

Kameraet har en høj billedopløsning på 13,5 megapixels. Beregnes afstanden mellem facade og kamera, således at den geometriske pixelstørrelse bliver 1 cm, bliver afstanden 35 m. Opløsningen er tilfredsstillende.

Aflæses optagefrekvensen for Kodak i figur 4.2 på baggrund af den største vinkel på  $53^\circ$ , ses det, at kameraet skal udløses hvert 0,6 sekund. Det er med kameraet netop muligt at optage billeder med denne frekvens, hvorfor kameraet kan anvendes, når MKS'et kører 20 km/t.

Med Kodak kameraet er der mulighed for at lagre tiden for billedets eksponering i billedfilens header. Kameraet kan dog styres fra en PC ved hjælp af medfølgende software.

[Kodak DCS Pro 14N]

### 4.2.3 Kameravalg

De vigtigste oplysninger om krav til kameraerne, er opsamlet i figur 4.10. Alle kameraerne har mulighed for fast fokusering i et acceptabelt interval. Endvidere kan alle kameraerne opfylde kravet om en opløsning på 1 cm ved en afstand på 5 m til facaden samt kravet om, at det skal være muligt at tidsstemple billederne. Skal billederne have et overlap på 30 % ses det, at kun Nikon og Kodak kan opfylde dette krav, hvis MKS'et skal køre i en hastighed af 20 km/t. Skal Rollei anvendes skal hastigheden således sættes ned, med mindre der anvendes flere kameraer på MKS'et. Skal der anvendes ét kamera på MKS'et, ses det, at kun Nikon kan opfylde dette krav, idet dette kamera har en åbningsvinkel på  $89^\circ$ , hvilket betyder, at der kan fotografere 15 m høje facader ved en afstand til facaden på 5 m. Det konkluderes, at Nikon er det

Kamera	Åbningsvinkel	Maksimal afstand til facade (1 cm pixel) [m]	Kameraets mulige optagefrekvens [sekund]	Mulighed for tidsstemping
<b>Rollei d7 Metric</b>	51° × 61° (÷)	11 (+)	5 (÷)	+
<b>Nikon D100</b>	66° × 89° (+)	15 (+)	0,3 (+)	+
<b>Kodak 14n</b>	38° × 53° (÷)	35 (+)	0,6 (+)	+

Figur 4.10: Opsummering af egenskaberne for de tre kameraer til rådighed. (+) og (÷) angiver om kameraet opfylder kravet.

kamera, der bedst kan opfylde de opstillede krav.

Det bestemmes ud fra ovenstående analyse at anvende Rollei d7 metric som kortlægningsenhed til MKS'et. Valget af Rollei begrundes med, at kameraet har en kendt og stabil indre orientering. Det betyder, at det ikke er nødvendigt at kalibrere kameraet, da den indre orientering er oplyst fra fabrikanten. Kalibreringsrapporten ses i bilag 1H.

Endvidere vælges det kun at anvende ét kamera, da projektgruppen afgrænser sig fra at lave billedmosaikker.

Valget af ét Rollei-kamera betyder flere ting i forbindelse med konstruktionen af MKS'et. For det første betyder det, at MKS'et må anvendes i en afstand til facaden, der er større end 5 m, da der ikke kan være en 15 m høj bygning på billedet. Alternativt kan der vælges bygninger, der ikke er så høje. For det andet betyder valget, at MKS'et skal holde stille ved dataindsamlingen, da Rollei kameraets optagefrekvens medfører en betydelig reduktion af den mulige hastighed. Det vælges derfor at holde stille.

I et kommercielt system, ville et kamera som Rollei sikkert ikke vælges som kortlægningsenhed. Projektgruppen ser dog ingen problemer i valget af Rollei kameraet, da dette er et studieprojekt.

## 4.3 Positioneringsenheden

Da det er nødvendigt at kende kameraets ydre orientering, skal kameraets position og orientering bestemmes. I det følgende undersøges

forskellige instrumenter og metoder, der kan anvendes til bestemmelse af positionen af kameraet eller orienteringen af kameraet eller begge dele. Endvidere beskrives forskellige kombinationer af det beskrevne udstyr med henblik på at vælge det endelige udstyr, der skal anvendes i MKS'et til bestemmelse af position og orientering af kameraet. Der tages udgangspunkt i, at instrumenterne skal vælges, så det er muligt at køre med MKS'et.

### 4.3.1 Instrumenter

Positionen og orienteringen af kameraet kan bestemmes på forskellig vis, afhængig af den nøjagtighed, der ønskes. I det følgende beskrives instrumenter, der kan anvendes til projektets formål, og som ud fra projektgruppens synspunkt findes relevant at beskæftige sig med. Det vil sige, at det for eksempel ikke gennemgås, hvordan observationer fra en laserscanner monteret på MKS'et kan anvendes til positionering af MKS'et ved sammenligning med en eksisterende 3D-bygmodel, som det er beskrevet i 2.2 *Automatiserede metoder til fremstilling af fotorealistiske 3D-bygmodeller i udlandet*. Projektgruppen finder systemet omfattende, og det vil tage fokus fra det egentlige formål med projektet.

#### GPS

GPS er en metode til positionsbestemmelse i tre dimensioner, der anvendes inden for mange områder verden over. Blandt andet anvendes GPS til navigation, til indsamling af GIS data og i landmåling.

Inden for positionsbestemmelse med GPS findes der flere forskellige målemetoder afhængigt af formålet. Der er overordnet tale om to forskellige metoder til positionsbestemmelse; nemlig kodemåling og fasemåling, hvor fasemåling er den mest nøjagtige metode. Endvidere afhænger nøjagtigheden af, om der måles differentielt. Differentiel måling betyder, at der måles relativt mellem to modtagere, hvoraf én er en stationær master, og en anden er en bevægelig rover. Kodemåling kan foretages absolut med én modtager eller differentielt med to modtagere. Differentiel GPS på koden benævnes DGPS. Fasemåling foretages altid differentielt og benævnes relativ GPS.

Som enkeltmodtager påvirkes enhver GPS-modtager af adskillige fejlkilder. Det drejer sig om multipath, urfejl i henholdsvis satellitterne og modtagerne, satellittens banefejl, atmosfæriske forstyrrelser samt satellitkonstellationen i forhold til modtageren. De fleste af disse fejl kan nedbringes eller elimineres, hvis der måles differentielt. Se nærmere beskrivelse af fejlkilderne i Appendiks E.

Når der kun anvendes én modtager kaldes det absolut kodemåling. Absolut kodemåling er under indflydelse af ovenstående fejlkilder. En statisk test af absolut kodemåling foretaget med en håndholdt kodemåler af navnet Garmin 12, hvor der i 240 timer måles i det samme punkt, viser, at der kan opnås en spredning på et punkt på cirka 4-5 m i planen og 7-8 m i højden [Dueholm, 2002, s. 49]. På grund af ovenstående nøjagtigheder findes absolut kodemåling ikke anvendeligt i MKS'et, da kameraets position ifølge projektgruppens krav skal kunne bestemmes inden for 0,2 m.

Ved DGPS anvendes to eller flere modtagere; én master, der er placeret i et kendt punkt samt en eller flere rovere, der måler relativt i forhold til masteren og anvendes til positionsbestemmelsen. Ved at stille masteren i et kendt punkt kan korrektioner mellem det målte punkt og punktets sande værdi beregnes og sendes til roveren,

som således korrigerer observationerne med de udsendte korrektioner.

Med det billigste udstyr, hvor der udelukkende måles på C/A-koden, kan der med DGPS opnås nøjagtigheder på 2-5 m. DGPS giver dog mulighed for positionsbestemmelse med en nøjagtighed bedre end 1 m. Dyrere DGPS-systemer, som foruden C/A-koden anvender en form for udglatning af L1 bærebølgen, kan opnå nøjagtigheder på submeterniveau [www.trimblecenter.dk, 20.03.2004]. En statisk test af en dyrere og mere præcis kodemåler, nemlig NAV-GUIDE+, hvor der måles i samme punkt i 12 timer, viser, at der kan opnås en spredning på et punkt på cirka 0,65 m i planen og 1 m i højden [Jensen m.fl., 2002, s. 176], og andre har med andet udstyr opnået nøjagtigheder på 20-30 cm [www.gpsnet.dk, 21.03.2004].

Korrektionerne kan udsendes fra egen referencestation via et UHF-radiolink, men der findes også forskellige DGPS-tjenester i Danmark, der udsender korrektioner via FM radionettet eller telefonnettet. Af DGPS-tjenester i Danmark er der tale om blandt andet Beacon, der er oprettet af farvandsstyrelsen, Spot-FM, der er oprettet af Kort & Matrikelstyrelsen (KMS) og TeleDanmark, NAVdk, der er oprettet af KMS og Sonofon, mens WAGPS-systemerne Landstar og Omnistar er verdensomspændende DGPS-tjenester. Alle disse tjenester har nøjagtighed på submeterniveau. Også den danske GPS-tjeneste GPSnet.dk udbyder DGPS-korrektioner, hvilket ifølge GPSnet.dk kan give nøjagtigheder helt op til 20-30 cm, hvis der anvendes en kodemodtager af mærket Trimble Pathfinder Pro. [www.trimblecenter.dk, 20.03.2004], [www.gpsnet.dk, 21.03.2004]

Prisen på DGPS-udstyr, hvormed der kan opnås nøjagtigheder på submeterniveau, svinger meget, men kan fås fra 35.000 kr. [www.trimblecenter.dk, 24.03.2004]. Dertil kommer et eventuelt abonnement på anvendelse af en DGPS-tjeneste, som for eksempel den der udbydes af GPSnet.dk. Her

koster et DGPS-abonnement for eksempel 6000 kr. om året, hvortil der skal lægges minuttakst på telefonopkaldet. [www.gpsnet.dk, 21.03.2004].

Ovenstående nøjagtigheder viser, at det med det rigtige udstyr, og de rigtige korrektionssignaler, er muligt at anvende DGPS i et MKS, hvor kameraets position skal bestemmes med en nøjagtighed på 20 cm. Det er dog lige på grænsen.

I landmåling anvendes relativ GPS til opmåling, hvis der kræves en nøjagtighed på centimeter- eller millimeterniveau. Relativ GPS kan overordnet deles op i statiske og kinematiske målemetoder. De statiske metoder er de mest nøjagtige målemetoder med nøjagtigheder på millimeterniveau. Metoden er meget tidskrævende og egner sig således til nøjagtig positionsbestemmelse af enkeltpunkter, og ikke til et bevægeligt MKS.

Den kinematiske målemetode er en mere effektiv metode, når det gælder antallet af målinger. Nøjagtigheden er dog ikke så god som ved de statiske metoder. Forskellen fra den statiske metode er, at roveren holdes tændt ved flytning fra punkt til punkt, så det ikke er nødvendigt at initialisere hver gang, der skal måles et nyt punkt. Endvidere er observationstiden heller ikke så lang. Positionen af punkterne kan bestemmes ved efterfølgende processering af dataene hjemme på kontoret eller i sand tid i marken ved metoden "Real Time Kinematic" (RTK). RTK forudsætter, at masterens observationer leveres til roveren via et data-link mellem master og rover. [Dueholm, 2002, s. 81-88]

De kinematiske metoder kan anvendes ved to forskellige principper: "stop and go" eller "kontinueret måling".

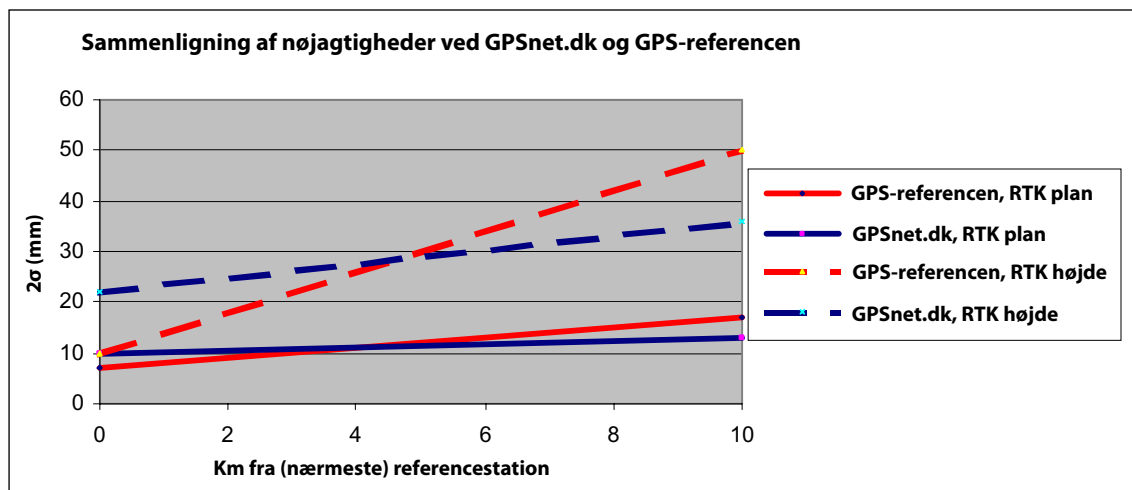
Ved "stop and go" måles et antal observationer samme sted, eksempelvis 10 epoker af for eksempel et sekunds varighed, hvoraf én position beregnes. Stop and go kan også indstilles, således at der kun måles det antal epoker, der opfylder

en på forhånd givet nøjagtighed, eller der måles i et givent tidsinterval. [Dueholm, 2002, s. 85]. Projektgruppen har fra tidligere projekter arbejdet med RTK ved "stop and go", og har i disse tilfælde opnået nøjagtigheder på omkring 1 cm i planet og 1,5 cm i koten.

Ved kontinuert måling beregnes hver epoke som et nyt punkt. Denne metode er især velegnet til positionsbestemmelse af bevægelige objekter som fly, biler eller skibe. [Dueholm m.fl., 2002, s. 85-86]. Nøjagtigheden kan dog ikke forventes at være lige så god som ved "stop and go", da der kun ligger én epoke til grund for punktets position.

For at RTK kan fungere, skal roveren løbende modtage observationer fra en referencestation. Projektgruppen har erfaringer med at anvende egen master, der sender observationerne via et UHF-link. Denne metode giver let problemer i byområder, idet UHF-linket mellem master og rover ikke altid kan række. Derved kan observationerne ikke nå frem til roveren, hvilket betyder, at der ikke kan måles. I Danmark findes der to kommercielle landsdækkende referencesystemer som tilbyder observationer via UHF og/eller mobiltelefoni, nemlig GPSnet.dk og GPS-referencen. En af fordelene ved disse systemer er, at modtagerforholdene også er gode i byområder, hvor MKS'et skal anvendes, fordi der anvendes telefon. I 2002 testede KMS de to GPS-tjenesters nøjagtigheder. Af figur 4.11 fremgår resultatet af de to GPS-tjenesters nøjagtigheder. Det ses, at GPS-referencen er mest nøjagtig inden for en afstand på ca. 5 km fra referencestationen. Ud over denne afstand har GPSnet.dk den bedste nøjagtighed.

Fordelen ved at anvende en GPS-tjeneste er, at det kun er nødvendigt at investere i én GPS-modtager. Dog skal man betale abonnement til tjenesten. Eksempelvis koster et abonnement til GPSnet.dk 12.850 kr., hvortil der skal lægges minutpris på telefonopkald. En RTK GPS-modtager koster i dag ca. 150.000 kr. [www.trimblecenter.dk, 20.03.2004].



Figur 4.11: Sammenligning af de to danske GPS-tjenester; GPSnet.dk og GPS-referencen. Bemærk at nøjagtigheden angives i  $2\sigma$ . [Madsen m.fl., 2002, s. 7]

Af figur 4.12 ses en oversigt over nøjagtighederne ved de forskellige GPS-metoder. Det ses, at RTK-måling er den mest anvendelige metode i MKS'et.

Udover positionsbestemmelse kan GPS anvendes til bestemmelse af kameraets orientering. Dette kræver dog en anordning bestående af mindst tre GPS-modtagere. Ud fra positionerne fra de tre GPS-modtagere kan hældningerne af kameraet beregnes.

Der findes kommercielle produkter, hvor orienteringen bestemmes ud fra fire antenner og en GPS-modtager, der direkte beregner orienteringen ud fra antennernes indbyrdes relative position. Systemet er ikke god til bestemmelse af den ab-

solutte position, men god til bestemmelse af den relative position, og dermed også hældninger og kurs. Et sådant system produceres blandt andet af firmaet Thales Navigation. Systemet kaldes ADU5. Antennesystemet ses af figur 4.13. Haves egen master, kan der bestemmes en absolut position med 40 cm nøjagtighed. Nøjagtigheden af kursen og hældningerne afhænger af den indbyrdes afstand mellem antennerne. Jo større indbyrdes afstand, der er mellem antennerne, jo bedre kan kurs og hældninger bestemmes. Ved en indbyrdes afstand på én meter kan kursen bestemmes med en spredning på 0,45 gon og hældningerne med en spredning på 0,9 gon. [www.thalesnavigation.com, 17.03.2004]. Systemet kan anvendes i MKS'et til bestemmelse af hældninger og kurs.

	$\sigma_{xy}$ [m]	$\sigma_h$ [m]	Anvendelighed i MKS
<b>Kodemåling, absolut</b>	4-5	7-8	÷
<b>DGPS, CA-kode</b>	2-5	2-5	÷
<b>DGPS, CA-kode, L1</b>	0,65	1	÷
<b>DGPS, CA-kode, L1 (Pathfinder)</b>	0,2-0,3	0,2-0,3	(+)
<b>Fasemåling, RTK (flere epoker)</b>	0,01	0,02	+

Figur 4.12: Oversigt over forskellige typer GPS, der kan anvendes i et MKS. En DGPS Pathfinder ligger lige på grænsen til at kunne blive anvendt til formålet. RTK er den bedste mulighed for anvendelse af GPS i MKS'et.



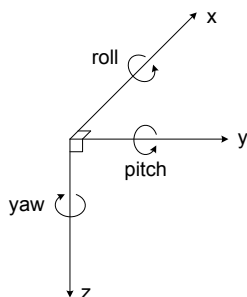
Figur 4.13: GPS-antennesystemet ADU5 fra Thales Navigation. [www.thalesnavigation.com]

Fordelen ved GPS er, at der kan opnås gode absolute positioner. Ulempen ved GPS er, at det er svært at anvende i byområder.

## IMU

En IMU består af tre accelerometre og tre gyroer, der måler henholdsvis accelerationer og vinkelhastigheder i tre på hinanden vinkelrette retninger, jf. figur 4.14.

Kombineres IMU med nogle beregningsrutiner til beregning af position, orientering og hastighed kaldes et sådant system for et "Inertial Navigation System" (INS). Sådanne systemer anvendes meget i kortlægningsbranchen, hvor INS'et kombineres med GPS positioner, således at der fås en orientering og en mere nøjagtig position for flyet, når et kamera udløses, eller der laserscannes.



Figur 4.14: IMUens koordinatsystem, hvor der måles henholdsvis accelerationer ud af og hældninger omkring x-, y- og z-aksen. Hældningerne omkring de tre akser benævnes roll, pitch og yaw.

En IMU kan anvendes til bestemmelse af orienteringen af kameraet ved integration af vinkelhastighederne over tid. Også positionen til kameraet kan bestemmes med IMU. Dette foregår principielt ved hjælp af orienteringen samt accelerationerne, der omregnes til tilbagelagt afstand i en given retning.

Observationerne fra en IMU er præcise over en kortere periode, men ved længere tids kontinuerligt brug bliver den beregnede position og orientering mere usikker. Observationerne fra IMU'en er relative, og kan derfor ikke direkte forholdes til referencesystemet. Derfor ophobes fejlene, jo længere tid der observeres, medmindre position og orientering korrigeres af andre sensorer, som for eksempel ved hjælp af GPS-observationer.

Afhængig af IMU'ens opbygning fås mere og mindre præcise instrumenter, hvilket også kommer til udtryk i prisen. De dyre IMU'er, der anvendes i fly, kan bestemme hældninger med en nøjagtighed på op til 5 mgon, men kan nemt koste en million [Blankenberg, 2003]. Der fås dog også billigere og mindre nøjagtige IMU'er. For eksempel har landinspektøruddannelsen netop anskaffet en IMU fra firmaet Crossbow af mærket IMU400-CC-100, som koster ca. 40.000 kr., se figur 4.15. Der er mange fejlkilder, som har indflydelse på nøjagtigheden af IMU'en, jf. bilag 4, og det er således svært at komme med et bud på, hvor godt IMU'en kan beregne position og orientering af kameraet. Projektgruppen mener dog godt, at IMU'en kan anvendes i et MKS sammen med for eksempel GPS, som skal



Figur 4.15: IMU af mærket IMU400CC-100 og fabrikeret af Crossbow. [Crossbow 1]

anvendes til at korrigere IMU-observationerne. IMU'en har en output-frekvens på 100 Hz, og hvor lang tid, der skal gå inden IMU-observationerne skal korrigeres, kræver nærmere undersøgelse.

## Kompas

Fra den maritime verden er kompasset ofte anvendt til bestemmelse af skibenes kurs.

Kompasset anvendes til bestemmelse af kursen i forhold til det magnetiske nord. Det magnetiske nord stemmer ikke overens med det geografiske nord, og der skal derfor foretages en omregning af outputtet fra kompasset i henhold til en misvisningsfaktor. Hvis outputtet skal anvendes i en kortprojektion, skal der endvidere omregnes fra geografisk nord til gridnord.

En stor fejlkilde ved kompasset er, at det reagerer ved magnetisme. Ved anvendelse af kompasset i en bil, der hovedsageligt består af jern og har magnetfelter fra bilens elektroniske systemer, vil dette have stor indflydelse på nøjagtigheden af observationerne fra kompasset. Den magnetiske indflydelse fra bilen kan søges minimeret, ved at placere kompasset på bilen, så det er under så lidt magnetisk indflydelse som overhovedet muligt.

Landinspektørstudiet er i besiddelse af et digitalt kompas; Azimut 1000 fra firmaet KVH Industries. Dette kompas kan automatisk kompensere for bilens magnetfelt, hvis ikke dette er for stort. Er det for stort, viser kompasset ingen output. Kompasset kan levere output med en frekvens på 10 Hz. Efter auto-kompensationen for bilens magnetfelt kan Azimut 100 i følge specifikationerne bestemme kursen med en nøjagtighed på bedre end  $1^\circ$ . Et digitalt kompas kan fås til ca. 1500 kr. Det vurderes at kompasset kan overholde de opstillede krav, og det er således anvendeligt i MKS'et.

## Tiltmeter

Et kompas angiver kun én af de tre ønskede vinkler

i MKS'ets orientering, nemlig kursen. Et tiltmeter kan anvendes til at måle en hældning i forhold til lodlinien. Til bestemmelse af MKS'ets hældninger i forhold til lodlinien kan to på hinanden vinkelrette tiltmetre anvendes.

Der findes forskellige typer tiltmetre, med både én akse og to akser. Et eksempel på et tiltmeter med to akser er MD900-T fra firmaet Applied Geomechanics. Dette tiltmeter kan måle hældninger i forhold til lodlinien på  $\pm 50$  grader, og har en output-frekvens på 7 Hz. Ved stilstand har dette tiltmeter en nøjagtighed på  $0,02^\circ$ . Anvendes tiltmeteret i et kørende MKS, falder nøjagtigheden sandsynligvis. [www.geomechanics.com, 02.06.2004]. Det vurderes, at tiltmeteret kan anvendes i MKS'et.

## Odometer

Et odometer er en triptæller, det vil sige en mekanisme, der holder styr på et køretøjs tilbagelagte afstand. I moderne biler sidder der et digitalt odometer, som udsender en impuls hver gang bilen har tilbagelagt en given afstand. Oftest registreres en impuls for hver meter, der tilbagelægges. [www.howstuffworks.com]. Et odometer kan anvendes sammen med andre sensorer til bestemmelsen af køretøjets position. Et odometer kan være nøjagtige, men det afhænger fra bil til bil. Det vurderes at kunne anvendes i et MKS.

### 4.3.2 Kombinationsmuligheder

De ovenstående instrumenter er alle anvendelige i MKS'et. Anvendelse af alle sensorer sammen er en mulighed, for eksempel giver en IMU og et tiltmeter flere bestemmelser på hældningerne ved bestemmelsen af orientering på kameraet. Det vil dog være unødvendigt at anvende samtlige sensorer i MKS'et, nøjagtighedskravet taget i betragtning, idet det er muligt at overholde nøjagtighedskravene med færre sensorer, hvilket også er en mere økonomisk løsning.



Det er også muligt at digitalisere få paspunkter på facaderne, for på denne måde at få overbestemmelser. Projektgruppen overvejer dog ikke denne mulighed nærmere, da det ønskes at systemet skal være automatisk.

Der skal således vælges nogle sensorer til anvendelse i MKS'et, som opfylder nøjagtighedskravene. I det følgende gennemgås nogle mulige kombinationer af instrumenterne.

### **Odometer, tiltmeter, kompas og GPS**

Til positionsbestemmelse af MKS'et er en GPS et oplagt valg. Til bestemmelsen af orienteringen kan tiltmeter og kompas anvendes. Ved GPS-udfald kan kompasset, som giver kursen, og odometeret, som giver tilbagelagt afstand anvendes i kortere tid til positionsbestemmelse.

### **GPS og IMU**

Der er flere fordele ved at kombinere GPS og IMU. For det første kan IMU'en ved GPS-udfald anvendes til positionsbestemmelsen. Dette kan ske på baggrund af den sidst kendte GPS-observation, samt hastigheden som fås fra accelerometrene ved integration af accelerationerne, og orienteringen af fartøjet, som fås fra gyroerne. For det andet er IMU'ens output-frekvens meget højere end GPS-modtagerens output-frekvens, og IMU'ens observationer kan således anvendes til interpolation af positioner imellem GPS-observationerne. For det tredje kan GPS, der har en god absolut nøjagtighed, anvendes til korrektion af IMU'en, der har en god relativ nøjagtighed, i real-time.

### **Tre GPS-modtagere**

Det er også en mulighed at anvende tre GPS-modtagere som et multiantennesystem til bestemmelse af både position og orientering af kameraet på baggrund af de indsamlede koordinater til de tre antenner.

### **Kalmanfilter**

Der kan også anvendes et kalmanfilter i MKS'et, som værktøj til beregning af position og orientering. Dette kan foregå real-time ved anvendelse af mindste kvadraters princip. Det er dog ikke nødvendigt at positionen og orienteringen af kameraet beregnes real-time, men der er andre fordele i at anvende et kalmanfilter:

- Forskellige typer observationer uanset nøjagtighed kan anvendes sammen.
- Kalmanfiltret kan fjerne støj og grove fejl fra observationerne, og således forbedre observationerne. Dette gøres ved antagelser om bilens bevægelsesmønster. Dette er også muligt, når der kun anvendes én observationstype.
- Det er ikke nødvendigt at anvende alle tidligere observationer ved beregning af de ønskede størrelser. Et output fra bestemmelsen af én position er input til beregning af næste position.
- Kalmanfiltret kan anvendes til Dead Reckoning, hvilket betyder, at hvis der i en periode ingen observationer findes, så kan kalmanfiltret estimere de manglende observationer. Dette gøres blandt andet på baggrund af bilens bevægelsesmønster, som opstilles i kalmanfiltret.

### **4.3.3 Valg af instrumenter til positioneringsenhed**

Valget af instrumenter er foretaget på baggrund af projektgruppens interesse samt de instrumenter, der er til rådighed.

Projektgruppen har fra begyndelsen af projektperioden haft interesse i at anvende en IMU sammen med GPS. IMU'en skulle anvendes til bestemmelse af kameraets orientering samt til bestemmelse

af kameraets position ved GPS-udfald. Projektgruppen har derfor foretaget nogle indledende undersøgelser af IMU'en, for at undersøge dennes fejlkilder. Projektgruppen har fundet ud af, at der er mange fejlkilder forbundet med anvendelsen af en IMU. IMU'en er således en kompleks størrelse, som vil være tidskrævende i forhold til de ting projektgruppen ellers ønsker at beskæftige sig med i projektet. De øvrige ting, som projektgruppen ønsker at berøre i projektet, vil, hvis projektgruppen vælger at arbejde med IMU'en i projektet, glide i baggrunden. Endvidere skal IMU'en synkroniseres med GPS og kamera, hvilket giver et yderligere problem, da projektgruppen hverken har software eller hardware til rådighed, der kan håndtere denne synkronisering. Projektgruppen har derfor set sig nødsaget til ikke at anvende IMU'en. De indledende undersøgelser, der er foretaget af IMU'en beskrives i bilag 4.

Det vælges altså at anvende tre GPS-modtagere, som multiantennesystem til bestemmelse af kameraets ydre orientering.

Projektgruppen har Leica GPS system 500 til rådighed, se figur 4.16. Med systemet er det muligt at måle relativ GPS, hvilket er den metode, som vælges i projektet. Da der skal bestemmes positioner til et bevægeligt MKS, vælges det at anvende kontinuert RTK, hvor hver epoke á et sekund betragtes som en position. Det vælges endvidere at anvende en GPS-tjeneste; GPS-referencen, hvorfra der modtages faseobservationer. Valget begrundes med, at det er et landsdækkende system,



Figur 4.16: GPS-modtager af mærket Leica System 500. [Leica, 2002, s. 12 og s. 15]

og det er muligt via mobiltelefon at modtage observationer, hvilket gør systemet anvendeligt i byområder, hvor et UHF-link nogle gange kan have svært ved at række. Derudover kræves det selvfølgelig, at GPS-antennerne har forbindelse til GPS-satellitterne. Når MKS'et skal anvendes i tætby-områder, jf. 4.1 *Indledende overvejelser om krav til systemet*, er det ikke hensigtsmæssigt, at der kun anvendes GPS til bestemmelse af position og orientering af kameraet, idet der ofte vil være risiko for at GPS-antennerne vil miste forbindelsen til satellitterne. At der er dårlige målebetingelser i byområder fremgår af Appendiks A, hvor der redegøres for nogle forsøg udført af lektor Peter Cederholm, Institut for Samfundsudvikling og Planlægning, AAU. Han har, ved at simulere nogle GPS-målinger i Matlab, undersøgt målebetingelser for måling med GPS i områder med høje bygninger. Det fremgår, at det med bare 10 m høje bygninger, kan det være svært at få kontakt til nok satellitter. Målebetingelserne forbedres en del ved simultan måling til GPS og Galileo, som introduceres i år 2008. Det er dog ikke godt kun at være afhængig af satellitpositionering, idet der altid vil kunne forekomme tilfælde, hvor forbindelsen til satellitterne mistes. Supplerende positioneringsinstrumenter, der ikke er afhængig af ydre omstændigheder vil altså være en fordel i et MKS, der skal anvendes i byområder. Der tænkes her for eksempel på en IMU. Alternativt kan der anvendes et kalmanfilter, som på baggrund af tidligere observationer samt viden om bilens bevægelsesmønster kan bestemme positioner, hvis forbindelsen mellem GPS-antenner og satellitter mistes. Kalmanfiltret kan også anvendes til at fjerne støj fra GPS-observationerne, og således forbedre positioner, der indsamles. Der anvendes dog hverken IMU eller kalmanfilter i opbygningen af MKS'et, men projektgruppen ser med fordel, at disse kan integreres senere ved forbedring af prototypen.

GPS-referencen kan udsende observationer med 1 Hz, hvilket er tilstrækkeligt til dette formål. Der måles således med 1 Hz. Hvis MKS'et kører 20 km/

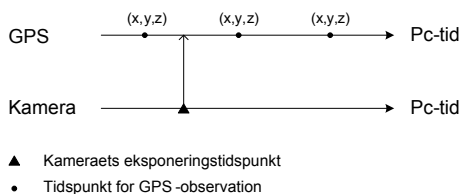
t, betyder det, at der bestemmes en position hver 5 m. Mellem disse observationer skal der således interpoleres positioner, så der kan bestemmes en position og orientering til kameraet til ethvert tidspunkt. Det er som før nævnt valgt, at MKS'et skal holde stille. For at simulere, at MKS'et kører, vil positions- og hældningsbestemmelsen blive beregnet ud fra én epoke.

Leica GPS System 500 er en to-frekvent modtager, hvilket har den fordel, at bestemmelsen af periodekonstanterne foregår hurtigere. [Dueholm, 2002, s. 73, s. 86]. Mistes kontakten til satellitterne under opmålingen, tager det således ikke så lang tid at initialisere, hvilket er en fordel i byområderne.

## 4.4 Positionsbestemmelse i et kørende MKS

Da projektgruppen regnede med, at MKS'et skulle køre, er der foretaget nogle undersøgelser omkring de muligheder, der er for synkronisering af kamera og GPS.

Som nævnt er der med Rollei kameraet mulighed for at foretage en fælles tidsstempling. Det betyder, at tidspunkterne for observationerne fra GPS'erne og tidspunktet for udløsning af kameraet skal sammenholdes. Dette kræver, at tidspunkterne registreres i en fælles enhed, så tidspunktet for observationerne kan knytte de forskellige observationer sammen. Projektgruppen har overvejet at anvende en PC som reference mellem tiden



Figur 4.17: Princippet for den fælles tidsstempling, der foregår med PC'en som reference, samt interpolationen af positioner til kameraets eksponeringstidspunkt..

for kameraets udløsning og GPS-observationernes tidsenhed, som er UTC-tid. Det betyder, at kameraet skal sende besked til PC'en, når det udløses og at GPS-modtageren skal sende besked til PC'en, når der modtages en GPS-observation.

Figur 4.17 viser princippet for den fælles tidsstempling.

GPS-modtagerne opsættes til at overføre UTC-tiden i hundrededele sekunder for GPS positionerne via en NMEA-streng til PC'ens com-port. UTC-tiden registreres i en log-fil på PC'en sammen med PC-tiden. Ved hjælp af toolboxen til Rollei kameraet kan der skrives et program i C++, hvor kameraet udløses og hvor PC'ens tid for kameraets udløsning ligeledes lagres i samme log-fil.

GPS-positionerne lagres i selve GPS-modtageren og beregnes efterfølgende i programmet "SKI-Pro". Ved at sammenligne tidspunkterne i log-filen med tidspunkterne til de beregnede positioner i SKI-PRO, kan kameraets position beregnes ved interpolation mellem GPS-positionerne.

Under konstrueringen af programmet til registrering af tidspunktet for kameraets udløsning løb projektgruppen ind i nogle problemer. Fra fabrikanten havde projektgruppen lånt en toolbox til programmeringssproget C++, hvori det var muligt at lave et program lige til projektgruppens formål. Det viste sig, at denne toolbox kun fungerede, hvis kameraet og PC'en var forbundet via et SCSI interface, hvilket ikke var til rådighed for projektgruppen.

Da der ikke er et SCSI interface til rådighed, er det altså endnu en hindring for at konstruere et kørende MKS, hvilket betyder at MKS'et skal holde stille.

Billederne kan altså heller ikke indsamles fra et kørende MKS, da det ikke er muligt at synkroni-

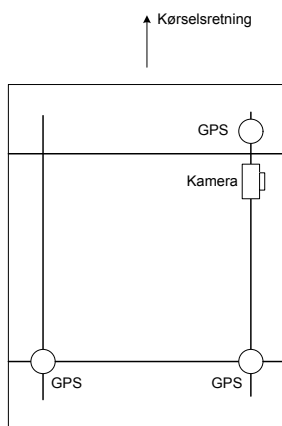
sere observationerne. Dette betyder, at MKS'et må holde stille, når billedet tages og GPS-positionerne måles. For at holde styr på GPS-positioner og de tilhørende billeder i prototypen noteres disse i en målebog.

## 4.5 Samlet system

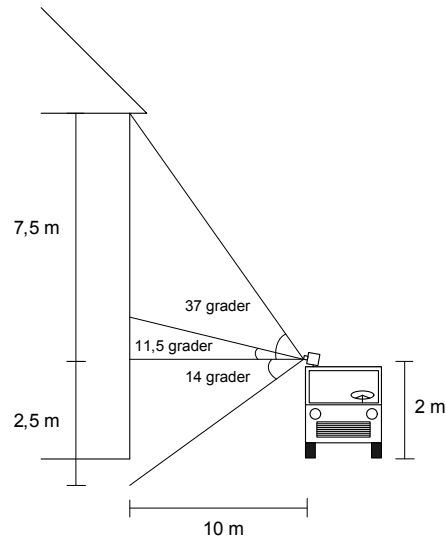
Det samlede system vil bestå af et kamera samt tre GPS-modtagere. GPS skal således bestemme både positionen og orienteringen af kameraet.

MKS'et skal anvende en bil som platform. I den forbindelse anvendes den bil, der ejes af Institut for Samfundsudvikling og Planlægning.

For at observationerne fra GPS-modtagerne kan anvendes til bestemmelsen af kameraets position og orientering, skal den indbyrdes afstand og orientering være kendt mellem GPS-antenne og kameraet, hvilket kan ske gennem en systemkalibrering af MKS'et. I den forbindelse bør sensorerne monteres på en fælles platform, således at de indbyrdes afstande og orienteringer forbliver konstante, selv om udstyret afmonteres bilen. De tre GPS-antenner skal udgøre et koordinatsystem, som kameraet skal bestemmes i forhold til. Koordinatsystemet kaldes bilens koordinatsystem, og definitionen af dette fremgår af Appendiks C, og det fastlægges senere i *5 Design af mobil kortlægningssystem*.



Figur 4.18: De tre GPS-antenner og kameraets montering på taget af køretøjet.



Figur 4.19: Forudsætninger for beregning af kameraets optimale montering på bilen, for at udnytte billedet bedst muligt.

Princippet for montering af instrumenterne på bilen ses på figur 4.18. På bilen findes to tagbøjler, hvorpå der lægges to aluminiumsbjælker. På den ene bjælke monteres en GPS-antenne i hver ende. Den tredje GPS-antenne monteres på den anden tagbøjle.

På aluminiumsbøjlen med de to GPS-antenner påsættes kameraet, således at det fotograferer bygningerne til højre for køretøjet. Kameraet monteres lidt skævt, for at udnytte billedet bedst muligt. Forudsætningerne for beregning af kameraets montering ses af figur 4.19. Det beregnes, at kameraet skal monteres med en hældning på 11,5 grader. Som nævnt før bør kameraet monteres højt, for at undgå biler, der holder foran facaderne. Dette er dog ikke gjort, da projektgruppen ved anvendelse af systemet bliver nødt til selv at udløse kameraet.

## 4.6 Delkonklusion

I kapitlet er der opstillet en række krav, som vil være hensigtsmæssige at implementere i et MKS. Endvidere har projektgruppen fra begyndelsen af

projektperioden haft nogle forestillinger om et "perfekt" MKS.

Et MKS skal kunne køre. I den forbindelse skal der anvendes et kamera med en hurtig optagefrekvens, således at MKS'et kan køre med en rimelig hastighed, der ikke sænker den yderligere trafik væsentligt. Billederne skal endvidere optages med overlap, så der kan dannes mosaikker. Det vil ofte være nødvendigt at danne mosaikker, da billederne optages fra et "dumt" kørende system. Der kan også anvendes flere kameraer, så større områder kan dækkes, hvilket gør systemet mere fleksibelt med hensyn til fotografering af høje bygninger. Som positioneringsinstrumenter havde projektgruppen i begyndelsen forestillet sig at integrere GPS og IMU til bestemmelsen af kameraets ydre orientering. Beregningerne kunne eventuelt foregå i et kalmanfilter. Disse instrumenter gøre systemet anvendeligt i byområder, hvor systemet skal anvendes, da IMU alene vil kunne bestemme positioner og orienteringer, hvis forbindelsen til GPS-satellitterne mistes.

Der er i dette kapitel foretaget en del afgrænsninger i forhold til konstrueringen af det perfekte MKS. For det første har projektgruppen set sig nødsaget til at konstruere et MKS, der holder stille. Årsagen er at det valgte kamera kun kan tage ét billede hvert femte sekund, hvilket betyder, at MKS'et ikke vil kan køre ret stærkt. Endvidere er der ikke software og hardware til rådighed, der kan synkronisere de forskellige instrumenter, hvilket er en forudsætning for konstruering af et kørende MKS.

Det er endvidere valgt at anvende tre GPS-modtagere som positioneringsinstrument, selvom projektgruppen fra begyndelsen havde planlagt at anvende en IMU. IMU'en viste sig dog at være en kompleks størrelse, som ville kræve for meget tid i forhold til de øvrige ting, projektgruppen gerne ville nå i projektet.

Det er også valgt at anvende kun ét kamera,

selvom der er mange fordele ved at anvende flere kameraer. Dette er valgt, da projektgruppen har afgrænset sig fra at lave billedmosaikker. Valget betyder, at systemet kun kan anvendes på mindre bygninger, eller at MKS'et skal anvendes i en større afstand fra facaderne end først antaget. Det medfører, at MKS'et ikke kan anvendes i smalle gader.

Som det ses er der foretaget nogle afgrænsninger. Det betyder dog blot, at MKS'et skal ses som en prototype, hvor nogle af principperne kan anvendes i senere udgaver af MKS'et.

# 5 Design af mobilt kortlægningsystem

I forhold til Struktureret Analyse indebærer systemdesignet den fysiske konstruktion af det givne system. Dette kapitel omhandler således konstruktionen af en prototype på det mobile kortlægningsystem.

Først gøres nogle generelle overvejelser omkring systemet, hvorefter opbygningen af systemet og systemkalibreringen beskrives. Endelig redegøres for en praktisk test af hældningsbestemmelsen af bilens koordinatsystem i referencekoordinatsystemet ved brug af multiantennesystemet bestående af de tre GPS-antenner.

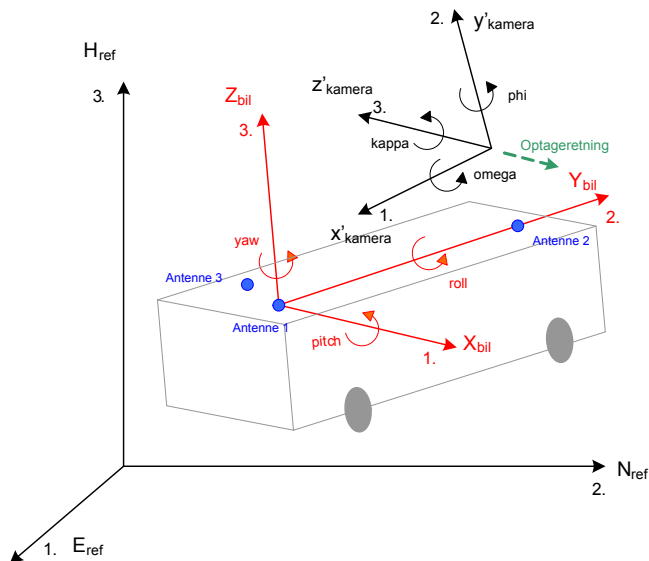
## 5.1 Systemets delfunktioner

Ideen med det mobile kortlægningsystem er som allerede nævnt, at indsamle en række facadebilleder og samtidig opnå kendskab til den ydre orien-

tering af kameraet i et referencekoordinatsystem i optageøjeblikket, da denne skal anvendes til opretning af facaderne i billederne. Der arbejdes i den forbindelse med tre koordinatsystemer: et referencekoordinatsystem, bilens koordinatsystem og kameraets koordinatsystem, jf. figur 5.1. Det der ønskes kendt, er således:

- Kameraets position og orientering i forhold til bilens koordinatsystem
- Position og orientering af bilens koordinatsystem i forhold til referencekoordinatsystemet.

Som det ses af figur 5.1, arbejdes der i forbindelse med MKS'et udelukkende i højrehåndskordinatsystemer. Orienteringen af bilens koordinatsystem i forhold til referencekoordinatsystemet bestemmes ved rotationerne pitch, roll og yaw, mens



Figur 5.1:  
De tre koordinatsystemer, der er involverede i systemet: Referencekoordinatsystemet, bilens koordinatsystem og kameraets koordinatsystem. Alle tre systemer er højrehåndskordinatsystemer. Alle rotationer er defineret positivt efter højrehandsreglen!

orienteringen af kameraets koordinatsystem i forhold til bilens koordinatsystem bestemmes ved rotationerne omega, phi og kappa. Der roteres om meddrejede akser.

Kameraets position og orientering i forhold til bilens koordinatsystem bestemmes én gang for alle ved en systemkalibrering af MKS'et, jf. 5.4 *Systemkalibrering*. Positionen og orienteringen af bilens koordinatsystem i forhold til referencekoordinatsystemet bestemmes for hver position, hvori der optages et billede, jf. 5.5 *Bestemmelse af bilens position og orientering i forhold til referencekoordinatsystemet*.

Når kameraets position og orientering i forhold til bilens koordinatsystem og bilkoordinatsystemets position og orientering i forhold til referencekoordinatsystemet er bestemt, beregnes den ydre orientering af kameraet i referencekoordinatsystemet efter følgende formler.

Først beregnes rotationsmatricen for rotationen fra kameraets koordinatsystem til referencekoordinatsystemet:

$$R_{Kamera(\omega, \varphi, \kappa)}^{Ref} = R_{Bil(yaw, pitch, roll)}^{Ref} \cdot R_{Kamera(\omega, \varphi, \kappa)}^{Bil}$$

hvor  $R_{Kamera(\omega, \varphi, \kappa)}^{Ref}$  er defineret:

$$R_{Kamera(\omega, \varphi, \kappa)}^{Ref} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

og

$R_{Bil(yaw, pitch, roll)}^{Ref}$  er rotationsmatricen for bilkoordinatsystemets rotation i forhold til referencekoordinatsystemet

$R_{Kamera(\omega, \varphi, \kappa)}^{Bil}$  er rotationsmatricen for kamerakoordinatsystemets rotation i forhold til bilens koordinatsystem

Derefter beregnes de ydre orienteringsparametre for kameraet i referencekoordinatsystemet:

$$\omega_{Kamera}^{Ref} = \tan^{-1} \left( \frac{-r_{23}}{r_{33}} \right)$$

$$\varphi_{Kamera}^{Ref} = \sin^{-1}(r_{13})$$

$$\kappa_{Kamera}^{Ref} = \tan^{-1} \left( \frac{-r_{12}}{r_{11}} \right)$$

og

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ N_0 \\ H_0 \end{bmatrix}_{Kamera}^{Ref} = \begin{bmatrix} E_B \\ N_B \\ H_B \end{bmatrix}_{Bil}^{Ref} + R_{Bil(yaw, pitch, roll)}^{Ref} \cdot \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{Kamera}^{Bil}$$

hvor

$\begin{bmatrix} E_B \\ N_B \\ H_B \end{bmatrix}_{Bil}^{Ref}$  er bilkoordinatsystemets origo i referencekoordinatsystemet

$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{Kamera}^{Bil}$  er kameraets projektionscenter i bilens koordinatsystem

For grundlæggende information om rotationsmatricer henvises til Appendiks D.

Den beregnede ydre orientering anvendes som beskrevet til geokodning og i forbindelse med opretning af facadebillederne. Geokodningen og opretningen af facadebillederne beskrives i 6 *Design af billedbehandlingsrutine*.

## 5.2 Valg af koordinatsystemer

I systemet anvendes en række forskellige koordinatsystemer, hvilket der kort redegøres for i det følgende. For uddybende oplysninger om de enkelte koordinatsystemer henvises til Appendiks C.

Inden design og konstruktion af MKS'et påbegyndes, skal det vælges hvilket referencekoordinatsystem, der skal arbejdes i. Som referencesystem har projektgruppen valgt at arbejde i UTM<sub>EUREF89</sub> zone 32 og højdesystemet DVR90. I princippet kunne der vælges hvilket som helst referencesystem, men i Danmark anbefales det af KMS at UTM<sub>EUREF89</sub> anvendes som den primære kortprojektion, mens DVR90 bør anvendes som højdesystem [www.kms.dk, 08.05.2004]. Det må derfor forventes, at 3D-bymodeller i fremtiden vil befinde sig i disse systemer. Gør de ikke det, skal de omregnes til ovennævnte system, for at kunne anvendes i dette MKS. I det følgende refereres der til UTM<sub>EUREF89</sub> zone 32 og højdesystemet DVR90 som et tredimensionalt koordinatsystem, og det benævnes referencekoordinatsystemet.

Projektgruppen har som før nævnt valgt at bestemme bilens position og hældninger ved hjælp af GPS-modtagere. GPS-modtagerne måler i EUREF89. Der er mulighed for at indstille GPS-modtagerne således, at de målte positioner for brugeren præsenteres i referencekoordinatsystemet. Dette kræver imidlertid, at modtagerne kender parametrene for koordinatomregningen mellem de enkelte koordinatsystemer. Projektgruppen har valgt at få GPS-positionerne angivet i EUREF89, således der ikke opstår tvivl om, hvilke parametre der er indtastet i de forskellige modtagere. Da projektgruppen ønsker at kende bilens position i referencekoordinatsystemet foretages der efterfølgende en koordinatomregning af GPS-koordinaterne fra EUREF89 til UTM<sub>EUREF89</sub> zone 32. Dette foregår ved hjælp af de af projektgruppen udarbejdede scripts: "omregning\_geo2grad.m" og "transformation\_EUREF892UTM32.m", der findes i bilag 1C. For nærmere oplysninger om koordinatomregningen fra EUREF89 til UTM<sub>EUREF89</sub> zone 32 henvises til Appendiks D.

Der anvendes ud over referencekoordinatsystemet en række lokale koordinatsystemer i forbindelse med det mobile kortlægningsssystem, hvoraf nogle allerede er nævnt. De anvendte

koordinatsystemer er billedets koordinatsystem, kameraets koordinatsystem, bilens koordinatsystem og totalstationernes koordinatsystem. Sidstnævnte system er et lokalt koordinatsystem defineret mellem to totalstationer i forbindelse med systemkalibreringen. Alle koordinatsystemer er højrehåndssystemer, og defineret i Appendiks C. Alle rotationer foregår positivt efter højrehandsreglen.

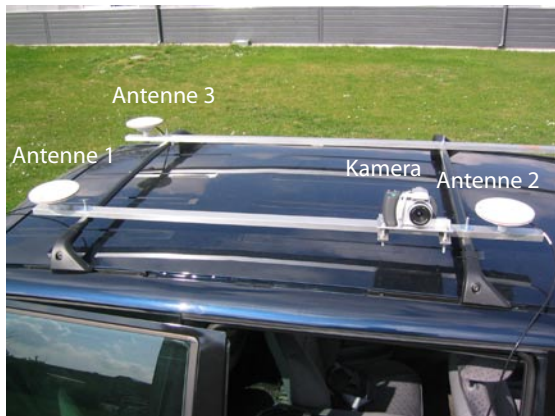
Som det ses af figur 5.1 foretages der en række rotationer, for at bestemme et koordinatsystem i forhold til et andet. Bilens koordinatsystem er defineret efter [Lu, 1995, s. 39], i Appendiks C. På samme måde har projektgruppen valgt at definere rotationerne omkring koordinatsystemets akser efter [Lu, 1995, s. 41-43]. Pitch er rotationen omkring bilens x-akse, roll er rotationen omkring bilens y-akse og yaw er rotationen omkring bilens z-akse. Disse tre rotationer definerer således sammen med positionen bilens koordinatsystem i forhold til referencekoordinatsystemet. Definitionen af kameraets rotationer i forhold til bilens koordinatsystem har projektgruppen valgt at kalde omega, phi og kappa, hvor omega er rotationen om kameraets x-akse, phi er rotationen om kameraets y-akse og kappa er rotationen om kameraets z-akse. Der er i princippet ingen forskel mellem pitch, roll og yaw og phi, omega og kappa, men projektgruppen har valgt disse betegnelser for ikke at forveksle rotationerne mellem de forskellige koordinatsystemer.

### 5.3 Konstruktion af det mobile kortlægningsssystem

I det følgende beskrives, hvordan prototypen af det mobile kortlægningsssystem er opbygget i praksis.

Kamera og GPS-antener er monteret på bilen, som vist på figur 5.2. På tværs af bilens to tagbøjler er der monteret to aluminiumsprofiler. På disse er monteret henholdsvis én GPS-antenne og to GPS-antener samt et kamera. GPS-antenerne





Figur 5.2: Opbygning af det mobile kortlægningsystem. Billedet viser de tre GPS-antenner og kameraet monteret på bilens tag.

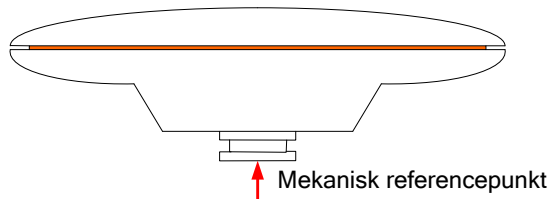
er monteret på aluminiumsprofilerne ved hjælp af en skrue og et cylindrisk nylonmellemsykke, jf. figur 5.3.

Der er flere konstruktionsmæssige forhold, som har indflydelse på nøjagtigheden af GPS-positionerne. Det gælder blandt andet bilens hældning i målingsøjeblikket, monteringen af GPS-antennerne samt afstanden mellem antennerne.

Ved GPS-måling forudsættes normalvis, at antennerne er placeret parallelt med lodlinjen. GPS-modtagerne måler til fasecentret inde i antennen og den lodrette afstand fra antennens mekaniske referencepunkt (MRP), jf. figur 5.4, til fasecentret trækkes automatisk fra GPS-observationen i GPS-modtagerens software. Herved fås en højde til det mekaniske referencepunkt som output for brugeren. Afstanden mellem fasecenter og mekanisk referencepunkt kendes ikke nøjagtigt, da den ikke er oplyst af producenten. For at alligevel at kunne regne lidt på, hvilke unøjagtigheder der fås som følge af den anvendte metode til påsætning



Figur 5.3: GPS-antennen er monteret på aluminiumsprofilen. Som mellemstykke er indsat et stykke af nylon.



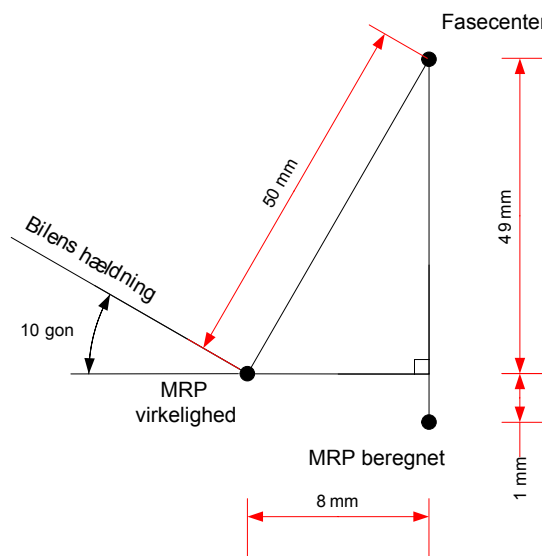
Figur 5.4: Det mekaniske referencepunkt på GPS-antennen. Her er antennehøjden lig nul. Fasecentret befinder sig et sted inde i antennen. Producenten har ikke opgivet hvor fasecentret befinder sig.

af antennerne på bilen, har projektgruppen skønnet afstanden mellem fasecenter og mekanisk referencepunkt. Afstanden formodes efter måling med lineal på GPS-antennen at være mellem 3 og 5 cm.

Ved GPS-måling med den fremstillede prototype vil bilen sjældent holde fuldstændig vandret, hvorfor der vil fremkomme en fejl i målingen af det mekaniske referencepunkt. Problemet er illustreret i figur 5.5. Det ses, at en hældning af bilen på 10 gon og en afstand mellem fasecenter og mekanisk referencepunkt på 5 cm betyder en fejl på ca. 1 mm i højden og ca. 8 mm i planet, hvis bilen er drejet om enten x- eller y-aksen på bilen. Den beskrevne fejl opstår ved alle tre GPS-antenner og vil være den samme for alle antenner, såfremt disse er placeret parallelt med hinanden. Fejlen har derfor kun betydning for positionsbestemmelsen og ikke hældningsbestemmelsen. Da positionen, som beskrevet i 4.1 *Indledende overvejelser om krav til systemet*, blot skal være bedre end 20 cm, har den beskrevne fejl ingen afgørende betydning.

Den benyttede monteringsmetode betyder, at antennerne ikke er monteret parallelt i forhold til hinanden, jf. figur 5.6. Det vil sige, at de ikke står fuldstændig vinkelret på bilens koordinatsystem,

der er defineret af de tre mekaniske referencepunkter på GPS-antennerne. Dette giver en fejl af samme form som fejlen fremkommet på grund af bilens hældning. Forskellen er blot, at fejlen ikke er den samme for alle GPS-antener, da de vender hver sin vej. Derfor får denne fejl indflydelse på både positions- og hældningsbestemmelsen. Da hældningen af antennerne på prototypen imidlertid er små, vurderes det, at fejlen er ubetydelig.



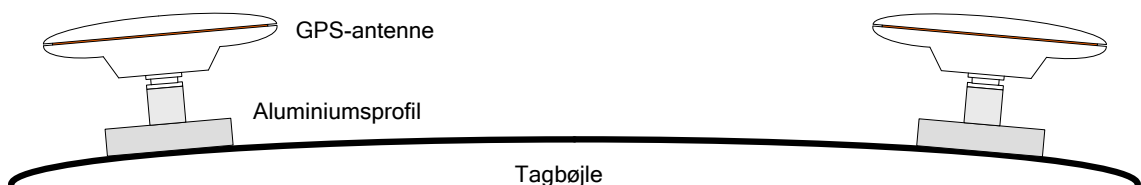
Figur 5.5:

Illustration af den fejl der opstår som følge af, at antennerne ikke er placeret parallelt med lodlinen. Det mekaniske referencepunkt (MRP) beregnes lodret fra fasecenteret, hvorfor der opstår fejl. Er afstanden fra fasecenter til MRP 5 cm og hælder bilen 10 gon fra vandret omkring x- eller y-aksen på bilen opstår en fejl i planet på ca. 8 mm og en fejl i højden på ca. 1 mm.

Som nævnt har afstanden mellem antennerne også betydning for nøjagtigheden af hældningsbestemmelsen. Årsagen er, at GPS-observationerne ikke er fejlfri. Generelt er det hensigtsmæssigt, at de tre GPS-antener befinder sig så langt væk fra hinanden som muligt, og at de tre antenner ikke ligger på samme linje. Ved konstruktion af prototypen, er den opnåelige afstand mellem antennerne begrænset af bilens længde og bredde og en let praktisk metode til påsætningen. Prototypen er derfor designet, så GPS-antennerne er placeret i en vinkelformation, jf. figur 5.2. Afstanden mellem GPS-antenne 1 og GPS-antenne 2 er ca. 137,3 cm og afstanden mellem GPS-antenne 1 og GPS-antenne 3 er ca. 76,3 cm. Ved denne antennekonfiguration er der ifølge 5.6.1 *Teoretisk opnåelig spredning* mulighed for at opnå en teoretisk spredning på roll og yaw på henholdsvis  $\sigma_{roll}=1,75$  gon,  $\sigma_{pitch}=1$  gon,  $\sigma_{yaw}=0,6$  gon, ved spredninger på GPS-observationerne i planet på 1 cm, og spredninger på GPS-observationer i højden på 1,5 cm. Vurderes disse spredninger i forhold til de ønskede 4 gon, er spredningerne acceptable, idet de således også giver plads til andre fejlbidrag fra for eksempel systemkalibreringen.

GPS-antennerne er tilsluttet hver sin modtager, som befinder sig inde i bilen.

Til påmontering af kameraet er der fremstillet en anordning, med henblik på at kunne af- og påmontere kameraet under projektperioden uden at kameraets ydre orientering i forhold til bilens koordinatsystem ændres i en sådan grad,



Figur 5.6: GPS-antennerne monteret på tagbøjlerne. Da tagbøjlen buer, er antennerne placeret ikke parallelt med hinanden, hvilket medfører en fejl ved positionering. Tagbøjlen er set fra bag bilen.

at denne skal bestemmes på ny. I 5.4.2 *Ydre orientering* testes om af- og påmontering i praksis har nogen betydning for bestemmelsen af den ydre orientering af kameraet.

Som beskrevet i 4.5 *Samlet system* skal kameraet efter beregning have en hældning på ca. 11,5 grader eller ca. 13 gon i forhold til bilens koordinatsystem for at udnytte billedet bedst muligt i en afstand til facaden på 10 m. For at kunne indstille kameraets hældning i praksis er konstruktionen til montering af kameraet udformet således, at det er muligt at ændre hældningen af kameraet, jf. figur 5.7. Kameraets hældning indstilles i en situation, hvor bilen befinder sig ca. 10 meter fra en facade. Efter systemkalibreringen skal kameraet forblive



*Figur 5.7:*  
Kameraet er monteret på en sådan måde, at det så vidt det er muligt sidder ens efter af- og påmontering, og at der kan vælges forskellige indstillinger af hældningen på kameraet inden systemkalibreringen.

i denne position. Ændres hældningen, skal der foretages en ny kalibrering.

## 5.4 Systemkalibrering

Formålet med systemkalibreringen er at fastlægge bilens koordinatsystem, GPS-antennernes placering i bilens koordinatsystem og kameraets ydre orientering i bilens koordinatsystem. I den forbindelse skal også den indre orientering af det anvendte kamera tages i betragtning. I det følgende beskrives, hvordan systemkalibreringen er gennemført. Først redegøres kort for forhold omkring den indre orientering. Derefter redegøres for, hvordan bilens koordinatsystem er defineret ved fremskæring, og hvordan de ydre orienteringsparametre for kameraet er bestemt i bilens koordinatsystem.

### 5.4.1 Indre orientering

Det anvendte digitale kamera Rollei d7 metric er et metrisk kamera og har derfor stabile og kendte indre orienteringsparametre. Disse er opgivet i en kalibreringsrapport medfølgende kameraet ved anskaffelse i år 2000. Skal kameraet anvendes til præcisionsfotogrammetri, er det fornuftigt at foretage en kalibrering af kameraet ind imellem. Da det imidlertid ikke er tilfældet i denne sammenhæng, er en kalibrering mindre nødvendig. Af tidsmæssige årsager har projektgruppen derfor valgt at benytte de indre orienteringsparametre opgivet i kameraets kalibreringsrapport. Havde der i stedet været anvendt et ikke metrisk kamera; for eksempel et amatør still kamera eller et videokamera, havde kalibreringen været nødvendig. En sådan kalibrering bør omfatte bestemmelse af kamerakonstant ( $c$ ) ved den anvendte zoom- og fokuseringsindstilling, hovedpunkt ( $H$ ), linsefortegning og eventuelt pixlernes affinitet.

Anvendes et amatørkamera eller et videokamera er det vigtigt at kamerakalibreringen foretages med jævne mellemrum, idet den type kameraer ikke er stabile.

Kalibreringsrapporten fra Rollei indeholder kun oplysninger om kamerakonstant, hovedpunkt og linsefortegning.

### 5.4.2 Ydre orientering

Det der ønskes fastlagt, er bilens koordinatsystem samt kameraets ydre orienteringsparametre ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) i forhold til bilens koordinatsystem. De ydre orienteringsparametre bestemmes ved fotogrammetrisk tilbageskæring. I det følgende redegøres der først for teorien bag fotogrammetrisk tilbageskæring, hvorefter der følger nogle indledende overvejelser omkring den praktiske gennemførelse af systemkalibreringen. Derefter beskrives, hvordan paspunkterne og GPS-antennerne bestemmes ved hjælp af terrestrisk rumlig fremskæring, og hvordan disse transformeres over i bilens koordinatsystem. Efterfølgende beskrives

den praktiske gennemførelse af den fotogrammetriske tilbageskæring. Endelig vurderes resultatet af kalibreringen af det samlede system.

## Teori bag fotogrammetrisk tilbageskæring

Der findes flere metoder til orientering af enkeltbilleder. Det drejer sig for eksempel om fotogrammetrisk tilbageskæring på baggrund af Direkte Lineær Transformation (DLT) samt stråleligningerne (stråleudjævning).

Formlerne der anvendes ved DLT minder om stråleligningerne:

$$x' = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$

$$y' = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$

hvor

$x'$  og  $y'$  er billedkoordinater

$X, Y, Z$  er kendte paspunkter

$L_1$ - $L_{11}$  er de ubekendte transformationsparametre

Benyttes DLT til bestemmelse af de ubekendte ydre orienteringsparametre, kræves koordinaterne til mindst seks XYZ-paspunkter. Ideen bag DLT er, at alle observationer; det vil sige billedkoordinater og objektkoordinater til paspunkterne betragtes som fejlfrie. Derved bliver observationsligningerne lineære. Det betyder, at der ikke kræves foreløbige koordinater, hvorfor det ikke er nødvendigt at iterere sig frem til den bedste løsning. Når de ubekendte parametre er bestemt, kan hovedpunktet, kamerakonstanten samt parametrene for den ydre orientering bestemmes på baggrund af parametrene  $L_1$ - $L_{11}$ . DLT har dog den klare ulempe, at der ikke kan findes en entydig løsning, såfremt paspunkterne ligger på ét og samme plan. Sammenlignet med stråleudjævning er resultatet af denne metode mindre nøjagtigt, idet problemet, som oprindeligt er ulineært, behandles som om, det er lineært. Metoden anvendes typisk i forbindelse med ikke-metriske kameraer, idet den

indre orientering nemt bestemmes, og kravet til nøjagtigheden nødvendigvis ikke er så stort.

For yderligere information om DLT henvises til [Luhmann, 2000]

Benyttes stråleudjævning til bestemmelse af de ubekendte ydre orienteringsparametre, og kendes den indre orientering, kræves kendskab til koordinaterne til mindst tre XYZ-paspunkter, men flere er at foretrække, idet de ydre orienteringsparametre derved overbestemmes. I praksis anvendes derfor også altid flere paspunkter.

Stråleligningerne ser i det aktuelle tilfælde ud som følger:

$$x' = x'_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y' = y'_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

hvor

$x'$  og  $y'$  er billedkoordinater til paspunkter

$x'_0$  og  $y'_0$  er billedkoordinater til hovedpunktet

$c$  er kamerakonstanten

$X_0, Y_0, Z_0$  er projektiionscentret i bilens koordinatsystem

$X, Y, Z$  er koordinater til paspunkter i bilens koordinatsystem

$r_{11}$  til  $r_{33}$  er elementer i rotationsmatricen  $R_{Kamera}^{Bil}(\omega, \varphi, \kappa)$

Ovenstående formler forudsætter, at der er korrigeret for linsefortegning.

For at få en entydig løsning er det vigtigt, at paspunkterne ikke ligger på linje. Det er optimalt at så meget som muligt af billedet er dækket af paspunkter, hvorved den bedste geometri opnås.

Desuden kræves foreløbige værdier for de ydre orienteringsparametre. De foreløbige orienteringsparametre kan dog ofte være vanskelige at fremskaffe.

[Atkinson, 1996, s. 24-25, s. 32-33], [Luhmann, 2000, s. 235-266]

Ved fotogrammetrisk tilbageskæring er der oprindeligt fire observationer per observationsligning; nemlig  $(x_0, X, Y, Z)$  eller  $(y_0, X, Y, Z)$ , hvor den generelle udjævningsteknik kan anvendes til løsning af udjævningsproblemet, jf. appendiks F. Denne metode er dog ret besværlig, hvorfor denne ikke anvendes i praksis. I stedet vælges det ofte at betragte objektkoordinaterne til paspunkterne  $(X, Y, Z)$  som fejlfrie i stråleligningerne, hvorfor disse indgår som konstanter i udjævningen. Udjævningen kan herefter foregå på normal vis ved udjævning af indirekte observationer, jf. appendiks F. Det er denne metode projektgruppen har valgt at anvende. Det er dog muligt at forfine udjævningen ved at anvende koordinatobservationer til paspunkterne sammen med stråleligningerne. Herved tages hensyn til spredningen på objektkoordinaterne til paspunkterne, hvilket selvfølgelig er den bedste løsning. Også i dette tilfælde kan der udjævnes på almindelig vis ved udjævning af indirekte observationer.

For hvert paspunkt opstår to observationsligninger. Da observationsligningerne er ulinære, skal disse lineariseres, hvorefter de indgår i en iterativ udjævning efter mindste kvadraters princip. Resultatet af udjævningen vurderes på normal vis gennem spredningen på vægtenheden, residua-

ler og spredningen på de ubekendte. Det er også muligt at foretage kontrolmålinger ved måling af kontrolpunkter eller kontrolafstande i billedet.

### Indledende overvejelser

For at bestemme paspunkterne i bilens koordinatsystem, skal både GPS-antennen, som definerer bilens koordinatsystem, og paspunkterne indmåles i samme system. Rent praktisk foretages målingerne til bestemmelsen af den ydre orientering ved at bilen påmonteret de tre GPS-antenner og kamera parkeres foran en mur med målemærker, hvorefter både målemærker og GPS-antenner indmåles samtidigt ved terrestrisk rumlig fremskæring. Desuden tages et billede af muren, som senere skal anvendes ved den fotogrammetriske tilbageskæring. Det vælges at anvende en mur på Fibigerstræde 14 til formålet, jf. figur 5.8. Muren anvendes normalt til øvelser i forbindelse med fotogrammetriundervisningen på AAU, hvorfor der allerede er påsat målemærker på muren. Stedet har endvidere den fordel, at der er en forhøjning i terrænet mellem muren og bilen, jf. figur 5.8. Fra forhøjningen er det muligt at se bilens tag, hvorfor det er muligt let at indmåle GPS-antennen på bilen.



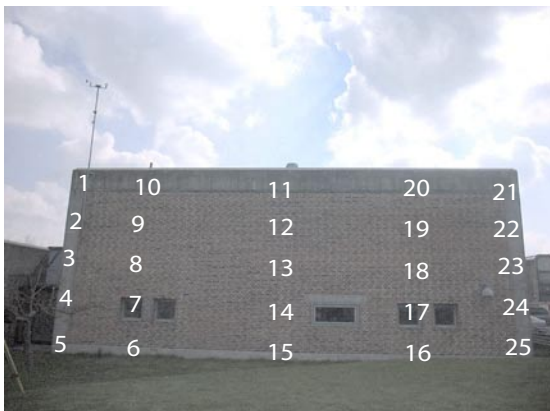
Figur 5.8: Situation ved indmåling af paspunkter på mur og GPS-antenner på bilen. Opmålingen sker ved fremskæring fra to totalstationer.

Ved fotogrammetrisk tilbageskæring har både placeringen og antallet af paspunkter som før nævnt betydning for kvaliteten af bestemmelsen af den ydre orientering. På muren findes 25 punkter, jf. figur 5.9. I praksis er der benyttet 22 punkter til bestemmelse af den ydre orientering. Punkterne 1 og 2 kunne ikke måles ved fremskæring fra målestation 1, da et jernrør på muren skygger for punkterne. Punkt 25 kan ikke ses i de optagne billeder på grund af forhøjningen mellem bilen og muren.

For at bestemme den optimale placering af kameraet i forhold til muren under kalibreringen, foretages beregning af den minimale afstand mellem mur og kamera, således hele muren kan være i billedet. Der tages udgangspunkt i normaltildet, selvom kameraet har en hældning i forhold til vandret. Kameraet vender som før beskrevet med den lange billedside horisontalt og billedets dimensioner er 7,17 mm  $\times$  8,96 mm. Skal hele muren indeholdes i billedet horisontalt, beregnes den mindste objektafstand:

$$a_H = c \times \frac{X}{x'}$$

hvor  
c er kamerakonstanten  
X er murens brede  
x' er billedets horisontale længde



Figur 5.9: Den anvendte mur med 25 målemærker.

Skal hele muren indeholdes i billedet vertikalt, beregnes den mindste objektafstand:

$$a_v = (H_{mur} - H_{kamera}) \times \frac{2c}{y'}$$

hvor  
c er kamerakonstanten  
 $H_{mur}$  er murens højde  
 $H_{kamera}$  er kameraets højde  
y' er billedets vertikale længde

I dette tilfælde er  $c=7,57$  mm,  $x'=8,96$  mm,  $y'=7,17$  mm,  $X \approx 14$  m,  $H_{mur} \approx 7$  m og  $H_{kamera} \approx 1,5$  m. Det betyder at den mindste afstand  $a_H=11,8$  m og  $a_v=11,6$  m. Samlet betyder det en mindste afstand på 11,8 m. I praksis blev objektafstanden ved kalibreringens gennemførelse ca. 14 m på grund af den førnævnte forhøjning, hvorfor muren let kan være i billedet. Den valgte afstand og hældning på kameraet betyder, at der i den øverste del af billederne anvendt til kalibrering, ikke findes paspunkter, hvilket selvfølgelig ikke er optimalt, jf. figur 5.9. Den manglende udnyttelse af hele billedet ved systemkalibrering kan betyde, at den ydre orientering af kameraet i bilens koordinatsystem bestemmes med en mindre fejl.

Inden kalibreringen finder sted, kontrolleres det, om målemærkerne kan ses i billederne. Målemærkerne har en diameter på 8,5 cm i virkeligheden og er udformet som vist i figur 5.10. En tommelfingerregel siger, at der skal 2-3 pixels til, for at et objekt kan ses i billedet. De tre pixels kan omregnes til en diameter d i virkeligheden ved følgende formel:

$$d = p \times n \times \frac{a}{c}$$

hvor  
p er pixelstørrelsen  
n er antallet af pixler  
a er objektafstanden  
c er kamerakonstanten



I dette tilfælde er  $p=7\ \mu\text{m}$ ,  $n=3$ ,  $a\approx 11\ \text{m}$  og  $c=7,57\ \text{mm}$ . Dette giver en diameter  $d$  på  $3\ \text{cm}$ . I praksis blev afstanden til muren  $14\ \text{m}$ , hvilket giver en diameter af målemærket på  $3,9\ \text{cm}$ . Det kan deraf konkluderes, at målemærkerne bør kunne ses i billeder ved en objekt afstand på  $14\ \text{m}$ .

Under kalibreringen tages en række billeder af muren med paspunkter. Kameraet er monteret på bilen under kalibreringen. Der tages først ét billede med henblik på selve kalibreringen. Derefter af- og påmonteres kameraet, hvorefter der tages endnu et billede. Denne procedure gentages endnu engang, således at der i alt er tre billeder. Billederne kaldes i det følgende for billede A, B og C. Der foretages en fotogrammetrisk tilbageskæring på baggrund af alle tre billeder, for at undersøge, hvilken indflydelse det har, at kameraerne af- og påmonteres mellem de forskellige forsøg.



Figur 5.10:  
Eksempel på de anvendte målemærker.

### Terrestrisk rumlig fremskæring

Som allerede nævnt skal der bestemmes koordinater til paspunkterne på muren og GPS-antennerne på bilen. Disse koordinater kan bestemmes på flere forskellige måder, alt efter hvilken nøjagtighed, der ønskes. Projektgruppen mener at en nøjagtighed på  $2\text{--}3\ \text{mm}$  er tilstrækkelig i dette tilfælde. For at opnå dette kan der anvendes følgende metoder: Fotogrammetrisk måling i en stereomodel, måling i en punktsky fremkommet ved laserscanning, polær reflektorfri måling med totalstation og endelig terrestrisk rumlig fremskæring med totalstation.

Projektgruppen har før anvendt fotogrammetrisk måling i en stereomodel og har opnået en nøjagtighed, der er tilstrækkelig til dette formål. Metoden findes dog omstændigt i forhold til formålet.

Under et tidligere projekt har projektgruppen erfaret, at der ved laserscanning med instrumentet Cyrax 2500 i afstande under  $50\ \text{m}$  kan opnås en nøjagtighed på veldefinerede punkter på  $2,2\ \text{mm}$  [Frederiksen m.fl., 2003, s. 123]. Metoden findes dog for besværlig i forhold til de få punkter, der skal indmåles. Metoden vil blandt andet kræve, at nylonmellestykke mellem GPS-antennerne og aluminiumsprofilerne skal modelleres i for eksempel det medfølgende software til laserscanneren, inden koordinaterne til GPS-antennerne kan bestemmes. Endvidere kan de eksisterende paspunkter på muren ikke anvendes, hvorfor der skal anvendes særlige målemærker, som er genkendelige for laserscanneren.

Projektgruppen har ved øvelse med terrestrisk rumlig fremskæring under lignende forhold opnået en nøjagtighed på paspunkterne på ca.  $1\ \text{mm}$ . Samme nøjagtighed kan opnås ved polær måling afhængigt af antal satser og opmålingsgeometri.

På baggrund af ovenstående overvejelser, anses terrestrisk rumlig fremskæring og polær måling, som værende de mest anvendelige metoder til indmåling af paspunkterne og GPS-antennerne. For systemkalibreringen vil det sikkert ikke betyde noget hvilken af de to metoder, der vælges. Projektgruppen har således valgt at anvende terrestrisk rumlig fremskæring til bestemmelse af paspunkter og GPS-antennere.

Den terrestriske rumlige fremskæring gennemføres fra to stationer, jf. figur 5.8. Der anvendes to totalstationer af typen TCR1105 til formålet. Specifikationerne for instrumenterne fremgår af figur 5.11. Med disse specifikationer kan den ønskede nøjagtighed opnås.

Ved terrestrisk rumlig fremskæring måles afstanden mellem de to totalstationer, for at bestemme målestokken i systemet. Afstanden kan bestemmes med for eksempel stålmålebånd, basislægte eller EDM-afstandsmåling med totalstation. For den fotogrammetriske tilbageskæring er det prin-

Spredning på en retning (1sats)	1,5 mgon
Grundfejl	2 mm
Afstandsafhængig fejl	2 ppm

Figur 5.11: *Specifikationer for Leica TCR1105. Grundfejlen gælder kun ved brug af reflektor [Leica, 1999, s. 122-124].*

cielt lige meget, hvor godt afstanden er målt, idet det netop kun drejer sig om en målestok. Da der også måles til GPS-antennen for at bestemme bilens koordinatsystem, bør målestokken dog ikke variere betydeligt fra 1. Projektgruppen har valgt at anvende totalstationernes EDM-udstyr til afstandsmålingen, da den nøjagtighed, som hermed kan opnås, findes tilstrækkelig.

Paspunkter og GPS-antenner er bestemt ved fremskæring med to satser. Der måles med gennemslag for at eliminere systematiske fejl.

Der kan beregnes en optimal opmålingsgeometri jf. formlerne i Appendiks B. Teorien siger, at den optimale geometri opnås ved en topvinkel på ca. 120 gon, hvorfor denne topvinkel tilstræbes ved fremskæringen.

Beregningerne af koordinaterne til paspunkterne og GPS-antennen er foretaget efter formlerne i Appendiks B og beregningerne af fremskæringen ses i bilag 1D.

Med kendskab til afstande mellem totalstation og indmålte punkter samt topvinkler, kan de forventede nøjagtigheder for bestemmelsen af paspunkterne og GPS-antennen i det aktuelle tilfælde beregnes efter formlerne i Appendiks B. Den forventede plane punktnøjagtighed på GPS-antennen er 1,2-1,3 mm. Den forventede plane punktnøjagtighed for paspunkterne på muren er 1,4-2,3 mm. Beregningerne fremgår af "noejagtighed\_fremskaering.xls" i Bilag 1D.

Da koterne til paspunkterne og GPS-antennen er bestemt fra to opstillingspunkter, er de målt med én overbestemmelse. Det er derfor muligt at kontrollere målingerne. Det viser sig, at afvigelsen mellem paspunkterne bestemt fra henholdsvis opstillingspunkt 1 og 2 i koten er 0-1,2 mm. Tilsvarende er afvigelsen for GPS-antennen 0-1,6 mm, og afvigelserne accepteres. Beregningerne fremgår af "Beregn\_koter.xls" i Bilag 1D.

Efter måling og beregning af koordinaterne til paspunkterne og GPS-antennen er der foretaget en række kontrolmålinger med stålmålebånd og tommestok af afstande mellem paspunkter og afstande mellem GPS-antennen. Det viser sig, at afstandene beregnet på baggrund af de beregnede koordinater stemmer overens med kontrolmålingerne inden for 1 mm, hvilket er tilfredsstillende.

### Transformation til bilens koordinatsystem

Efter fremskæringen er alle koordinater til paspunkter og GPS-antennen beregnet i totalstationernes koordinatsystem, der er et lokalt koordinatsystem defineret af de to opstillingspunkter, jf. Appendiks C. Paspunkterne og antennen ønskes imidlertid bestemt i bilens koordinatsystem, idet kameraet skal bestemmes i bilens koordinatsystem, og de paspunkter, der skal anvendes ved den fotogrammetriske fremskæring, skal således være beliggende i bilens koordinatsystem. Der foretages derfor en transformation af koordinaterne til paspunkterne og GPS-antennen fra totalstationernes koordinatsystem til bilens koordinatsystem. Fællespunkterne er de tre GPS-antennen. Koordinaterne til GPS-antennen i bilens koordinatsystem kendes imidlertid ikke, men projektgruppen har valgt at tildele antennen følgende koordinater: Antenne 1(0,0,0), Antenne 2(0,y,0) og Antenne 3(x,y,0) efter [Lu, 1995, s. 39]. Ved transformationen foretages først en flytning og dernæst foretages de tre rotationer. Transformationen foretages som beskrevet i det følgende.



Først flyttes koordinaterne til antennerne i totalstationernes koordinatsystem til origo i bilens koordinatsystem, der defineres af antenne 1. Dette gøres ved at trække koordinaten for antenne 1 i totalstationernes koordinatsystem fra alle punkter i totalstationernes koordinatsystem. Således er de to koordinatsystemer placeret i forhold til hinanden, som det ses af figur 5.12.

Derefter skal der foretages tre rotationer. Rotationerne findes ved at rotere om én akse ad gangen, hvorefter der roteres om den pågældende akse. Det betyder derfor, at de to efterfølgende rotationer om de øvrige akser foregår om allerede drejede akser. Rotationerne beregnes ved at anvende tangens samt koordinaterne til antenne 2 og 3 i totalstationens koordinatsystem. Rotationsrækkefølgen er i princippet ligegyldig, men projektgruppen har valgt at rotere om z-aksen først, derefter om x-aksen og til sidst om y-aksen.

Først roteres altså om z-aksen. Med udgangspunkt i koordinaten til antenne 2 i totalstationens flyttede koordinatsystem beregnes vinklen  $\kappa$ , jf. figur 5.12, efter følgende formel:

$$\kappa = \arctan\left(\frac{dx}{dy}\right)$$

Vinklen  $\kappa$ , anvendes efterfølgende i følgende rotationsmatrice:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

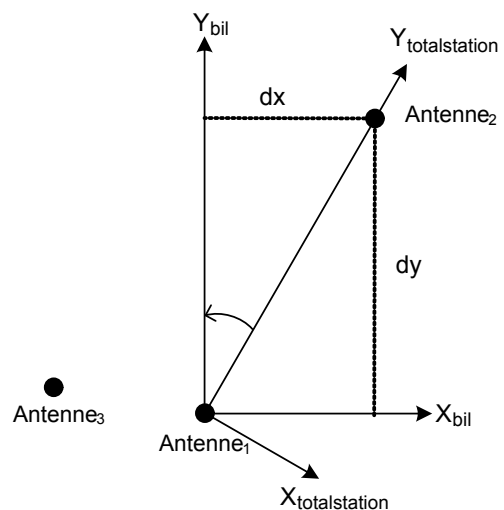
For nærmere information om rotationsmatricers udseende henvises til appendiks D.

Rotationsmatricen  $R_z$  ganges på de flyttede koordinater i totalstationens koordinatsystem efter følgende formel:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R_z \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \text{Flyttede koordinater}$$

Her indikerer  $[X', Y', Z']$  at koordinaterne er drejet én gang. Koordinaterne får således nye X- og Y-koordinater. De nye koordinater  $[X', Y', Z']$  til antenne 2 anvendes ved beregning af rotationen omkring X-aksen og beregningen af  $[X'', Y'', Z'']$ .  $[X'', Y'', Z'']$  indikerer at der er roteret to gange. På lignende vis foretages den sidste rotation omkring Y-aksen.

Ovenstående beregninger er implementeret i Matlabscriptet "kalibrering\_transformation.m" i Bilag 1C. Resultatet er alle koordinater til paspunkter og GPS-antenner i bilens koordinatsystem. Koordinaterne er nu klar til fotogrammetrisk tilbageskæring.



Figur 5.12: Rotationen  $\kappa$ , om z-aksen beregnet ud fra x- og y-koordinaterne til antenne 2.

## Praktisk gennemførelse af fotogrammetrisk tilbageskæring

Som før nævnt har projektgruppen kendskab til to metoder til fotogrammetrisk tilbageskæring. I dette projekt befinder samtlige paspunkter sig på samme plan eller tæt derved, hvorfor DLT ikke er anvendelig i dette tilfælde. Projektgruppen har således valgt at benytte fotogrammetrisk tilbageskæring ved stråleudjævning til bestemmelse af kameraets ydre orienteringsparametre.

Det skal i den forbindelse nævnes, at stråleudjævningen kan udvides til også at bestemme den indre orientering af kameraet. Dette kræver dog ved enkeltbilledemetoden, at paspunkterne er placeret i et rumligt testfelt og ikke på samme plan, som det er tilfældet i dette projekt. Desuden skal de indre orienteringsparametre inkluderes i stråleligningerne som ubekendte. Bestemmes hovedpunktet samt kamerakonstanten på denne vis, kræves i alt fem paspunkter. Ønskes også linsefortegningen bestemt, kræves i alt seks paspunkter. [Luhmann, 2000, s. 231]. I praksis skal der dog anvendes flere paspunkter, for at opnå et godt resultat.

I praksis foretages fotogrammetrisk tilbageskæringen i Matlab scriptet "tilbageskaering.m", jf. Bilag 1C. Objektkoordinaterne til paspunkterne i bilens koordinatsystem kendes fra fremskæringen, mens billedkoordinaterne er bestemt i programmet CDW fra Rollei. Projektgruppen har også forsøgt at anvende dette software til den fotogrammetriske tilbageskæring, hvilket også lykkedes. Resultaterne anvendes dog ikke i det videre arbejde, idet det ikke præcist fremgår af hverken manual eller hjælpefunktioner, hvilken rotationsrækkefølge og hvilke vinkler der præcist bestemmes i CDW. Denne information er vigtig for projektgruppen, idet drejningsmatricen og den beregnede ydre orientering i bilens koordinatsystem skal anvendes i det videre arbejde med positionering af billederne. Det vælges at anvende rotationsrækkefølgen beskrevet i [Brande-Lavridsen, 1993,

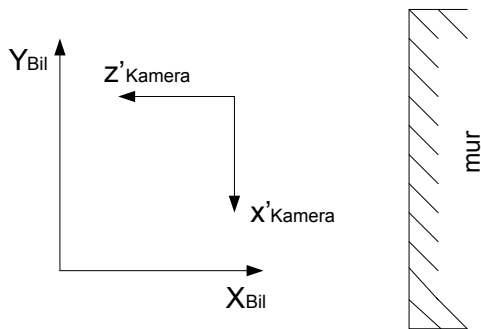
s. 53-56]. Det vil sige, at der drejes om x-aksen, y-aksen og z-aksen i nævnte rækkefølge.

Som foreløbige værdier for projektionscenteret anvendes koordinater fremkommet ved den terrestriske rumlige fremskæring, hvor der ud over målingerne til paspunkter og GPS-antenner blev målt til kameraet, for netop at bestemme en foreløbig værdi for kameraets placering i bilens koordinatsystem. De foreløbige værdier for de tre rotationer er fastsat ud fra kendskab til, hvordan kameraet ca. er placeret i forhold til bilens koordinatsystem. Da kameraet har en hældning i forhold til bilens koordinatsystem i optageretningen, anvendes følgende foreløbige værdier for de tre rotationer:  $\omega=0$  gon,  $\varphi=-120$  gon og  $\kappa=300$  gon.

## Resultater

Bilens og kameraets placering i optageøjeblikket er skitseret i figur 5.13. De ydre orienteringsparametre til kameraet i bilens koordinatsystem beregnet i Matlab scriptet "tilbageskaering.m", jf. Bilag 1C, fremgår af figur 5.14. Det fremgår, at orienteringsparametrene varierer efter af- og påmontering af kameraet. Afvigelsen findes dog acceptabel i forhold til det formål MKS'et skal anvendes til, hvorfor det konkluderes, at kameraet kan af- og påmonteres uden at den ydre orientering ændres væsentligt. Skal MKS'et anvendes til andre formål med højere nøjagtighedskrav, vil det dog være at foretrække, at kameraet er fastmonteret.

Det kan dog undre, at koordinaterne til projektionscenteret varierer op til 8 mm. Dette er relativt meget i forhold til, at det fremstillede udstyr til montering af kameraet burde sikre, at kameraet sidder nær samme sted ved påmontering. En årsag til de store afvigelser, kan eventuelt være at billedkoordinaterne til de tre billeder er målt med forskellig nøjagtighed. Billederne blev taget med en smule modlys, hvilket gjorde det en smule svært at genkende alle paspunkter. Det



Figur 5.13: Skitse over placering af bilens og kameraets koordinatsystemer i forhold til muren i optageøjeblikket i forbindelse med kalibrering af MKS'et.

største residual på paspunkterne er 7  $\mu\text{m}$ , hvorfor det konkluderes, at måling af billedkoordinater er foretaget tilfredsstillende til dette formål. Årsagen kan skyldes at af- og påmonteringen af kameraet ikke er foretaget så fejlfrit. De større afvigelser på kameraets position i henholdsvis Y- og Z-retningen, kan desuden være forårsaget af, at rotationerne omkring Y- og Z-akserne er korrelerede med positionsbestemmelsen i Y- og Z-retningerne. Denne sammenhæng fremgår også af figur 5.15, der viser at spredningerne på de ydre orienteringsparametre for alle tre billeder A, B og C. Her er spredningen på X-koordinaten mindre end spredningen på Y- og Z-koordinaterne.

Som det fremgår af figur 5.15, er spredningerne på projektionscenteret mellem 4 og 36 mm, mens spredningerne på orienteringerne ligger mellem 0,132 og 0,342 gon. Disse spredninger er højere, end hvad der burde være muligt at opnå. Dette

Billede nr.	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	$\omega$ [gon]	$\varphi$ [gon]	$\kappa$ [gon]
A	0,071	1,126	0,115	-1,409	-114,033	-100,007
B	0,070	1,130	0,110	-1,330	-114,206	-99,805
C	0,068	1,124	0,118	-1,383	-114,165	-99,788
Maks afvigelse	0,003	0,006	0,008	0,079	0,173	0,219

Figur 5.14: De ydre orienteringsparametre for henholdsvis billede A, B og C. Mellem A, B og C er kameraet af- og påmonteret på bilen. Bilen har samme position ved alle tre forsøg.

Billede nr.	$\sigma_{X_0}$ [m]	$\sigma_{Y_0}$ [m]	$\sigma_{Z_0}$ [m]	$\sigma_{\omega}$ [gon]	$\sigma_{\varphi}$ [gon]	$\sigma_{\kappa}$ [gon]
A	0,005	0,020	0,036	0,340	0,151	0,342
B	0,004	0,017	0,031	0,295	0,132	0,297
C	0,005	0,018	0,036	0,314	0,151	0,316

Figur 5.15: Spredning på de ydre orienteringsparametre for billede A, B og C beregnet efter udjævningen.

skyldes sandsynligvis, at paspunkterne ikke er fordelt over hele billedet. Vurderes de opnåede spredninger i forhold til det opstillede krav for den ydre orientering på henholdsvis 20 cm for projektiionscenteret og 4 gon for rotationerne, falder de opnåede spredninger fint indenfor det krævede. Omregnes spredningerne til afstande på facaden ses det endvidere, at der er tale om små afvigelse. Den største spredning  $\sigma_k$  på 0,342 gon giver ved en afstand mellem facade og det mobile kortlægningsystem på 10 m, en afvigelse på muren på maksimalt 7 cm. Resultatet vurderes derfor at være acceptabelt til formålet.

## 5.5 Bestemmelse af bilens position og orientering i forhold til referencekoordinatsystemet

Som beskrevet tidligere i dette kapitel, skal der for at beregne den ydre orientering af kameraet i referencekoordinatsystemet, bestemmes en position og tre rotationer af bilens koordinatsystem i forhold til referencekoordinatsystemet. Til bestemmelse af disse parametre anvendes multiantennesystemet bestående af de tre GPS-antenner monteret på bilen.

I det følgende beskrives de teorier, der ligger til grund for positionerings- og rotationsbestemmelsen. Der beskrives tre metoder til rotationsbestemmelsen. Projektgruppen har anvendt alle tre metoder, men anvender dog kun den ene metode under selve implementeringen.

Der beskrives tre metoder til bestemmelse af bilens rotationer i UTM:

- Den direkte metode
- Rotationsbestemmelse ved 3-parameter 3D-transformation
- Rotationsbestemmelse ved 6-parameter 3D-transformation

De to første metoder bestemmer kun rotationerne af bilen, mens den sidste metode også bestemmer den flytning, der skal foretages for at bestemme kameraets projektiionscenter i referencekoordinatsystemet. Derfor skal der, inden de to første metoder anvendes, bestemmes en flytning. De tre metoder beskrives hver for sig i det følgende.

I det følgende anvendes rotationsmatricen  $R_{(yaw, pitch, roll)}$ , hvor der drejes omkring henholdsvis Z-aksen, X-aksen og til sidst Y-aksen for at rotere bilens koordinatsystem over i referencekoordinatsystemet. Rotationsmatricen er valgt, idet denne rotationsrækkefølge normalt anvendes i forbindelse med mobile kortlægningsystemer og søopmåling [Lu, 1995, s. 42].

### Den direkte metode

Den direkte metode stammer fra [Lu, 1995]. Først beregnes og foretages alene på baggrund af GPS-antennernes koordinater i referencekoordinatsystemet en flytning af koordinaterne til de tre GPS-antenner i referencekoordinatsystemet, således GPS-antenne 1 får koordinaten (0, 0, 0).

Det er muligt at bestemme de tre rotationer på bilen alene ved brug af GPS-koordinaterne i referencekoordinatsystemet, såfremt disse koordinater kendes i 3D, samt at bilens koordinatsystem er defineret som angivet i figur 5.1. Er det tilfældet, kan to af de tre rotationer ved rotationsrækkefølgen (yaw, pitch, roll) beregnes, som følger:

$$yaw = -\tan^{-1}\left(\frac{\Delta E_{antenne(1-2)}}{\Delta N_{antenne(1-2)}}\right)$$

$$pitch = -\tan^{-1}\left(\frac{\Delta H_{antenne(1-2)}}{\sqrt{\Delta E_{antenne(1-2)}^2 + \Delta N_{antenne(1-2)}^2}}\right)$$

hvor

$\Delta E_{antenne(1-2)}$ ,  $\Delta N_{antenne(1-2)}$  og  $\Delta H_{antenne(1-2)}$  er forskellen i E-, N, og H-koordinaterne mellem antenne 1 og 2 i reference-koordinatsystemet.

Som det fremgår, beregnes yaw og pitch alene på baggrund af koordinaterne til antennerne 1 og 2. Efter yaw og pitch er beregnet, roteres koordinaterne til GPS-antenne 3 i referencesystemet først omkring Z-aksen med den beregnede værdi for yaw og derefter om den meddrejede X-akse med en værdi for pitch. Koordinaterne til antenne 1, 2 og 3 betegnes herefter ( $E''_1, N''_1, H''_1$ ), ( $E''_2, N''_2, H''_2$ ) og ( $E''_3, N''_3, H''_3$ ). Herefter beregnes den sidste rotation, roll, om den meddrejede Y-akse som:

$$\text{roll} = -\tan^{-1}\left(\frac{\Delta H''_{\text{antenne}(1-3)}}{\Delta E''_{\text{antenne}(1-3)}}\right)$$

hvor

$\Delta E''_{\text{antenne}(1-3)}$ ,  $\Delta N''_{\text{antenne}(1-3)}$  og  $\Delta H''_{\text{antenne}(1-3)}$  er forskellen i  $E''$ -,  $N''$ -, og  $H''$ -koordinaterne mellem antenne 1 og 3 i det meddrejede referencekoordinatsystemet.

Metoden er egnet i situationer, hvor der ikke findes nogen koordinater til GPS-antennen i det anvendte køretøjs koordinatsystem. Det vil sige i tilfælde, hvor det anvendte system ikke er kalibreret. Metoden er ligeledes velegnet til beregning af foreløbige værdier for pitch, roll og yaw, hvis det i stedet vælges at bestemme position og rotationer af bilens koordinatsystem ved 3D-transformation.

Ulempen ved metoden er dog, at alle tilgængelige oplysninger ikke anvendes. Det viser sig ved, at Y-koordinaten til antenne 3 slet ikke anvendes i beregningerne af de tre rotationer. Dette er selvfølgelig ikke optimalt, idet rotationerne således ikke bestemmes bedst muligt. En anden ulempe er, at den beregnede flytning ikke er den bedste mulige, idet der kun tages udgangspunkt i én antenne og ikke alle tre, hvilket ville være optimalt.

## Hældningsbestemmelse ved 3-parameter 3D-transformation

Som ved den direkte metode foretages først en flytning af koordinaterne til de tre GPS-antenner i referencekoordinatsystemet, således GPS-antenne 1 får koordinaten (0, 0, 0).

Derefter bestemmes de tre hældninger ved en 3-parameter transformation, hvor de ubekendte netop er de tre rotationer (yaw, pitch, roll). Fællespunkterne ved transformationen er koordinaterne til de tre GPS-antenner i referencekoordinatsystemet og tilsvarende koordinater i bilens koordinatsystem. Sammenhængen mellem disse koordinater er givet ved observationsligningerne:

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ H \end{bmatrix}_{\text{Bil}}^{\text{Ref}} = R_{\text{Bil}(\text{yaw}, \text{pitch}, \text{roll})}^{\text{Ref}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Bil}}$$

hvor

$R_{\text{Bil}(\text{yaw}, \text{pitch}, \text{roll})}^{\text{Ref}}$  er den anvendte rotationsmatrix

Koordinaterne til henholdsvis højre og venstre for lighedstegnet er koordinaterne til GPS-antennen på bilen i bilens koordinatsystem og i referencekoordinatsystemet.

Observationsligningerne indgår i en udjævning efter mindste kvadraters princip, hvorved de tre ubekendte bestemmes.

Betragtes både koordinaterne til GPS-antennen i bilens koordinatsystem og i referencekoordinatsystemet som observationer, som det er tilfældet i [Lu, 1995, s. 56], er der flere observationer per observationsligning, hvilket betyder, at udjævningsproblemet ikke kan løses ved metoden "Udjævning af indirekte observationer", som oftest anvendes i forbindelse med udjævning. I stedet er det nødvendigt at anvende "Den generelle udjævningsteknik", som er mere kompleks end den førstnævnte udjævningsmetode, jf. Appendix F. Projektgruppen ser i dette tilfælde ingen grund til, at benytte "Den generelle udjævningsteknik", idet

udjævningsproblemet kan løses tilfredsstillende ved blot at betragte koordinaterne til GPS-antennene i bilens koordinatsystem som konstanter. I praksis er spredningen på disse også forholdsvis ubetydelig. Skal der dog alligevel tages hensyn til denne spredning, kan spredningen på antennekoordinaterne i bilens koordinatsystem blot tillægges spredningen på koordinaterne i referencekoordinatsystemet. Projektgruppen betragter antennekoordinaterne i bilens system som fejlfrie, idet det antages, at nøjagtigheden af koordinatbestemmelsen er høj. Desuden antages det, at antennerne ikke bevæger sig i forhold til hinanden under kørsel.

Observationsligningerne er ulineære, hvorfor disse inden udjævningen skal lineariseres ved Taylor rækkeudvikling. Det betyder, at der skal anvendes foreløbige koordinater. Disse bestemmes ved "Den direkte metode". Alternativt kan de foreløbige værdier til pitch og roll sættes til nul, idet hældningen på bilen sandsynligvis oftest vil være tæt på nul. Det har projektgruppen valgt at gøre.

Observationerne vægtes efter spredningerne på GPS-observationerne til antennerne i referencesystemet. Spredningerne på GPS-observationerne i referencesystemet stammer fra output-filen fra GPS-modtagerne. De ubekendte rotationer bestemmes ved iteration. Resultatet af udjævningen vurderes på baggrund af residualer, spredningen på de ubekendte samt spredningen på vægtenheden.

Denne metode er bedre end "Den direkte metode" idet mindste kvadraters princip giver det bedste bud på de ubekendte. Der er dog den ulempe ved denne metode, at flytningerne ikke er en del af udjævningen, hvorfor disse ikke er bestemt optimalt. Selvom projektgruppen har programmeret bestemmelsen af flytning og hældning ved denne metode, jf. Matlab scriptet "transformation\_biltilutm\_3p.m" i Bilag 1C, vælges det at anvende hældningsbestemmelse ved 6-parameter 3D-

transformation til bestemmelse af flytningen og hældningen under implementeringen.

## Hældningsbestemmelse ved 6-parameter 3D-transformation

Denne metode svarer til hældningsbestemmelsen ved en 3-parameter 3D-transformation bortset fra, at flytningen inkluderes som ubekendte i observationsligningerne, der derfor ser ud som følger.

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ H \end{bmatrix}_{Bil}^{Ref} = R_{Bil(yaw, pitch, roll)}^{Ref} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Bil} + \begin{bmatrix} E_B \\ N_B \\ H_B \end{bmatrix}_{Bil}^{Ref}$$

hvor

$R_{Bil(yaw, pitch, roll)}^{Ref}$  er den anvendte rotationsmatrice

$$\begin{bmatrix} E_B \\ N_B \\ H_B \end{bmatrix}_{Bil}^{Ref}$$

er bilkoordinatsystemets origo i referencekoordinatsystemet

Koordinaterne til henholdsvis højre og venstre for lighedstegnet er koordinaterne til GPS-antennerne på bilen i bilens koordinatsystem og referencekoordinatsystemet.

Igen antages koordinaterne til GPS-antennerne i bilens koordinatsystem at være fejlfrie, og der udjævnes på samme måde som beskrevet ved 3-parameter transformationen. De foreløbige værdier beregnes som under "Den direkte metode".

Metoden er implementeret i Matlab scriptet "transformation\_biltilutm\_6p.m", jf. Bilag 1C. Vurderingen foretages ligeledes på samme vis, som allerede beskrevet under 3-parameter transformationen. Kun få iterationer er nødvendige, idet de foreløbige værdier er tilfredsstillende bestemte.

Denne metode betragtes af projektgruppen som den mest optimale løsning på bestemmelsen af flytningen og rotationerne mellem bilens koor-

dinatsystem og referencekoordinatsystemet, idet metoden giver det bedste bud på alle seks ubekendte; de tre flytninger samt de tre rotationer.

Ved sammenligning af parametrene beregnet efter de to transformationsmetoder, har projektgruppen erfaret, at parametrene kun afviger fra hinanden på millimeter og milligon niveau. I praksis er det derfor ikke vigtigt hvilken af transformationsmetoderne, der anvendes i det mobile kortlægningsystem. Projektgruppen har ved tidligere projekter erfaret, at Matlab ikke kan regne med store tal, hvorfor det ved anvendelse af Matlab kan være en fordel at foretage en flytning til origo, ligesom det gøres ved 3-parameter transformationen. Projektgruppen har dog ikke haft problemer med Matlab i dette projekt.

Resultatet af ovenstående beregninger er, at transformationsparametrene mellem bilens koordinatsystem og referencekoordinatsystemet er bestemt for alle GPS-epoker. Herved er altså bilens position og hældning i forhold til referencekoordinatsystemet bestemt. Transformationsparametrene anvendes i positioneringsformlen.

## 5.6 Test af rotationsbestemmelse med multiantennesystemet

Projektgruppen har foretaget en undersøgelse af, hvor god GPS-multiantennesystemet er til bestemmelse af de tre rotationer, pitch, roll og yaw, af køretøjets koordinatsystem i referencekoordinatsystemet. For at kunne vurdere dette, ønskes det at bestemme præcisionen og nøjagtigheden af bestemmelsen af rotationsvinklerne.

Præcisionen er et udtryk for, hvor tæt gentagne målinger af den samme størrelse ligger på hinanden. Ligger observationerne tæt på hinanden, er der tale om høj præcision, og ligger observationerne langt fra hinanden, er der tale om lav præcision [Cederholm, 2000, s. 12]. Beregningen af præcisionen foretages ved at betragte midelværdien af observationerne som den sande

værdi. Formlen for beregning af præcisionen er [Mærsk-Møller, 1984, s. 19]:

$$\text{præcision} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\bar{k} - k_i)^2}$$

hvor  
 n er antal observationer  
 $\bar{k}$  er middelværdien af observationerne  
 $k_i$  er værdien af den i'te observation

Nøjagtigheden er et udtryk for, hvor tæt gentagne målinger ligger på den sande værdi af størrelsen. Ligger observationerne tæt på den sande værdi, er der tale om høj nøjagtighed, og ligger observationerne langt fra den sande værdi, er der tale om lav nøjagtighed. Beregningen af nøjagtigheden foretages ved at måle en reference, som kan betragtes som værende den sande værdi. Er observationerne ikke under indflydelse af systematiske fejl, er præcisionen og nøjagtigheden den samme. [Cederholm, 2000, s. 12]. Formlen for beregning af nøjagtigheden er [Mærsk-Møller, 1984, s. 19]:

$$\text{nøjagtighed} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (k - k_i)^2}$$

hvor  
 n er antal observationer  
 k er den sande værdi af størrelsen  
 $k_i$  er værdien af den i'te observation

Inden beregningen af ovenstående spredninger på observationerne, som i dette tilfælde er pitch, roll og yaw, beregnes i det følgende først de teoretisk opnåelige spredninger for de tre rotationsvinkler, for at gøre det muligt at vurdere om de beregnede spredninger er nær de teoretisk opnåelige. Efterfølgende beskrives testens udførelse samt de opnåede resultater.

### 5.6.1 Teoretisk opnåelig spredning

Rotationerne pitch, roll og yaw af bilens koordinatsystem i forhold til referencekoordinatsystemet bestemmes på baggrund af GPS-målingerne ved hjælp af transformation ved mindste kvadraters princip, jf. 5.5 *Bestemmelse af bilens position og orientering i forhold til referencekoordinatsystemet*. På baggrund af observationsligningerne anvendt ved transformationen burde der beregnes en teoretisk opnåelig spredning for de tre rotationsvinkler. Dette vil være mest korrekt, idet alle observationer fra alle tre antenner ved anvendelse af mindste kvadraters princip har indflydelse på bestemmelsen af de tre rotationsvinkler. Beregningen af den teoretiske spredning på baggrund af disse observationsligninger findes af projektgruppen for omfattende, og projektgruppen har derfor valgt en anden løsning til opstilling af den teoretiske opnåelige spredning, hvilket beskrives i det følgende.

Bilens koordinatsystem er defineret med y-aksen beliggende mellem GPS-antenne 1 og 2 (i det følgende defineret som vektor<sub>12</sub>), hvilket betyder, at disse to GPS-antenner hovedsageligt har indflydelse på bestemmelsen af pitch, som er rotationen om x-aksen. GPS-antenne 3 er tilnærmelsesvis placeret på x-aksen, jf. Appendix C, og derfor er det hovedsageligt GPS-antenne 1 og 3 (i det følgende defineret som vektor<sub>13</sub>), der får indflydelse på bestemmelsen af roll, som er rotationen om y-aksen. Ovenstående ses af figur 5.16.

Ovenstående betyder, at rotationerne pitch og roll i princippet kan betragtes som en hældningsbestemmelse i referencekoordinatsystemet mellem to GPS-antenner. Hældningsbestemmelsen foretages efter følgende formel:

$$\text{Hældning}_{\text{GPS}} = \tan^{-1} \left( \frac{H_i - H_j}{\sqrt{(E_i - E_j)^2 + (N_i - N_j)^2}} \right)$$

hvor

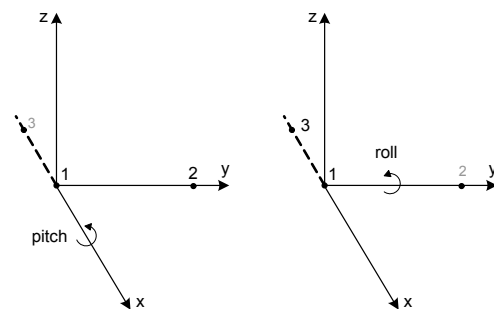
$j$  er GPS-antenne 2 eller 3

$E, N, H$  er koordinater i referencekoordinatsystemet

Projektgruppen er således af den overbevisning, at bestemmelsen af rotationerne pitch og roll afhænger af samme spredninger på GPS-positionen som bestemmelsen af hældningerne på vektor<sub>12</sub> og vektor<sub>13</sub> gør, hvilket betyder at spredningerne på henholdsvis rotationer og hældninger vil blive identiske ved samme afstand. Det skal dog nævnes, at de beregnede hældninger ikke kan betragtes som rotationsvinklerne pitch og roll, som de anvendes i rotationsmatricen ved bestemmelse af bilens hældning i referencekoordinatsystemet, idet disse er beregnet om meddrejede akser.

Idet bilens koordinatsystem er defineret på taget af en bil, således at z-aksen tilnærmelsesvis er parallel med referencesystemets z-akse (højden  $H$ ), og systemet ikke skal anvendes i stejle bjergområder, vil bilens koordinatsystem aldrig hælde ret meget i forhold til referencekoordinatsystemet. Det betyder, at bestemmelsen af pitch og roll i høj grad afhænger af spredningen på GPS-koordinaterne i  $z$ , mens spredningen i planet næsten ingen indflydelse får på bestemmelsen af disse to hældninger, jf. figur 5.17.

Som nævnt, vil de plane spredninger få minimal indflydelse på bestemmelsen af de to rotationsvinkler, hvorfor der ses bort fra disse ved



Figur 5.16:

GPS-antenne 1 og 2 har indflydelse på bestemmelsen af pitch, mens GPS-antenne 1 og 3 har indflydelse på bestemmelsen af roll. GPS-antenne 3 har således ingen indflydelse på bestemmelsen af pitch, da denne er placeret på den akse, der roteres omkring. Tilfældet er det samme med hensyn til GPS-antenne 2 og bestemmelsen af roll.



anvendelse af den simple fejlforsplantningslov på udtrykket for hældningsbestemmelsen. Der opstilles således to forsimplerede fejlteoretiske udtryk for bestemmelsen af de to rotationsvinkler pitch og roll:

$$\sigma_{pitch} = \frac{\sqrt{2} \times \sigma_z}{L_{12}}$$

$$\sigma_{roll} = \frac{\sqrt{2} \times \sigma_z}{L_{13} \cos(\alpha)}$$

hvor  
 L12, L13 betegner afstanden mellem henholdsvis GPS-antenne 1 og 2 og GPS-antenne 1 og 3.  
 $\alpha$  er vinklen i xy-planet mellem vektoren, der udspændes mellem GPS-antenne 1 og 3 og x-aksen i bilens koordinatsystem, jf. figur 5.18.

Udtrykkene for de teoretiske spredninger kan kun betragtes som korrekte, hvis bilens koordinatsystem ikke hælder for meget i forhold til referenckoordinatsystemet. Bestemmelsen af yaw kan på en simpel måde beregnes som beskrevet i 5.5 *Bestemmelse af bilens position og rotationer i forhold til referenckoordinatsystemet*, selvom dette selvfølgelig ikke er udjævningsmæssigt korrekt. Et forsimpleret fejlteoretisk udtryk på baggrund af dette udtryk er [Lu, 1995, s. 55]:

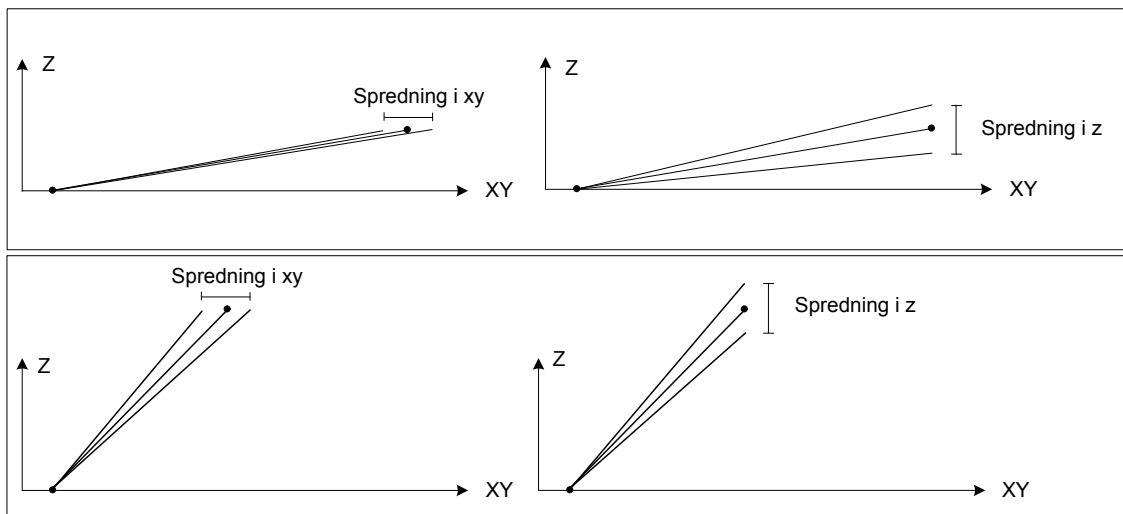
$$\sigma_{yaw} = \frac{\sqrt{2} \times \sigma_{plan}}{L_{12}}$$

hvor

$$\sigma_{plan} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2}}$$

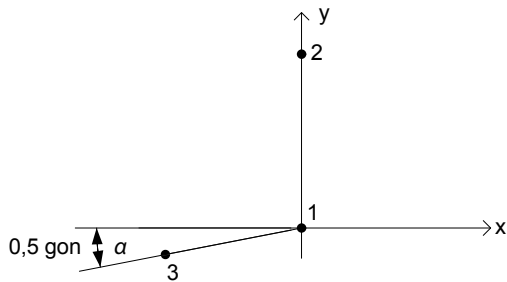
Som det ses af formlerne, er spredningerne på pitch og yaw omvendt proportionale med afstanden mellem GPS-antennen. Idet GPS-antenne 3 ikke er placeret præcist på x-aksen, jf. Appendiks B, har vinklen mellem vektor<sub>13</sub> og x-aksen i koordinatsystemet teoretisk set også indflydelse på bestemmelsen af roll, jf. figur 5.18. Vinklen er dog kun 0,5 gon og har således ingen reel betydning for spredningen.

Af figur 5.19 ses proportionaliteten mellem afstanden mellem GPS-antennen og den teoretiske spredning på pitch og roll. Ved beregning af spredningen for roll, er  $\alpha$  sat til 0, idet den lille vinkel på 0,5 gon ingen reel betydning har. Grafen i figur 5.19 er således ens for både pitch og roll. Det ses af figuren, at den valgte antennekonfiguration, jf.



Figur 5.17: Spredningernes indflydelse på bestemmelsen af hældningerne. Øverst ses, at når koordinatsystemerne ikke hælder meget i forhold til hinanden, så vil spredningen i z have stor indflydelse på bestemmelsen af vinklen, mens spredningen i planet stort set ingen indflydelse har. Nederst ses, at hvis koordinatsystemerne hælder meget i forhold til hinanden, så vil også spredningerne i planet have indflydelse på bestemmelsen af hældningerne.

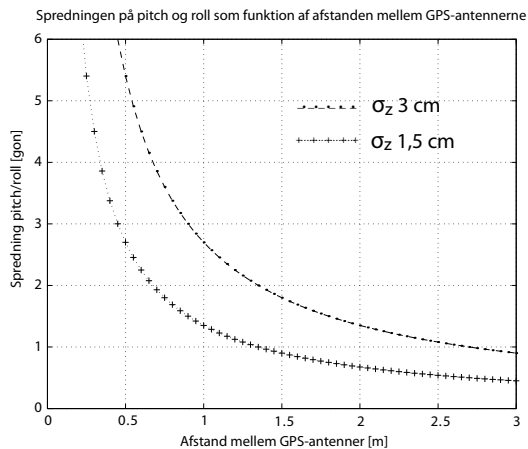
5.3 Konstruktion af det mobile kortlægningssystem, vil medføre, at det teoretisk set vil blive sværest at bestemme roll, idet længden af vektor<sub>13</sub> er ca. 0,75 m, mens længden af vektor<sub>12</sub> er ca. 1,4 m. Af figur 5.20 ses at yaw er den rotationsvinkel, der kan bestemmes bedst, idet den kun påvirkes af spredningen i planet, som oftest ikke er så store som spredningen i z ved GPS-måling. Endvidere anvendes den længste vektor - mellem GPS-antenne 1 og 2 - til bestemmelse af yaw, hvorfor yaw i forhold til de øvrige vinkler bestemmes bedre. Ved bestemmelsen af yaw ved hjælp af mindste



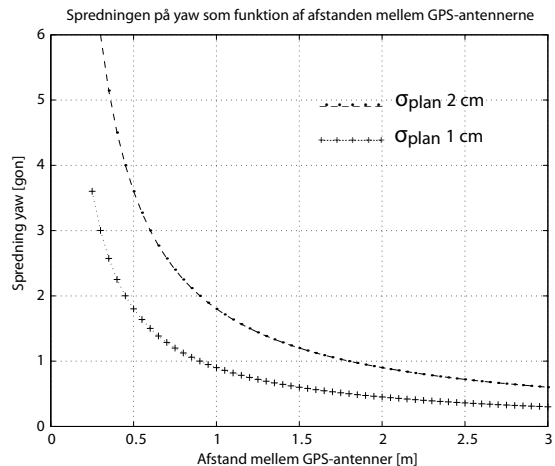
Figur 5.18: GPS-antenne 3 ligger ikke præcist på x-aksen, men ligger på en vektor, der i forhold til x-aksen har en vinkel på 0,5 gon.

kvadraters princip har den tredje GPS-antenne, som ikke indgår i den teoretiske spredning, endvidere indflydelse på bestemmelsen af yaw, hvorfor projektgruppen forventer at spredningen på yaw vil være bedre end den teoretisk angivne.

Ved aflæsning på graferne i figur 5.19 og 5.20 kan den teoretiske spredning på de tre rotationsvinkler findes. Disse fremgår af figur 5.21 ved forskellige spredninger i planet og i højden for de enkelte GPS-observationer. Projektgruppen forventer en  $\sigma_{pitch}$  på 1 gon, en  $\sigma_{roll}$  på 1,75 gon og en  $\sigma_{yaw}$  på 0,6 gon, da det forventes at GPS-målingernes spredninger ligger på ca. 1 cm i planet og 1,5 cm i højden. Det forventes dog, at spredningerne vil være bedre end den teoretisk angivne - især for yaw, idet rotationsvinklerne bestemmes ved en 6-parameter 3D-transformation. Graferne er udarbejdet i Matlab-scriptet "spred\_rot.m", jf. Bilag 1C.



Figur 5.19: Proportionaliteten mellem spredningen på pitch/roll og afstanden mellem GPS-antennerne. [spred\_hael.m]. Graferne er beregnet ud fra en spredning på GPS-observationerne på henholdsvis 1,5 cm og 3 cm i højden.



Figur 5.20: Proportionaliteten mellem spredningen på yaw og afstanden mellem GPS-antennerne. [spred\_hael.m]. Graferne er beregnet ud fra en spredning på GPS-observationerne på henholdsvis 1,5 cm og 3 cm i højden.

	$\sigma_{pitch}$ [gon]	$\sigma_{roll}$ [gon]	$\sigma_{yaw}$ [gon]
$\sigma_{plan} = 1 \text{ cm}$			0,6
$\sigma_{plan} = 2 \text{ cm}$			1,2
$\sigma_z = 1,5 \text{ cm}$	1	1,75	
$\sigma_z = 3 \text{ cm}$	2	3,5	

Figur 5.21: Teoretisk opnåelige spredninger for rotationerne pitch, roll og yaw ved forskellige spredninger i planen og højden for de enkelte GPS-observationer. Spredningerne på pitch og yaw er beregnet med antenneafstanden 1,37 m, mens spredningen på roll er beregnet med antenneafstanden 0,76 m. Disse afstande svarer til antenneafstandene på MKS'et. Tallene anført med fed skrift, er de spredninger, som projektgruppen regner med at kunne opnå med multiantennesystemet.

## 5.6.2 Testens planlægning og udførelse

Der er nu givet et bud på den teoretisk opnåelige nøjagtighed for de tre rotationsvinkler. For at teste om praksis lever op til teorien, er der udført en række forsøg. Der udføres i alt otte forsøg fordelt i tidsrummet 10.30 til 13.15. Dette sikrer forskellige målebetingelser, såsom forskellig satellitkonstellation samt forskelligt antal satellitter ved forsøgene, hvilket kan have indflydelse på nøjagtigheden af GPS-målingerne. Se i øvrigt appendiks E for nærmere information om de fejlkilder, der er ved måling med GPS. GPS-satellitter er 23 timer og 56 minutter om at nå den samme placering på himlen, hvorfor øvelsen burde have været foretaget over et døgn, for at få alle muligheder for placering af satellitter med i forsøget. Projektgruppen mener dog, at de otte forsøg giver tilstrækkelig mulighed for en vurdering af, om præcisionen og nøjagtigheden påvirkes af de forskellige målebetingelser.

### GPS-målinger

Ved hvert af de otte forsøg måles der med 1 Hz i ca. 2 minutter, således at hvert forsøg består af 100 epoker. Ved hvert forsøg noteres antallet af satellitter, som modtagerne har kontakt til. Hældning-

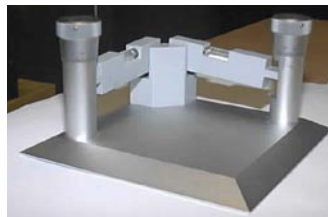
gen af de to vektorer beregnes for hver epoke ved hjælp af formlen for bestemmelsen af hældningen nævnt i 5.6.1 *Teoretisk opnåelig spredning*.

### Valg af reference

Da også nøjagtigheden ønskes vurderet, skal der indmåles en reference. Én mulighed for at skabe en reference er at måle GPS-antennerne, som definerer bilens koordinatsystem, ind med for eksempel totalstation, direkte i UTM<sub>EUREF89</sub> zone 32 og DVR90. Pitch, roll og yaw ville således - i lighed med GPS-observationerne - kunne bestemmes ved hjælp af transformation, hvilket ville skabe en reference-pitch, -roll og -yaw, som observationerne fra GPS-målingerne ville kunne holdes op imod.

Projektgruppen har dog valgt en anden mulighed for måling af reference, som dog kun giver mulighed for at skabe en reference for pitch og roll. Idet bestemmelsen af rotationsvinklerne pitch og roll som før nævnt kan betragtes som værende lige så godt bestemt som hældningsbestemmelsen af vektor<sub>12</sub> og vektor<sub>13</sub>, bestemmes referencen som hældningen af disse vektorer. Der anvendes derfor libeller til bestemmelse af de to referencenhældninger. Dette valg er foretaget ud fra betragtninger omkring de teoretiske spredninger, der kan opnås, hvor yaw er den rotationsvinkel, der kan bestemmes bedst.

Referencenhældningerne måles ved hjælp af en krydslibelle, jf. figur 5.22. Krydslibellen anvendes normalt til genskabelse af billedets ydre orientering i Zeiss' undervisningsinstrument til fremstilling af ortofotos. Krydslibellen er et instrument

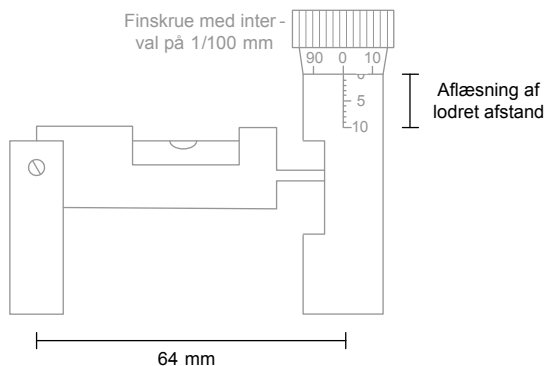


Figur 5.22: Krydslibellen, der anvendes til måling af referencenhældning.

bestående af to libeller orienteret vinkelret på hinanden. Libellerne kan justeres til vandret ved hjælp af to finskruer, og den lodrette afstand kan aflæses med 1/100 millimeter. Projektgruppen har dog kun aflæst med 1/10 mm, idet libellerne ikke er mere følsomme end dette. Endvidere er libellerne følsomme overfor for eksempel vind etc., hvilket forsøgsopstillingerne har været under indflydelse af. Krydslibellens dimensioner og princippet for aflæsning af den lodrette afstand ses på figur 5.23. Beregningen af hældningen fremgår af følgende formel:

$$\text{hældning} = \tan^{-1}\left(\frac{\text{aflæst lodret afstand [mm]}}{64\text{mm}}\right)$$

Ved måling af referencen placeres krydslibellen på bilen i en anordning, der sikrer, at krydslibellen placeres det samme sted hver gang referencen skal måles, jf. figur 5.24. Anordningen er forsøgt orienteret således, at den er parallel med det plan, der udspændes af GPS-antennerne, og libellerne placeres parallelt med akserne i bilens koordinatsystem. Er den ikke parallel med planet, der udspændes af GPS-antennerne, vil der opstå en systematisk fejl ved sammenligning af hældningerne med referencehældningerne. Krydslibellen



Figur 5.23: Krydslibellens dimensioner og princip for aflæsning af den lodrette afstand, når libellen er vandret. Den vinkelrette libelle har samme dimensioner i begge retninger. Afstanden på 64 mm er målt med lineal.

måler hældningerne i et vinkelret koordinatsystem, mens vektor<sub>12</sub> og vektor<sub>13</sub> ikke er orienteret helt vinkelret på hinanden. Ved måling af referencen betyder dette en fejl i referencemålingerne i forhold til den ene GPS-vektor. Fejlen findes dog ubetydelig.

Krydslibellen er inden forsøget verificeret, for at være sikker på at libellerne ikke har en nulpunktsfejl. Dette er gjort ved at placere krydslibellen på en plade, der er placeret på et fodstykke, og stillet vandret ved hjælp af en anden libelle, jf. figur 5.25. Verifikationen viser, at krydslibellen ikke har nogen nulpunktsfejl.

Ved hvert af de otte forsøg sættes krydslibellen på anordningen, og den lodrette afstand i de to retninger aflæses og noteres.

### 5.6.3 Resultater

I det følgende beregnes præcisionen og nøjagtigheden på observationerne efter formlerne beskrevet i 5.6 Test af rotationsbestemmelse med multiantennesystemet.



Figur 5.24: Krydslibellen placeres i en anordning, således at den kan placeres samme sted, hver gang referencen måles. Endvidere er den placeret parallel med det plan, der udspændes af GPS-antennerne, og libellerne er placeret parallel med akserne i bilens koordinatsystem.



Figur 5.25: Verifikation af krydslibellen. Øverst ses krydslibellen og libellen, der anvendes til at sætte pladen vandret. Nederst ses opstillingen med libellerne på pladen på fodstykket.

### Præcision

Præcisionen på pitch og roll beregnes ud fra både de beregnede rotationer bestemt ved den beskrevne 6-parameter 3D-transformation samt hældningerne beregnet ved hældningsformlen. Beregningerne er foretaget i de matlabscripts, der hedder "Hældning\_rot.m" og "Hældning.m", jf. bilag 1C. Resultaterne ses af figur 5.26. I kolonnerne med  $\sigma_{pitch}$  og  $\sigma_{roll}$  er præcisionen af hældningerne angivet i parentes. Det ses, at præcisionsbestemmelsen er stort set ens, og betragtningerne om at hældningen af vektorerne og rotationsvinklerne kan betragtes som værende næsten ens er korrekte. Spredningen på yaw er kun beregnet ud fra rotationerne. Den maksimale afvigelse på pitch, roll og yaw beregnet ud fra middellobservationerne er også angivet i tabellen. Denne størrelse er interessant, idet der i et kørende system, som det er designet nu, kun vil blive anvendt én epoke til bestemmelsen af bilens orientering i referencekoordinatsystemet. Antal satellitter ved forsøgene er også angivet.

Det ses af figur 5.26, at spredningerne generelt er lidt under de teoretisk beregnede spredninger. Dette kan betyde, at GPS-observationerne har bedre spredninger end 1 cm i planet og 1,5 cm i højden.

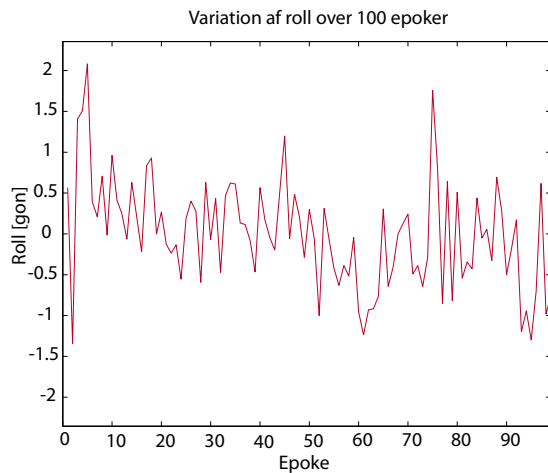
Forsøg	$\sigma_{pitch}$ ( $\sigma_{vektor12}$ ) [gon]	$\sigma_{roll}$ ( $\sigma_{vektor13}$ ) [gon]	$\sigma_{yaw}$ [gon]	max pitch [gon]	max roll [gon]	max yaw [gon]	Antal satellitter
1	0,2209 (0,2209)	0,5875 (0,5965)	0,1447	0,7420	1,6371	0,3545	8
2	0,1834 (0,1839)	0,2684 (0,2681)	0,0536	0,5402	0,7893	0,1580	9
3	0,5646 (0,5644)	1,4771 (1,4758)	0,1695	1,5024	3,8577	0,4923	9
4	1,0673 (1,0672)	1,2106 (1,2051)	0,3294	2,5059	3,3152	0,7464	5
5	0,2889 (0,2889)	0,5426 (0,5410)	0,0907	0,8102	1,3140	0,1971	7-8
6	0,5481 (0,5483)	0,6605 (0,6572)	0,0917	2,1412	2,0814	0,2326	8
7	0,5666 (0,5669)	0,9204 (0,9154)	0,0903	1,7567	2,9852	0,1516	5-6
8	1,1375 (1,1375)	1,2382 (1,2301)	0,1551	3,4018	5,8283	0,5752	7

Figur 5.26: Præcisionen på rotationerne pitch, roll og yaw, som er bestemt ved hjælp af mindste kvadraters princip. I parantes ses de beregnede spredninger fra hældningsbestemmelsen af vektor<sub>12</sub> og vektor<sub>13</sub>. De tre sidste kolonner viser de maksimale afvigelser fra gennemsnittet af de tre rotationer.

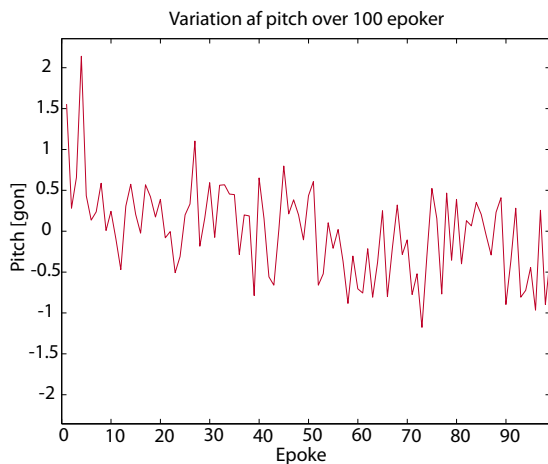
Som forventet, er spredningen på roll bestemt dårligere end pitch og yaw, hvilket kan tilskrives den korte vektorlængde mellem GPS-antenne 1 og 3. Endvidere er yaw bestemt bedst, hvilket tilskrives, at det hovedsageligt er spredningen i planet, der er med til at bestemme denne rotationsvinkel. At spredningen på yaw er så meget lavere end den teoretisk beregnede, er sandsynligvis på grund af at alle tre GPS-antenner anvendes til bestemmelse rotationsvinklen ved 6-parameter transformationen. Ved beregning af den teoretisk beregnede indgår observationerne

fra den tredje GPS-antenne ikke. Et indtryk af variationerne på pitch, roll og yaw i løbet af forsøg 6 ses af figurerne 5.27-5.29. Det ses at yaw varierer mindst. Roll burde variere mere end pitch, jf. de teoretisk beregnede spredninger, men undersøges de beregnede spredninger for forsøg 6, jf. figur 5.26, ses det, at spredningen på de to rotationer er næsten ens, hvorfor variationen også må forventes at være næsten ens. Det er desuden værd at bemærke, at yaw er bestemt meget bedre end teorien foreskriver sammenlignet med pitch og roll. En årsag til dette kan være, at GPS-observationernes E- og N-kordinater er mere korrelerede end H-kordinaterne. Dette er dog ikke undersøgt nærmere.

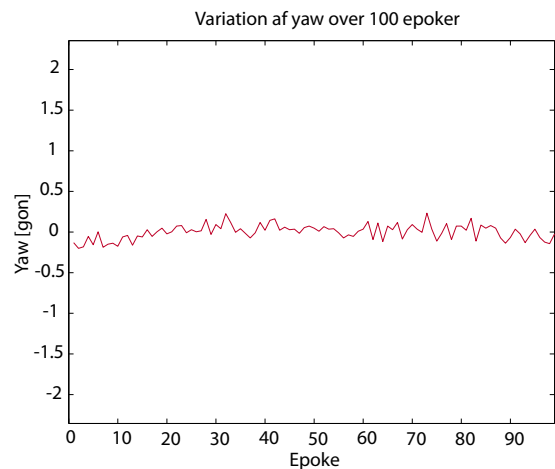
Forsøgene imellem varierer spredningerne. Dette kan måske tilskrives antallet af satellitter og satellitkonstellationen (PDOP-værdien) på det pågældende måletidspunkt. I forsøg 4 og 8, hvor spredningen er over 1 gon for både pitch og roll, ses det af figur 5.26, at der kun er 5 satellitter for forsøg 4, mens det er 7 satellitter for forsøg 8. Omvendt er antallet af satellitter 5-6 for forsøg 7, mens spredningerne er i små. En direkte sammenhæng mellem antal af satellitter og spredningerne på rotationerne, er altså ikke til at se. PDOP-vær-



Figur 5.27: Variation af roll i forsøg 6.



Figur 5.28: Variation af pitch i forsøg 6.



Figur 5.29: Variation af yaw i forsøg 6.

dien kendes ikke for de enkelte forsøg, men det forventes at denne værdi vil have stor indflydelse på nøjagtigheden af GPS-målingerne.

Resultaterne viser, at rotationerne kan bestemmes med en acceptabel nøjagtighed i forhold til det opstillede krav på 4 gon. De maksimale afvigelser viser dog i forsøgene store afvigelser på op til 5,8 gon for roll, hvilket kan tyde på en grov fejl. En afvigelse af denne størrelse kan eventuelt skyldes indflydelse af multipath på GPS-målingerne. Sådanne grove fejl vil forekomme engang imellem, når der kun anvendes én epoke per måling, da det i så fald ikke er muligt at sortere den grove fejl fra. Problemet kan eventuelt afhjælpes ved filtrering af observationerne.

## Nøjagtighed

Nøjagtigheden beregnes i forhold til referencen, der som før nævnt er bestemt ved libeller. Det er således kun pitch og roll, der kan bestemmes en nøjagtighed af, idet yaw ikke kan bestemmes ved libellerne. Det viser sig ved beregning af nøjagtigheden, at spredningerne i alle forsøgene bliver større end beregningen af præcisionen. Det tyder derfor på, at hældningsbestemmelsen er under indflydelse af en systematisk fejl, hvorfor størrelsen af denne må findes. Den systematiske fejl er sandsynligvis opstået ved, at det plan GPS-antennen udspænder og det plan, som libellerne placeres i, ikke er helt parallelle. Et bud på den systematiske fejl er fundet ved at beregne et middel af de residualer, der er mellem referencenhældningen og de beregnede hældninger. Alle forsøg er inkluderet i beregningen af den systematiske fejl. Ved beregningen af middelresidualet er hældningerne vægtet efter de spredninger, der fås fra GPS-observationerne, således at en hældning, der er bestemt ud fra observationer med store spredninger vægtes lavere end en bedre bestemt hældning. Beregningerne er foretaget i scriptet "Hældning.m", jf. Bilag 1C. Der er beregnet en systematisk fejl på hældningsbestemmelsen af vektor<sub>12</sub> på 0,69 gon, mens den systematiske fejl

på vektor<sub>13</sub> er 0,87 gon. Hældningerne korrigeres for den systematiske fejl, og nøjagtigheden beregnes på ny. Resultatet fremgår af figur 5.30.

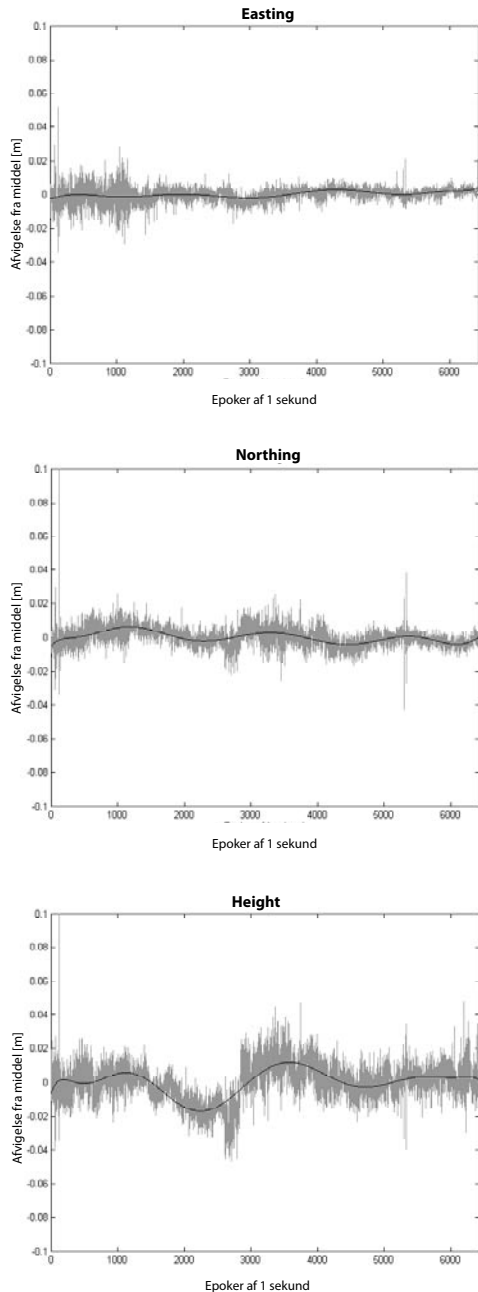
Det ses af figurene 5.26 og 5.30, at nøjagtigheden generelt er højere end præcisionen. Det tyder derfor på, at observationerne stadig er under indflydelse af systematiske fejl. Den systematiske fejl fra uoverensstemmelsen mellem de to planer er fjernet, hvorfor den må stamme fra et andet sted.

Projektgruppen har forudsat at referencehældningen målt med krydslibellen er fejlfri, men er der for eksempel en grov fejl i aflæsningen af libellerne, vil denne selvfølgelig have indflydelse på resultatet.

En anden mulighed er dog, at GPS-målingerne introducerer systematiske fejl i observationerne, og at den ikke er ens for hvert forsøg. Det tyder altså på, at GPS introducerer systematiske fejl i målingerne, der varierer over tid. Denne antagelse bekræftes yderligere af kurverne i figur 5.31. Kurverne er blevet til på baggrund af GPS-observationer foretaget i et punkt på taget af Fibigerstæde 11, Aalborg d. 25. marts 2004 fra kl. ca. 12.45 til 13.30. Kurverne viser afvigelsen fra middellobservationen. De sorte streger viser et 10. grads polynomie tilpasset afvigelse. Det frem-

Forsøg	$\sigma_{\text{pitch}}$ ( $\sigma_{\text{vektor12}}$ ) [gon]	$\sigma_{\text{roll}}$ ( $\sigma_{\text{vektor13}}$ ) [gon]
1	0,6308	0,9883
2	0,3084	0,6068
3	0,5666	2,6524
4	1,3896	3,3969
5	0,9358	1,1805
6	0,6953	0,6765
7	0,5641	0,9105
8	1,1323	1,7722

Figur 5.30: Nøjagtigheden på hældningerne af vektor<sub>12</sub> og vektor<sub>13</sub>.



Figur 5.31: Easting, Northing og Height koordinaternes afvigelse fra middel ved GPS-måling. GPS-observationerne fra ca. 12.45 til 14.30 d. 23. marts 2004. Frekvensen er 1 sekund. [gps\_test.m]

går af kurverne, at både E-, N- og H-koordinaterne afviger fra middel i samme mønster over tid; det vil sige når afvigelsen fra middel stiger i E-koordinaten, stiger den også i N- og H-koordinaterne. Afvigelsen er dog ikke lige stor i alle retninger. Den er som forventet størst i H. Ifølge kurverne kan det forventes at E- og N-koordinaterne afviger omkring 2-4 cm, mens H-koordinaterne afviger omkring 8 cm. Desuden ses, at der ind imellem forekommer grove fejl. De viste afvigelser kan muligvis være forårsaget af, at der er anvendt forskellige satellitter og satellitgeometri til de enkelte epoker. Afvigelserne vil som allerede vist, selvfølgelig påvirke bestemmelsen af kameraets ydre orientering. Filtrering vil muligvis kunne forbedre positions- og hældningsbestemmelsen med GPS.

## 5.7 Delkonklusion

I dette kapitel er der redegjort for, hvordan prototypen på MKS'et er konstrueret med 3 GPS-mottagere og et kamera på en bil. Som referencekoordinatsystem er det valgt at anvende  $UTM_{EUREF89}$  og DVR90. Der er endvidere redegjort for de anvendte beregninger til bestemmelse af kameraets ydre orientering i referencekoordinatsystemet.

MKS'et er blevet kalibreret for at bestemme kameraet ydre orientering og de tre GPS-antenners positioner i bilens koordinatsystem. Position og orientering af bilens koordinatsystem i referencekoordinatsystemet bestemmes ved en 6-parameter 3D-transformation mellem antennekoordinaterne i referencekoordinatsystemet målt med GPS og antennekoordinaterne i bilens koordinatsystem.

Det er herefter muligt at bestemme den ydre orientering af kameraet efter hver målt GPS-epoke forudsat bilen holder stille.

Der er i det foregående foretaget en undersøgelse af, hvilken nøjagtighed, der kan forventes af den



ydre orientering bestemt med GPS. Det kan forventes at bilens hældningen i forhold til vandret kan bestemmes med en præcision på over 1,5 gon, mens kursen kan bestemmes med en præcision på over 0,3 gon, jf. figur 5. 26. Nøjagtigheden forventes at være af samme størrelsesorden. Dog ser det ud til at position og hældningsbestemmelsen er under indflydelse af systematiske fejl. Desuden forekommer der ind imellem grove fejl, som vil påvirke bestemmelsen af den ydre orientering af kameraet. Det betyder, at det ikke i alle tilfælde er muligt at overholde kravet på de 4 gon for bestemmelsen af den ydre orientering. Dette vil selvfølgelig påvirke opretningen af facadebillederne.

## 6 Design af billedbehandlingsrutine

Dette kapitel omfatter design af de billedbehandlingsrutiner, der er nødvendige i forbindelse med automatisk påsætning af facadebilleder på en eksisterende 3D-bymodel. Som beskrevet i 3 *Problemformulering* omhandler billedbehandlingsdelen flere faser. Disse faser fremgår af figur 6.1.

I det følgende vil den samlede automatiserede billedbehandlingsrutine, som projektgruppen forestiller sig den, blive beskrevet overordnet, hvorefter de enkelte faser beskrives mere detaljeret. For den overordnede beskrivelse anbefales det sideløbende med læsningen at følge med i figur 6.1. For de efterfølgende mere detaljerede beskrivelser anbefales desuden at følge med i diagrammet over den samlede metode i bilag 7.

Indledningsvist skal det nævnes, at billedbehandlingsrutinerne ikke omfatter fraeditering af uønskede objekter, da projektgruppen vurderer, at denne del ikke kan ske automatisk.

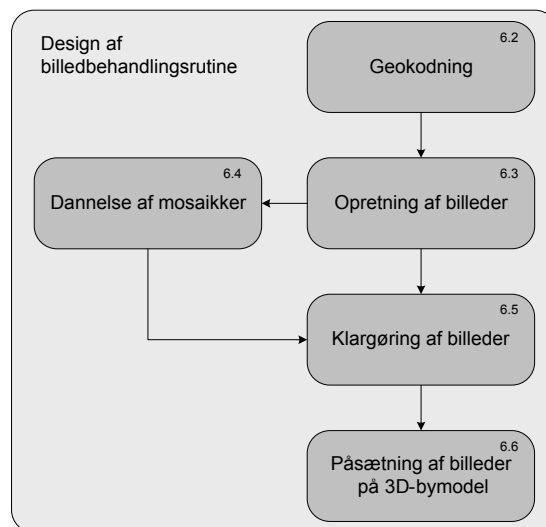
### 6.1 Samlet billedbehandlingsrutine

Efter GPS-observationerne og facadebillederne er indsamlet og den ydre orientering af kameraet i alle optagesituationer er beregnet, skal den ydre orientering og tilhørende billede samt koordinater til facaden i 3D-bymodellen organiseres. Det sker ved, at den beregnede ydre orientering, billedet og den aktuelle facade i 3D-bymodellen relateres til hinanden; der etableres en georeference. Denne proces kaldes geokodning og kan med fordel ske ved at oprette en relationsdatabase, hvori dataene gemmes.

Når dataene er samlet i en database, skal de enkelte billeder oprettes, således at der ikke forekommer hældningsforskydninger i billederne grundet kameraets orientering i forhold til facadens orientering.

Består facaden af flere billeder som følge af, at facaden i 3D-bymodellen ikke kan dækkes af ét billede, skal disse sammensættes til ét billede. Når billederne er oprettet, kan der konstrueres en billedmosaik, således flere billeder samles til ét billede.

Efter billedet er oprettet, er der stadig to problemer, som skal løses. For det første er billedet sandsynligvis ikke fuldstændigt oprettet, idet den ydre orientering af kameraet ikke er bestemt perfekt, jf. 5.6.3 *Resultater*, der viser at nøjagtigheden kan



Figur 6.1: Design af billedbehandlingsrutine. Tallene i øverste højre hjørne henviser til afsnittet, hvori den enkelte proces er beskrevet.

variere. For det andet er bygningen i 3D-bymodellen ikke af samme størrelse som bygningen i virkeligheden på grund af tagudhængsproblematikken og 3D-bymodellens nøjagtighed beskrevet i 2.1.3 *Fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller*. Da projektgruppen har til hensigt at benytte facadeafgrænsningen fra 3D-bymodellen til udklipping af facaderne i billederne, skal facaderne i billederne tilpasses facadeafgrænsningerne fra 3D-bymodellen. Løsning af disse to problemer klargør tilsammen facadebillederne, således de oprettes så godt som muligt og klippes det rigtige sted.

Efter forbedring af facadebillederne skal billederne påsættes 3D-bymodellen.

Projektgruppen har af tidsmæssige årsager valgt at afgrænse sig fra problemstillingerne vedrørende geokodning, konstruktion af fotomosaikker og påsætning af billeder. Faserne 6.2, 6.4 og 6.6 i figur 6.1 beskrives derfor i det følgende kun på et overordnet niveau. Faserne 6.3 og 6.5 beskrives mere detaljeret. Hvert punkt i figur 6.1 henviser til et af følgende afsnit.

## 6.2 Geokodning

Dette afsnit omhandler en beskrivelse af, hvordan der kan etableres en georeference mellem de optagne billeder og de bygningsfacader i 3D-bymodellen, der befinder sig på billederne. Beskrivelsen af geokodningen er kun på idéstadiet, hvorfor emnet blot beskrives overordnet.

Gennem GPS-målinger, systemkalibrering samt efterfølgende beregninger, etableres en direkte reference mellem facadebillederne og referencenkoordinatsystemet. Det vil sige, at den ydre orientering af billederne er kendt i referencenkoordinatsystemet. Det der ønskes bestemt i denne sammenhæng, er imidlertid også hvilke facadebilleder, der dækker hvilke facader i 3D-bymodellen. Dette er nødvendigt for at oprette billederne i forhold til de korrekte bygningsfacader. Det vil sige,

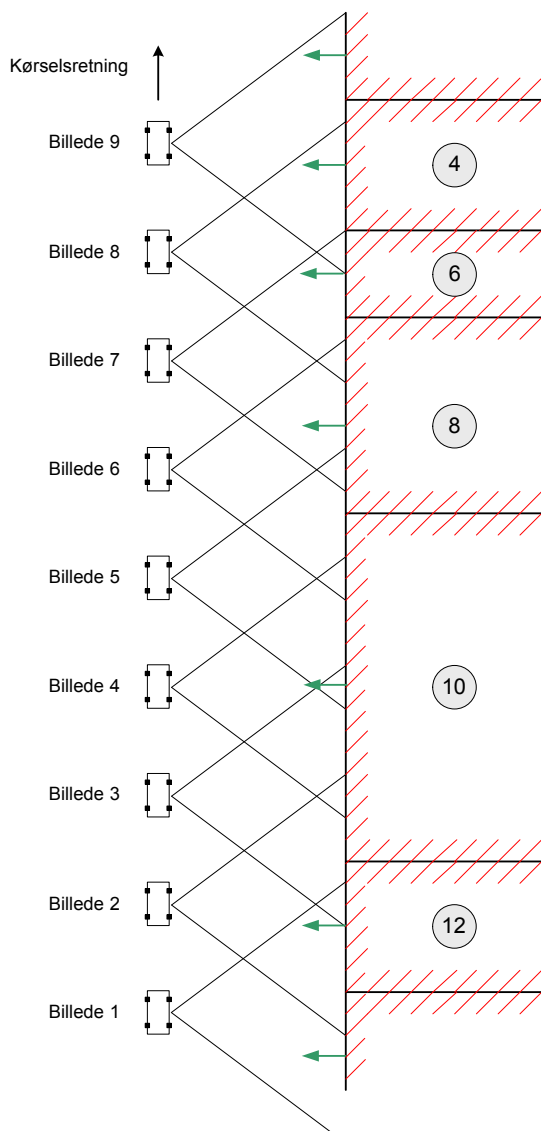
billederne skal georefereres til bygningsfacaderne i 3D-bymodellen.

Af figur 6.2 ses en typisk fotograferingssituation. MKS'et kører, mens der fotograferes med fast frekvens. På grund af den faste fotograferingsfrekvens vil det sandsynligvis ofte forekomme, at ikke alle facader indeholdes i ét enkelt billede. Dette komplicerer situationen yderligere, idet der således skal dannes mosaikker af flere billeder for at dække en facade.

Projektgruppen forestiller sig, at den beregnede ydre orientering tilhørende hvert enkelt billede kan anvendes til at undersøge og bestemme hvilke facader, der indeholdes i de enkelte billeder. Det forudsættes i den sammenhæng, at 3D-bymodellen er opdelt i facader, og at hver facade har en retning, jf. figur 6.2.

Undersøgelsen kan foregå i flere trin, for løbende at afgrænse søgeområdet. Først kan kendskabet til kameraets position i referencekoordinatsystemet anvendes til at finde de facader, der ligger inden for en bestemt afstand; for eksempel 15 m af kameraet. Derved er alle øvrige facader i 3D-bymodellen sorteret fra. Antages det, at alle facader har en retning, kan de valgte facader sorteres efter retningen således, at facader med forkert retning i forhold til kameraets ydre orientering frasorteres. Herefter bør der kun være få facader tilbage at undersøge. Undersøgelsen af, om en facade i 3D-bymodellen findes i et billede, kan herefter foregå på mindst to måder.

Kendes den ydre orientering og kameraets åbningsvinkel, kan optagevinklen i referencenkoordinatsystemet beregnes. Da også koordinaterne til facaderne i 3D-bymodellen kendes i referencenkoordinatsystemet, kan det undersøges, hvilke koordinater til facaderne, der ligger indenfor optagevinklen. Da der stadig kan være flere facader i 3D-bymodellen i optagevinklen i forskellig afstand fra kameraet, vælges kun den facade, som er tættest på kameraet.



Figur 6.2: *Fotografering af bygningsfacader. Det skal analyseres, hvilke facader der findes i de optagne billeder. Ikke alle facader dækkes af ét billede. Pilene ved facaderne viser facadens retning.*

Det er også muligt at foretage den sidste undersøgelse ved i stedet, at "skyde" koordinaterne til facaderne i referencekoordinatsystemet ind i billedet ved hjælp af stråleligningerne og derefter undersøge, om de "indskudte punkter" befinder sig inden for billedplanet.

Uanset hvordan undersøgelsen foregår, relateres de facader, som kan ses i det enkelte billede, til billedet. Anvendes situationen i figur 6.2 som eksempel, ses det, at det kun er facaderne i billede 2, 8 og 9, som indeholdes fuldstændigt i ét billede. De øvrige facader kan kun dækkes ved brug af flere facadebilleder. I en database relateres billederne til den eller de facader, som er indeholdt i billedet. Der tages ikke yderligere stilling til design af geokodningsrutine og databasedesign.

### 6.3 Opretning af billeder

I dette afsnit redegøres for den billedopretning projektgruppen har foretaget.

#### Opretningsmetoder

Der findes flere forskellige opretningsmetoder. I dette projekt behandles kun numeriske opretningsmetoder, da de optagne billeder er digitale og billedbehandlingen skal foregå digitalt. Der behandles to opretningsmetoder:

- Opretning ved stråleligninger
- Projektiv transformation

Opretning ved hjælp af stråleligningerne anvendes normalvis til fremstilling af ortofotos. Haves for eksempel en DTM eller DSM over et område på jorden, kan der fjernes både hældnings- og højdeforskydninger i et billede af området. Anvendes en DTM, vil der stadig forekomme højdeforskydninger i forbindelse med bygninger etc. Anvendes en DSM, kan disse højdeforskydninger også fjernes. Et ortofoto dannet på baggrund af en DSM kaldes et true ortofoto. Ortofotos er karakteriseret ved at

være målfaste. Stråleligningerne kan også anvendes til fremstilling af ortofotos af facadebilleder. Dette kræver dog kendskab til en digital overflademodel af facaden, som i det følgende kaldes en Digital Facade Model (DFM). En sådan kan for eksempel dannes ved laserscanning af facaden eller ved måling i en stereomodel.

Projektiv transformation anvendes til at transformere punkter fra ét plan til ét andet plan. I fotogrammetrien anvendes metoden til at fjerne eventuelle hældningsforskydninger i billeder af plane flader. Det kan for eksempel være facadebilleder. De projektive transformationsformler bygger på stråleligningerne. Ved anvendelse af den projektive transformation korrigeres i modsætning til anvendelse af de almindelige stråleligninger ikke for højdeforskydninger, idet det forudsættes at facaden er plan. Resultatet af anvendelse af den projektive transformation til opretning er et målfast billede forudsat den fotograferede facade virkelig er plan. For yderligere information om den projektive transformation henvises til [Schenk, 1999].

### Den anvendte opretningsmetode

I 3D-bymodellen er facaderne modelleret som plane flader. Projektgruppen har valgt at anvende koordinaterne til facaderne i 3D-bymodellen som grundlag for dannelse af en DFM. Ved billedopretningen behandles kun én facade af gangen. Det vil sige der dannes en DFM for kun én facade af gangen, hvorefter det tilhørende billede oprettes efter denne DFM. DFM'en dannes ved at beregne et grid af punkter, der dækker den aktuelle facade, i samme plan som facaden. Det vil sige, at DFM'en kun indeholder punkter på ét plan, og at vinduer, altaner etc. ikke er en del af DFM'en. Da alle punkter i DFM'en befinder sig på ét og samme plan, er det i princippet tilstrækkeligt at anvende den projektive transformation til opretning af facadebillederne. Projektgruppen har dog valgt at benytte stråleligningerne til opretningen af billederne. Derved kan der senere oprettes for højde-

forskydninger, hvis der fås en mere detaljeret DFM af facaderne indeholdende altaner etc. Desuden har stråleligningerne den fordel frem for den projektive transformation, at facadebillederne kan oprettes på baggrund af et grid i referencekoordinatsystemet, mens den projektive transformation ville kræve, at den anvendte DFM er parallel med en af koordinataksene. Den enkelte facade skulle således transformeres inden dannelse af grid og opretning.

Selvom resultatet af opretning med stråleligningerne er et ortofoto, kaldes resultatet i det følgende for "det oprettede billede".

Den valgte metode til opretning betyder, at billedet efter opretning kun er målfast indenfor den aktuelle facade og ikke i området omkring facaden, med mindre dette område ligger i samme plan som facaden.

Rutinen til opretning af facadebilleder er programmeret i Matlab i scriptet "opretning.m", jf. Bilag 1C. Rutinen kan deles op i tre faser, som beskrives i det følgende:

- Hent billede, billedets ydre orientering og koordinater til den aktuelle facade i referencekoordinatsystemet
- Dan grid med bestemt pixelstørrelse
- Beregn pixelværdier til det nye billede ud fra stråleligningerne

Først hentes det data, der skal til, for at oprette et billede. Det, der hentes, er således billedet, som skal oprettes, den ydre orientering tilhørende billedet angivet i referencekoordinatsystemet samt koordinaterne til den aktuelle facade i referencekoordinatsystemet. Disse data kan og bør i princippet hentes automatisk fra en database, men i dette tilfælde har projektgruppen blot indtastet data manuelt i scriptet.

Ud fra koordinaterne til facaden i referencekoordinatsystemet beregnes et grid med en pixelstørrelse svarende til den ønskede geometriske opløsning. Projektgruppen har valgt at anvende en geometrisk pixelstørrelse på 1 cm. Gridet beregnes ved først at bestemme koordinaterne  $(E_1, N_1, H_1)$  og  $(E_2, N_2, H_2)$ , der er de to "yderstliggende" punkter på facaden, jf. figur 6.3. Derefter beregnes selve gridet, idet det antages, at facaden er plan og lodret.

Koordinaterne i referencekoordinatsystemet til gridet gennemløbes stråleligningerne.

$$x' = x'_0 - c \frac{r_{11}(E - E_0) + r_{21}(N - N_0) + r_{31}(H - H_0)}{r_{13}(E - E_0) + r_{23}(N - N_0) + r_{33}(H - H_0)}$$

$$y' = y'_0 - c \frac{r_{12}(E - E_0) + r_{22}(N - N_0) + r_{32}(H - H_0)}{r_{13}(E - E_0) + r_{23}(N - N_0) + r_{33}(H - H_0)}$$

hvor

$x'$  og  $y'$  er billedkoordinater til gridpunkterne skudt ind i det originale billede

$x'_0$  og  $y'_0$  er billedkoordinater til hovedpunktet

$c$  er kamerakonstanten

$E_0, N_0, H_0$  er projektiionscentret i referencekoordinatsystemet

$E, N, H$  er gridkoordinater i referencekoordinatsystemet

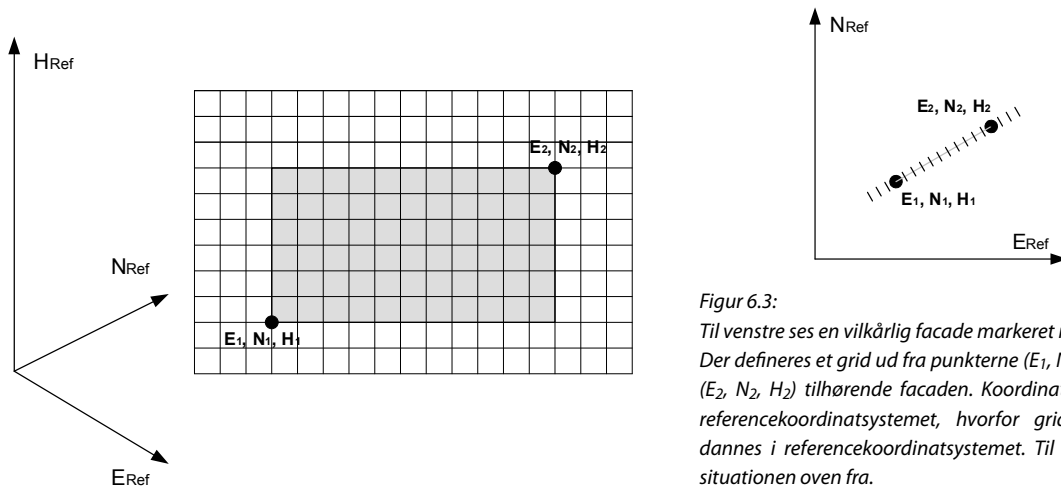
$r_{11}$  til  $r_{33}$  er elementer fra rotationsmatricen  $R_{Kamera(\omega, \varphi, \kappa)}^{Ref}$

Der korrigeres desuden for kameraets linsefortegning, jf. kalibreringsrapporten for Rollei d7 metric i Bilag 1H.

Som output fra stråleligningerne fås et billedkoordinat for hvert gridpunkt. Billedkoordinaterne omregnes til pixelkoordinater for at hente den aktuelle pixels farveværdi i det originale billede. Denne omregning foretages ved formlerne i Appendiks C, afsnit 1 *Billedkoordinatsystemet*. Da stråleligningen ikke nødvendigvis rammer midt i en pixel i det originale billede, har projektgruppen valgt at hente den farve i det originale billede, som er nærmest den beregnede pixelværdi. Denne metode kaldes "nærmeste nabo". Der findes andre mere avancerede interpolationsmetoder til at finde den rette farveværdi; for eksempel "bilineær interpolation" [Mikhail m.fl., 2001, s. 164-165]. I dette tilfælde findes den anvendte metode tilstrækkelig.

Når farveværdien er hentet fra det originale billede, lagres den i et nyt billede. Dette billede er det oprettede billede.

Afslutningsvis skal det nævnes, at der er risiko for, at der kommer en fejl i målforholdet i det oprettede billede, da koordinaterne til facadeafgrænsningen kan være tættere på eller længere væk fra



Figur 6.3:

Til venstre ses en vilkårlig facade markeret med gråt. Der defineres et grid ud fra punkterne  $(E_1, N_1, H_1)$  og  $(E_2, N_2, H_2)$  tilhørende facaden. Koordinaterne er i referencekoordinatsystemet, hvorfor gridet også dannes i referencekoordinatsystemet. Til højre ses situationen oven fra.

kameraet i den anvendte 3D-bymodel end i virkeligheden på grund af tagudhængsproblematikken og 3D-bymodellens nøjagtighed. Der er i dette afsnit ikke taget højde for denne problematik.

## 6.4 Dannelse af mosaikker

Dette afsnit indeholder en kort redegørelse for nogle af de problemer, projektgruppen ser i forbindelse med automatisk dannelse af mosaikker. Der er ikke arbejdet i dybden med dette emne, hvorfor listen af problemer sandsynligvis ikke er fuldstændig. Ved fuld implementering af den automatiserede proces til påsætning af billeder på 3D-bymodeller, bør denne fase overvejes yderligere.

Automatisk dannelse af mosaikker er en kompleks proces. Alt efter hvilket kamera, optagefrekvens og hastighed der anvendes, vil der være facader i 3D-bymodellen, som ikke dækkes af ét billede. Der skal derfor flere billeder til at dække én facade i 3D-bymodellen. Skal der for eksempel to billeder til at dække en facade, skal disse to billeder omdannes til ét billede inden påsætningen på 3D-bymodellen. Der skal altså dannes en mosaik af de to billeder.

Der er to hovedproblemer forbundet med dannelse af mosaikker. Det drejer sig om den geometriske tilpasning og den radiometriske tilpasning.

### Geometrisk tilpasning

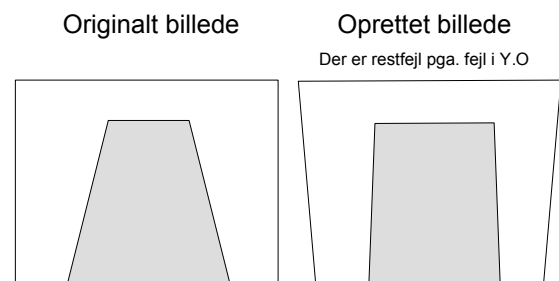
Projektgruppen forestiller sig, at mosaikken kan dannes på følgende måde: Først oprettes de to billeder, hver for sig ved anvendelse af metoden beskrevet i 6.3 *Opretning af billeder*. Derefter bestemmes fællespunkter i form af interessepunkter, linjer eller objekter i billederne ved diverse filterteknikker. Fællespunkterne kan anvendes som sammenknytningspunkter. Sammenknytningspunkterne kan herefter indgå som observationer i en transformation ved mindste kvadraters udjævning, hvorved de tre billeder

tilpasses hinanden efter anblokmetoden. Efter transformationen bør de tre billeder passe sammen så godt som muligt.

På grund af, at der ikke anvendes en korrekt ydre orientering til opretningen, kan der forekomme en restfejl i billederne således, at linjer, der er lod- eller vandrette i virkeligheden, ikke er lod- eller vandrette i billederne. Afhængig af restfejls størrelse, vil bygningerne og andre objekter i billederne være mere eller mindre deforme, jf. figur 6.4. Det vil sige, at objekter, der findes i flere billeder, sandsynligvis ikke er ens i billederne. Det kan være med til at vanskeliggøre søgningen efter fællespunkter i billederne. Denne manglende opretning vil sandsynligvis også medføre, at billedets kosmetiske udseende vil være lidt forvrænget, idet restfejlen i de enkelte billeder sandsynligvis ikke er den samme, jf. figur 6.5. Facadernes kanter, vil derfor ikke være sammenfaldende i hele mosaikken, hvilket er uheldigt.

### Radiometrisk opløsning

Et andet problem, som opstår i forbindelse med dannelse af mosaikker, er farveforskellen i billederne, der sættes sammen. Der vil ofte kunne



Figur 6.4:

Skitse af et originalt billede og et billede som er oprettet efter den beregnede ydre orientering. Af skitsen af det originale billede ses, at kameraet i optageøjeblikket er roteret omkring kameraets x-akse. Efter opretningen er billedet ikke oprettet fuldstændigt på grund af fejl i den bestemte ydre orientering. Det vil sige, at rotationen omkring kameraets x-akse er ikke bestemt tilstrækkeligt nøjagtigt.

forekomme en farveforskel og eventuelt skygeområder i billederne på grund af forskellige lysforhold ved fotografering. Denne farveforskel vil sandsynligvis også kunne problematisere genkendelsen af objekter til sammenknytningspunkter i billederne. Desuden vil der kunne forekomme en farveforskel mellem billederne, når disse er sat sammen i en mosaik. Denne forskel kan dog sandsynligvis udglattes i skæringen mellem de to billeder. Efter dannelse af mosaikker indgår mosaikkerne i den øvrige billedbehandling på lige fod med de øvrige billeder. Alle facader i 3D-bymodellen er nu dækket af netop ét billede.

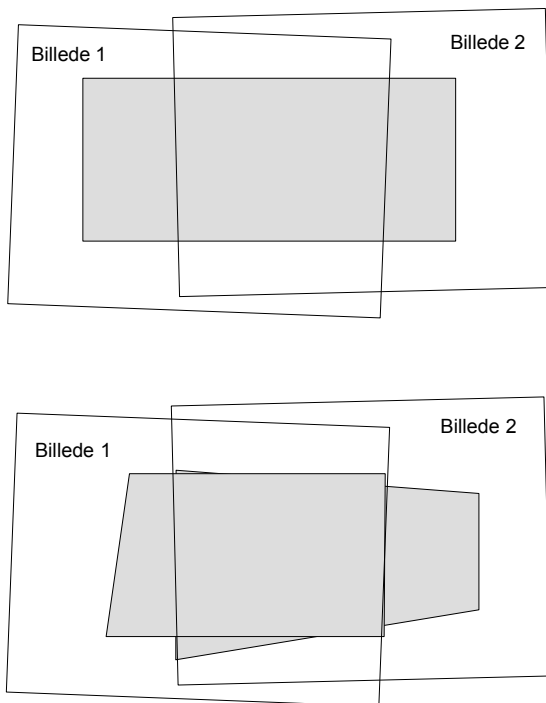
Som beskrevet, er dannelse af mosaikker altså en forholdsvis kompleks opgave. Den vil være

nødvendig i forbindelse med indsamling af billeder med et mobilt kortlægningssystem, men behandles ikke yderligere i projektet.

## 6.5 Klargøring af billeder

Dette afsnit indeholder en redegørelse for, hvordan billederne klargøres til påsætning, efter de er oprettet på baggrund af GPS-observationerne.

Som allerede beskrevet, er der to hovedproblemer, som skal løses. For det første betyder unøjagtigheden af bestemmelsen af den ydre orientering af kameraet i referencesystemet, at der opstår en restfejl ved oprettningen af billedet, jf. figur 6.4. Denne restfejl skal fjernes.

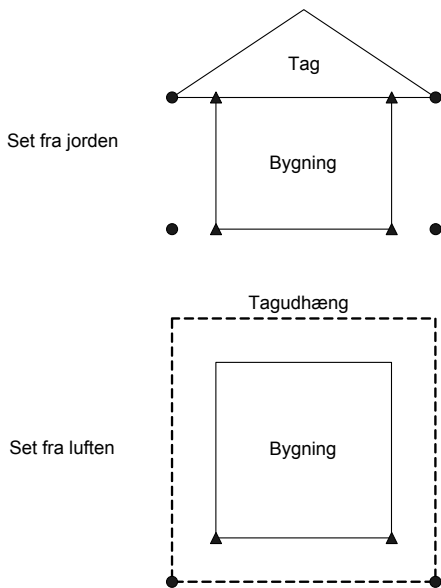


Figur 6.5: Øverst ses to billeder, som er oprettet perfekt og sat sammen til en mosaik. Bygningen i billedet er rektangulær som forventet. Nederst ses to billeder, som ikke er oprettet fuldstændigt på grund af unøjagtig ydre orientering. De to billeder sættes sammen til en mosaik. Resultatet viser, at kanterne i bygningerne ikke passer sammen.

For det andet skal der ved udklipning af facaderne i billederne, klippes ved den rigtige facadeafgrænsning således, at der hverken kommer for lidt eller for meget med i billedet, når facaden klippes ud af billedet. Det betyder, at den rigtige facadeafgrænsning skal bestemmes i billedet. Stemmer facadeafgrænsningerne i 3D-bymodellen overens med virkeligheden, og er der ingen fejl i de oprettede billeder, kan facadekoordinaterne fra 3D-bymodellen blot projiceres ind i det oprettede billede af bygningsfacaden og anvendes til at klippe facaden ud af billedet. Da der imidlertid er en restfejl fra oprettningen, og da facaderne i 3D-bymodellen sandsynligvis ikke er sammenfaldende med facaderne i virkeligheden og i billederne, jf. figur 6.6, kan udklipningen af facaderne ikke ske så enkelt. Denne skal således forbedres.

I det følgende skitseres en løsningsmodel på de to hovedproblemer. Løsningsmodellen er af tidsmæssige årsager ikke implementeret. Der er dog gennemført en række indledende forsøg, med henblik på at afprøve nogle af projektgruppens ideer til forbedring af billederne. Disse forsøg beskrives sammen med teorien bag de anvendte teknikker i det følgende.





Figur 6.6:

På grund af tagudhængsproblematikken og 3D-bymodellens nøjagtighed er der forskel mellem facadernes koordinater i 3D-bymodellen og i virkeligheden. Hvis facaden fra 3D-bymodellen anvendes direkte til udklipning af facaden i billedet, risikeres det, at det udklippede billede af facaden vil komme til at indeholde noget af det, der grænser op til facaden; for eksempel luft, buske eller andre facader.

Prikkerne på skitsen angiver koordinaterne til facaden i 3D-bymodellen, mens trekantede symboler angiver koordinaterne til facadernes i virkeligheden.

### 6.5.1 Løsningsmodel

For at løse de to hovedproblemer har projektgruppen opstillet en løsningsmodel, skitseret figur 6.7. Først oprettes de originale billeder efter den ydre orientering, som allerede beskrevet i 6.2 *Oprettning af billeder*. Unøjagtigheden af bestemmelsen af den ydre orientering medfører en restfejl, som viser sig ved at bygningen i billedet ikke er fuldt oprettet. Dette er illustreret i figur 6.7 (A og B).

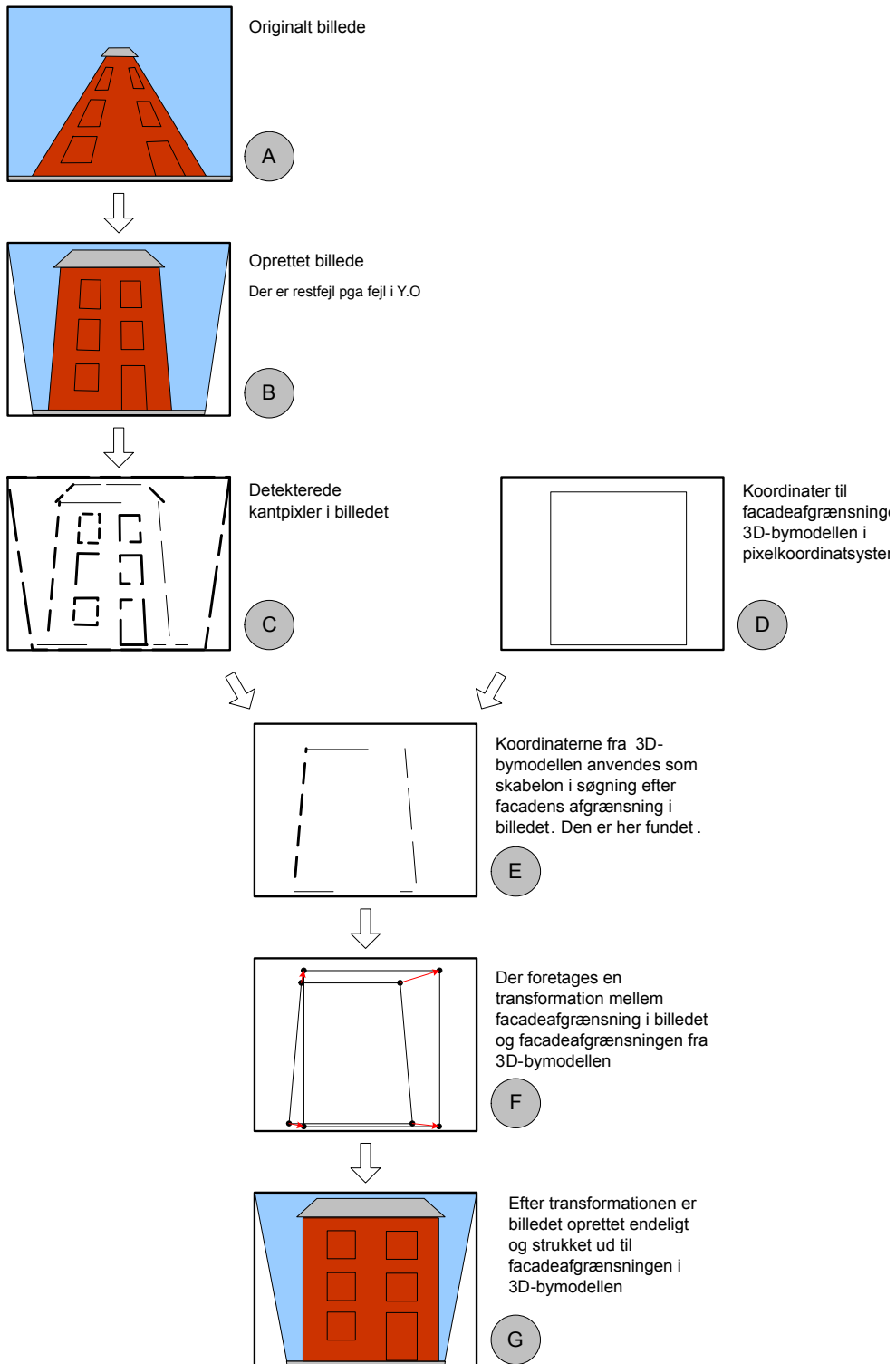
For at løse problemet foretages en kantdetektering i det oprettede billede, hvorved kantpixler findes og vises i et binært billede, jf. figur 6.7 (C). Kantdetekteringen beskrives nærmere i 6.5.2 *Detektering af kantpixler*.

Parallelt hermed projiceres koordinaterne til facadeafgrænsningen fra 3D-bymodellen ind i det oprettede billede. Det vil sige, at der beregnes pixelkoordinater til bygningsafgrænsningen, der stammer fra 3D-bymodellen. Der dannes linjer mellem de projicerede punkter, således at der opstår et binært billede af facaden, jf. figur 6.7 (D).

Facadeafgrænsningen fra 3D-bymodellen anvendes som skabelon i søgningen efter facadeafgrænsningen i det binære billede fremkommet ved detektering af kantpixler. Resultatet af søgningen er det bedste bud på facadeafgrænsningen i det oprettede billede, jf. figur 6.7 (E). Denne proces beskrives nærmere i 6.5.3 *Detektering af facadeafgrænsning i billede*.

Herefter er der to problemer, som skal løses. Da facaden i billedet ikke består af vand- og lodrette linjer, som forventet efter en oprettning, skal billedet oprettes endeligt. For det andet svarer skabelonen fra 3D-bymodellen ikke til virkeligheden grundet tagudhængsproblematikken og modellens nøjagtighed, hvorfor der opstår et affinitetsproblem. Disse to problemer kan løses ved en transformation mellem facadeafgrænsningen fundet i billedet og facadeafgrænsningen ifølge skabelonen. Der beregnes transformationsparametre mellem de markerede punkter i figur 6.7 (F), hvorefter alle billedpixelerne i det oprettede billede (B) transformeres. Yderligere overvejelser omkring transformationen fremgår af 6.5.4 *Endelig oprettning og korrektion*.

Resultatet af hele processen fremgår af figur 6.7 (G). Det færdige billede (G) er således oprettet endeligt, og facadekanterne i billedet er tilpasset facadeafgrænsningen ifølge skabelonen og dermed 3D-bymodellen. Denne tilpasning betyder, at det ofte vil være nødvendigt at strække i billedet, da tagudhængsproblematikken gør, at facaden i 3D-bymodellen er større end facaden i virkeligheden. Det vil sige, at billedet deformeres, hvilket i figur 6.7 (G) er vist ved, at døre og vinduer er blevet bredere end i virkeligheden. Billedet



Figur 6.7: Løsningsmodel til fuld opretning og klipning af facader i billeder. Skitserne er stærkt overdrevet for at lette forklaringen.

klippes efter skabelonens facadeafgrænsning og er nu klar til påsætning på 3D-bymodellen. Da billedet allerede er tilpasset 3D-bymodellen, er det ikke nødvendigt at strække billedet yderligere under påsætning af billedet på 3D-bymodellen.

Løsningsmodellen kompenserer altså for fejl i den ydre orientering samt 3D-bymodellens afvigelse fra virkeligheden.

I den beskrevne løsningsmodel er der processer som kræver yderligere behandling. Det drejer sig om:

- Detektering af kantpixler
- Detektering af facadeafgrænsning i billeder
- Endelig opretning og korrektion

De tre punkter behandles i det følgende.

## 6.5.2 Detektering af kantpixler

Til genfindning af facadeafgrænsninger i billederne anvendes blandt andet detektering af kantpixler.

En kantpixel detekteres i billedbehandling, hvor der er en stor ændring i pixelens værdi i forhold til nabopixelerne. I praksis foregår detekteringen ved filtrering. Det vil sige, at billedet gennemløbes pixel for pixel for at finde store forskelle i pixelværdierne mellem nærliggende pixler. For en mere detaljeret beskrivelse af filtrering henvises til Appendiks H. Desuden henvises til Appendiks I for en beskrivelse af principperne bag detektering af kantpixler og problemer forbundet hermed.

Projektgruppen har gennemført nogle indledende forsøg med detektering af kantpixler i billeder af bygningsfacader. I det følgende beskrives projektgruppens erfaringer på baggrund af disse forsøg.

Detekteringen af kantpixler foretages efter, det originale billede er oprettet. Der er altså manipuleret med billedet inden detekteringen, hvilket betyder, at billedet kan have mistet noget billedinformation. Det kan muligvis have nogen indflydelse på detekteringen af kanter.

Forsøgene er foretaget i Matlab 6.5 ved brug af Image Processing Toolbox, hvor det er muligt at foretage detektering af kantpixler ved prædefinerede funktioner. Da de prædefinerede funktioner til detektering af kantpixler kræver, at inputbilledet er pankromatisk, omdannes de oprettede facadebilleder i farve (RGB) til et pankromatisk billede ved hjælp af en foruddefineret funktion i Matlab. Derefter afprøves forskellige funktioner til detektering af kantpixler. Resultatet af kantdetekteringen i Matlab er et binært billede, hvor de hvide pixler angiver en kantpixel.

Der findes følgende foruddefinerede filtre til detektering af kantpixler i Matlab:

- Sobel
- Prewitt
- Roberts
- Laplacian of Gaussian (LoG)
- Zero-cross
- Canny

Desuden er det muligt, at definere egne filtre. Filtrene Sobel, Prewitt, Roberts er gradientfiltre, der detekterer en kant, hvor den afledte er maksimum. LoG er et kombineret filter, der består af et støjfilter og et kantdetekteringsfilter byggende på den anden afledte. Her detekteres en kantpixel, hvor der er zero-crosses. Alle fire filtre er kort beskrevet i Appendiks I. Filteret Zero-cross detekterer kant-

pixler ved at lede efter 2. afledte med værdier nær nul efter filtrering med et vilkårligt filter. Canny-fil-teret er mere kompliceret. Det er en kombination af et Gaussisk støjfilter og et gradientfilter. Canny-fil-teret detekterer kantpixler, hvor gradienten er maksimum. Gradienten beregnes på baggrund af et gaussisk filter. Der anvendes to grænseværdier for at detektere stærke og svage kanter. De svage kanter inkluderes kun i outputbilledet, hvis de er sammenhængende med stærke kanter. [Matlab hjælpefunktion]

Det er for alle filtrene muligt at angive en tærskel-værdi for hvilke pixelværdier, der skal accepteres som kantpixler. Angives ingen tærskelværdi bestemmer Matlab selv en tærskelværdi. Hvordan tærskelværdien bestemmes er ikke oplyst i materialet fra Matlab, men det formodes, at tærskelværdien beregnes statistisk på baggrund af det aktuelle billede.

Der er foretaget forsøg med detektering af kant-pixler på billeder af to forskellige bygninger. Den ene bygning er en enkeltstående bygning, der er kalket, jf. figur 6.8. Den anden bygning, hvis facade består af mursten, er sammenbygget med andre bygninger og har i det hele taget et mere kompliceret udseende end den første bygning, jf. figur 6.9.

Detekteringen af kantpixler er foretaget i scriptet "kantdetektering.m", jf. Bilag 1C.

De kantpixler, som projektgruppen ideelt set ønsker som output fra detekteringen af kantpixler, er kantpixler fra facadens afgrænsning og kun disse. Det er dog højst sandsynligt ikke muligt. Da projektgruppen ikke har nogen erfaring med, hvilke filtre, der er bedst egnet til formålet, er det valgt at afprøve alle seks foruddefinerede filtre på de to facadebilleder. I alle forsøg anvendes automatisk fastsættelse af tærskelværdien. Resultaterne fremgår i trykt form af bilag 6 og i digital form af bilag 1G. Figurene 6.10 og 6.11 viser eksempler på resultaterne ved detektering af kantpixler med Sobel filteret.

Det fremgår af resultaterne, at filtrene Sobel, Pre-witt og Roberts giver cirka samme resultat. Dette er ikke overraskende taget i betragtning, at alle tre filtre er gradientfiltre. Resultaterne af gennemløb med filtrene LoG, Zero-cross og Canny minder også meget om hinanden. Dette er heller ikke overraskende, idet både LoG og Canny anvender Gaussisk filter til behandling af støj og da Zero-cross filteret i dette tilfælde bygger på Canny filteret. Der er dog stor forskel mellem resultatet af de tre førstnævnte filtre sammenlignet med de tre sidstnævnte. De tre førstnævnte detekterer hovedsageligt tydelige kanter fra tagreder, byg-



Figur 6.8: Facadebillede af bygningen Hadsundvej 176.



Figur 6.9: Facadebillede af bygningen Østerbro 88.

ningshjørner og vinduer, mens de tre sidst nævnte filtre også detekterer kanter i forbindelse med mursten, græs og lignende. Fælles for alle filtre er, at der detekteres mange kanter i forbindelse med tagene, da tagstenene er markante. Desuden bemærkes, at også skyggerne fra tagudhæng og sålbænke i Bilag 6, figur 6 giver anledning til detektering af kantpixler.

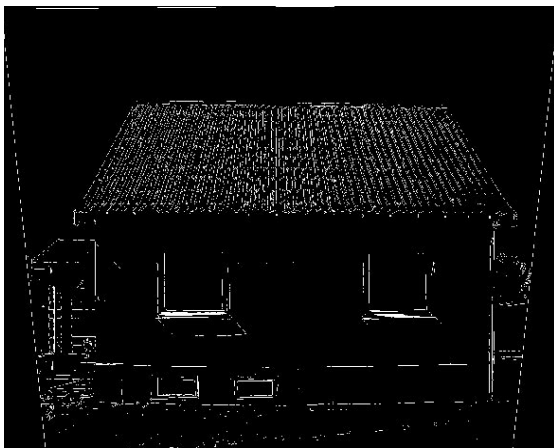
I de anvendte billeder afgrænses de to facader ikke ens. I billedet figur 6.8 afgrænses facaden af henholdsvis et bygningshjørne, et nedløbsrør, græsen mellem tag og facade samt græsen mellem græs og facade. I billedet figur 6.9 afgrænses facaden af nedløbsrør, græsen mellem tag og facade samt græsen mellem fortov og facade. I begge tilfælde er der således en forholdsvis tydelig markering af facadens afgrænsning. Derfor går detekteringen af kantpixler også forholdsvis godt i nogle af forsøgene. Det kunne dog se anderledes ud, hvis for eksempel nedløbsrørene ikke var til stede i figur 6.9. Græsen mellem to bygninger ville da sandsynligvis ikke være hverken mere eller mindre tydelig end kanter mellem mursten, hvorfor det ville være vanskeligere at detektere de ønskede kanter.

En samlet vurdering af sammenligningen mellem

de seks foruddefinerede filtre ved automatisk sat grænseværdi tyder på, at gradientfiltrene Sobel, Prewitt og Roberts er de bedst egnede til at detektere facadens kanter under de forudsætninger som billederne i figur 6.8 og 6.9 giver.

For videre at undersøge anvendelsen af forskellige filtre til detektering af facadernes kanter har projektgruppen foretaget forsøg med at variere grænseværdien for hvilke pixler, der skal betragtes som kanter. Forsøgene bygger udelukkende på filtrene Prewitt, LoG og Canny. De tre filtre er valgt fordi, de repræsenterer hver sin type. Prewitt repræsenterer gradientfiltrene, LoG repræsenterer et kombineret støj- og gradientfilter, mens Canny giver mulighed for at arbejde med to grænseværdier; en øvre og en nedre. Resultaterne af forsøgene fremgår i trykt form af Bilag 6 og i digital form af Bilag 1G.

Det ses klart af forsøgene, at grænseværdiens størrelse har en stor indflydelse på resultatet af detekteringen af kantpixler. Er grænseværdien for lav, detekteres mange kanter i forbindelse med mursten og lignende, hvorfor det ikke er let at skelne mellem facadens kanter og øvrige kanter. Vælges grænseværdien for høj, risikeres det, at de ønskede kanter slet ikke detekteres.



Figur 6.10: Hadsundvej 176. Detektering af kantpixler med Sobel filteret. Automatisk bestemt grænseværdi i Matlab.



Figur 6.11: Østerbro 48. Detektering af kantpixler med Sobel filteret. Automatisk bestemt grænseværdi i Matlab.

Sammenlignes resultaterne fra anvendelse af de tre forskellige filtre med forskellige grænseværdier, ses det, at det med hvert af de tre filtre er muligt at opnå et fornuftigt resultat, således at de binære billeder stort set kun viser de tydelige kanter fra facadernes afgrænsning og vinduerne. Resultaterne afhænger af de satte grænseværdier. Det er på baggrund af de gennemførte forsøg ikke muligt at fremhæve ét filter som bedre end ét andet. Det er heller ikke muligt at konkludere noget endeligt omkring grænseværdierne, da den optimale størrelse af disse varierer fra filter til filter og billede til billede. På samme måde er det heller ikke muligt at sige noget entydigt om automatisk valg af grænseværdierne i forhold til manuelt satte grænseværdier. Dog ser det ud til, at anvendelse af den automatiske grænseværdi i forbindelse med Prewitt giver ligeså gode, om ikke bedre, resultater end de manuelt satte grænseværdier. Det samme gør sig ikke gældende ved LoG og Canny filtrene. Her giver de manuelt satte grænseværdier et bedre resultat. Skal detekteringen af kanter implementeres i praksis, er det dog vigtigt, at fastsættelsen af grænseværdien sker automatisk. Der kan eventuelt implementeres en mere optimal metode til automatisk beregning af grænseværdien, end den Matlab anvender.

Afslutningsvis kan det konkluderes, at detektering af kantpixler er en kompleks proces. Der er mange muligheder for anvendelse af forskellige filtre og grænseværdier. Det er vanskeligt kun på baggrund af de gennemførte forsøg at fremhæve én metode frem for en anden. Dog foretrækkes et resultat, hvor kun facadens afgrænsninger er output. Som resultaterne viser, er det ikke tilfældet i nogen af de gennemførte forsøg. Der er altid andre objekter blandt output. Dette kunne yderligere forværres af træer eller andre objekter foran bygningsfacaderne. Desuden vises ikke altid facadens afgrænsninger blandt output. Linjer, der markerer facadens afgrænsning er også ofte brudte, som en følge af, at afgrænsningen ikke er lige tydelig over alt. Problemet er, at facadens

afgrænsning ikke adskiller sig betydeligt fra andre objekter i billederne. Vinduer og lignende kan være mere tydeligt markeret end facadens afgrænsning.

### 6.5.3 Detektering af facadeafgrænsning i billede

Efter detekteringen af kantpixler, handler det om at finde netop de kanter i de binære billeder, som repræsenterer facadens afgrænsning. Dette kan foregå ved en metode til genkendelse af objekter i billeder. Der findes flere forskellige metoder til genkendelse af linjer og andre objekter i billeder. Flere metoder forudsætter, at der inden genfindingen af objekterne er foretaget en detektering af kantpixler, som beskrevet i forrige afsnit. Det gælder blandt andet Hough transformationen, som behandles i dette afsnit.

Gennem artiklerne "Automated appearance-based building detection in terrestrial images" [Böhm m.fl. 2, 2001] og "Processing of 3D building models for location aware applications" [Böhm m.fl., 2001] har projektgruppen erfaret, at der med succes er gjort forsøg med anvendelse af en metode kaldet Hough transformation til genkendelse af bygninger i forbindelse med et turist navigations- og informationssystem. I artiklerne anvendes Hough transformationen til genkendelse af komplekse fritliggende bygningers silhuetter. Der anvendes til genkendelsen en skabelon, som er dannet på baggrund af en CAD-model i referencekoordinatsystemet. Princippet for turistsystemet er kort beskrevet i 2.2.2 *Øvrige automatiserede systemer og metoder* og illustreres i figurerne 2.14 og 2.15.

Projektgruppen har en ide om, at principperne vedrørende Hough transformation beskrevet i artiklerne kan anvendes i projektsammenhæng, da problemstillingen omkring genkendelse af hele bygninger i artiklerne minder om det projektgruppen har til hensigt; at genkende bygningsfacaderne.

Der findes to former for Hough transformation; Den klassiske Hough transformation og Den generelle Hough transformation. Den klassiske Hough transformation er udviklet til genkendelse af simple geometriske former som linjer, cirkler etc., mens Den generelle Hough transformation er udviklet til genkendelse af komplekse former som kurver, polygoner og lignende. Principperne bag Hough transformation er beskrevet mere detaljeret i Appendiks G. Det forudsættes i det følgende, at læseren har kendskab til Hough transformationer eller har læst Appendiks G.

I de nævnte artikler anvendes Den generelle Hough transformation til genkendelse, da bygningernes silhuetter er af mere kompleks karakter. Dette er også nødvendigt i forbindelse med genkendelse af en facades afgrænsning, idet denne også er kompleks.

Som det fremgår af Appendiks G forudsætter Den generelle Hough transformation, at der findes en skabelon af det, der søges efter. Projektgruppen har til hensigt at anvende facadens afgrænsning fra 3D-bymodellen projiceret ind i det oprettede billede som skabelon, jf. figur 6.7. Denne skabelon er som før nævnt sandsynligvis ikke i fuld overensstemmelse med virkeligheden på grund af tagudhængsproblematikken samt unøjagtigheder i forbindelse med fremstilling af 3D-bymodellen. Desuden er billederne ikke fuldt oprettet på grund af unøjagtigheden af den ydre orientering. Disse to ting tilsammen gør, at formen, størrelsen og placeringen af skabelonen samt facadens afgrænsning i billedet ikke stemmer overens med hinanden, hvorfor genkendelse af skabelonen i billedet vanskeliggøres. En vigtig pointe i brugen af Den Generelle Hough-transformation er dog, at den tillader en vis variation i form og størrelse. Hvor stor denne variation må være, før Hough-transformationen går godt, er vanskeligt at sige noget om.

I 4.1 *Inledende overvejelser om krav til systemet* har projektgruppen for at mindske søgeområdet

efter den rette facadeafgrænsning i billedet indledningsvist krævet en ydre orientering bedre end 4 gon for rotationerne og 20 cm for positionerne. Dette krav kan også være medvirkende til, at facadens form i billedet ikke afviger for meget i forhold til virkeligheden, således at den stadig kan genkendes ved brug af Hough transformationen.

Mere konkrete tal for den maksimale tilladte variation mellem billede og skabelon eller krav til den ydre orientering kræver, at der foretages nogle forsøg.

Resultatet af Hough transformationen afhænger sandsynligvis også af resultatet af den forudgående detektering af kantpixler, jf. 6.5.2 *Detektering af kantpixler*. Det formodes, at være lettere at genkende skabelonen i det binære billede, jo mere af facadens afgrænsning, der fremgår af det binære billede som en kant og des færre øvrige kantpixler, der findes i billedet. Ved man på forhånd indenfor hvilket interval, man skal lede efter et objekt, gøres søgningen både hurtigere og mere sikker. Det har projektgruppen netop forsøgt at tage højde for, ved at stille et krav om, at bestemmelsen af kame-raets ydre orientering i optageøjeblikket skal være bestemt bedre end 4 gon for rotationerne og 20 cm for positionen. Der kan dog stadigvæk inden for det angivne interval forekomme fejl, således det genkendte objekt ikke er det korrekte. I figur 6.11 er der for eksempel flere kanter nær facadens afgrænsning ud mod de øvrige bygninger. I et sådant tilfælde, vil det være vanskeligt at bestemme, hvilken kant der er den korrekte afgrænsning af facaden. Endelige konklusioner inden for dette område vil dog også kræve flere forsøg.

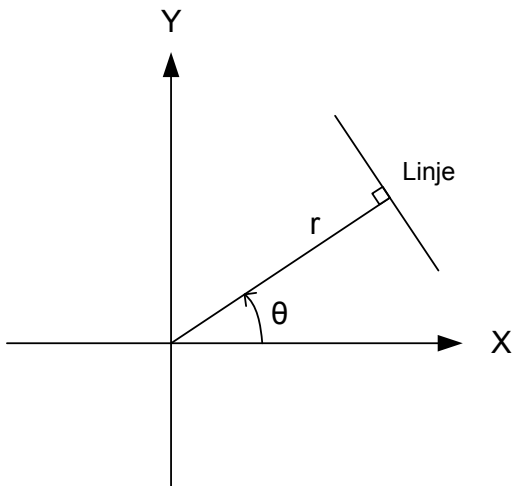
Da projektgruppen ikke har noget software til rådighed, der kan gennemføre Den generelle Hough transformation, og da denne er særdeles kompleks og derfor tidskrævende selv at programmere, har projektgruppen været nødsaget til at afgrænse sig fra forsøg med anvendelse af Den generelle Hough transformation.

For alligevel at afprøve princippet har projektgruppen foretaget forsøg med Den klassiske Hough transformation til detektering af rette linjer i de binære billeder. Forsøgene er foretaget i Matlab 6.5 med Image Processing Toolbox, hvor det er muligt at detektere rette linjer i et billede med den foruddefinerede funktion "Radon". Denne funktion er ikke en fuldstændig implementering af Den klassiske Hough transformation, men en modifikation deraf. I det følgende beskrives Radon funktionen og de gennemførte forsøg.

### Radon funktionen og gennemførte forsøg

Linjens ligning angives i Radon funktionen som i Hough transformationen på polær form med parametrene  $\theta$  og  $r$ . Disse er defineret som vist i figur 6.12. Hermed undgås problemer med at beskrive lodrette linjer ved hjælp af ligningen  $y=ax+b$ .

Input til Radon funktionen er et binært billede. Hver kantpixel i det binære billede afbildes i et parameterum som en kurve. Skæringspunkterne mellem kurverne i parameterummet indikerer, at der er sandsynlighed for, at der findes en linje i det binære billede med parametre svarende til



Figur 6.12: Radon funktionen angiver linjens parametre ved hjælp af vinklen theta og den vinkelrette afstand  $r$  fra origo til linjen.

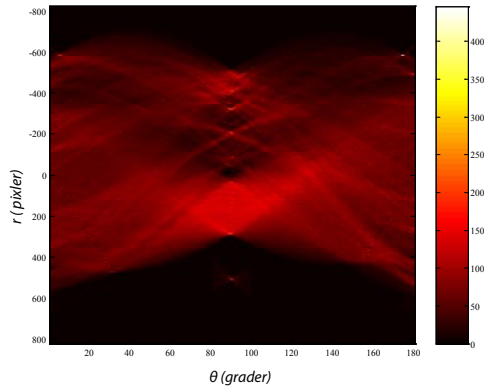
skæringspunktets koordinater. Det gælder, at jo flere kurver, der skærer hinanden i samme punkt, des større er sandsynligheden for, at der er tale om en linje i det binære billede og ikke en tilfældig linje dannet af støj eller lignende. Da der ofte vil være næsten uendelig mange muligheder for kombinationer af pixler i det binære billede, som kan danne en linje vil der forekomme næste uendelig mange skæringer i parameterummet. Hvis man på forhånd har en ide om, for eksempel hvilken hældning de linjer, man leder efter, har, er det muligt at opsætte et interval for, hvilke linjer der ønskes detekteret. Derved mindskes antallet af linjer i parameterummet.

Projektgruppen har anvendt oprettede billeder af bygningerne Hadsundvej 176 og Østerbro 48 til forsøgene. Først foretages en detektering af kantpixler i billederne. I dette tilfælde er der anvendt et LoG-filter med automatisk bestemmelse af grænseværdier til detekteringen af kantpixler. Output fra detekteringen er et binært billede, som anvendes som input til Radon-funktionen. De binære billeder fremgår af bilag 6, figur 7 og 13.

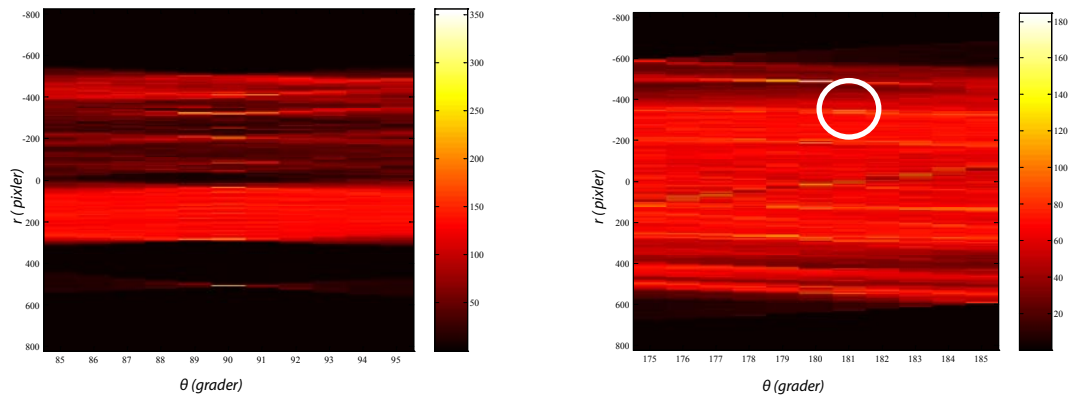
Først analyseres det binære billede af Hadsundvej 176 med Radon-funktionen med henblik på at finde rette linjer i billedet. Figur 6.13 viser parameterummet for Hadsundvej 176 i intervallet 1-180°. Som sagt, repræsenterer hver kurve i parameterummet en kantpixel i det binære billede. Der, hvor mange kurver skærer hinanden, er området markeret med gult. De gule områder indikerer altså, at der er mange pixler på en linje. Projektgruppen antager, at facadens afgrænsning i det binære billede består af mange pixler. Derfor antages, at en facadeafgrænsning vil være markeret med et gult område i parameterummet.

Det ses af figur 6.13, at der er mange kurver som skærer hinanden omkring 80-100°, hvilket tyder på, at der er mange vandrette linjer i det analyserede billede. Dette analyseres nærmere i det følgende.

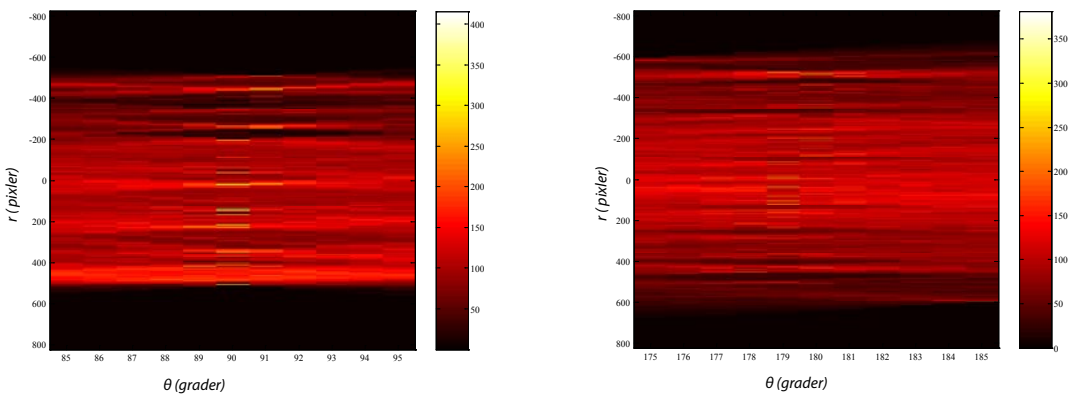




Figur 6.13: Illustration af parameterummet i forbindelse med anvendelse af Radon funktionen i Matlab til detektering af linjer i binært billede indeholdende kantpixeler af Hadsundvej 176. Intervallet er 1-180°.



Figur 6.14: Illustration af parameterummet i forbindelse med anvendelse af Radon funktionen i Matlab til detektering af linjer i binært billede indeholdende kantpixeler af Hadsundvej 176. Til venstre ses parameterummet i intervallet 85 til 95° og til højre ses parameterummet i intervallet 175-185°. De gule områder i parameterummet angiver, at der er mange linjer, som går gennem punktet, hvorfor der sandsynligvis er tale om, at der er detekteret en ret linje.



Figur 6.15: Illustration af parameterummet i forbindelse med anvendelse af Radon funktionen i Matlab til detektering af linjer i binært billede indeholdende kantpixeler af Østerbro 48. Til venstre ses parameterummet i intervallet 85 til 95° og til højre ses parameterummet i intervallet 175-185°. De gule områder i parameterummet angiver, at der er mange linjer, som går gennem punktet, hvorfor der sandsynligvis er tale om, at der er detekteret en ret linje.

Da hensigten er, at finde facadernes afgrænsning, har projektgruppen begrænset søgeområdet. Facadernes afgrænsninger er karakteriseret ved alle at være nær lodrette eller vandrette. På baggrund af denne viden opsættes to  $\theta$ -intervaller i parameterrommet indenfor hvilke, der "søges" efter rette linjer.  $\theta$ -intervallerne er  $85\text{--}95^\circ$  for vandrette linjer og  $175\text{--}185^\circ$  for lodrette linjer.

Figurerne 6.14 og 6.15 viser parameterrommene for henholdsvis Hadsundvej 176 og Østerbro 48. Af figur 6.14 ses, at der ved  $\theta \approx 181^\circ$   $r \approx -400$  er et mindre gult område i parameterrommet. Dette gule område er markeret med en hvid ring og repræsenterer den røde linje i figur 6.16.

Farverne i parameterrommene er kun en indikator for, hvor der er en kant bestående af mange pixler i billedet. Der er således et output i form af en linje for alle skæringer i parameterrommet. Det gælder både linjer eller kanter, som virkelig findes i det oprettede billede og som består af mange kantpixler i det binære billede, men også tilfældige og falske linjer som ikke eksisterer i virkeligheden, men blot består af få tilfældige pixler i det binære billede. Projektgruppen antager, at facadens afgrænsning i det binære billede består



Figur 6.16: Illustration af en detekteret linje i billedet af Hadsundvej 176 samt linjens parametre. Den detekterede linje har parametrene  $\theta=181^\circ$  og  $r=-400$ .

af mange pixler i forhold til andre linjer og ønsker derfor kun linjer med mange pixler som output fra Radon funktionen. Derfor skal der sættes en tærskelværdi for hvor mange linjer, der mindst skal skære hinanden i samme punkt i parameterrommet, før der er tale om en facadeafgrænsning. Det vil sige, hvor mange pixler en detekteret linje i det binære billede mindst skal bestå af, før vi tror på, at der er tale om en facadeafgrænsning og ikke en tilfældig linje.

Denne tærskelværdi er ikke nogen let størrelse at håndtere, idet det let kan forekomme, at der er kanter i det binære billede, som består af flere pixler end facadeafgrænsningen. Er det tilfældet, detekteres ikke kun facadeafgrænsningerne, men også linjer bestående af lige så mange eller flere pixler.

Ved manuelt at aflæse på farverne i figurerne 6.14 og 6.15 og afprøve forskellige værdier har projektgruppen manuelt sat en tærskelværdi. Tærskelværdierne er ikke sat ens for de to billeder, idet der er forskellig grad af ikke ønskede kantpixler i det to binære billeder af bygningerne. Grænseværdierne er manuelt sat til henholdsvis 230 og 130 for vandrette linjer og lodrette linjer for bygningen på Hadsundvej. Tilsvarende grænseværdier er sat til henholdsvis 190 og 220 for Østerbro 48. Tærskelværdierne er endeligt valgt således, at bygningens afgrænsninger netop bliver detekteret. De valgte tærskelværdier betyder, at der kun detekteres forholdsvis få linjer i billederne. Resultatet af de to forsøg fremgår af figurerne 6.17 og 6.18. Det ses af figurerne, at alle facadernes afgrænsninger på nær afgrænsningen mod fortovet på Østerbro er fundet. Desuden er der fundet en del andre kanter i forbindelse med vinduer, andre bygningsafgrænsninger etc. Det ville selvfølgelig være mere optimalt, hvis kun netop facadens afgrænsninger blev detekteret. Dette er dog under de givne forudsætninger ikke umiddelbart muligt. Forsøg med andre grænseværdier med henblik på kun at detektere facadens afgrænsninger har vist, at højere grænseværdier blot betyder, at

netop facadernes afgrænsninger ikke detekteres, mens nogle af de andre linjer stadig detekteres. Problemet er altså, at facadernes afgrænsninger ikke nødvendigvis er de linjer i det binære billede, som er repræsenteret ved flest kantpixler.

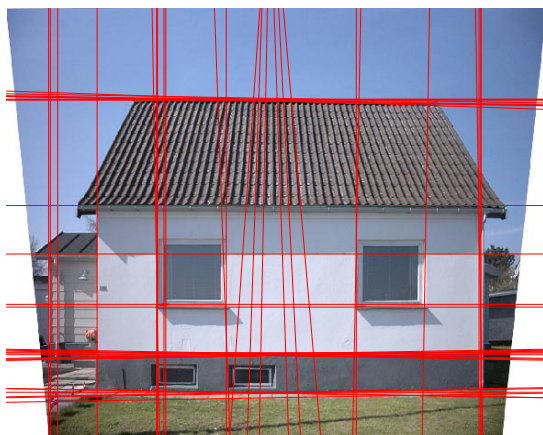
Skal hele billedbehandlingssystemet fungere automatisk, skal også Hough transformationen inklusiv fastsættelse af grænseværdier foregå automatisk. Der skal derfor udvikles en metode til automatisk fastsættelse af grænseværdier.

Metoden kan desuden yderligere forbedres, hvis en ca. position af facadens afgrænsning kendes. Dette er netop tilfældet i projektsammenhæng, hvor koordinaterne til facadens afgrænsning kendes fra 3D-bymodellen i pixelkoordinatsystemet i form af en skabelon, jf. figur 6.7. Det vil sige, at vi kender en ca. værdi for facadeafgrænsningernes  $r$ -værdi. Oplysningerne om facadeafgrænsningernes  $r$ -værdi kan anvendes til at afgrænse søgeområdet efter næsten vandrette og lodrette linjer på samme måde, som vi i det beskrevne forsøg har afgrænset søgningen ud fra kendskab til  $\theta$ -værdierne til facadeafgrænsningerne. Dette vil antageligt forbedre metoden betragteligt, men resultatet afhænger selvfølgelig stadig af, at de ønskede kanter er tydelige nok til, at de detekteres, og at der ikke er andre lignende kanter

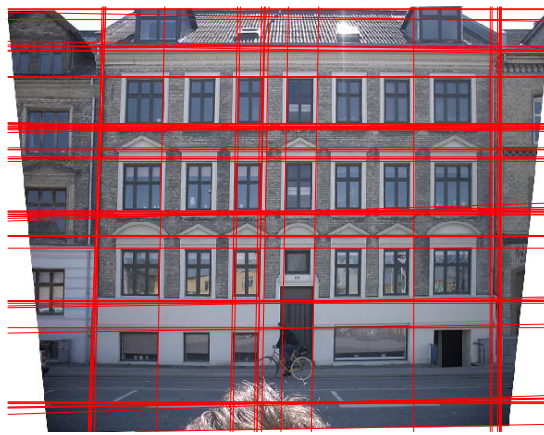
i umiddelbar nærhed. Er der det, vil der være risiko for, at en forkert kant vælges som facadens afgrænsning.

Metoden kan også anvendes til facader, der ikke har rektangulært udseende; for eksempel gavle og andre typer jf. figur 6.19. Da alle facadekanternes hældninger og positioner er kendte i 3D-bymodellen, bør det være muligt at søge specielt efter kanter, der opfylder de kendte forudsætninger om hældning og position.

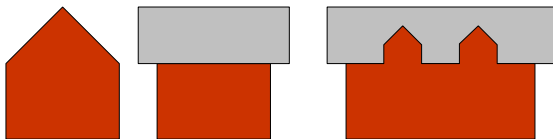
Projektgruppen har i det foregående arbejdet med nogle af de værktøjer, der kan anvendes til detektering af bygningers facadeafgrænsninger i billeder i form af nogle indledende forsøg. Af tidsmæssige årsager er der ikke arbejdet videre med detektering af kantpixler og detektering af facadeafgrænsninger. Der er dog masser af problemstillinger at arbejde videre med. Forsøgene omfattede kun detektering af facadekanter ved genkendelse af rette linjer, og de viste fine indledende resultater. Projektgruppen har dog en formodning om, at Den generelle Hough transformation vil egne sig endnu bedre til formålet, idet det må være lettere at genkende et mere komplekst objekt frem for blot en linje. Det er dog gisninger, hvorfor konklusioner på det område vil kræve flere forsøg.



Figur 6.17: De detekterede linjer illustreret ovenpå et billede af bygningen Hadsundvej 176.



Figur 6.18: De detekterede linjer illustreret ovenpå et billede af bygningen Østerbro 48.



Figur 6.19: Eksempler på forskellige typer af facader. Først en gavl. Derefter to bygninger set forfra.

Et af hovedproblemerne i forbindelse med detektering af kantpixler og genkendning af objekter er automatisk fastsættelse af grænseværdier. Dette bør der arbejdes videre med.

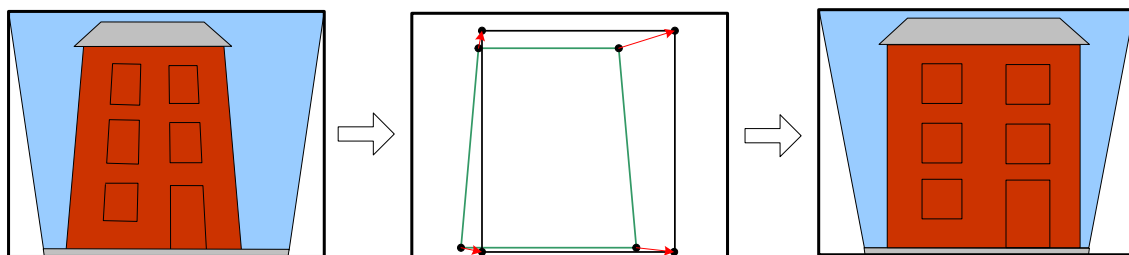
Endelig skal det konkluderes, at der er afprøvet forskellige teknikker til detektering af facadernes afgrænsninger. Da resultaterne af de indledende forsøg er forholdsvis gode, er det projektgruppens vurdering, at det bør være muligt at anvende teknikkerne til det angivne formål. En implementering af teknikkerne kræver dog en del mere arbejde.

Efter den rigtige facadekant forhåbentligt er fundet ved hjælp af ovenstående metoder, skal billederne som det fremgår af figur 6.7 oprettes og korrigeres efter facadeafgrænsningerne i 3D-bymodellen.

## 6.5.4 Endelig opretning og korrektion

Som beskrevet i 6.5.1 *Løsningsmodel* oprettes billederne af facaderne ikke fuldstændigt, da den ydre orientering er fejlbehæftet. Derfor skal der gennemføres en endelig opretning. Desuden skal der løses et affinitetsproblem, idet billedet skal strækkes ud eller ind til facadeafgrænsningen, som den er defineret i 3D-bymodellen. Problematikken er illustreret i figur 6.20.

Opretningen og affinitetsproblemet kan løses ved en eller anden mere kompleks form for transformation, ud fra kendskab til fire fællespunkter på henholdsvis facadeafgrænsningen i billedet og facadeafgrænsningen jævnfør skabelonen, der stammer fra 3D-bymodellen, jf. figur 6.20. Dette kræver, at der opstilles en transformationsligning, som kan klare denne type af transformation. Transformationen skal kunne foretage en rotation, to flytninger og endelig en målestoksændring afhængig af, hvilken pixel, der behandles. I den midterste skitse på figur 6.20 er der for eksempel tale om en forskellig horisontal målestoksændring afhængig af, om man befinder sig øverst eller nederst i billedet. En anden mulighed er, at foretage en polynomietransformation af højere grad. Projektgruppen har af tidsmæssige årsager ikke arbejdet videre med denne del af processen og har derfor ikke opstillet en sådan transformationsligning.



Figur 6.20: Til venstre ses det oprettede billede med restfejl. Restfejlen er i dette tilfælde illustreret ved, at billedet af facaden ikke indeholder lodrette linjer, hvor linjerne burde være lodrette. I midten ses den ved kantdetektering fundne facadeafgrænsning i billedet og facadeafgrænsningen fra 3D-bymodellen markeret med henholdsvis grønt og sort. De røde pile markerer en transformation. Til højre ses det endelige resultat; billedet af facaden er ved tranformation oprettet og strækket ud til 3D-bymodellens facadeafgrænsning.

Det skal nævnes, at transformationen ikke foretager en egentlig opretning. Det betyder, at der ikke tages hensyn til målforholdet, som det sker ved opretning. Dette vil sandsynligvis ikke betyde ret meget, da der kun er mindre hældningsforskydninger tilbage i billedet.

## 6.6 Påsætning af billeder på 3D-bymodel

Projektgruppen har afgrænset sig fra at beskæftige sig med selve påsætningen af de færdigoprettede billeder på 3D-bymodellen. Ideen er dog, at de færdigoprettede billeder gemmes i en database og linkes til facaderne i 3D-bymodellen, hvorefter billederne automatisk hentes ind i 3D-bymodelen.

Som beskrevet i 2 *Fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller* anvender man i Danmark i dag softwaret Studio Max og Skyline til påsætning af facadebilleder på 3D-bymodeller. Facadebillederne påsættes manuelt ét efter ét. Skal påsætningen fremover foregå i samme software, skal det undersøges, om påsætningen kan ske automatisk ved at trække facadebillederne fra en database. Alternativt kan der anvendes eller udvikles andre programmer til påsætningen. Under alle omstændigheder kræver denne del yderligere undersøgelse.

## 6.7 Alternativ løsningsmodel

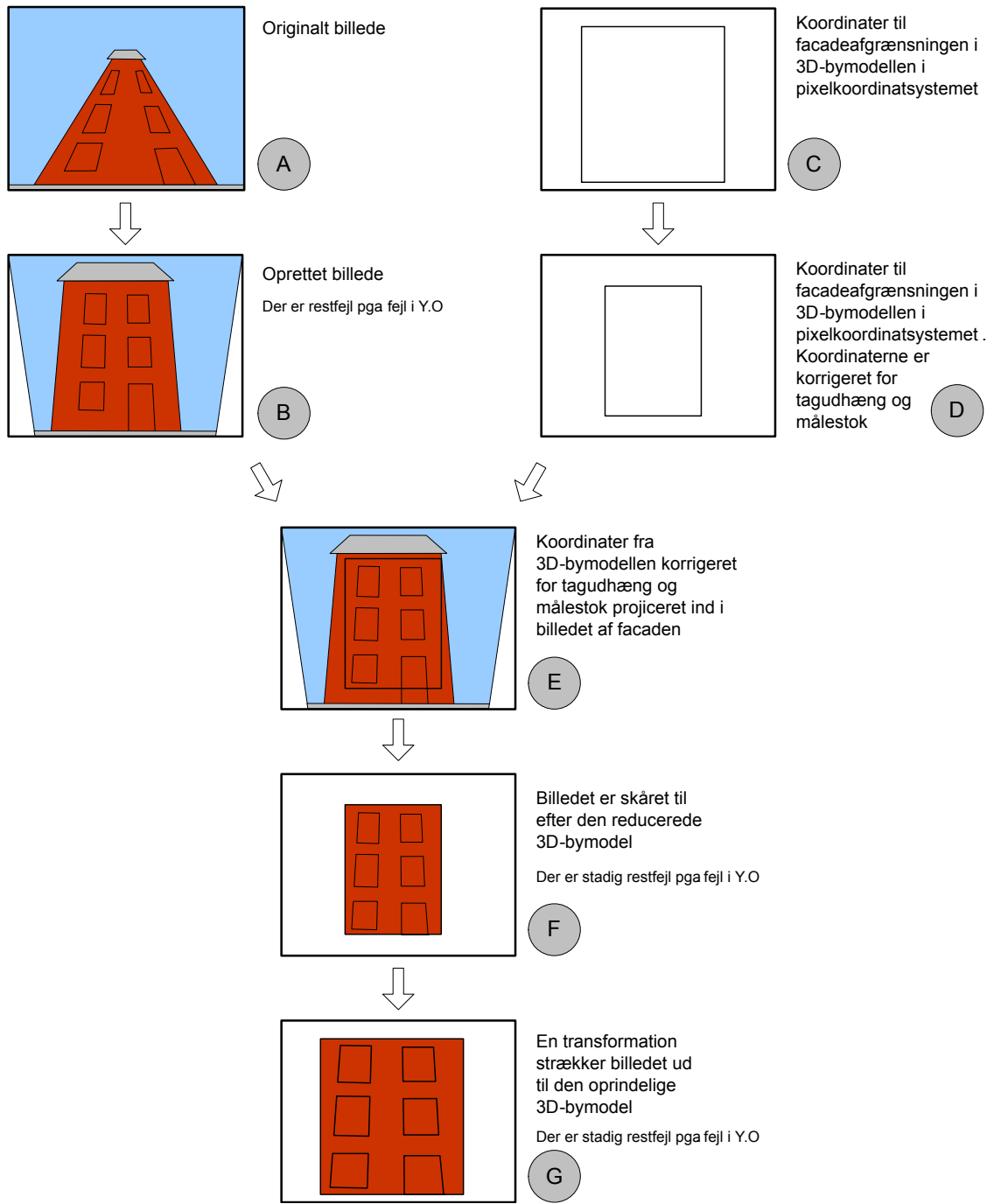
I det forrige har projektgruppen behandlet en løsningsmodel for billedbehandlingen i forbindelse med automatisk indsamling og påsætning af billeder. Løsningsmodellen er ret kompleks, idet den bygger på en billedopretning, detektering af kantpixels, detektering af bygningsfacaden i 3D-bymodellen samt en endelig opretning og affin ændring af facadebilledet. Netop på grund af denne kompleksitet har projektgruppen valgt at afprøve en alternativ løsningsmodel. Den alternative løsningsmodel er illustreret på figur 6.21.

Den alternative løsningsmodel indeholder overordnet de samme problemstillinger omkring geokodning, dannelse af mosaikker, opretning af billeder, klargøring af billeder og påsætning af billeder på 3D-bymodel, jf. figur 6.1. Den alternative løsningsmodel adskiller sig kun fra den forrige i punktet "Klargøring af billeder", hvorfor kun denne del beskrives i det følgende.

Princippet for den alternative løsningsmodel er som følger. Først oprettes facadebillederne ud fra kendskab til den ydre orientering af kameraet i optageøjeblikket, jf. figur 6.21 (A og B). Da den ydre orientering ikke er bestemt nøjagtigt, indeholder det oprettede billede en restfejl, som allerede beskrevet. Her vælges det imidlertid at se bort fra denne restfejl og betragte billedet som tilfredsstillende oprettet.

Det eneste problem, der herefter skal løses er, at få facaden klippet ud af billedet det rigtige sted. Anvendes facadeafgrænsningen i 3D-bymodellen projiceret ind i billedet som "klippegrænse" risikeres det, at der kommer mere med i billedet af facaden end kun facaden, da facaden i 3D-bymodellen ofte vil være større end facaden i virkeligheden på grund af tagudhængsproblematikken og modellens nøjagtighed.

Ideen bag denne løsningsmodel er blot at antage, at tagudhænget har en bestemt størrelse; for eksempel  $\frac{1}{2}$  meter. Facadens bredde i 3D-bymodellen reduceres med  $\frac{1}{2}$  meter i hver side. På tilsvarende vis reduceres facaden yderligere for eksempel 15 cm ind mod midten i begge retninger, da 3D-bymodellen er målt med 15 centimeters nøjagtighed. Da facaden i 3D-bymodellen ofte befinder sig tættere på kameraet end facaden gør i virkeligheden på grund af tagudhængsproblematikken, opstår der en målestoksfejl. Denne korrigeres der for, ved at gøre 3D-bymodellen mindre i begge retninger, jf. figur 6.21 (C og D).



Figur 6.21: Alternativ løsningsmodel til opretning og klipning af facader i billeder. Skitserne er stærkt overdrevet for at lette forklaringen.



Den korrigerede facade i 3D-bymodel projiceres ind i det oprettede billede, jf. figur 6.21 (E). Som det ses, er facaden i billedet og i den korrigerede 3D-bymodel forskudt i forhold til hinanden på grund af restfejlen i det oprettede billede. Desuden er facaden i den korrigerede 3D-bymodel mindre end facaden i billedet, da facaden i 3D-bymodellen er reduceret for meget. Det er i den forbindelse vigtigt, at facaden i 3D-bymodellen reduceres lidt for meget i stedet for lidt for lidt, da der ellers vil kunne komme blå himmel med i det udklippede facadebillede.

Den korrigerede facade i 3D-bymodellen projiceres ind i billedet anvendes til at klippe facaden ud af billedet. Resultatet bliver, som det ses af figur 6.21 (F), et billede af facaden, som ikke er fuldstændigt oprettet og hvor der eventuelt er klippet noget af facaden både i højden og bredden.

Endelig gennemføres en affin transformation, hvorved billedet af facaden tilpasses til udstrækningen af facaden i den oprindelige 3D-bymodel, jf. figur 6.21 (C og G).

Der er flere problemer at tage hensyn til i forbindelse med denne metode. For det første kræves der kendskab til tagudhængets størrelse. Denne kunne selvfølgelig skønnes for hver enkelt bygning, men dette ville være tidskrævende. Derfor er ideen, at størrelsen på tagudhænget sættes én gang for alle ud fra et skønnet middel eller maksimum af tagudhænget på bygningerne i den bydel, der skal fotograferes. Derved vil der blive klippet samme størrelse af alle facadebillederne uanset størrelse på tagudhæng. Ved facader, hvor tagudhænget er større end gennemsnittet, vil der blive klippet for lidt af og omvendt. Gruppens holdning er, at det er bedre, at der klippes lidt for meget end lidt for lidt, da det ikke betyder så meget, om der mangler et par mursten på facadebilledet. Derimod ser det underligt ud, hvis der er stakit, blå himmel eller andet på facaden, hvis der klippes for lidt af.

Et andet problem er, at nøjagtigheden af bestemmelsen af den ydre orientering er medbestemmende for, hvor meget der skal klippes af facaden. Er den ydre orientering bestemt med en fejl vil facaden i det oprettede billede være forskudt og/eller drejet i forhold til virkeligheden. Dennes forskydning og drejning skal der kompenseres for ved at klippe yderligere af billedet. Klippingen betyder, at der vil blive skåret mere af facaden i den ene side end i den anden side, jf. figur 6.22. Da der ønskes klippet så lidt af facaden som muligt, kræver metoden en bedre bestemmelse af den ydre orientering af kameraet end den forrige løsningsmodel. Projektgruppen vurderer, at det vil kunne accepteres, at der skæres ca. 20 cm af facaden i hver side på grund af fejl i den ydre orientering. De 20 cm betyder overslagsmæssigt i 5 meters afstand mellem kamera og facade, at kravet til den ydre orientering ved anvendelse af den alternative løsningsmodel er ca. 1 gon, jf. 6.23. På samme måde skal kravet til positionsbestemmelsen skønsmæssigt sættes op til ca. 5 cm. Disse krav kan ikke helt opfyldes af den

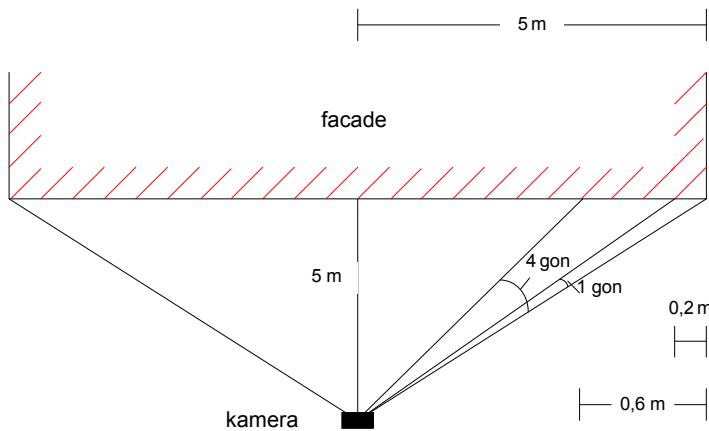


Figur 6.22: Den røde linje viser facadeafgrænsningen i 3D-bymodellen projiceret ind i det oprettede billede med restfejl. Den blå linje viser, hvor meget der kommer med af facaden i det endelige facadebillede, efter der er klippet af billedet for at kompensere for tagudhængsproblematikken, 3D-bymodellens unøjagtighed samt fejl på den ydre orientering. Jo bedre den ydre orientering er, des mindre skal der klippes af facaden for at undgå himmel med mere i facadebilledet.

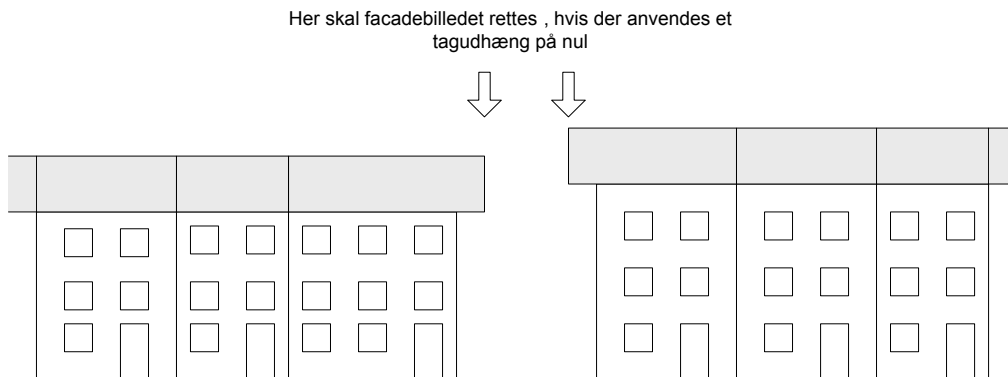
fremstillede prototype, men det vurderes at være muligt, hvis der anvendes filtrering eller yderligere instrumenter til at forbedre bestemmelsen af den ydre orientering.

Ovenstående betyder, at vælges der at regne med et tagudhæng på  $\frac{1}{2}$  meter, en 3D-bymodelnøjagtighed på 15 cm og en nøjagtighed af den ydre orientering på 20 cm, skæres der ialt maksimalt 85 cm af facaderne i siderne og 35 cm af facaderne i top og bund. Forekommer det, at der intet tagudhæng er på en bygning, og er den ydre orientering perfekt, skæres altså 70 cm for meget af bygningsfacaden. Det er derfor vigtigt,

at gættet på tagudhængets størrelse er godt. I tætte byområder, hvor det mobile kortlægnings-system påtænkes anvendt, sidder bygningerne sammen, og tagudhængene er derfor minimalt til siderne. I sådanne tilfælde vil der kunne anvendes en tagudhængsstørrelse på nul eller tæt derpå. I tilfælde af tagudhæng i forbindelse med en afbrydelse af bygningsrækken, hvor der ofte vil være et større tagudhæng jf. figur 6.24, vil der selvfølgelig forekomme en fejl, hvis der anvendes en værdi på nul for tagudhængene. I så fald vil dette kunne rettes efterfølgende i forbindelse med en kontrol af facadebillederne inden de sættes på 3D-bymodellen.



Figur 6.23: Skitse over anslået krævet nøjagtighed for den ydre orientering ved anvendelse af den alternative løsningsmodel.



Figur 6.24: Bygninger i tæt bebyggelse. Der er intet eller næsten intet tagudhæng på bygningernes sider, hvorfor der intet eller næsten intet skal klippes af facadebillederne som følge af tagudhæng. Ved brud mellem bygningerne i forbindelse med vej eller lignende forekommer der ofte tagudhæng. Her vil facadebillederne skulle rettes, hvis der anvendes en tagudhængsstørrelse på nul.



I ovenstående beregningseksempler er der ikke korrigeret for fejl i billedets målforholdet, som en følge af, at billedet er oprettet efter 3D-bymodel-len målt til tagudhæng. Det betyder, at billedet af facaden er mindre end det burde være. Dette skal der også kompenseres for, ved klipning af facaden. Problemet løses ved at "skrumpe" det blå rektangel i figur 6.22 yderligere svarende til målforholdsfejlen, hvilket også er vist i figur 6.21. Der kan dog i stedet tages hånd om problemet allerede ved opretningen af billedet, ved at gætte tagudhængets størrelse fremad ud mod kameraet og kompensere det dannede grid til opretning for denne afstand. Er tagudhængets størrelse gættet rigtigt, oprettes billedet i det korrekte målforhold. Denne løsning har projektgruppen valgt ved implementeringen.

Den alternative løsningsmodel medfører som sagt, at billedet ikke oprettes fuldstændigt. Det betyder, at det kan forekomme, at de linjer i billedet som burde være lod- eller vandrette, ikke er fuldstændig lod- eller vandrette. Er der kun en fejl i den ydre orientering på ca. 1 gon, vurderes denne fejl at være ubetydelig i visualiseringssammenhæng. Skulle billederne anvendes til at måle i, var sagen selvfølgelig en anden.

Projektgruppen har programmeret og implementeret den alternative løsningsmodel, jf. Matlab scriptet "opretning.m" i Bilag 1C. Programmet udfører billedopretningen og klargøringen af billederne til påsætning. I praksis følger den programmerede rutine ikke fuldstændigt rækkefølgen for processerne beskrevet ovenfor og vist i figur 6.21, idet trinene mellem det originale billede (A) og det færdige billede klar til påsætning på 3D-bymodellen (G) er programmeret i en lidt anden rækkefølge end beskrevet. Figuren viser blot princippet.

## 6.8 Delkonklusion

Nærværende kapitel omhandlede design af de billedbehandlingsrutiner, som er nødvendige i

forbindelse med automatiseret behandling og påsætning af billeder indsamlet med MKS'et.

Der er i forbindelse med billedbehandlingen og påsætningen af billeder påpeget flere problemer, som skal løses, for at påsætningen af de indsamlede billeder kan ske automatisk. Det gælder geokodning af billeder, opretning af billeder, dannelse af mosaikker, klargøring af billeder og påsætning af billeder på 3D-bymodellen. Projektgruppen har valgt i dette projekt at arbejde med opretningen samt klargøringen af billeder. Oprettningen blev foretaget ved anvendelse af stråleligningerne, mens der i kapitlet er skitseret to løsningsmodeller for klargøringen af billeder til påsætning på 3D-bymodeller.

Den første løsningsmodel er forholdsvis kompleks. Ideen bag metoden er, at kravene til nøjagtigheden af den ydre orientering bestemt af MKS'et ikke behøver at være så store, da facadeafgrænsningen i billedet findes ved kantdetektering, Hough transformation etc. Fordelen ved denne metode er i teorien, at billederne oprettes så godt som muligt, og at de korrekte facadeafgrænsninger i billedet findes. Problemerne ved denne metode er hovedsageligt fastsættelse af grænseværdier, fastsættelse af søgeområde og endelig fastsættelse af krav til den ydre orientering. Desuden kræver metoden, at facadeafgrænsningerne er tydelige i billederne. Der er gennemført en række indledende forsøg med henblik på implementering af løsningsmodellen. For endeligt at kunne vurdere anvendeligheden af denne løsningsmodel i praksis, kræves yderligere forsøg.

Den anden løsningsmodel er langt mere simpel, men kræver til gengæld en bedre bestemt ydre orientering, idet facaderne i billederne blot udklippes ved hjælp af facaden i 3D-bymodellen uden at søge efter den korrekte facadeafgrænsning i billedet. Klippingen foretages ud fra forudsætninger om størrelse på tagudhæng, 3D-bymodellens nøjagtighed og nøjagtigheden af den ydre orientering. Ulempen ved metoden er,

at alle facader behandles ens uanset størrelsen på tagudhæng, nøjagtighed etc., hvorfor der klippes mere eller mindre af nogle facader, end der burde. Desuden vil der stadig være en restfejl i billederne som følge af fejlen i den ydre orientering. Metoden er implementeret og vurderes på baggrund af indsamlet data i *7 Implementering*.

Uanset hvilken af de to metoder, der implementeres i MKS'et, vil de færdige billeder klar til påsætning kræve en manuel kontrol, idet der ved begge metoder kan ske fejl.



# 7 Implementering

Dette kapitel omhandler implementeringen og realiseringen af den første prototype på MKS'et og test af systemet på et kontrolfelt. Først oprides designet af den fremstillede prototype på et MKS inklusiv beregnings- og billedbehandlingsrutiner. Dernæst foretages en vurdering af prototypen gennem diverse test af systemet.

## 7.1 Prototypen

Den udarbejdede prototype af MKS'et består nu af et kamera og et GPS-multiantennesystem monteret på en bil samt rutiner til opretning og klipning af de indsamlede billeder. På grund af manglende soft- og hardware til synkronisering af GPS-positioner og kamera holder MKS'et stille ved billedoptagelsen. Der er altså tale om et "stop and go" princip. Da der endnu ikke er programmeret software til dannelse af billedmosaikker, skal MKS'et ved billedoptagelse placeres således, at den enkelte facade dækkes fuldstændigt af ét billede. Til test af systemet må der derfor vælges facader af en størrelse, som kan være inden for billedets åbningsvinkel. På samme måde må afstanden fra MKS'et til facaden tilpasses således, at den aktuelle facade kan være i ét billede.

På figur 7.1 ses et flowdiagram over det samlede system, som det er implementeret. I den følgende gennemgang af figuren, henvises til tallene i figurens firkanter og ellipser. Alle beregninger er foretaget i Matlab.

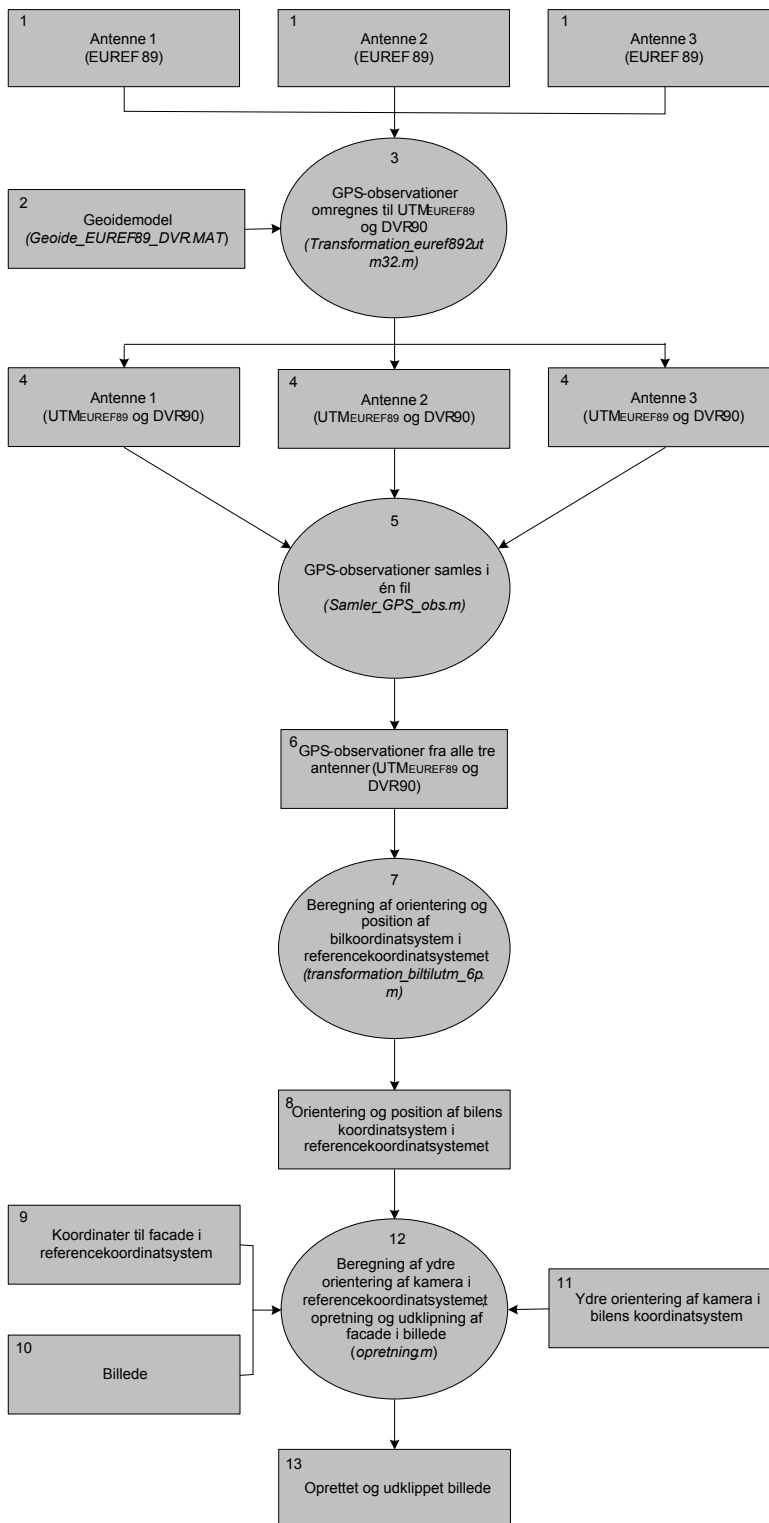
Ved hver position, hvor der optages et billede indsamles GPS-observationer bestående af én epoke til de tre antenner på MKS'et. Observationerne indsamles i EUREF89 og køres gennem softwaret SKI-

Pro. Herefter findes en fil med GPS-observationer i EUREF89 til hver antenne (1). Disse observationer omregnes via (3) til  $UTM_{EUREF89}$  og DVR90. Højden til GPS-antenneerne interpoleres på baggrund af ellipsoidehøjden i EUREF89 og geoidmodellen "Geoide\_EUREF89\_DVR.MAT" (2). Resultatet er en fil fra hver antenne med GPS-observationer i  $UTM_{EUREF89}$  og DVR90. Disse observationer samles i én fil (6) via scriptet i (5). Filen anvendes som input i (7), der beregner position og orientering af bilens koordinatsystem i  $UTM_{EUREF89}$  og DVR90 ved en 6-parameter 3D transformation. Den beregnede position og hældning af bilen (8) anvendes i (12) sammen med den ydre orientering af kameraet i bilens koordinatsystem (11) til beregning af den ydre orientering af kameraet i  $UTM_{EUREF89}$  og DVR90. I samme script (12) foretages desuden ved hjælp af stråleligningerne og kendskab til facadens koordinater i referencekoordinatsystemet (9) en opretning og derefter en klipning af det optagede billede (10), hvorefter det oprettede og klippede billede (13) er klar til påsætning på en 3D-bymodel.

## 7.2 Test af prototypen

For at kunne vurdere prototypen, foretages en række test af systemet. Disse test ligger til grund for følgende vurderinger:

- Vurdering af billedopretningsrutine
- Vurdering af GPS-bestemt ydre orientering til billedopretning
- Vurdering af det samlede system



Figur 7.1: Flowdiagram for beregnings- og opretningsrutine i den opbyggede prototype på et MKS.

For det første foretages en test af billedopretningsrutinen. Formålet med denne test er at sikre, at denne rutine foregår uden fejl. Er der fejl i billedopretningsrutinen, vil denne fejl afspejle sig i det endelige resultat.

For det andet foretages en test af de oprettede billeder, ved anvendelse af én GPS-epoke til bestemmelse af kameraets ydre orientering i forhold til referencesystemet. Formålet med denne test er at vurdere, hvor godt billedopretningen foretages, når GPS-multiantennesystemet anvendes til bestemmelse af den ydre orientering.

Til sidst vurderes det samlede system, hvor den alternative løsningsmodel, jf. 6.7 *Alternativ løsningsmodel* anvendes til at klargøre billederne til påsætning på en 3D-bymodel.

### Anvendt 3D-bymodel og indmåling af reference til kontrol

Projektgruppen har gennem kontakt til Aalborg Kommune og VR Media Lab på AAU forsøgt at fremskaffe en 3D-bymodel af en del af Aalborg by. Dette er imidlertid ikke lykkedes. Derfor har projektgruppen valgt selv at indmåle nogle bygningsfacader, som gør det ud for en 3D-bymodel. En fordel herved er, at der opnås kendskab til hvilke punkter, der er målt til samt nøjagtigheden af koordinaterne i 3D-bymodellen, således at fejl fra 3D-bymodellen kan udelukkes ved vurdering af MKS'et.

Der er i alt indmålt fem forskellige bygningsfacader i Aalborg. Disse er efterfølgende benævnt "Hadsundvej 176", "Østerbro 48", "Østerbro 50", "Østerbro 52" og "Fibigerstræde 14". De fem facader er indmålt med polær måling med en reflektorløs totalstation. Ved den polære måling tages opstilling i et kendt punkt, og der tages udgangspunkt til at andet kendt punkt. De to kendte punkter er etableret ved at slå to rør i jorden, hvorefter disse måles med RTK med 10 epoker, hvorved der efter projektgruppens erfaringer kan forventes

en nøjagtighed i plan og højde på henholdsvis 1 cm og 1½ cm. GPS-observationerne til de to opstillingspunkter foretages i EUREF89, hvorefter de omregnes til UTM<sub>EUREF89</sub> og DVR90. Derved fås koordinaterne til facaderne i UTM<sub>EUREF89</sub> og DVR90, som forudsat.

Bygningsfacaderne i 3D-bymodellen er indmålt, som de ville være gjort fotogrammetrisk; det vil sige til tagudhæng, hvorefter der er beregnet et punkt med samme plane koordinat ved terrænhøjden, der også er målt. Bygningsfacaden målt på denne måde, anvendes til vurdering af det samlede system, jf. 7.5 *Vurdering af det samlede system*.

Projektgruppen har endvidere målt facadens virkelige afgrænsning; det vil sige, at der er målt til fri mur over sokkel. Denne anvendes til at teste GPS-observationer anvendt til bestemmelse af den ydre orientering til billedopretning, jf. 7.4 *Vurdering af GPS-bestemt ydre orientering til billedopretning*. Herved afgrænses der fra den fejl, der opstår, når 3D-bymodellen er målt til tagudhæng.

Samtidig med indmåling af facader, er der også indmålt en række kontrolpunkter på facaderne. Disse anvendes ved vurderingen i 7.4 *Vurdering af GPS-bestemt ydre orientering til billedopretning*. Der anvendes både signalerede kontrolpunkter og naturlige kontrolpunkter. På facaden Fibigerstræde 14 anvendes der signalerede kontrolpunkter, mens der på de andre fire facader anvendes kontrolpunkter i form af vindueshjørner. Projektgruppen skønner, at koordinaterne til kontrolpunkterne på facaderne er bestemt med en nøjagtighed på 1-3 cm. Fejlkilderne til bestemmelsen er hovedsageligt definitionen af kontrolpunkterne samt bestemmelsen af opstillingspunkterne ved GPS-måling. Kontrolpunkterne er også beregnet i UTM<sub>EUREF89</sub> og DVR90.

Da koordinaterne til facaderne og til kontrolpunkterne er bestemt med reflektorløs totalstation, er der risiko for, at der fås en forkert afstand, hvis for

eksempel en bil eller lignende passerer mellem totalstationen og det, der måles i måleøjeblikket. Derfor kontrolleres de indsamlede målinger. Kontrollen foregår i Matlab ved at kontrollere, at de målte punkter på en facade ligger i samme plan, som det bør være tilfældet.

## 7.3 Vurdering af billedopretning

Dette afsnit omhandler vurdering af den programmerede opretningsrutine. Vurderingen foretages på baggrund af et billede af en facade på Fibigerstræde 14. Det anvendte billede, er billede C, som er anvendt til systemkalibrering, jf. 5.4.2 *Ydre orientering*.

Til vurderingen anvendes desuden koordinaterne til de signalerede punkter på muren, som blev målt ved fremskæring i forbindelse med systemkalibreringen, jf. 5.4.2 *Ydre orientering*. Disse koordinater er i bilens koordinatsystem. De fire yderste signalerede punkter på muren betragtes som en fiktiv facadeafgrænsning, jf. figur 7.2. Det er altså disse fire punkter, som ligger til grund for det grid, der skal beregnes for at oprette billedet, jf. 6.3 *Oprettning af billeder*. De øvrige punkter på muren anvendes som kontrolpunkter.



Figur 7.2: Punkterne på facaden Fibigerstræde 14 målt i forbindelse med systemkalibreringen anvendes som henholdsvis fiktiv facade (røde) og kontrolpunkter (hvide). Koordinaterne til punkterne er i bilens koordinatsystem.

Til vurdering af billedopretningen anvendes kameraets ydre orientering i bilens system fastlagt under systemkalibreringen.

Testen foregår ved, at billedet oprettes med den programmerede rutine på baggrund af den fiktive facade. Herefter projiceres kontrolpunkterne ind i det oprettede billede med en lilla pixel, og afvigelsen mellem de lilla pixler og kontrolpunkterne i det oprettede billede måles og vurderes. De originale billeder og de oprettede billeder kan findes i Bilag 1F.

Den anvendte testmetode betyder, at forsøget isoleres fra bestemmelsen af den ydre orientering ved hjælp af GPS. Fejlkilderne kan således kun stamme fra kameraets indre orientering, fra fejl i billedopretningsrutinen, fra fejl i systemkalibreringen og fejl i kontrolmålingen i det oprettede billede. Projektgruppen skønner, at kunne definere både de signalerede og de naturlige paspunkter med 2-3 pixels nøjagtighed i billederne.

Billedopretningsrutinen vurderes som nævnt på afvigelserne mellem kontrolpunkter projiceret ind i et oprettet billede med en lilla pixel og kontrolpunkterne i det oprettede billede. Afvigelserne måles i billedbehandlingsprogrammet Jasc Paint Shop Pro 8, hvor det er muligt at måle billedkoordinaterne i hele pixels. De målte billedkoordinater noteres for henholdsvis kontrolpunkterne projiceret ind i billedet og kontrolpunkterne i billedet. Med kendskab til det oprettede billedes geometriske opløsning på 1 cm, omsættes afvigelsen til en kendt afstand. Der beregnes afvigelser mellem 13 synlige kontrolpunkter.

På baggrund af de målte afvigelser beregnes en samlet nøjagtighed ved følgende formel:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \text{afvigelse}_i^2}{n}}$$

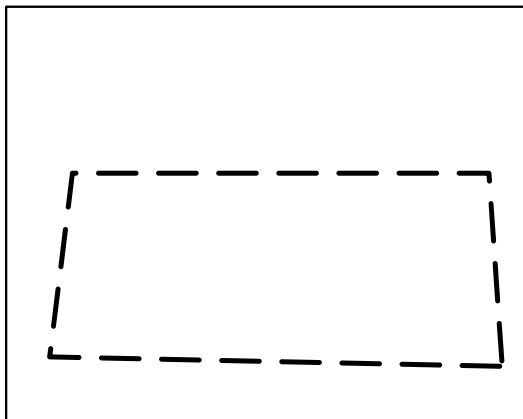
hvor  
afvigelse = afvigelsen mellem det målte punkt og referencen  
n = antal elementer

Den samlede nøjagtighed er beregnet til 1,62 cm, hvor den maksimale afvigelse er 2,23 cm. Tages definitionsnøjagtigheden i betragtning, samt at der kun måles på pixelniveau ved denne kontrolmåling og den geometriske opløsning af pixelerne er 1 cm, er den samlede nøjagtighed tilfredsstillende.

Nøjagtigheden afhænger af afstanden mellem kamera og facade. Jo kortere afstand der er mellem facade og kamera, jo mindre fejl vil en vinkelfejl give ved bestemmelsen af et punkt. Derfor omregnes nøjagtigheden på afvigelsen til en vinkel ud fra afstanden mellem facaden og kameraet. I dette tilfælde er afstanden mellem kameraet og facaden 14 m, og vinkelnøjagtigheden bliver således 0,069 gon.

På figur 7.3 er der plottet fejlvektorer mellem de målte og projicerede kontrolpunkter. Der kan ses en systematik i fejlvektorernes retning. Denne systematik skyldes sandsynligvis bestemmelsen af kameraets ydre orientering i bilens koordinatsystem under systemkalibreringen.

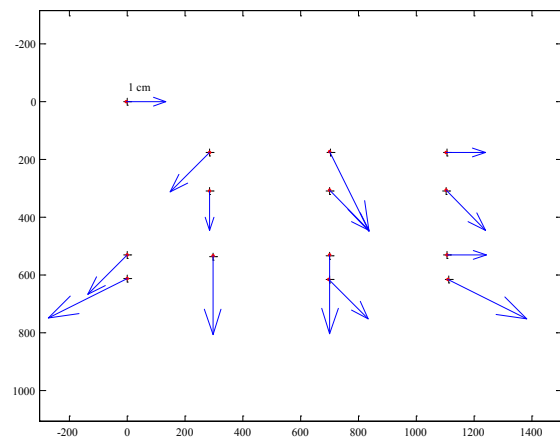
Da vinkelnøjagtigheden er mindre end den beregnede spredning på kameraets ydre orientering fra systemkalibreringen, vurderes det, at den programmerede opretningsrutine er i orden.



## 7.4 Vurdering af GPS-bestemt ydre orientering til billedopretning

I dette afsnit vurderes billedopretningen, hvor GPS-multiantennesystemet er anvendt til bestemmelse af kameraets ydre orientering i referencekoordinatsystemet. Den GPS-bestemte ydre orientering vil give nogle deformationer i det oprettede billede, da GPS-observationerne ikke er fejlfrie. Formålet med testen er at komme med et bud på den nøjagtighed, der kan opnås i det oprettede billede ved anvendelse af GPS-multiantennesystemet til bestemmelse af den ydre orientering.

Der foretages to tests i afsnittet. Den første test foretages på baggrund af seks forskellige facader, hvor der ved hver facade er målt positioner til de tre GPS-antenner og taget et billede. Til hver af de seks billeder er der bestemt en ydre orientering med GPS-multiantennesystemet på baggrund af en tilfældig valgt epoke. Dataindsamlingen ved de seks facader er foretaget over en periode på ca. seks timer, jf. figur 7.4, hvilket giver forskellige målebetingelser. Projektgruppen mener således, at testen giver et generelt bud på, hvilken nøjagtighed, der kan opnås i billedet ved anvendelse af systemet.



Figur 7.3: Til højre: Fejlvektorer mellem de målte kontrolpunkter i det oprettede billede (sorte krydser) og referencen i form af kontrolpunkterne projiceret ind i billedet (røde punkter). Til venstre: Facadens og dermed kontrolpunkternes placering indenfor facaden i det oprindelige billede.



Den anden test foretages på baggrund af ét billede. Til billedet er der ud fra 37 på hinanden følgende forskellige epoker beregnet 37 forskellige ydre orienteringer, og billedet er således oprettet 37 gange. Formålet er her at vurdere, hvordan variationen i bestemmelsen af bilens hældninger med GPS-multiantennesystemet påvirker det oprettede billede.

I testen vurderes der, på samme måde som ved vurdering af billedopretningsrutinen, også på afvigelserne mellem kontrolpunkter projiceret ind i det oprettede billede og kontrolpunkterne i billedet.

De seks facadebilleder anvendt til vurderingen er billederne "Optagelse 1" og "Optagelse 2" af facaden Fibigerstræde 14 fotograferet fra to forskellige vinkler i forhold til facaden, samt billeder af facaderne Hadsundvej 176, Østerbro 48, Østerbro 50 og Østerbro 52, som er taget vinkelret på facaden.

Alle seks billeder oprettes med den samlede rutine til beregning af den ydre orientering af kameraet i referencekoordinatsystemet og de polært indmålte punkter til facadens afgrænsning i referencenkoordinatsystemet. Det skal understreges, at det er koordinaterne målt til selve facaden og ikke til tagudhæng, der anvendes i disse to tests.

### 7.4.1 Vurdering af seks facader ved anvendelse af én GPS-epoke

Afvigelserne er som nævnt målt mellem kontrolpunkter projiceret ind i det oprettede billede og kontrolpunkterne i billedet. Derefter er de samlede nøjagtigheder beregnet. Nøjagtighederne og den

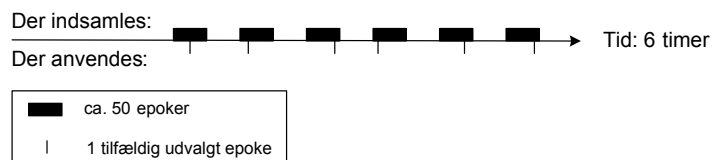
maksimal afvigelse omregnes til en vinkel ud fra afstanden mellem facaden og kameraet for ikke at være afhængig af afstanden mellem facade og kamera ved vurderingen, jf. figur 7.5. Nøjagtighederne ligger mellem 1,2 og 1,9 gon, hvilket svarer meget godt overens med de nøjagtigheder, der er bestemt på rotationsbestemmelsen i 5.6 *Test af rotationsbestemmelse med multiantennesystemet*. Nøjagtighederne her er lidt dårligere, men de indeholder også vinkelfejl fra alle tre rotationer samt fejl i positionering.

I 6.7 *Alternativ løsningsmodel* vurderer projektgruppen, at hældningerne af kameraet skal bestemmes med ca. 1 gons nøjagtighed, hvis den alternative løsningsmodel skal anvendes. Det vurderes i den forbindelse, at nøjagtighederne er en smule i overkanten. Dette vil dog måske kunne forbedres ved filtrering med et kalmanfilter.

Betragtes fejlvektorerne fra de seks billeder, ses det, at der stadig er hældningsforskydninger tilbage efter opretningen af billederne, jf. figurerne 7.6 til 7.11. Det ses, at der de seks oprettede facader i mellem ikke er noget systematik i fejlvektorerens retning. Havde der for eksempel været en større systematisk fejl i beregning af bilens orientering i forhold til referencesystemet, ville det have vist sig ved billederne af facaderne Optagelse 1, Østerbro 48, Østerbro 50 og Østerbro 52. Her er alle facaderne nordvendte og med kameraet vinkelret derpå. Havde der været en systematisk fejl i MKS'et eller ved beregning af den ydre orientering, ville fejlvektorerne for de nævnte billeder have samme systematiske træk. Det kan altså konkluderes, at der er systematiske fejl inden for de enkelte billeder, men fejlen er ikke den samme for alle seks facadebilleder.

Figur 7.4:

Forsøgene er foretaget over seks timer. Ved hver facade indsamles ca. 50 positioner til de tre antenner af én epoke. Der udvælges en tilfældig epoke til opretningen af de enkelte billeder.



Billede	Nøjagtighed [cm]	Maksimal afvigelse [cm]	Ca. afstand fra kamera til facade [m]	Antal målte afvigelser	Nøjagtighed [gon]	Maksimal afvigelse [gon]
Optagelse 1	28,4	36,4	15	14	1,2	1,5
Optagelse2	34,8	48,8	15	15	1,5	2,1
Østerbro 48	44,9	58,5	15	59	1,9	2,5
Østebro 50	26,9	36,1	15	43	1,2	1,5
Østerbro 52	31,1	43,9	15	40	1,3	1,9
Hadsundvej 176	22,1	24,2	9	8	1,6	1,7

Figur 7.5: Tabel over vurderingen af opretningen af billederne med én GPS-epoke til bestemmelse af den ydre orientering.

Generelt er spredningerne og de maksimale afvigelser ved hver forsøg af samme størrelsesorden, hvormed disse resultater giver en beskrivelse af hvad, der kan forventes ved brug af prototypen på MKS'et til opretning af billeder. Det skal dog holdes for øje, at resultaterne bygger på kun seks epoker. Ved endelig implementering af et MKS, bør vurderingen foretages på et større grundlag. Det kan for eksempel være ved anvendelse af flere facader fotograferet på andre tidspunkter af dagen. Projektgruppen er dog af den overbevisning, at resultaterne giver et foreløbigt godt bud på den nøjagtighed, der bør kunne opnås i billedet med systemet.

Med ovenstående resultater er det vist hvilke resultater, der kan forventes med anvendelse af den konstruerede prototype.

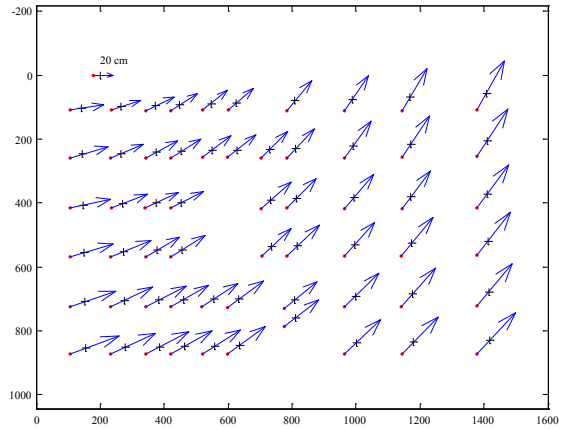
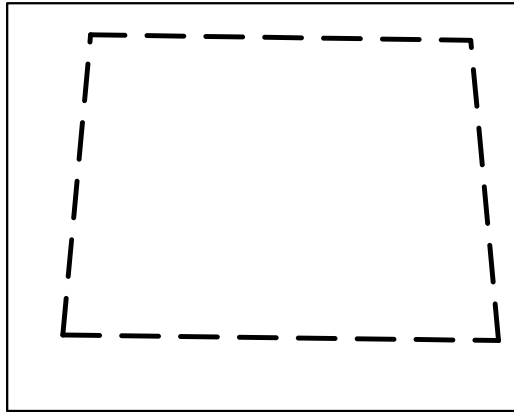
#### 7.4.2 Vurdering af én facade med forskellige GPS-epoker

Ovenstående forsøg tager alle udgangspunkt i kun én GPS-epoke. For at undersøge hvordan bilens varierende hældning fra GPS-epoke til GPS-epoke, som beskrevet i 5.6 *Test af rotationsbestemmelse med multiantennesystemet*, påvirker

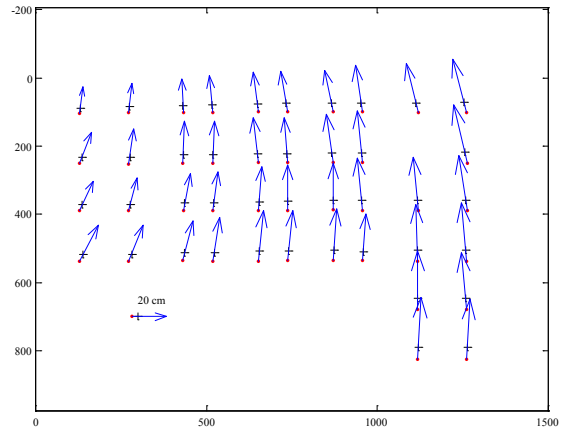
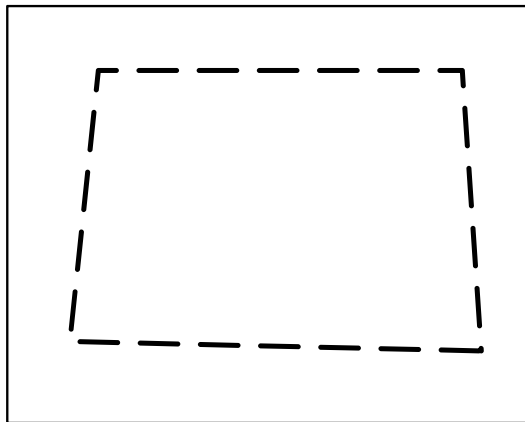
det oprettede billede, er 37 på hinanden følgende GPS-epoker anvendt til at oprette det samme billede. Der tages udgangspunkt i facaden på Hadsundvej 176, men der kunne lige så godt vælges en anden facade til vurderingen.

Også i dette forsøg beregnes afvigelser mellem de naturlige kontrolpunkter i det oprettede billede og kontrolpunkterne projiceret ind i billedet. Heraf beregnes en præcision og en nøjagtighed for de oprettede billeder. Endvidere foretages en visuel vurdering af de oprettede billeder. Dette gøres med henblik på at vurdere, om det er nødvendigt at anvende kantdetektering etc. i form af løsningsmodellen beskrevet i 6.5.1 *Løsningsmodel* til udklipning af facaden eller om facaden blot kan udklippes af facaden ved anvendelse af den alternative løsningsmodel beskrevet i 6.7 *Alternativ løsningsmodel*.

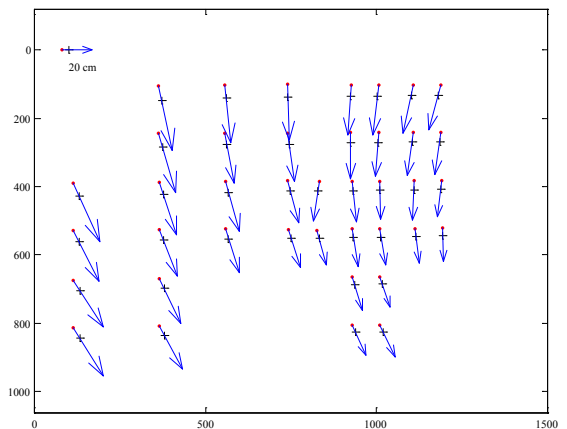
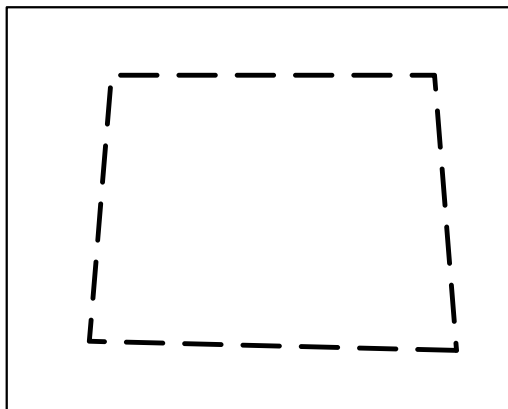
Bilag 1E indeholder et filmklip med billedet af Hadsundvej 176 oprettet på baggrund af hver enkelt af de 37 på hinanden følgende GPS-epoker. Filmklippet giver et godt billede af variationen af de oprettede billeder, og det anbefales læseren at se dette. Figur 7.12 viser et af de oprettede billeder. På tilsvarende vis, findes i Bilag 1E et filmklip



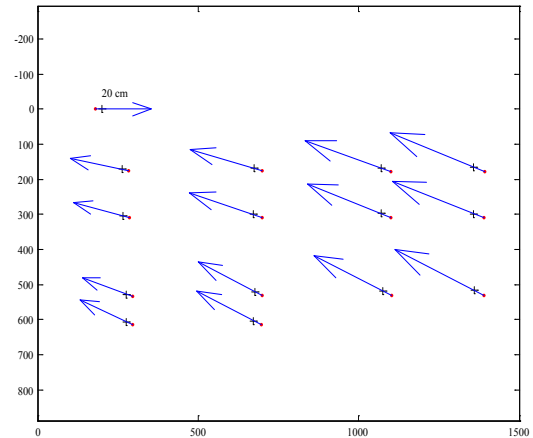
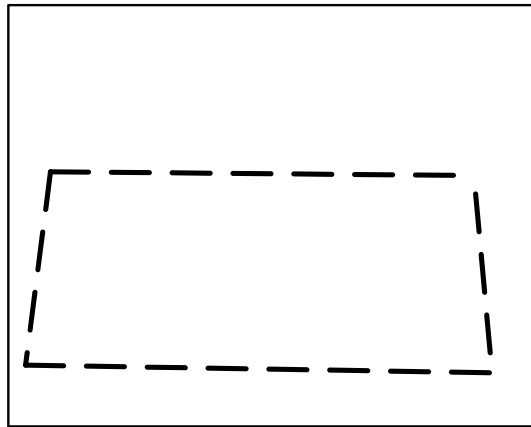
Figur 7.6: Vurdering af opretningen af billede Østerbro 48. Venstre: Facadens afgrænsning i det originale billede. Højre: Fejlvektorer fra kontrollen. Prikkerne (røde) angiver koordinaterne til referencekontrolpunkterne projiceret ind i billedet, mens krydsene (sorte) angiver kontrolpunkterne i billedet.



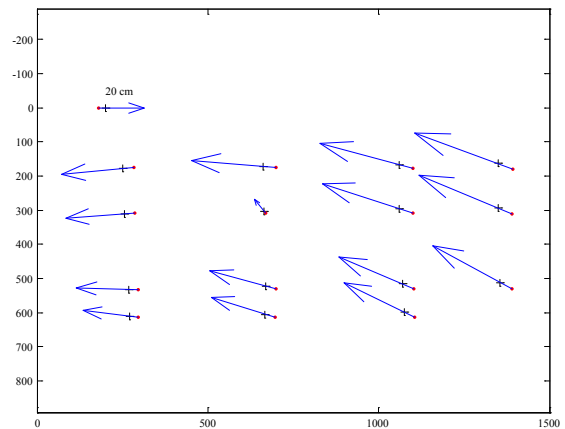
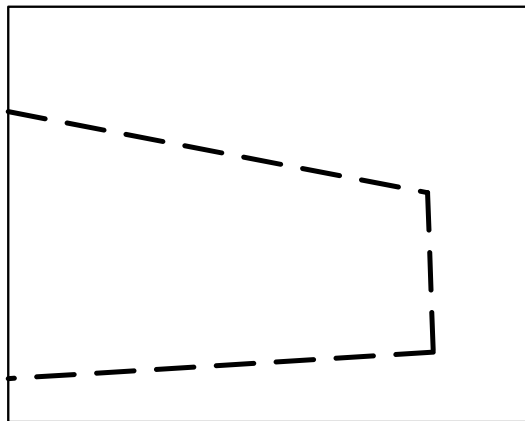
Figur 7.7: Vurdering af opretningen af billede Østerbro 50. Venstre: Facadens afgrænsning i det originale billede. Højre: Fejlvektorer fra kontrollen. Prikkerne (røde) angiver koordinaterne til referencekontrolpunkterne projiceret ind i billedet, mens krydsene (sorte) angiver kontrolpunkterne i billedet.



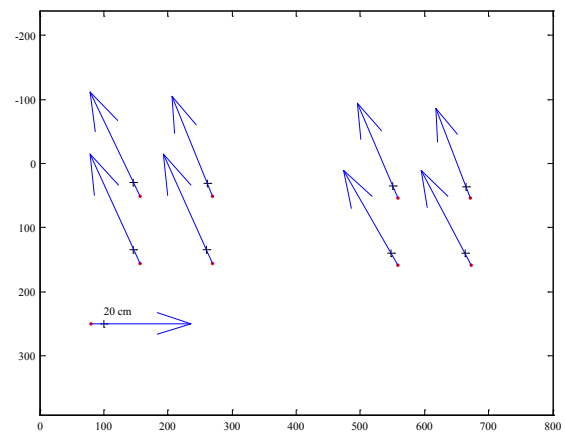
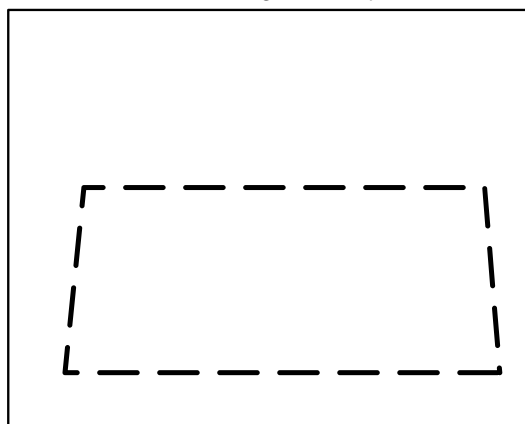
Figur 7.8: Vurdering af opretningen af billede Østerbro 52. Venstre: Facadens afgrænsning i det originale billede. Højre: Fejlvektorer fra kontrollen. Prikkerne (røde) angiver koordinaterne til referencekontrolpunkterne projiceret ind i billedet, mens krydsene (sorte) angiver kontrolpunkterne i billedet.



Figur 7.9: Vurdering af opretningen af billede position 1. Venstre: Facadens afgrænsning i det originale billede. Højre: Fejlvektorer fra kontrollen. Prikkerne (røde) angiver koordinaterne til referencekontrolpunkterne projiceret ind i billedet, mens krydsene (sorte) angiver kontrolpunkterne i billedet.



Figur 7.10: Vurdering af opretningen af billede position 2. Venstre: Facadens afgrænsning i det originale billede. Højre: Fejlvektorer fra kontrollen. Prikkerne (røde) angiver koordinaterne til referencekontrolpunkterne projiceret ind i billedet, mens krydsene (sorte) angiver kontrolpunkterne i billedet.



Figur 7.11: Vurdering af opretningen af billede Hadsundvej 176. Venstre: Facadens afgrænsning i det originale billede. Højre: Fejlvektorer fra kontrollen. Prikkerne (røde) angiver koordinaterne til referencekontrolpunkterne projiceret ind i billedet, mens krydsene (sorte) angiver kontrolpunkterne i billedet.

med et billede af Østerbro 48, som er oprettet efter 30 på hinanden følgende epoker.

Præcisionen og nøjagtigheden af de varierende oprettede billeder kan ses i tabellen i figur 7.13. Middelfvigelsen i forhold til målingen i referencesystemet antyder, at der er en lille systematisk forskydning af kameraet i forhold til facaden. Dette bidrag er på henholdsvis 7,5 cm og -8,9 cm i billedet x- og y-retning. Præcisionen af de 37 billeder i henholdsvis billedets x- og y-retning er beregnet til 1,9 cm og 9,6 cm, hvor den maksimale afvigelse fra middel i henholdsvis billedets x- og y- retning er 5,1 cm og 25,9 cm. En afvigelse på 26 cm i en afstand af 9 m giver en vinkelfejl på ca. 1,8 gon.

At spredningen i billedets x-retning er en faktor fem mindre end i billedets y-retning, kan forklares med, at bilens yaw, der har indflydelse på x-værdierne i billederne, bestemmes bedre end dens roll med ca. en faktor fem, der har indflydelse på billedets y-værdier, jævnfør resultaterne i figur 5.26. Resultaterne i figur 5.26 og 7.13 stemmer altså godt overens.

Den systematiske fejl mellem afvigelsesernes midelværdi og den målte reference kan stamme fra fejlbidragene fra indmålingen af reference-



Figur 7.12: Et af de oprettede og udklippede billeder fra facaden på Hadsundvej 176.

punkterne og fejl fra GPS-observationerne. Som beskrevet i 5.6.3 *Resultater*, blev der konkluderet, at GPS-observationerne er påvirket af en systematisk fejl, og at denne afhænger af tidspunktet for observationerne. Det er derfor sandsynligt, at det er GPS-observationerne, som forårsager den systematiske fejl.

I filmklippene af de oprettede billeder i bilag 1E ses det, at billedernes orientering i forhold til kameraets optageakse varierer fra billede til billede. Derfor er vinklen mellem to punkter i det oprettede billede fra hvert vindue beregnet i de 37 billeder. Præcisionen på vinkelafvigelsen for de to punkter er beregnet til 0,52 gon og den største afvigelse er 1,03 gon, jf. figur 7.13. Fejlen er mindre end præcisionen på roll, pitch og yaw, jf. figur 5.26. Undersøges billederne i filmklippet visuelt, ses det, at billedet bortset fra få tilfælde ikke ændrer sig meget.

Skal den fotorealisticke 3D-bymodel anvendes til visualisering, som er det formål, MKS'et skal opfylde, kan det diskuteres, om det overhovedet er nødvendigt at anvende kantdetektering etc. til opretning af de sidste hældningsforskydninger og klipning af billederne. Betragtes filmklippet med de 37 facader, vurderer projektgruppen, at de hældningsforskydninger, der er tilbage i billederne

	Præcision	Nøjagtighed
Middel $x$ -residual [cm]	-	7,5
Middel $y$ -residual [cm]	-	-8,9
$\sigma$ $x$ -residual [cm]	1,9	1,6
$\sigma$ $y$ -residual [cm]	9,6	9,9
Maks. $x$ -residual [cm]	5,1	12
Maks. $y$ -residual [cm]	25,9	34,7
$\sigma$ vinkelafvigelse. [gon]	0,52	0,53
Maks. vinkelafvigelse. [gon]	1,03	1,59

Figur 7.13: Resultatet af beregning af præcision og nøjagtighed af punkter i billedet Hadsundvej 176 oprettet på baggrund af 37 på hinanden følgende epoker.

ikke vil skæmme det visuelle indtryk ved anvendelse af billederne i en 3D-bymodel. Projektgruppen vurderer således på baggrund af forsøget, at det er muligt at oprette billederne efter den ydre orientering uden at foretage yderligere opretning ved for eksempel at anvende kantdetektering etc., som beskrevet i 6.5.1 *Løsningsmodel*. Det forudsætter dog, at der ikke forekommer grove fejl blandt observationerne. Det vil der dog altid gøre, hvorfor det vil være hensigtsmæssigt at anvende filtrering til at forbedre GPS-observationerne, og således undgå grove fejl.

## 7.5 Vurdering af det samlede system

Projektgruppen har anvendt den "alternative løsningsmodel", jf. 6.7 *Alternativ løsningsmodel* for at klargøre de fotograferede billeder af facaderne til påsætning på 3D-bymodellen. Løsningsmodellen vurderes i det følgende.

For at vurdere denne metode visuelt er der oprettet nogle billeder ud fra de polært målte facader, der er målt til tagudhæng, jf. 7.2 *Test af prototypen*. Dette er valgt, fordi de danske 3D-bymodeller oftest er målt til tagudhæng.

Til det formål er der anvendt to forskellige bygninger; den enkeltstående bygning på Hadsundvej 176 og bygningen på Østerbro 50, der er en bygning i en karré.

Det oprettede billede er dannet ved angivelse af tagudhæng med forskellige størrelser som angivet i tabellen i figur 7.14. De oprettede billeder med de forskellige størrelser på tagudhæng kan ses af figurerne 7.15 - 7.22.

Det ses, at selvom der anvendes et større tagudhæng end det bygningen virkelig har, betyder det ikke meget for det generelle indtryk af det oprettede billede. For bygningen på Hadsundvej 176 betyder det blot, at husnummeret bliver skåret væk og vinduerne får et mere rektangulært udseende, se figur 7.18. Ved anvendelse af

samme værdier for Østerbro 50 bliver vinduerne ikke deformeret i samme grad som vinduerne på Hadsundvej 176, da deformationen hovedsageligt skal ses som en målestoksændring i billedets x-retning og er afhængig af facadens længde. Smalle bygninger vil derfor påvirkes mere end brede bygninger.

Ved denne metode må man dog ikke glemme, at der ikke kun skal korrigeres i siden af facaden men også i højden; det vil sige vertikalt, på grund af spredningerne op koordinaterne i 3D-bymodellen. Dette er der taget højde for i den programmerede rutine. I eksemplerne i figurerne 7.15 til 7.22 er der dog kun korrigeret horisontalt. Af figur 7.15 ses det for eksempel, at fliserne grænsende op til facaden kommer med i billedet.

Bygningerne er altså stadig genkendelige, selvom der klippes 0,75 m af i siderne. Det bør dog generelt tilstræbes, at der ikke klippes så meget af bygningerne, at dele af døre eller vinduer skæres væk, jf. figur 7.22, hvor en del af porten er skåret væk. Derfor mener projektgruppen, at kravet om at instrumenterne skal kunne bestemme hældningerne af kameraet bedre en 1 gon, er en god tommelfingerregel, hvis metoden skal kunne anvendes i praksis.

Tagudhæng Hadsunvej 176	Front [m]	Venstre [m]	Højre [m]
Figur 7.15	0	0	0
Figur 7.16	0,25	0,25	0,25
Figur 7.17	0,25	0,5	0,5
Figur 7.18	0,25	0,75	0,75
Tagudhæng Østerbro 50	Front [m]	Venstre [m]	Højre [m]
Figur 7.19	0	0	0
Figur 7.20	0,25	0,25	0,25
Figur 7.21	0,25	0,5	0,5
Figur 7.22	0,75	0,75	0,75

Figur 7.14: Tabel med oversigt over hvilket værdier der er angivet som tagudhængets størrelse i de følgende figurer.



Figur 7.15: Facadebilledet ej korrigeret for tagudhæng.



Figur 7.17: Facadebillede korrigeret 0,25 m i front og 0,5 m i begge sider.



Figur 7.16: Facadebilledet korrigeret 0,25 m i begge sider og front.



Figur 7.18: Facadebillede korrigeret 0,25 m i front og 0,75 m i begge sider.



Figur 7.19: Facadebilledet ej korrigeret for tagudhæng.



Figur 7.21: Facadebillede korrigeret 0,25 m i front og 0,5 m i begge sider.

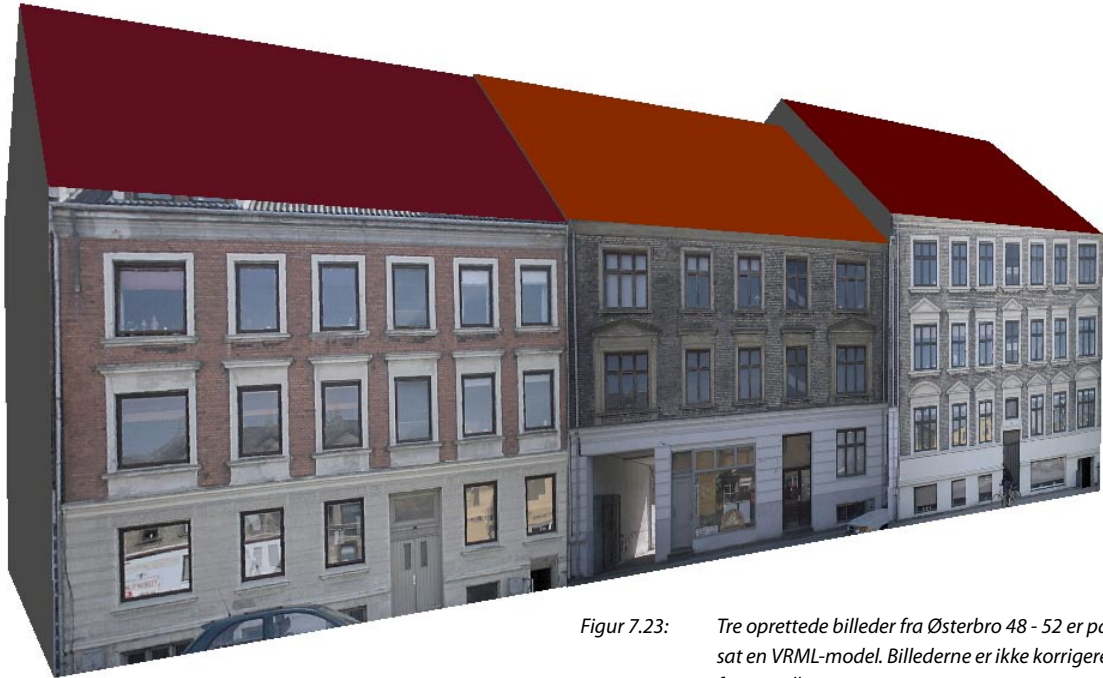


Figur 7.20: Facadebilledet korrigeret 0,25 m i begge sider og front.



Figur 7.22: Facadebillede korrigeret 0,25 m i front og 0,75 m i begge sider. Det ses, at noget af porten er skåret væk.





Figur 7.23: Tre oprettede billeder fra Østerbro 48 - 52 er påsat en VRML-model. Billederne er ikke korrigeret for tagudhæng.

For at få et indtryk af hvordan de oprettede facadebilleder tager sig ud på en 3D-bymodel, er der sat tre oprettede billeder fra Østerbro 48 - 52 på en VRML-model, jf. figur 7.23. De tre billeder er ikke korrigeret for hverken tagudhæng eller spredning på koordinater i 3D-bymodellen. Det ses, at bygningen nærmest viewpoint, har rester af taget tilbage i billedet. Noget af dette vil sandsynligvis forsvinde ved korrektion for spredningen. På facadebilledet for bygningen nærmest viewpoint er der kørt en personbil forbi, mens billedet blev taget. Taget i betragtning hvordan kameraet er monteret, jf. figur 5.2, finder projektgruppen det bemærkelsesværdigt, at der ikke kommer mere af bilen med på billedet. Det betyder, at monteres kameraet højere, jf. 4.1 *indledende overvejelser om krav til systemet*, vil personbiler lettere kunne undgås ved fotograferingen, og således ikke være så stort et problem som først antaget. Der vil dog stadig være problemer med træer, lastbiler, etc.

Den alternative løsningsmodel vurderes at kunne anvendes i praksis ved at sætte en værdi for tag-

udhængets størrelse. Ved en efterfølgende visuel kontrol kan der, hvis det vurderes, at der er klippet for meget eller for lidt af facadebilledet, sættes en anden værdi for tagudhængets størrelse til den pågældende bygning. Projektgruppen finder det vigtigt, at der ikke er streger i facadebilledet i form af "blå himmel", tag, etc. Mindre hældningsforskydninger gør ikke noget for det visuelle indtryk af facadebilledet. Det er af disse årsager vigtigt, at hældningerne bestemmes bedre end 1 gon. Kan GPS-observationerne for eksempel forbedres ved hjælp af et kalmanfilter, vil resultaterne af denne metode blive endnu bedre, end det er vist i dette afsnit.

Projektgruppen vurderer, at den fotorealisticke 3D-bymodel fremstillet ved hjælp af den alternative løsningsmodel vil være anvendelig til visualiseringsformål.

Projektgruppen mener, at "den alternative løsningsmodel" kan erstatte projektgruppens primære idé om at finde bygningens virkelige facade



ved hjælp af kantdetektering. Hvis det er muligt ved valg af de rette instrumenter og metoder at bestemme den ydre orientering med ca. 1 gon og 5 cm i et kørende system, så vil det måske ikke være nødvendigt at konstruere et stykke kompliceret software til automatiseret kantdetektering.

## 8 Konklusion

I dette kapitel konkluderes der på problemformuleringen samt på projektet som helhed. Til sidst perspektiveres der over fremtidsmulighederne for mobile kortlægningsystemer.

Projektet tager udgangspunkt i projektgruppens interesse for 3D-bymodeller og sensorintegration i et mobilt kortlægningsystem. I foranalysen undersøges, hvordan fotorealistiske 3D-bymodeller fremstilles i Danmark. De nuværende metoder til indsamling og påsætning af facadebilleder på en 3D-bymodel, der skal anvendes til visualiseringsformål analyseres. Efter litteraturstudier omhandlende udenlandske mobile kortlægningsystemer til blandt andet fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller, konkluderes det, at flere af processerne til databehandling af indsamlede billeder kan automatiseres, hvis dataindsamlingen foregår med et mobilt kortlægningsystem. Foranalysen leder frem til problemformuleringen, som lyder:

*Hvordan kan der konstrueres et system til automatiseret indsamling og påsætning af facadebilleder på en eksisterende 3D-bymodel, hvor dataindsamlingen foregår ved hjælp af et mobilt kortlægnings-system med en bil som platform, og hvilke problemer er der ved konstrueringen af systemet?*

### 8.1 Svar på problemformulering

Projektgruppen har gennem projektarbejdet udarbejdet et mobilt kortlægningsystem til dataindsamling samt nogle billedbehandlingsrutiner til den efterfølgende databehandling. Der er således introduceret nogle metoder, der kan være med til at automatisere processerne omkring indsamling og bearbejdning af data til fotorealistiske 3D-bymodeller.

Udvikling af nye systemer indebærer som regel en eller flere prototyper udviklet i en iterativ proces. Det gennem projektet udviklede system, skal da også kun betragtes som en første prototype med det formål at indsamle erfaringer til udvikling af et forbedret system. Ved design af prototypen er der konstateret en lang række problemer, der skal tages højde for, ved konstrueringen af et sådant system. Problemerne er af både teknisk karakter og mere praktisk anvendelsesmæssig karakter.

I det følgende uddybes først opbygningen af det mobile kortlægningsystem samt de tilhørende billedbehandlingsrutiner. Endvidere uddybes de problemer, der skal tages højde for ved design af et mobilt kortlægningsystem. Problemerne er af generel karakter og er derfor problemer, der skal løses ved udarbejdelsen af et vilkårligt mobilt kortlægningsystem til indsamling og påsætning af facadebilleder på en eksisterende 3D-bymodel, hvor platformen er en bil.

#### Det mobile kortlægningsystem

I projektet er der undersøgt flere instrumenter, der kan integreres i et mobilt kortlægnings-system. Undersøgelsen munder ud i et valg af instrumenter til integration i en prototype af et mobilt kortlægningsystem. Prototypen består af tre GPS-modtagere samt et kamera. De tre GPS-antenner og kameraet er monteret på taget af en bil, og instrumenternes indbyrdes relation bestemmes ved en systemkalibrering. På baggrund af positionerne bestemt med de tre GPS-modtagere er der udarbejdet en rutine til bestemmelse af kameraets ydre orientering i referencekoordinatsystemet.

Systemet fungerer efter "stop and go" princippet, hvilket vil sige, at systemet holder stille under fotografering.

Det anvendte kameras begrænsede åbningsvinkel sætter en begrænsning for, hvor høje bygningsfacader og i hvilken afstand, der kan fotograferes.

Det konkluderes, at det mobile kortlægningsssystem kan bestemme kameraets hældninger med en nøjagtighed på ca. 1,5 gon.

### Billedbehandlingsrutiner

På baggrund af den beregnede ydre orientering af kameraet i eksponeringsøjeblikket, er der konstrueret et program til opretning af billederne. Oprettningen foretages ved hjælp af stråleligningerne. Inden facadebilledet kan påsættes 3D-bymodellen, skal den rigtige facade udklippes af billedet. Som skabelon til udklipningen anvendes facaden i 3D-bymodellen, og i den forbindelse, er der to problemer, der skal løses:

- Der er uoverensstemmelse mellem facaden i billedet og facaden i 3D-bymodellen.
- Der er restfejl i form af hældningsforskydninger i det oprettede billede på grund af spredningen på bestemmelsen af den ydre orientering.

I projektet er der opstillet to løsningsmodeller, som kan anvendes til løsning af ovenstående problemer.

Den første løsningsmodel omhandler en metode, der anvender kantdetektering til at finde facadens rette afgrænsning i billedet. Metoden er ikke implementeret i systemet, men der er foretaget nogle indledende forsøg med detektering af kantpixler og Hough transformation, som anvendes ved kantdetekteringen. Forsøgene giver lovende resultater, idet facadeafgrænsningerne detekte-

res. Metoden er forholdsvis kompleks, og skal den automatiseres kompliceres den yderligere. Derfor kræves flere forsøg, inden endelige konklusioner omkring metodens anvendelighed i systemet kan drages.

Den anden metode; den alternative løsningsmodel tager kun hånd om problemet med, at der er uoverensstemmelse mellem facaden i billedet og facaden i 3D-bymodellen. Det betyder, at det billede, der sættes på 3D-bymodellen, ikke er helt oprettet for hældningsforskydninger. Metoden fungerer ved, at der med udgangspunkt i facaden i 3D-bymodellen klippes en fast størrelse af billedet af facaden. Denne størrelse fastlægges på baggrund af et skøn af uoverensstemmelsen mellem facadeafgrænsningerne i billederne og facadeafgrænsningerne i 3D-bymodellen. Metoden medfører, at der klippes mere eller mindre af nogen facader end nødvendigt i forhold til den rette facadeafgrænsning. Projektgruppen mener dog, at metoden er anvendelig, blot positionsbestemmelsen af kameraet er bedre end ca. 5 cm og kameraets hældninger bestemmes bedre end 1 gon i en afstand fra facaden på maksimalt 10 m. Denne nøjagtighed medfører, at der ikke klippes for meget af facaden inden påsætningen på 3D-bymodellen, og at de resterende hældningsforskydninger, der er tilbage i billedet, er så små, at de ikke ændrer noget ved det visuelle udtryk af facaden.

Da hældningerne skal bestemmes bedre end 1 gon, bør bestemmelsen af kameraets ydre orientering forbedres.

Den alternative løsningsmodel er implementeret i projektet, og der er foretaget en visuel vurdering af resultatet. Metoden vurderes at være anvendelig til fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller.

## Problemer ved det samlede system

Der er gennem projektarbejdet fundet en del problemer ved konstruering af prototypen på det mobile kortlægningssystem til indsamling og påsætning af billeder på en 3D-bymodel. Problemerne opridses i det følgende på punktform:

- Den eksisterende 3D-bymodel vil ofte være fremstillet fotogrammetrisk, hvorfor facaderne i 3D-bymodellen ikke stemmer overens med virkeligheden. Endelig skal det nævnes, at projektgruppen ikke i praksis har arbejdet med en virkelig 3D-bymodel, hvorfor der ved implementering af denne i systemet, sandsynligvis vil opstå uforudsete problemer.
- Ved dataindsamling ved hjælp af en bil er det svært at undgå objekter foran facaderne, som for eksempel holdende biler, forbipasserende, træer, etc.
- Det mobile kortlægningssystem med bil som platform, vil ofte komme ud for steder, der er svært tilgængelige. Det kan for eksempel være bytorve, baggårde, etc.
- Et problem ved anvendelse af GPS som positioneringsenhed er, at der i byområder ofte kan være problemer med modtagelse af GPS-signaler, på grund af de mange obstruktioner.
- Da en facade sandsynligvis sjældent vil kunne indeholdes i ét billede på grund af kameraets åbningsvinkel og afstand til facaden, skal der dannes billedmosaikker.
- En automatisk behandling af billederne i form af den første løsningsmodel er forholdsvis kompleks, da metoden bygger på kantdetektering, som kræver auto-

matisk fastsættelse af tærskelværdier. Tærskelværdierne kan være forskellig fra billede til billede på grund af forskellige materialer og farver samt lysforhold ved billedoptagelsen.

- Nøjagtigheden af den bestemte ydre orientering bør forbedres, hvis det vælges at anvende den alternative løsningsmodel til udklipning af facaderne i billederne.

Vurderes prototypen inklusiv billedbehandlingsrutiner i forhold til de manuelle fremstillingsmetoder, der i dag anvendes i Danmark, vurderer projektgruppen, at indsamlingstiden vil være cirka den samme, da prototypen holder stille under billedoptagelse. Billedbehandlingsmæssigt vil prototypen på nuværende tidspunkt kræve mere billedbehandling, idet der ikke endnu ikke er udviklet en rutine til automatisk dannelse af fotomosaikker. Udvikles en sådan rutine, vurderes tidsforbruget til billedbehandlingen ved den nuværende prototype at være reduceret, idet billederne klippes og oprettes automatisk. Ved sammenligning mellem prototypen og de manuelle fremstillingsmetoder, som idag anvendes, skal de netop beskrevne problemer ved prototypen tages i betragtning. Det vil sige, at der er nogle ulemper ved prototypen, som ikke forekommer ved de nuværende fremstillingsmetoder. Det gælder blandt andet prototypens manglende evne til at optage billeder i lukkede baggårde.

På trods af de opridsede problemer finder projektgruppen det interessant, at arbejde videre med konstruering af et mobilt kortlægningssystem til automatisk indsamling og påsætning af billeder på en 3D-bymodel. Det bunder hovedsageligt i, at flere af de skitserede problemer kan løses eller reduceres ved forbedringer af systemet.

## 8.2 Forbedringsmuligheder

Da det konstruerede mobile kortlægningssystem er ment som en prototype, redegøres i det følgende kort for, hvilke forbedringer, der kan foretages ved systemet. Flere af forbedringerne er allerede nævnt gennem projektet, men her oplistes ideerne til forbedring.

- Tidsstempeling
- Implementering af kalmanfilter
- Instrumentvalg
- Forbedring af billedbehandlingsrutinen
- Database og organisering af data

Det vil være hensigtsmæssigt at MKS'et kunne køre under billedoptagelsen. Dette kræver dog, at der foretages en fælles tidsstempeling således, at der kan bestemmes en korrekt ydre orientering til kameraet i eksponeringsøjeblikket. Dette kræver det rette software og hardware. Er systemet kørende, skal der desuden programmeres en rutine til interpolation af kameraets ydre orientering i optageøjeblikket.

På grund af svingende modtagerforhold for GPS-modtagerne i byen, hvor systemet skal anvendes, vil det være hensigtsmæssigt at indbygge et kalmanfilter i systemet, da dette kan anvendes til dead reckoning. Således kan positioner bestemmes, selvom der er GPS-udfald. Kalmanfilteret vil også være anvendeligt til filtrering af de indsamlede data med henblik på forbedring af de indsamlede observationer. Dette vil specielt være anvendeligt i forbindelse med den alternative løsningsmodel, da hældningerne her skal bestemmes bedre end 1 gon.

Efter afprøvning af den første prototype er det naturligt at genoverveje instrumentvalget. Projektgruppen ser GPS som en naturlig del af et mobilt kortlægningssystem, men anvendes yderligere

instrumenter som for eksempel en IMU, kan den ydre orientering sandsynligvis forbedres. Desuden er en IMU uafhængig af ydre omstændigheder, hvorfor den kan anvendes til dead reckoning. På samme måde som positioneringsenhederne bør genovervejes, bør også kortlægningssenheden overvejes. Skal systemet køre, skal der anvendes et kamera med større optagefrekvens; for eksempel et videokamera. Det vil desuden være hensigtsmæssigt at vælge et kamera med større åbningsvinkel og eventuelt at placere flere kameraer på bilen.

Projektgruppen har allerede givet et bud på automatisering af billedbehandlingsrutiner. Den alternative løsningsmodel mangler at blive udbygget med dannelse af mosaikker, men findes i øvrigt anvendelig til formålet. Løsningsmodellen indeholdende kantdetektering og Hough transformation er forholdsvis kompleks og bør undersøges nærmere. På baggrund af de gennemførte forsøg er det ikke muligt endeligt at konkludere, hvilke af de to metoder, som er mest hensigtsmæssig. Den ene metode kræver forbedret ydre orientering, hvilke betyder inddragelse af flere instrumenter eller filtre, mens den anden metode kræver komplekse billedbehandlingsrutiner. Umiddelbart virker den alternative løsningsmodel dog mest enkel og realistisk, da detektering af facadeafgrænsninger ved kantdetektering i så forskellige billeder, som der fås ved fotografering af facader, er en vanskelig opgave.

Endelig bør der oprettes en database til organisering af data og rutiner til lagring og trækning af data. Det betyder også, at der skal udarbejdes en rutine til at bestemme, hvilke facader, der findes i hvilke billeder.

Afslutningsvis vurderes det, at hvis de nævnte forbedringer implementeres i det mobile kortlægningssystem, fås et godt alternativ til de nuværende manuelle metoder til indsamling og påsætning af billeder på en 3D-bymodel. Systemet vil være specielt anvendeligt langs veje og kan derfor anvendes i en stor del af byen.

## 8.3 Afrunding

Som det fremgår af projektets titel: "Fotorealistiske 3D-bymodeller - automatiseret indsamling og påsætning af facadebilleder" og indholdet af rapporten, har projektgruppen gennem udvikling af en prototype på et mobilt kortlægningssystem samt tilhørende billedbehandlingsrutiner arbejdet bredt indenfor emnet, hvorfor der også er opnået et bredt kendskab til området. Det betyder at projektgruppen nu er i stand til at se hvilke problemer og muligheder, der er ved udvikling af automatiserede metoder til indsamling og påsætning af facadebilleder på 3D-bymodeller. Havde projektgruppen i stedet valgt at arbejde mere specifikt med for eksempel kun påsætning af billeder eller kun opbygning af et positioneringssystem, havde projektgruppen opnået en mere dybdegående viden om et smallere område, men måske mistet lidt af overblikket med risiko for, at udviklingen af den næste prototype vil løbe i den forkerte retning. Med et bredt kendskab til emnet føler projektgruppen sig nu godt klædt på til udvikling af den næste prototype på et mobilt kortlægningssystem møntet på automatisk indsamling og påsætning af billeder på en 3D-bymodel.

Med projektet er der nu taget hul på udviklingen af automatiserede mobile kortlægningssystemer til indsamling og påsætning af facadebilleder på en 3D-bymodeller i Danmark.



# Litteraturliste

## Publikationer

[Atkinson, 1996]

Editeret af K. B. Atkinson

"Close Range Photogrammetry and Machine Vision"

ISBN: 1-870325-46-X

1996

[Bauer m.fl., 2001]

"Virtual Habitat: Models of the Urban Outdoors"

J. Bauer, K. Karner og A. Klaus

VRVis Research Center, Graz, Austria

F. Leberl og M. Grabner

Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology, Austria

2001

[Borre, 1993]

Kai Borre

"Landmåling"

2. Udgave

ISBN: 87-984210-2-6

1993

[Borre, 1995]

Kai Borre

"GPS i landmålingen"

Aalborg Universitet

ISBN 87-984210-4-2

1995

[Böhm m.fl., 2001]

Jan Böhm, Norbert Haala og Martin Kada

"Processing of 3D Building Models for Location Aware Applications"

Institute for Photogrammetry

University of Stuttgart

2001

[Böhm m.fl. 2, 2001]

Jan Böhm, Norbert Haala, Peter Kapusy

"Automated appearance-based building detection in terrestrial images"

Institute for Photogrammetry

University of Stuttgart

2001

[Cederholm, 2000]

Peter Cederholm

"Udjævning"

Aalborg Universitet

2000

[CityGrid Modeler]

Artikler fra CDROM

INTERGEO 2003

[CityGrid Scanner]

Artikler fra CDROM

INTERGEO 2003

[Crossbow 1]

"IMU 6 DOF inertial measurement unit"

Document part number: 6020-0020-01

Crossbow technology Inc.

[Crossbow 2]

"DMU User's Manual"

Document 7430-0003-01

Revision A

Crossbow Technology Inc.

Marts 2002

[Delskov m.fl., 1994]

Lis Delskov og Therese Lange

"Struktureret analyse"

1. udgave, 4. oplag

Teknisk forlag

ISBN: 87-571-1189-8

1994

[Dueholm m.fl., 2002]

Keld Dueholm og Mikkel Laurentzius

"GPS"

2. udgave

ISBN: 87-571-2412-4

Ingeniøren | bøger

2002

[Eriksen m.fl., 2003]

Jens Enevold Eriksen, Jakob Lambrethsen og Kristian

Holm Vester

"Automatiseret nærfotogrammetri"

Aalborg Universitet

2003



[Forkert m.fl., 2003]  
 Gerald Forkert og Johannes Holzer  
 "Das digitale Stadtmodell als Dokument des urbanen Raumes"  
 No Limits IT GmbH  
 2003

[Frederiksen m.fl., 2003]  
 Lise Lausten Frederiksen, Jane Holmgaard, Martin Nyvang og Lars Storgaard  
 "Terrestrisk Laserscanning - En undersøgelse af præcision og nøjagtighed"  
 Aalborg Universitet  
 2003

[Frederiksen m.fl., 2004]  
 Lise Lausten Frederiksen, Jane Holmgaard og Kristian Holm Vester  
 "Automatiseret 3D-bygningsmodellering - Fra laserscanning til bygningsmodel"  
 Aalborg Universitet  
 2004

[Früh m.fl., 2003]  
 Christian Früh og Avidah Zakhor  
 "Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views"  
 Video and Image Processing Lab, University of California, Berkeley, USA  
 2003

[Ghilani m.fl., 1997]  
 Charles D. Ghilani, Paul R. Wolf  
 "Adjustment computations, statistics and least squares in surveying and GIS"  
 John Wiley & Sons, Inc.  
 1997

[Hansen m.fl., 2003]  
 Klaus Hansen, Hanne Kjeldsen, Hans Christian Mazanti Pedersen og Henrik Rønne  
 "Positionering med low cost inertialsensorer"  
 Aalborg Universitet  
 2003

[Höhle, 1998]  
 Joachim Höhle  
 Artiklen "On the production of photorealistic and dynamic 3D-models of building structures by means of digital photogrammetry" i samlingen "Visual Reality"  
 KTH Högskoletryckeriet  
 Stockholm  
 ISBN: 91-630-6626-2  
 1998

[Jensen m.fl., 2001]  
 Anna B. O. Jensen og Karsten Engsager  
 "GPS og koordinattransformationer II"  
 Kort & Matrikelstyrelsen  
 Landinspektøren 1/2001  
 2001

[Jensen m.fl., 2002]  
 Peter Jensen og Vibeke Stærdahl Nielsen  
 "Mobil kortlægning - Integration af GPS og digital fotogrammetri"  
 Aalborg Universitet  
 2002

[Jensen, 2003]  
 Karsten Jensen  
 "Transversal afbildning"  
 Institut for samfundsudvikling og planlægning  
 Aalborg Universitet  
 2003

[Jensen 2, 2003]  
 Karsten Jensen  
 "Landmåling i Teori og Praxis"  
 Institut for samfundsudvikling og planlægning  
 Aalborg Universitet  
 2003

[Kodak DCS Pro 14N Digital Camera]  
 Specifikationer for Kodak DCS Pro 14N  
 Eastman Kodak Company  
 2003

[Kraus, 1993]  
 Karl Kraus  
 "Photogrammetry"  
 Volume 1 - Fundamentals and Standard Processes  
 FERD. DÜMMLERS VERLAG  
 ISBN 3-427-78684-6  
 1993

[Lawrence, 1998]  
 Anthony Lawrence  
 "Modern Inertial Technology - Navigation, Guidance and Control"  
 2. udgave  
 Springer-Verlag, New York  
 ISBN: 0-387-98507-7  
 1998

[Leica 1998]  
 Leica  
 "GPSBasics - Introduction til GPS"  
 Schweitz  
 1998

- [Leica, 1999]  
Leica  
"TPS1100 Professional Series, Brugervejledning  
1.0.0 da"  
Schweitz  
1999
- [Leica, 2002]  
Leica  
"Technical Reference Manual"  
Schweitz  
2002
- [Lu, 1995]  
Gang Lu  
"Development of a GPS Multi-Antenna System for At-  
titude Determination"  
University of Calgary  
Januar 1995
- [Luhmann, 2000]  
Thomas Luhmann  
"Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Metho-  
den und Anwendungen"  
Herbert Wichmann Verlag  
2000
- [Madsen, 2001]  
Finn Bo Madsen  
"REFDK - fremtidens referencenet i Danmark"  
Artikel i Landinspektøren Nr. 1-01  
2001
- [Madsen m.fl., 2002]  
Kurt Madsen, Sigvard Stampe Villadsen  
"RTK test udført ved Kort & Matrikelstyrelsen"  
Kort & Matrikelstyrelsen  
Januar 2002
- [Manandhar m.fl., 2002]  
Dinesh Manandhar og Ryosuke Shibasaki  
"Auto-extraction of urban features from vehicle-borne  
laser data"  
Centre for Spatial Information Science, The University of  
Tokyo, Japan  
2002
- [Mikhail m.fl., 2001]  
Edward M. Mikhail, James S. Bethel, J. Chris McGlone  
"Modern Photogrammetry"  
2001  
ISBN: 0-471-30924-9
- [Mohinder, m.fl., 2001]  
Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill og Angus P.  
Andrews  
"Global Positioning Systems, Inertial navigation, and  
Integration"  
ISBN: 0471-35032-X  
2001
- [Nauschnegg m.fl., 2001]  
Bernhard Nauschnegg, Gerhard Paar, Helmut Urban,  
Roland Wack  
"Erzeugung von 3D Stadtmodellen"  
2001
- [Nikon d100]  
"Nikon D100 - DIGITALS SLR KAMERA"  
DFA A/S, Nikon Corporation  
Februar 2003
- [Rasmussen, 2003]  
Jesper Rye Rasmussen  
"3D-bymodeller"  
GeoForum Perspektiv  
Februar 2003
- [Rollei d-flex]  
"Specifications"  
Rollei
- [Schenk, 1999]  
Toni Schenk  
"Digital Photogrammetry"  
Volume1  
ISBN: 0-9677653-0-7  
1999
- [Serway, m.fl., 2000]  
Raymond A. Serway og Robert J. Beichner  
"Physics - For Scientists and Engineers with Modern  
Physics"  
5. udgave  
ISBN: 0-03-022657-0  
2000
- [Skaloud m.fl., 2002]  
Jan Skaloud og Julien Vallet  
"High Accuracy Handheld Mapping System for Fast  
Helicopter Deployment"  
Swiss Federal Institute of Technology  
2002
- [Tanner, 2003]  
Mark B. Tanner  
"Creating Digital Environments for Multi-Agent Simu-  
lation"  
Naval Postgraduate School, Monterey, California  
December 2003

[Ulrich, 2004]  
 Karl T. Ulrich og Steven D. Eppinger  
 "Product Design and Development"  
 Third edition  
 2004  
 ISBN: 0-07-2471146-8

[www.gis.nrcan.gc.ca]  
<http://gis.nrcan.gc.ca/~viljoen/gis8746/concepts/idrisi/commands/filter/filter.htm>  
 04.11.2003

[Vallet, 2000]  
 Julien Vallet  
 "Handheld Mobile Mapping System for Helicopter Based Avalanche Monitoring"  
 Swiss Federal Institute of Technology  
 2000

[www.geomechanics.com]  
[http://www.geomechanics.com/pdf/apps/MD900-T\\_IRIS\\_B03\\_1001B.pdf](http://www.geomechanics.com/pdf/apps/MD900-T_IRIS_B03_1001B.pdf)  
 02.06.2004

[Zhang m.fl., 2003]  
 Kefei Zhang og Benlin Xiao  
 "Current Status of Low-cost GPS and Mobile Mapping Systems"  
 Department of Geospatial Science  
 RMIT University  
 2003

[www.gpsnet.dk]  
<http://www.gpsnet.dk/showcontent.php?nID=115&showSingle=1>  
 21.03.2004

[Walchko m.fl., 2002]  
 Kevin Walchko, Michael Nechyba, Eric Schwartz, Antonio Arroyo  
 "Embedded Low Cost Inertial Navigation System"  
 University of Florida  
 2002

[www.howstuffworks.com]  
<http://inventors.about.com/gi/dynamic/offsite.htm?site=http://www.howstuffworks.com/odometer.htm>  
 19.03.2004

[www.kms.dk]  
[http://www.kms.dk/C1256AED004E87BA/\(AllDocsByDocId\)/8131B6E39DC005DAC1256BC8003B98D3?open&page=referencenet&omr=ERVGRUNDLAG](http://www.kms.dk/C1256AED004E87BA/(AllDocsByDocId)/8131B6E39DC005DAC1256BC8003B98D3?open&page=referencenet&omr=ERVGRUNDLAG)  
 08.05.2004

[www.kms.dk 1]  
<ftp://ftp.kms.dk/download/pdf/projektioner.pdf>  
 08.05.2004

## Internetkilder

[www.3dcitymodel.dk]  
[www.3dcitymodel.dk](http://www.3dcitymodel.dk)  
 17.02.2004

[www.politiken.dk]  
<http://politiken.dk/VisArtikel.sasp?PageID=244464>  
 24.02.2004

[www.3d.nja.dk]  
<http://www.3d.nja.dk>  
 05.03.2004

[www.thalesnavigation.com]  
<http://products.thalesnavigation.com/assets/datasheets/ADU5DSen.pdf>  
 17.03.2004

[www.blominfo.dk]  
<http://www.blominfo.dk/?ShowSubPage=648Type=1>  
 05.03.2004

[www.tjhsst.edu]  
<http://www.tjhsst.edu/~ai/AI2001/Vision/Explain.connect4.and8.html>  
 05.11.2003

[www.cis.temple.edu]  
[http://www.cis.temple.edu/~latecki/CIS581-02/Project2/Shahram\\_Hough.doc](http://www.cis.temple.edu/~latecki/CIS581-02/Project2/Shahram_Hough.doc)  
 12.11.2003

[www.trimblecenter.dk]  
<http://trimblecenter.dk/hvadergps.php>  
 20.03.2004

[www.flimap.com]  
<http://www.flimap.com/site1.php>  
 13.06.2004

[www.uni-koblenz.de]  
<http://www.uni-koblenz.de/~agas/lehre/ws0203/project/talks/houghTransf.pdf>  
 11.11.2003

[www.geoforum.dk]  
<http://www.geoforum.dk/ny/49/side8.shtml>  
 27.02.2004

[www.vejdirektoratet.dk]  
<http://www.vejsektoren.dk/imageblob/doc.asp?objno=/5419.pdf>  
 03.03.2004

## Diverse kilder

[Blankenberg, 2003]

Leif Erik Blankenberg, Norkart A/S

Slides med emnet "Bruk av GPS/INS ved flyfotografering"

2003

[CD-rom fra COWI]

"3D By-model - Skyline"

Version 1.0

16.10.2003

[Cederholm, 2004]

Peter Cederholm

Slides fra ph.d. forsvar

11. februar 2004

[Cederholm, 11.02.2004]

Peter Cederholms ph.d-forsvar

11. februar 2004

[Heipke, 2004]

Christian Heipke

"Integrated Sensor Orientation"

Slides fra kurs i Budapest

15. April 2004

[Seminar om 3D-bymodeller, COWI, 03.06.2004]

Seminar om 3D-bymodeller

COWI

03.06.2004

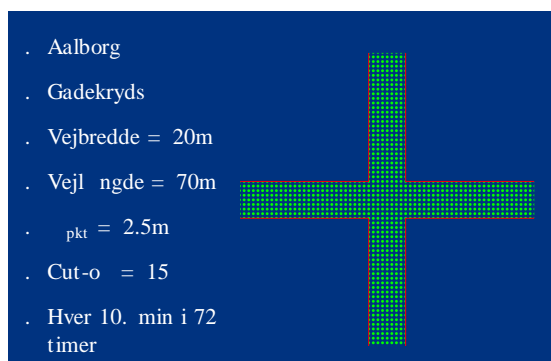
# Appendiks A: Muligheder for måling med GPS og Galileo i bymiljø

Projektgruppen har valgt udelukkende at anvende GPS til positioneringen af MKS'et. Hvis GPS-antenne mister forbindelsen til satellitterne, er det ikke muligt at positionere og orientere kameraet. I dette projekt skal MKS'et anvendes til påsætning af billeder på en 3D-bymodel. Det betyder, at MKS'et hovedsageligt skal anvendes i byer, og risikoen for at GPS-antenne mister forbindelsen til satellitterne forøges derfor, idet der findes flere obstruktioner i byen, såsom høje bygninger, træer etc. Mulighederne for anvendelse af satellitpositionering i byerne findes derfor interessant at undersøge, og formålet med dette appendiks er således at belyse relevansen af at anvende GPS som positioneringsenhed i et MKS, der skal anvendes i et bymiljø.

Peter Cederholm, Institut for Samfundsudvikling og Planlægning, Aalborg Universitet, har i sin ph.d.-afhandling "Artikler omkring GPS" sammenlignet de nuværende målebetingelser ved brug af GPS med de målebetingelser, der kan opnås ved brug af både GPS og Galileo, når Galileo efter planen træder i kraft i 2008.

Satellitnavigationssystemet NAVSTAR GPS er udviklet af U. S. Department of Defence, og har været fuldt operationelt siden 1993. NAVSTAR GPS står for Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System, men kaldes i daglig tale blot for GPS. EU ønsker et tilsvarende system, der skal kunne fungere uafhængigt og i samarbejde med GPS. Dette system kaldes Galileo, og skal efter planen blive operationelt i 2008.

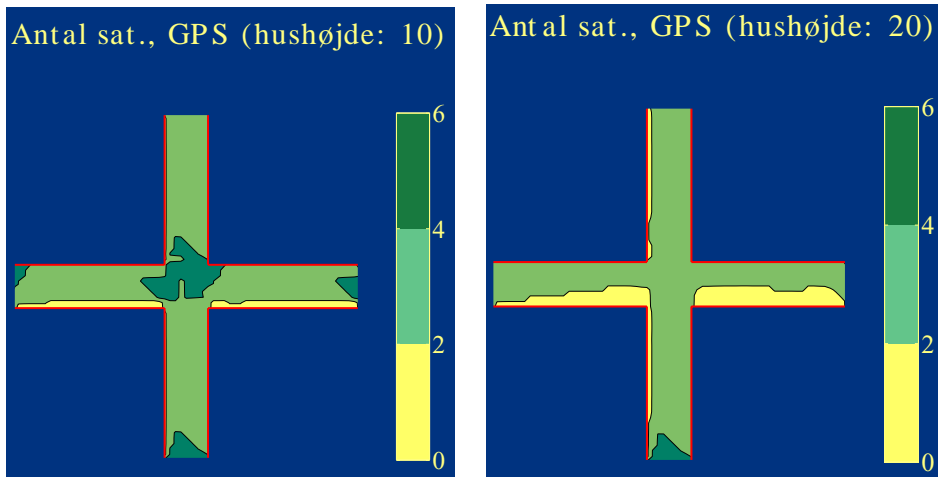
Peter Cederholms undersøgelse er foretaget i Matlab ved at simulere et kombineret GPS/



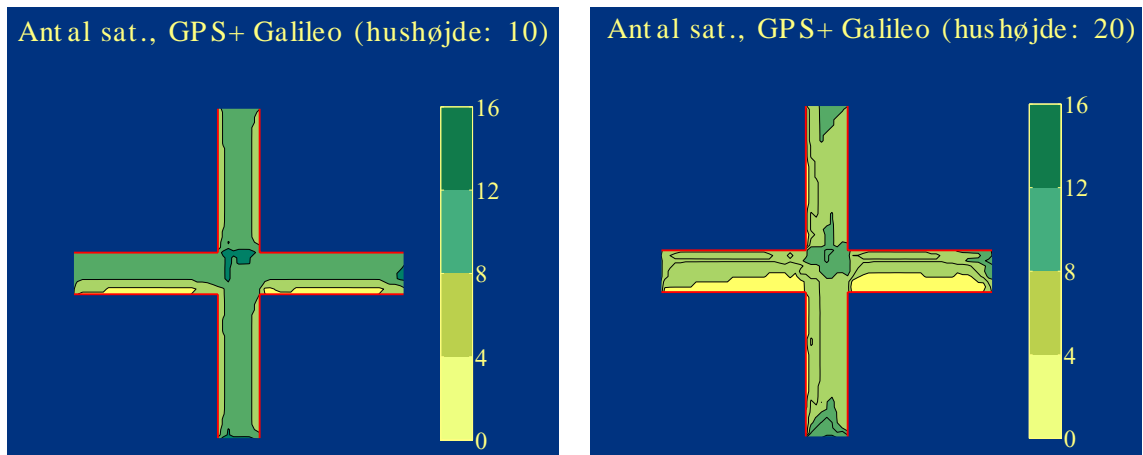
Figur 1: Målebetingelser for simuleret forsøg. [Cederholm, 2004, s. 22]

Galileo-system samt at simulere antal satellitter og således beregne en PDOP-værdi for 4140 punkter fordelt på jordkloden. PDOP-værdien er beregnet hvert 10. minut i en periode på 72 timer. Undersøgelsen viser, at der ved brug af GPS alene, altid vil være mindst fem satellitter synlige overalt på jorden. Ved brug af både GPS og Galileo stiger antallet af synlige satellitter til 13, og områder på jorden med høje PDOP-værdier forsvinder helt. En høj PDOP-værdi betyder, at geometrien mellem modtager og de satellitter, der måles til ikke, er god. Det er således godt, at de høje PDOP-værdier forsvinder. Det konkluderes, at antallet af synlige satellitter fordobles, mens PDOP-værdien omtrent halveres ved samtidig brug af GPS og Galileo. En forklaring af PDOP fremgår af Appendiks E.

Undersøgelsen er udvidet til også at omfatte inddragelse af obstruktioner, som de kan forekomme i byen. Forholdene for forsøget er vist i figur 1. Der er således simuleret et vejkryds beliggende i Aalborg, med henholdsvis 10 og 20 m høje bygninger. Vejbredden er sat til 20 m, vejlængden



Figur 2: Målebetingelserne for måling med GPS ved et vejkryds i Aalborg med henholdsvis 10 m og 20 m høje bygninger, og med 20 m mellem bygningerne. Nord er opad. [Cederholm, 2004, s. 23 og s. 25]



Figur 3: Målebetingelserne for måling med GPS og Galileo ved et vejkryds i Aalborg med henholdsvis 10 m og 20 m høje bygninger, og med 20 m mellem bygningerne. Nord er opad. [Cederholm, 2004, s. 24 og s. 26]

er 70 m, cut-off-vinklen til satellitterne er  $15^\circ$ , og der er simuleret målepunkter for hver 2,5 m. Der er efterfølgende simuleret målinger hvert 10. minut i 72 timer.

Resultatet af simuleringerne ses af figur 2 og figur 3. Søjlen til højre i figurerne angiver et gennemsnitligt antal af synlige satellitter over de 72 timer til den pågældende farve i vejkrydset.

Som det ses af figurerne 2 og 3, er der ved anvendelse af GPS ikke særligt gode muligheder for

positionering i byen. Er GPS-antenne omgivet af bare 10 m høje bygninger, vil der sjældent være tilstrækkeligt med satellitter til at kunne positionere. Og det bliver naturligvis ikke bedre af, at bygningerne bliver højere. Mulighederne bliver straks forbedret ved simultan anvendelse af GPS og Galileo, hvor der de fleste steder vil være tilstrækkeligt med synlige satellitter til at kunne positionere.

Undersøgelserne påpeger, at det som forholdene er nu, ikke er optimalt kun at anvende GPS

til positionering af MKS'et, idet MKS'et hovedsageligt skal anvendes i byområder. Men når Galileo sættes i drift, øges mulighederne betragteligt for positionsbestemmelse i byerne, og et MKS udelukkende bestående af GPS til positionering vil være mere realistisk, end det er på nuværende tidspunkt.

Ligeegyldigt hvor mange satellitter der anvendes i satellitnavigationssystemerne er det dog ikke godt at være afhængig af ydre omstændigheder ved positionering. Der vil sandsynligvis altid kunne opstå situationer, hvor positioneringen ikke kan lade sig gøre på grund af dårlig udsyn til satellitterne, eller fordi der er for få "synlige" satellitter på himlen. Derfor vil det være fornuftigt at have supplerende udstyr til positionering og orienteringsbestemmelse, hvis forbindelsen mellem GPS-antennen og satellitterne forsvinder. Som projektgruppen har været inde på i rapporten, vil et INS være et godt supplement til GPS, idet dette vil kunne bestemme position og orientering af MKS, hvis GPS-signalet skulle forsvinde over en kortere periode.

[Cederholm, 2004], [Cederholm, 11.02.2004]





# Appendiks B: Terrestrisk rumlig fremskæring

Ved kalibrering af det samlede positioneringssystem er der anvendt terrestrisk rumlig fremskæring i forbindelse med indmåling af GPS-antennernes placering samt indmåling af paspunkter til bestemmelse af kameraets ydre orientering i forhold til bilens system, jf. afsnit 5.4 Systemkalibrering.

I det følgende fremgår de formler, der er anvendt til bestemmelse af paspunkterne og GPS-antennernes koordinater.

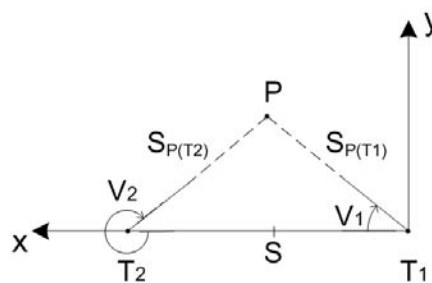
Projektgruppen har fra erfaring med, at der ved anvendelse af totalstation TCR 1105 måles med en retningsspredning på  $\sigma_r=0,5$  mgon [Frederiksen, 2003, Bilag 7]. Denne værdi er derfor anvendt i det følgende. Projektgruppen har valgt at benytte tvangscentrering, hvorfor centrering snøjagtigheden ifølge [Borre, 1993, s. 352] kan nedbringes til 0,1 mm, idet totalstationen ikke centreres over et kendt punkt. Projektgruppen har i dette tilfælde skønsomt valgt at sætte centreringsspredningen  $\sigma_c=1$  mm, idet der måles til både signalerede punkter som paspunkter men også til GPS-antennerne, der er mindre definerbare end signalerede punkter.

Til beregning af koordinater i planet er følgende formler anvendt, jf. figur 1.

$$X_p = \frac{\sin v_1 \cos v_2 S}{\sin(v_2 - v_1)}$$

$$Y_p = \frac{\sin v_1 \sin v_2 S}{\sin(v_2 - v_1)}$$

[Borre, 1993, s. 144]



Figur 1: Bestemmelse af koordinater ved terrestrisk rumlig fremskæring. Punkterne  $T_1$  og  $T_2$  er opstillingspunkter for totalstationen.  $P$  er det punkt, som måles og beregnes.  $S$ ,  $S_{P(T1)}$ ,  $S_{P(T2)}$  er strækninger mellem punkterne.  $V_1$  og  $V_2$  er vinklerne i punkterne  $T_1$  og  $T_2$ .

Den teoretiske punktspredning i planet beregnes ud fra formlen:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{S_{P(T1)}^2 + S_{P(T2)}^2}{2 \sin^2 P} \left( \frac{\sigma_\beta}{\omega} \right)^2}$$

[Borre, 1993, s. 145]

I ovenstående formel er  $\omega=200/\pi$  og  $\sigma_\beta$  er spredningen på en målt vinkel. Denne beregnes:

$$\sigma_\beta = \sqrt{\frac{\sigma_r^2}{n} + \left( \frac{\sigma_c \omega}{S_{P(T1)}} \right)^2 + \frac{\sigma_r^2}{n} + \left( \frac{\sigma_c \omega}{S} \right)^2}$$

Her er  $n$ =antal målte satser.

[Jensen, 2003, s. 11]

Højden til det målte punkt P måles både fra opstilling T1 og opstilling T2, hvorfor der er to bud på højden til punktet P. Den endelige højde beregnes som et gennemsnit af de to bud. Højden til P kaldet  $H_P$  beregnes efter følgende formler, jf. figur 2 og 3:

$$\begin{aligned}
 H_{P(T1)} &= DH_{P(T1)} - DH_{R(T1)} + R \\
 H_{P(T2)} &= DH_{P(T2)} - DH_{R(T2)} + R \\
 H_P &= \frac{H_{P(T1)} + H_{P(T2)}}{2}
 \end{aligned}$$

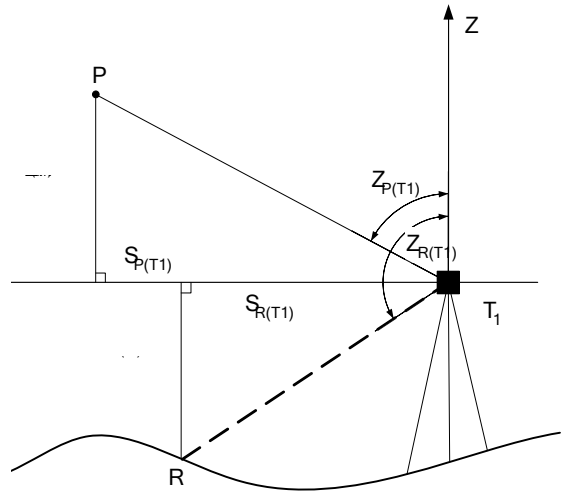
Her er:

$$\begin{aligned}
 DH_{P(T1)} &= \frac{S_{P(T1)}}{\tan Z_{P(T1)}} & DH_{P(T2)} &= \frac{S_{P(T2)}}{\tan Z_{P(T2)}} \\
 DH_{R(T1)} &= \frac{S_{R(T1)}}{\tan Z_{R(T1)}} & DH_{R(T2)} &= \frac{S_{R(T2)}}{\tan Z_{R(T2)}}
 \end{aligned}$$

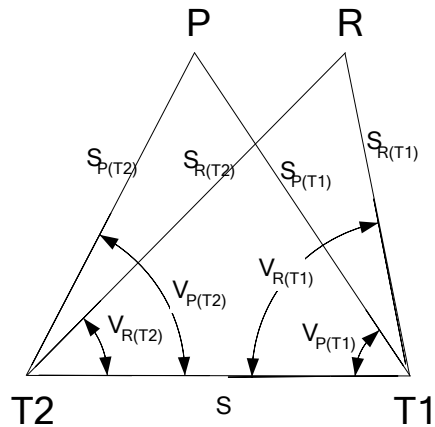
hvor

$$\begin{aligned}
 S_{P(T1)} &= \frac{\sin V_{P(T2)}}{\sin(V_{P(T1)} + V_{P(T2)})} S & S_{P(T2)} &= \frac{\sin V_{P(T1)}}{\sin(V_{P(T1)} + V_{P(T2)})} S \\
 S_{R(T1)} &= \frac{\sin V_{R(T2)}}{\sin(V_{R(T1)} + V_{R(T2)})} S & S_{R(T2)} &= \frac{\sin V_{R(T1)}}{\sin(V_{R(T1)} + V_{R(T2)})} S
 \end{aligned}$$

[Noter udleveret af Carsten Bech i kurset præcisionsmåling 2003]



Figur 2: Højdebestemmelse ved terrestrisk rumlig frem-skæring. R er et referencepunkt med kendt højde. Skitsen viser kun situationen ved opstilling T1. Ved T2 forekommer en lignende situation.



Figur 3: Skitse af horisontalvinkler ved beregning af afstand fra totalstationerne T1 og T2 til punkterne P og R.

# Appendiks C: Koordinatsystemer

I projektet arbejdes der i forskellige koordinatsystemer. I dette afsnit beskrives de forskellige anvendte koordinatsystemer.

De koordinatsystemer der er anvendt i projektet er:

- Billedkoordinatsystemet
- Kameraets koordinatsystem
- Totalstationernes koordinatsystem
- Bilens koordinatsystem
- EUREF89
- UTM32<sub>EUREF89</sub> og DVR90.

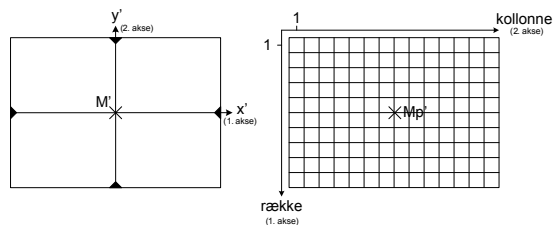
Alle koordinatsystemerne er højrehåndskordinatsystemer med positive omløbsretning jf. højrehåndsreglen.

## 1 Billedkoordinatsystemet

I billedkoordinatsystemet måles billedkoordinaterne, som indgår i stråleligningerne.

Origo i billedkoordinatsystemet er billedmidtpunktet,  $M'$ , som i analog og analytisk fotogrammetri defineres ud fra skæringen af forbindelseslinjerne mellem modstående rammemærker, jf. figur 1.

I digitale kameraer anvendes pixelkoordinater, hvis koordinatsystem defineres som vist i figur 1. Pixelkoordinatsystemet anvendes også af projektgrup-



Figur 1: Billedmidtpunktet i analog/analytisk fotogrammetri findes ved hjælp af rammemærker (venstre), mens det i digital fotogrammetri findes ved hjælp af antal pixler (højre).

pen ved den digitale billedbehandling i Matlab. Billedkoordinatsystemet fastlægges således ikke på baggrund af rammemærker, men på baggrund af antallet af pixler, som er kendt i forvejen. For Rollei d7, som har en CCD med størrelsen 1280×1024 pixler, betyder det, at billedmidtpunktet,  $M_p'$ , er defineret i 640,5×512,5 pixler. Den halve pixelværdi er lagt til, fordi midten af den øverste venstre pixel er defineret som (1,1) jf. figur 1.

I forbindelse med stråleligningerne kan pixelkoordinater ikke anvendes, og disse må således omregnes til billedkoordinater. Det betyder, at der skal omregnes mellem pixelkoordinater og billedkoordinater. Dette gøres efter følgende formler:

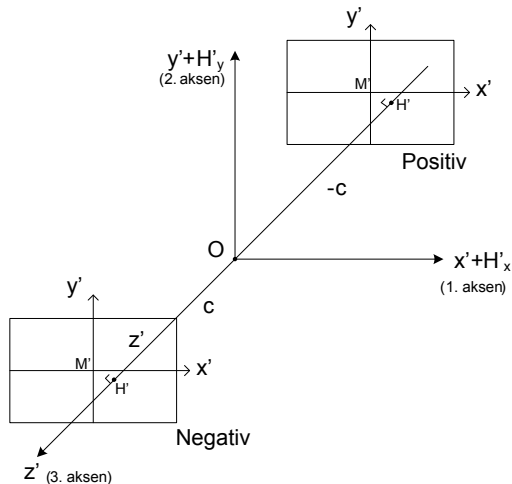
$$\begin{aligned}
 \text{kollonne} &= \frac{(x' + M_p'_x)}{\text{pixelstørrelse}} \\
 \Updownarrow \\
 x' &= \text{pixelstørrelse} \times \text{kollonne} - M_p'_x \\
 \\
 \text{række} &= \frac{(-y' + M_p'_y)}{\text{pixelstørrelse}} \\
 \Updownarrow \\
 y' &= -\text{pixelstørrelse} \times \text{række} + M_p'_y
 \end{aligned}$$

Pixelstørrelsen er 0,007 mm for Rollei d7, hvilket betyder, at billedmidtpunktet,  $M_p'$ , omregnet til millimeter er 4,4835 mm  $\times$  3,5875 mm.

## 2 Kameraets koordinatsystem

Kameraets koordinatsystem defineres af billedplanet og den vinkelrette afstand fra projektiionscentret ( $O$ ) til billedplanet. Idet CCD'en (eller filmen) ikke er placeret helt korrekt i kameraet i forhold til linsesystemet, vil den vinkelrette afstand på billedplanet ikke falde sammen med billedmidtpunktet ( $M'$ ), og billedkoordinatsystemet med origo i billedmidtpunktet kan ikke umiddelbart anvendes som  $xy$ -plan i kameraets koordinatsystem. Der hvor den vinkelrette afstand fra projektiionscentret skærer billedplanet kaldes hovedpunktet,  $H'$ . Hovedpunktet er således den optimale placering af billedmidtpunktet, og de målte billedkoordinater skal korrigeres for forskydningen mellem billedmidtpunktet og hovedpunktet.

Kameraets koordinatsystem ses på figur 2. Med origo i projektiionscentret defineres et højrehåndssystem med billedplanet som  $xy$ -plan og

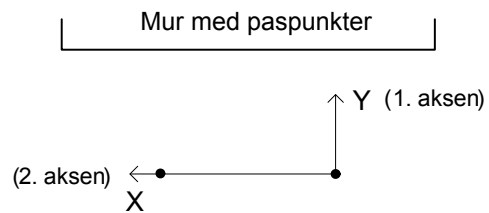


Figur 2: Kameraets koordinatsystem har origo i projektiionscentrum ( $O$ ).  $Z$ -aksen defineres af kamerakonstanten ( $c$ ), mens  $xy$ -planet defineres af billedplanet, hvor koordinaterne korrigeres for hovedpunktets ( $H'$ ) forskydning fra billedmidtpunktet ( $M'$ ).

kamerakonstanten ( $c$ ) som  $z$ -akse. Normalt fremstilles billedet som et negativ, men i matematiske beregninger, såsom i stråleligningerne, opfattes billedet som et positiv, for ellers vil billedet være spejlvendt. Derfor skrives koordinaterne i kameraets koordinatsystem som  $(x'+H'_x, y'+H'_y, -c)$ . [Luhmann, 2000, s. 26-27]

## 3 Totalstationernes koordinatsystem

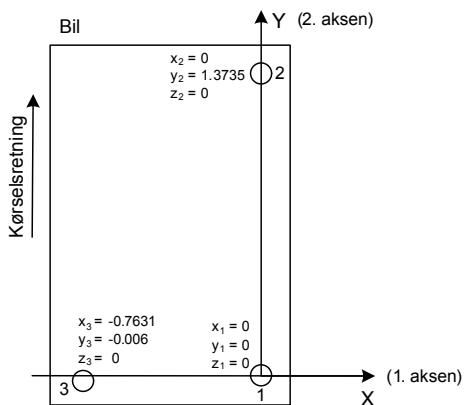
Totalstationernes koordinatsystem defineres af de to opstillingspunkter, der anvendes ved systemkalibreringen. Opstillingspunkterne og koordinataksene ses i figur 3. Højderne i koordinatsystemet defineres af et paspunkt på muren.



Figur 3: Definition af totalstationens koordinatsystem. Koden defineres af et punkt på muren.

## 4 Bilens koordinatsystem

Bilens koordinatsystem defineres af de tre GPS-antenner, der er placeret på taget af bilen. Origo er defineret i GPS-antenne 1, mens vektoren i mellem GPS-antennen 1 og 2 definerer  $Y$ -aksen. Antennernes placering ses af figur 4. Vinkelret på  $Y$ -aksen er  $X$ -aksen. Placeringen af GPS-antenne 3 i koordinatsystemet ses også af figur 4. For at have et højrehåndssystem defineres  $Z$ -aksen som pegende opad, se figur 4, vinkelret på planet udspændt af de tre GPS-antenner. Højderne i de tre GPS-antenner defineres til at være 0. Koordinaterne til de tre GPS-antenner er beregnet som beskrevet i *Appendiks D: Rotationsmatricer og koordinatomregning*. I bilens koordinatsystem er kameraet også defineret.

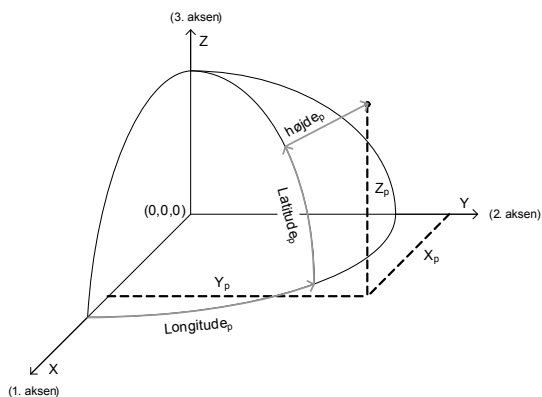


Figur 4: Definition af køretøjets koordinatsystem. GPS-antenne 1 definerer origo, mens vektoren mellem GPS-antenne 1 og 2 definerer Y-aksen. Højden i alle tre GPS-antener defineres til at være 0.

## 5 EUREF89

EUREF89 er den europæiske realisering af WGS84. WGS84 er et globalt datum, der i forbindelse med opbygningen af GPS blev defineret som det referencesystem, hvori både GPS-modtagernes og satelliternes positioner kunne repræsenteres. Kort & Matrikelstyrelsen betragter EUREF89 og WGS84 som værende identiske i Europa. [Madsen, 2001, s. 133]

EUREF89 er et geocentreret datum, hvilket betyder, at koordinatsystemet er tilstræbt sam-



Figur 5: Et geocentreret koordinatsystem med henholdsvis kartesiske og geografiske koordinater.

menfaldende med jordens massemidtspunkt. Koordinater i dette koordinatsystem angives som kartesiske (X,Y,Z) eller som geografiske ( $\varphi$ ,  $\lambda$ , ellipsoidehøjde), jf. figur 5.

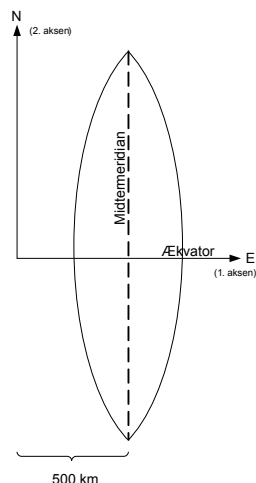
## 6 UTM og DVR90

Som kortprojektion og højdesystem har projektgruppen valgt at anvende henholdsvis UTM<sub>EUREF89</sub> (zone 32) og DVR90, som referencesystem ved GPS-observationerne og 3D-bymodellens koordinater.

### UTM

Universal Transverse Mercator eller blot UTM er en kortprojektion, der kan anvendes til afbildning af punkter overalt på jordkloden bortset fra polarområderne. Jordkloden er ved UTM-projektionen inddelt i 60 zoner á seks grader. Danmark ligger i zone 32 og 33. Over hver udfoldet UTM-zone, er der placeret et koordinatsystem, og for den nordlige halvkugle gælder det, at førsteaksen, Easting-aksen, er placeret på ækvator, mens andenaksen, Northing-aksen, er placeret 500 km vest for og parallel med zonens midtermeridian, jf. figur 6.

En kortprojektion anvendes til at afbilde et tredimensionalt koordinat på en to-dimensional overflade. Det er derfor vigtigt at vide, hvad den



Figur 6: Definition af UTM-kortprojektionens akser på den nordlige halvkugle. Northing akse ligger 500 km fra midtermeridianen for at undgå negative easting-koordinater.

tre-dimensionale koordinat er målt i forhold til. Opmålinger foretages i forhold til en tilnærmet beskrivelse af jordens form. Denne tilnærmede beskrivelse kaldes for et datum, og der er gennem årenes løb defineret forskellige datums. Skal opmålingen afbildes i UTM, skal det således angives hvilket datum, der er anvendt. I Danmark anvendes UTM normalt sammen med enten EUREF89 eller ED50. Vigtigheden i angivelse af datum til kortprojektion afspejles i, at en fejlagtig antagelse mellem de to datums kan give koordinatafvigelser på op til flere hundrede meter, jf. figur 7.

Koordinater i UTM angives ved Northing og Easting samt zonennummer og datum. Zonennummeret er vigtigt, idet "samme koordinat" findes i alle 60 zoner med mindre zonennummeret angives.

UTM er i EU-regi anbefalet som standardprojektion ved lagring og udveksling af data. I Danmark standardiseres kortlægningen ved introduktionen af to transversale mercatorprojektioner, UTM<sub>EUREF89</sub> og Kp2000. Kp2000 er også tilknyttet EUREF89. KMS anbefaler at UTM<sub>EUREF89</sub> anvendes som den primære kortprojektion, mens Kp2000 anvendes som den sekundære kortprojektion. Forskellen på de to kortprojektioner er hovedsageligt, at afstandskorrekturen i UTM er op til 40 cm/km, hvor den kun er 5 cm/km i Kp2000. At UTM<sub>EUREF89</sub> skal anvendes som den primære kortprojektion

betyder, at al lagring, bearbejdning og udveksling af data foregår i UTM<sub>EUREF89</sub>. Kp2000 kan således anvendes internt i organisationen, for eksempel i landinspektørfirmaer, hvor de store afstandskorrekturen på op til 40 cm/km kan være til gene.

[www.kms.dk 1, 08.05.2004], [Jensen m.fl., 2001, s. 136-140]

### DVR90

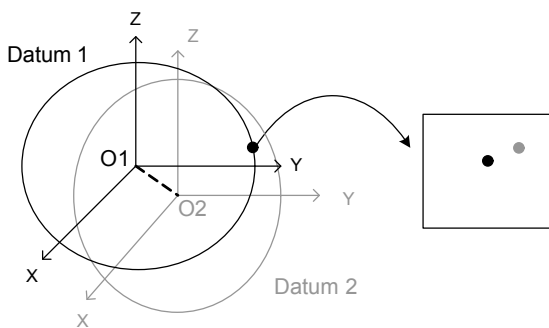
I Danmark er der i maj 2002 indført et nyt højdesystem, DVR90, til afløsning for det gamle højdesystem, DNN. Årsagen til indførelsen af det nye højdesystem er at højdeforskellen mellem højdefikspunkterne og middelvandstanden har ændret sig siden oprettelsen af DNN. Dette er sket fordi vandet i havene stiger, og Danmark vipper. Set over de sidste 100 år, har det nordlige Jylland hævet sig, mens resten af Danmark er sunket. Det betyder, at afstanden mellem højdefikspunktet og middelvandstanden er blevet længere i det nordlige Jylland end den angivne kote, mens det modsatte er tilfældet i resten af Danmark.

På grund af ovenstående har det været nødvendigt at justere referencerammen, således at der bliver overensstemmelse mellem koter og middelvandstand. DVR90 er defineret ud fra middelvandstanden i 1990.

Fra indførelsen af højdesystemet i 2002 til 1. januar 2005 er der en overgangsperiode, hvor det er muligt at udveksle højdeinformationer i begge højdesystemer. Det er derfor vigtigt, at opgave koter med systemangivelse - enten DNN eller DVR90.

Med det nye højdesystem er det muligt at bestemme koter med en nøjagtighed på 1-2 cm ved hjælp af GPS.

[www.kms.dk, 08.05.2004]



Figur 7: Angivelse af datum ved afbildning af et tre-dimensionelt punkt i en kortprojektion er vigtig, idet ukritisk afbildning kan give fejl på flere hundrede meter i kortprojektion.

# Appendiks D: Rotationsmatricer og koordinatomregning

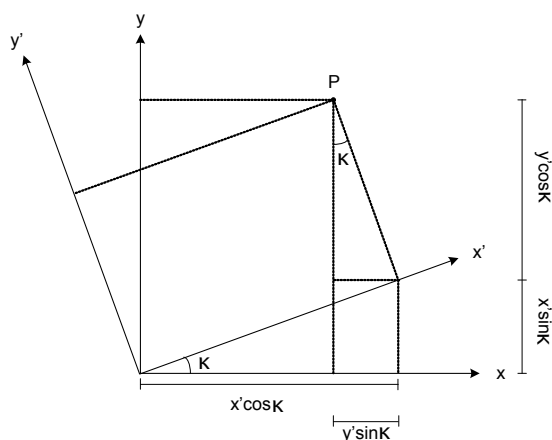
Der er i projektet anvendt transformation og koordinatomregning. I transformationer anvendes rotationsmatricer, og hvorfor de ser ud, som de gør, forklares i dette appendiks. Endvidere vil teorien bag koordinatomregningen mellem EUREF89 og UTM<sub>EUREF89</sub> zone 32 blive præsenteret.

## 1 Udledning af rotationsmatricer

I følgende afsnit forklares, hvorledes rotationsmatricer anvendt i transformation udledes. Der tages udgangspunkt i et 2-dimensionelt koordinatsystem. Herefter beskrives de 3-dimensionelle rotationsmatricer.

### 1.1 2D-rotationsmatricer

Et punkt  $P(x,y)$  i  $xy$ -koordinatsystemet skal beskrives i  $x'y'$ -koordinatsystemet, jf. figur 1.



Figur 1: Forhold mellem punktet  $P$  beskrevet i de to koordinatsystemer.

Figuren viser sammen med nedenstående formel, relationen mellem punktet  $P$  i henholdsvis det ene og det andet koordinatsystem.

$$\begin{aligned} x &= x' \cos \kappa - y' \sin \kappa \\ y &= x' \sin \kappa + y' \cos \kappa \end{aligned}$$

På matrixform ser ovenstående formler ud som følger:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa \\ \sin \kappa & \cos \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

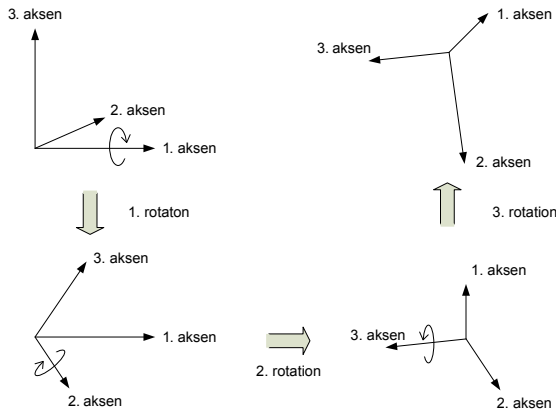
Ganges den transponerede rotationsmatrice på  $x,y$ -koordinaterne, fås  $P$ 's koordinater i  $x'y'$ -koordinatsystemet.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa \\ -\sin \kappa & \cos \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

### 1.2 3D-rotationsmatricer

I 3-dimensionelle koordinatsystemer roteres koordinaterne i princippet også kun i to dimensioner, men dette gøres af 3 gange - en gang for hver rotation om koordinatsystemets akser. Rotationsrækkefølgen er vigtig at have i mente, hvis den inverse rotation skal anvendes til at rotere koordinaterne tilbage til udgangspunktet.

Der drejes om meddrejede akser, hvilket vil sige, at når der roteres anden gang, er det ikke om den oprindelige 2. akse, men den 2. akse der allerede er roteret fra den første rotation. Ved den tredje rotation roteres der igen ikke om den oprindelige



Figur 2: Rotationsprincippet ved rotation om meddrejede akser.

3. akse, men 3. akse roteret to gange - en gang fra første rotation og en anden gang fra anden rotation. Rotationsprincippet er vist i figur 2.

Nedenstående ses matricerne for rotationerne omkring henholdsvis X-, Y- og Z-aksen.

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad \text{hvor:}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \omega \text{ er rotationen omkring} \\ \text{1. akse} \\ \varphi \text{ er rotationen omkring} \\ \text{2. akse} \\ \kappa \text{ er rotationen omkring} \\ \text{3. akse} \end{array}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [\text{Kraus, 1993, side 379-381}]$$

Den samlede rotation om de tre akser fås ved at gange de tre rotationsmatricer sammen. Rotationsrækkefølgen defineres ved hvilken rækkefølge de enkelte rotationsmatricer ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) ganges samme. Værdier for henholdsvis første, anden eller tredje rotation kan ikke sammenlignes med værdier for en anden rotationsmatrice, hvor der er anvendt en anden rotationsrækkefølge.

3D-rotationsmatricen  $R_{XYZ}$  ganges på koordinaterne i  $x$ ,  $y$ ,  $z$ -koordinatsystemet, og dermed får alle koordinaterne nye  $x'$ -,  $y'$  og  $z'$ -koordinater.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_{XYZ} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

## 2 Omregning fra EUREF89 til UTM32(EUREF89)/DVR90

Projektgruppen har omregnet koordinaterne fra EUREF89 til UTM32<sub>EUREF89</sub>/DVR90 efter beregningerne beskrevet i det følgende. Beregningerne anvendes ved omregning fra geografiske koordinater til koordinater i en transversal afbildning. Beregningerne er foretaget på baggrund af noterne "Transversal afbildning" og "Geoidmodeller" af Karsten Jensen, 2003. Med mindre andet angives, er kilden således disse noter.

### 2.1 Beregning af plane koordinater

Beregningsgangen for transformation mellem EUREF89 til UTM32<sub>EUREF89</sub> er følgende:

- Beregning fra geografiske koordinater ( $\varphi, \lambda$ ) til gaussiske koordinater ( $\Phi, \Lambda$ ).
- Beregning fra gaussiske koordinater ( $\Phi, \Lambda$ ) til komplekse gaussiske koordinater ( $X, Y$ ).
- Beregning fra komplekse gaussiske koordinater ( $X, Y$ ) til koordinater i transversal afbildning ( $N, E$ ).

### Parametre og konstanter

Beregningerne fra EUREF89 til UTM32<sub>EUREF89</sub> forudsætter at parametrene angående referenceelipsoiden og den transversale afbildning er kendt.



De parametre, der skal kendes, vedrørende referenceellipsoiden er ellipsoidens halve storakse i meter (a) og fladtrykningen (f). I EUREF89 anvendes GRS80-ellipsoiden, som har parametrene:

- a = 6378137 m
- f = 1/298,257223563

Parametrene, der skal kendes vedrørende den transversale afbildning, er for UTM32 midtmeridianen i grader ( $\lambda_0$ ), målforholdet ved midtmeridianen ( $m_0$ ), falsk northing ( $N_0$ -koordinat ved ækvator) og falsk easting ( $E_0$ -koordinat ved midtmeridianen). Parametrene for UTM zone 32 er følgende:

- $\lambda_0 = 9$  grader
- $m_0 = 0,9996$
- $N_0 = 0$  m
- $E_0 = 500.000$  m

På baggrund af ovenstående parametre beregnes en række konstanter, der skal anvendes i de efterfølgende beregninger:

$n = \frac{f}{2-f}$	3. fladtrykning
$e'^2 = \frac{f(2-f)}{(1-f)^2}$	2. excentricitet kvadreret
$c = \frac{a}{1-f}$	Krumningsradius ved pol
$Q = \frac{a}{1+n} \left( 1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 \right)$	Meridianbuens længdeenhed
$Q_m = m_0 Q$	Meridianbuens længdeenhed, skaleret

### Fra geografiske til gaussiske koordinater

Beregningen fra geografiske koordinater til gaussiske koordinater foretages efter formlerne:

$$\Phi = \varphi + \sum_{k=1}^4 e_{2k} \sin(2k\varphi)$$

$$\Lambda = \lambda - \lambda_0$$

hvor

$$e_2 = -2n + \frac{2}{3}n^2 + \frac{4}{3}n^3 - \frac{82}{45}n^4$$

$$e_4 = \frac{5}{3}n^2 - \frac{16}{15}n^3 - \frac{13}{9}n^4$$

$$e_6 = -\frac{26}{15}n^3 + \frac{34}{21}n^4$$

$$e_8 = \frac{1237}{630}n^4$$

### Fra gaussiske til komplekse gaussiske koordinater

Beregningen fra gaussiske koordinater til komplekse gaussiske koordinater foretages efter følgende formler:

$$Y = \arctan_2 \left( \frac{\sin \Phi}{\cos \Phi \cos \Lambda} \right)$$

$$t = \arctan_2 \left( \frac{\cos \Phi \sin \Lambda}{\sqrt{\sin^2 \Phi + (\cos \Phi \cos \Lambda)^2}} \right)$$

$$X = \ln \left( \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{t}{2} \right) \right)$$

$$U = Y + iX$$

U er et komplekst tal, hvor Y og X er henholdsvis den reelle del og den imaginære del. Y og t er vinkler. X er en dimensionsløs afstand til ækvator i en normaliseret mercatorafbildning.

### Fra komplekse gaussiske koordinater til koordinater i transversal afbildning

Beregningen fra komplekse gaussiske koordinater til koordinater i den transversale afbildning foretages efter følgende formler:

$$N = \Re [uQ_m] + N_0$$

$$E = \Im [uQ_m] + E_0$$

hvor

$\Re$  = reel del af  $[uQ_m]$

$\Im$  = Imaginær del af  $[uQ_m]$

$$u = U + \sum_{k=1}^4 U_{2k} \sin(2kU)$$

og

$$U_2 = \frac{1}{2}n - \frac{2}{3}n^2 + \frac{5}{16}n^3 + \frac{41}{180}n^4$$

$$U_4 = \frac{13}{48}n^2 - \frac{3}{5}n^3 + \frac{557}{1440}n^4$$

$$U_6 = \frac{61}{240}n^3 - \frac{103}{140}n^4$$

$$U_8 = \frac{49561}{161280}n^4$$

Ovenstående beregninger er implementeret i følgende matlabscripts: "ellipsoide\_konstanter.m", "geo2tm.m" og "Transformation\_euref892utm.m". Fra GPS-målingerne fås koordinaterne i grader, minutter og sekunder. Da beregningerne forudsætter at koordinaterne er angivet i decimalgrader skal koordinaterne omregnes til dette format. Dette gøres i følgende matlabscripts "geo2grad.m" og "Omregning\_geo2grad.m".

Koordinaterne N og E i den transversale afbildning er henholdsvis den reelle del og den imaginære del af  $uQ_m$  i meter adderet med de respektive værdier for falsk northing og falsk easting.

## 2.2 Beregning af højde i DVR90

I EUREF89 måles der i forhold til GRS80-ellipsoiden, og disse skal omregnes til en ortometrisk højde, som er i forhold til geoiden. Højderne beregnes i forhold til højdesystemet DVR90, og i beregningerne af højden er geoidmodellen dvr90g2002.01 anvendt.

Ved beregning af den ortometriske højde anvendes formlen:

$$H = h - N$$

hvor

H = ortometrisk højde i meter

h = ellipsoidehøjde i meter

N = geoidhøjde i meter

På baggrund af koordinaterne interpoleres N ud fra den pågældende geoidmodel.

# Appendiks E: Fejkilder ved GPS

Ved anvendelse af GPS, skal brugeren være opmærksom på de fejkilder, der findes i forbindelse med GPS-positionering. Fejkilderne vil blive introduceret i det følgende:

- Ionosfæriske forstyrrelser
- Troposfæriske forstyrrelser
- Banefejl
- Fejl i satellit- og modtagerure
- Multipath
- DOP

I projektet måles der relativ GPS. Ved relativ GPS foretages faseobservationer samtidigt fra to modtagere til de synlige satellitter. Vektoren mellem de to modtagere kaldes basislinjen. Faseobservationerne opsamles i et fast tidsinterval; i epoker. Ved databehandlingen anvendes faseobservationerne for samme epoke fra de to modtagere til dannelse af differenser. Mange af fejkilderne elimineres ved dannelse af disse differenser.

## Ionosfæriske forstyrrelser

GPS-satellitternes baner ligger 20.200 km over jordens overflade. GPS-signalet skal igennem atmosfæren inden det når modtageren, hvilket godt kan introducere fejl på afstandsbestemmelsen mellem satellit og modtager. En af de lag GPS-signalet skal igennem er ionosfæren, som er den del af atmosfæren, der ligger ca. 50 km fra jordens overflade og op til ca. 1500 km. På grund af

stråling fra rummet og solen spaltes ionosfærens luftmolekyler i ioner og elektroner. Ved GPS-signalets passage gennem ionosfæren forsinkes det på grund af tætheden af elektronerne. Tætheden af elektronerne afhænger af årstid, om det er dag eller nat samt solpletaktiviteten. Ionosfæreforstyrrelsen er mindst om natten, hvor solens stråler ikke påvirker ionosfæren i så høj grad som om dagen. Solpletaktiviteten medfører forøget ultraviolet stråling fra solen, hvilket giver større fejlbidrag til GPS-målingerne. Solpletaktiviteten peaker ca. hvert 11. år, og var sidst høj i år 2000.

Fejlbidragene fra ionosfæren kan til dels fjernes ved hjælp af kendskab til tætheden af elektronerne. Måles der relativ GPS kan resten af fejlbidraget fjernes ved dannelse af enkeltdifferenser, hvis basislinjen ikke er for lang. Enkeltdifferenser dannes mellem fasemålinger fra to modtagere til den samme satellit. Ved længere basislinjer mellem de to modtagere, skal der, hvis ionosfærens fejl skal fjernes, anvendes to-frekvente modtagere hvor ionosfærens indflydelse på målingen kan beregnes ved sammenligning af fasen på de to bærebølger.

## Troposfæriske forstyrrelser

GPS-signalet forsinkes ved passage gennem troposfæren. Troposfæren er den del af atmosfæren, der ligger nærmest jordens overflade. Fejlen der introduceres på GPS-signalet ved dets passage igennem troposfæren er kendt, og afhænger af temperaturen, trykket og den relative luftfugtighed. Troposfæreforsinkelsen kan således beskrives ved hjælp af en formel, og den målte afstand mellem satellit og GPS-modtager korrigeres derfor

i modtageren. Ved korrektion for troposfæreforsinkelsen indgår GPS-signalets rejsetid gennem troposfæren ikke. Det anbefales derfor kun at måle til satellitter, der er over 15° over horisonten, idet satellitter nær horisonten har længere rejsetid gennem troposfæren end satellitter nær zenit.

## Banefejl

Banefejl er den fejl, der er mellem satellittens sande position, og den fejl, der er beregnet ud fra den udsendte banedata, også kaldet almanakken. Fejlen kan formindskes ved at måle differentielt. Skal der opnås høje nøjagtigheder kan databehandlingen udskydes til mere præcise banedata, efemerider, er tilgængelige via internettet.

## Fejl i satellit ure

I satellitterne anvendes utroligt præcise ure, idet en lille fejl i satellit urene på for eksempel  $10^{-9}$  sekund vil medføre en fejl på jorden på 0,3 m. Satellit urene kontrolleres og korrigeres flere gange om dagen via kontrolstationerne på jorden. Den fejl der måtte være i satellit urene kan elimineres ved dannelse af enkelt differenser ved relativ GPS.

## Fejl i modtager ure

Urene i modtageren er knapt så præcise som urene i satellitterne, men korrigeres løbende under målingen efter satelliternes ure. Urfejlen i modtageren elimineres ved dannelse af dobbelt-

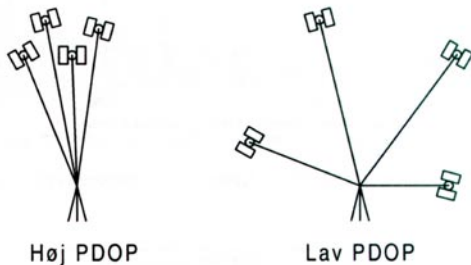
differenser, hvor der fra to modtagere måles til to forskellige satellitter.

## Multipath

Multipath opstår hvis GPS-antennen er placeret ved reflekterende flader, som for eksempel bygninger. Ved multipath reflekteres GPS-signalet af de omgivende flader, hvilket betyder, at GPS-signalet ikke rejser direkte til antennen, og afstanden mellem modtager og satellit beregnes således længere, end den i virkeligheden er. Risikoen for multipath kan formindskes ved at sætte en høj elevationsmaske. Visse GPS-modtagere har endvidere indbygget særlige filtre til at detektere og undertrykke signaler, der er påvirket af multipath.

## DOP

DOP betyder Dilution of Precision og kan angives på forskellig vis, men overordnet udtrykker DOP-værdien opmålingsgeometrien mellem modtager og satellit på et givent tidspunkt. PDOP (Position Dilution of Precision) er den værdi, der anvendes oftest til vurdering af opmålingsgeometrien. En lav PDOP-værdi udtrykker et stort volumen af det rum, der udspændes mellem satellitterne og modtageren, jf. figur 1. En lav PDOP-værdi er altså godt. Ved planlægning af GPS-målinger kan visse programmer anvendes til bestemmelse af PDOP på et givent geografisk sted til et givent tidspunkt. Et program der kan anvendes er for eksempel Survey Design fra Leica SkiPro-pakken.



Figur 1: Grafisk fremstilling af høj og lav PDOP. Lav PDOP betyder god geometri mellem satellitter og modtager. [Dueholm m.fl., 2002, s. 46]

[Borre, 1995. s. 100-103], [Dueholm m.fl., 2002, s. 40-48, 66-69], [Leica, 1998, s. 14-18], [www.trimblecenter.dk, 17.05.2004]

# Appendiks F: Udjævningssteknikker

Formålet med dette appendiks er, at redegøre for forskellige udjævningssteknikker nævnt i projektet.

Appendikset forudsætter, at læseren har kendskab til principperne og termerne bag udjævning ved mindste kvadraters princip.

Først redegøres kort for selve udjævningsproblemet, hvorefter der redegøres for to forskellige teknikker til udjævning, der blandt andet kan anvendes til udjævning i forbindelse med transformation og fotogrammetrisk tilbageskæring.

## 1 Udjævningsproblemet

Der findes flere forskellige teknikker til løsning af udjævningsproblemet. Uanset hvilken teknik, der anvendes på et givet udjævningsproblem giver resultatet det samme. Forskellen mellem de forskellige metoder er blot, at de er anvendelige til løsning af forskellige udjævningsproblemer.

Inden for landmåling og fotogrammetri benyttes hovedsageligt tre teknikker til udjævning; "udjævning af observationer alene", "udjævning af indirekte observationer" og "den generelle udjævningssteknik".

Den første teknik benyttes, hvis observationsligningerne kun indeholder konstanter og observationer.

"Udjævning af indirekte observationer" anvendes til udjævningsproblemer, hvor betingelsesligningerne består af elementer, konstanter samt netop én observation per betingelsesligning. Teknikken

kan for eksempel anvendes til udjævning af et nivellementsnet eller ved tilpasning af en ret linie  $y=ax+b$  til en række observationer  $(x,y)$ , hvor  $x$ -koordinaterne opfattes som konstanter og  $y$ -koordinaterne som observationer. Liniens parametre  $a$  og  $b$  er elementerne.

[Mikhail, 2001, s. 391-394]

"Udjævning af indirekte observationer" kan også anvendes til at bestemme transformationsparametrene ved koordinattransformation. Herved tilpasses koordinaterne til en række punkter i ét koordinatsystem til tilsvarende punkter i ét andet koordinatsystem, således at de kvadrede residualerne bliver mindst mulige. I dette tilfælde betragtes kun koordinaterne i det ene koordinatsæt som observationer, mens tilsvarende koordinater i det andet koordinatsystem, betragtes som konstanter. Dette medfører, at der kun er én observation per observationsligning. I så fald rettes kun observationerne i det første koordinatsystem. Drejer det sig om en 6-parameter 3D-transformation er transformationsparametrene ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ,  $dx$ ,  $dy$  og  $dz$ ) elementerne.

Ønskes at alle koordinatobservationerne  $(x,y,z)$  i begge koordinatsystem betragtes som observationer, således at alle koordinaterne rettes, skal der anvendes en mere generel udjævningssteknik, idet betingelsesligningerne således indeholder både elementer, konstanter og mere end én observation per ligning. [Mikhail, 2001, s. 393]

I projektet er de to sidstnævnte teknikker; "Udjævning af indirekte observationer" og "Den generelle udjævningssteknik", omtalt i 5.5 *Bestem-*

melse af bilens position og rotationer med GPS i forhold til referencesystemet. Derfor beskrives disse to teknikker i det følgende. Der tages i beskrivelsen udgangspunkt i transformationsligninger, men principperne for de beskrevne teknikker er de samme uanset, hvad der udjævnes på. Principperne gælder altså for eksempel også ved fotogrammetrisk tilbageskæring. Først beskrives teknikken "Udjævning af indirekte observationer", hvorefter der redegøres for den generelle udjævningsteknik.

## 2 "Udjævning af indirekte observationer" anvendt til transformation

Ved anvendelse af denne teknik til en 6-parameter 3D-transformation anvendes følgende formel:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}$$

R er en givet rotationsmatricen bestående af trigonometriske udtryk, jf. [Kraus, 1993, s. 9], hvis drejningsrækkefølgen først er omkring x-aksen, dernæst y-aksen og til sidst omkring z-aksen:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Observationsligningerne bestemmes som:

$$\bar{b} = A\bar{x} - \bar{r}$$

Da observationsligningerne består af trigonometriske udtryk, må disse først lineariseres ved hjælp af Taylor rækkeudvikling. Designmatricen A indeholder de afledte af observationsligningerne i forhold til de ubekendte. Således fås A:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{dX_1'}{d\omega} & \frac{dX_1'}{d\varphi} & \frac{dX_1'}{d\kappa} & \frac{dX_1'}{d\Delta X} & \frac{dX_1'}{d\Delta Y} & \frac{dX_1'}{d\Delta Z} \\ \frac{dY_1'}{d\omega} & \frac{dY_1'}{d\varphi} & \frac{dY_1'}{d\kappa} & \frac{dY_1'}{d\Delta X} & \frac{dY_1'}{d\Delta Y} & \frac{dY_1'}{d\Delta Z} \\ \frac{dZ_1'}{d\omega} & \frac{dZ_1'}{d\varphi} & \frac{dZ_1'}{d\kappa} & \frac{dZ_1'}{d\Delta X} & \frac{dZ_1'}{d\Delta Y} & \frac{dZ_1'}{d\Delta Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dX_n'}{d\omega} & \frac{dX_n'}{d\varphi} & \frac{dX_n'}{d\kappa} & \frac{dX_n'}{d\Delta X} & \frac{dX_n'}{d\Delta Y} & \frac{dX_n'}{d\Delta Z} \\ \frac{dY_n'}{d\omega} & \frac{dY_n'}{d\varphi} & \frac{dY_n'}{d\kappa} & \frac{dY_n'}{d\Delta X} & \frac{dY_n'}{d\Delta Y} & \frac{dY_n'}{d\Delta Z} \\ \frac{dZ_n'}{d\omega} & \frac{dZ_n'}{d\varphi} & \frac{dZ_n'}{d\kappa} & \frac{dZ_n'}{d\Delta X} & \frac{dZ_n'}{d\Delta Y} & \frac{dZ_n'}{d\Delta Z} \end{bmatrix}$$

n er antallet af fællespunkter ved transformationen. De foreløbige elementer ( $\omega_0, \varphi_0, \kappa_0, \Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$ ) indsættes i A.

Observationsvektoren b opstilles således:

$$\bar{b} = \begin{bmatrix} X_1' - (r_{11} \times X + r_{12} \times Y + r_{13} \times Z + \Delta X) \\ Y_1' - (r_{21} \times X + r_{22} \times Y + r_{23} \times Z + \Delta Y) \\ Z_1' - (r_{31} \times X + r_{32} \times Y + r_{33} \times Z + \Delta Z) \\ \vdots \\ X_n' - (r_{11} \times X + r_{12} \times Y + r_{13} \times Z + \Delta X) \\ Y_n' - (r_{21} \times X + r_{22} \times Y + r_{23} \times Z + \Delta Y) \\ Z_n' - (r_{31} \times X + r_{32} \times Y + r_{33} \times Z + \Delta Z) \end{bmatrix}$$

Vektorerne x og r er defineret som:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \varphi - \varphi_0 \\ \kappa - \kappa_0 \\ \Delta X - \Delta X_0 \\ \Delta Y - \Delta Y_0 \\ \Delta Z - \Delta Z_0 \end{bmatrix} \quad \bar{r} = \begin{bmatrix} r_{X_1} \\ r_{Y_1} \\ r_{Z_1} \\ \vdots \\ r_{X_n} \\ r_{Y_n} \\ r_{Z_n} \end{bmatrix}$$

Normalligningerne bestemmes som:

$$(A^T C A) \bar{x} = A^T C \bar{b}$$

C er vægtmatricen og denne bestemmes:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{x_1}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{y_1}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{z_1}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{x_n}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{y_n}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{z_n}^2} \end{bmatrix}$$

Normalligningens løsning findes ved:

$$\bar{x} = (A^T C A)^{-1} A^T C \bar{b}$$

Da udjævningsproblemet, som allerede nævnt, er karakteriseret ved at være ulineært, fås løsningen på udjævningsproblemet ved iteration til størrelsen af elementerne i x-vektoren er ubetydelig, hvor de foreløbige elementer forbedres løbende.

Residualerne beregnes:

$$\bar{r} = A\bar{x} - \bar{b}$$

Spredningen på vægtenheden beregnes:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\bar{r}^T C \bar{r}}{m-n}}$$

hvor m er antallet af observationer og n antallet af elementer, så modellen akkurat er bestemt.

### 3 Den generelle udjævnings-teknik anvendt til transformation

I dette tilfælde tages der, for at holde eksemplet på et mindre komplekst niveau udgangspunkt i en 3-parameter 3D-transformation, hvor kun de tre rotationer (omega, phi, kappa) er ubekendte. Det vil sige, at der anvendes følgende formel:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Som beskrevet før, betragtes koordinaterne til fællespunkterne i både koordinatsystemet der transformeres fra og koordinatsystemet der transformeres til som observationer, hvorfor der beregnes residualer til X, Y og Z koordinaterne i begge koordinatsystemer. Observationsligningerne ser ud som følger:

$$F(X', Y', Z', X, Y, Z) = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}$$

Da ligningerne er ulineære lineariseres ovenstående ved hjælp af Taylors rækkeudvikling, hvorefter observationsligningerne omskrives til:

$$\bar{b} = B\bar{r} + A\bar{x}$$

Vektor b er 0'te ordens leddet i den lineariserede observationsligning og opstilles ved at indsætte foreløbige værdier ind i observationsligningerne. Vektor b opstilles således for dette udjævnings-problem:

$$\bar{b} = R_{(\omega_0, \phi_0, \kappa_0)} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}$$

hvor de foreløbige værdier  $\omega_0$ ,  $\phi_0$ ,  $\kappa_0$  for rotationerne indsættes. A-matricen indeholder 1. ordens leddet og opstilles:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{dR}{d\omega} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} & \frac{dR}{d\varphi} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} & \frac{dR}{d\kappa} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Her indsættes ligeledes de foreløbige værdier  $\omega_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $\kappa_0$  for rotationerne.

B-matricen indeholder de afledte med hensyn til elementerne  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ . I dette tilfælde opstilles B-matricen:

$$B = \left[ R_{(\omega_0, \varphi_0, \kappa_0)} \right]$$

I angiver en 3x3 identitetsmatrice.

Vektorerne  $x$  og  $r$  defineres som følger:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \varphi - \varphi_0 \\ \kappa - \kappa_0 \end{bmatrix} \quad \bar{r} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Normalligningerne bestemmes som:

$$\left[ A^T (BQB^T)^{-1} A \right] \bar{x} = A^T (BQB^T)^{-1} \bar{b}$$

Q-matricen er kofaktormatricen, som beskriver vægtene for koordinaterne

$$Q = \frac{1}{\sigma_0^2} \begin{bmatrix} \sigma_{X'}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y'}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Z'}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_X^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_Y^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_Z^2 \end{bmatrix}$$

Normalligningens løsning findes ved:

$$\bar{x} = \left[ A^T (BQB^T)^{-1} A \right]^{-1} A^T (BQB^T)^{-1} \bar{b}$$

Udjævningsproblemet er ligesom det forrige udjævningsproblem ulineært, hvorfor løsningen på udjævningsproblemet fås ved at forbedre de foreløbige værdier ved iteration til størrelsen af elementerne i  $x$ -vektoren er ubetydelig.

Residualerne beregnes:

$$\bar{r} = A\bar{x} - \bar{b}$$

Spredningen på vægtenheden beregnes:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{r^T C r}{m-n}}$$

[Ghilani m.fl., 1996, s. 155-157, 184, 423-425], [Lu, 1995, s. 56-57], [Frederiksen m.fl., 2003, Appendiks A]



# Appendiks G: Hough transformation

I dette projekt har projektgruppen forsøgt at anvende Hough transformation til bestemmelsen af bygningsfacadernes kanter i de indsamlede billeder. Formålet med dette appendiks er grundlæggende at forklare, hvad en Hough transformation er, og hvad den kan anvendes til i forbindelse med billedbehandling.

Hough-transformationen blev udviklet af Hough i 1960'erne og er senere blevet modificeret af adskillige forskere. Funktionen, som anvendes til Hough-transformation i projektet er foruddefineret i Matlab. Matlab oplyser, at den anvendte funktion er en modificeret type af Hough-transformationen. Dog er hovedprincipperne de samme. I det følgende beskrives disse hovedprincipper.

Hough transformation anvendes traditionelt til billedanalyser med henblik på at detektere linjer, cirkler og endog mere komplicerede geometrier i billeder. Den kan også anvendes til for eksempel detektering af plane tagflader i punktskyer fremkommet ved laserscanning. Input i Hough-transformationen er et binært billede fremkommet efter detektering af kantpixler ved hjælp af et passende filter; for eksempel et Sobel-filter. Det undersøges således, om nogle af de detekterede kantpixler danner det objekt (linje, cirkel, etc.), som der ledes efter.

Der findes grundlæggende to typer af Hough-transformationer: Den "Klassiske Hough-transformation" og den "Generelle Hough-transformation". Den Klassiske Hough-transformation anvendes til detektering af geometrisk let definerbare geometrier som linjer og cirkler, hvortil der findes lignin-

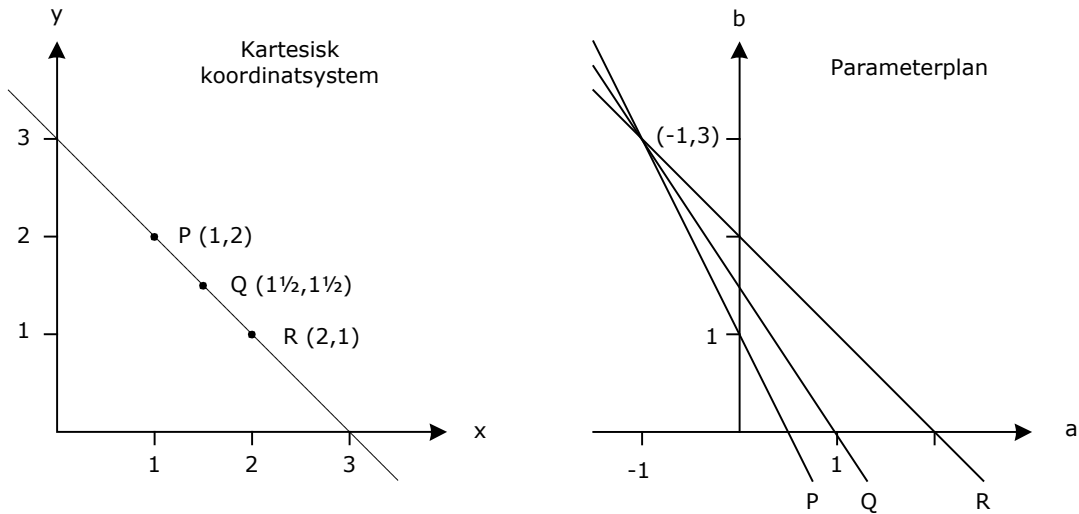
ger, der beskriver objektet. Den Generelle Hough transformation virker efter samme hovedprincipper som Den Klassiske Hough-transformation, men anvendes til mere komplicerede geometrier, som kurver, flerkantede objekter etc. Derfor er også Den Generelle Hough-transformation ret kompleks. I det følgende redegøres for både Den Klassiske Hough-transformation og Den Generelle Hough-transformation.

## Den Klassiske Hough-transformation

For at beskrive teorien bag Den Klassiske Hough-transformation tages udgangspunkt i et simpelt eksempel. Eksemplet bygger på en undersøgelse af, om tre punkter ligger på samme linje.

En linje beskrives i et kartesisk koordinatsystem med ligningen  $y=ax+b$ , hvor  $a$  og  $b$  er linjens parametre, og hver  $(x_n, y_n)$ , der opfylder ligningen, er punkter, der ligger på denne linje. Linjen  $y=ax+b$  kan repræsenteres ved et punkt i et parameterplan, hvor parametrene  $a$  og  $b$  fungerer som koordinater, mens koordinaten  $(x_n, y_n)$  kan repræsenteres ved en linje med parametrene  $x_n$  og  $y_n$ . Ligningen for en linje i parameterplanet er således  $b=-xa+y$ .

Hvert punkt i koordinatsystemet kan transformeres til en linje i parameterplanet, hvor forskellige punkter transformeres over i forskellige linjer med forskellige ligninger. Skærer linjerne hinanden i punktet  $(a_1, b_1)$ , betyder det, at de punkter i koordinatsystemet, der repræsenteres af de skærende linjer i parameterplanet, ligger på linjen med ligningen  $y=a_1x+b_1$ .

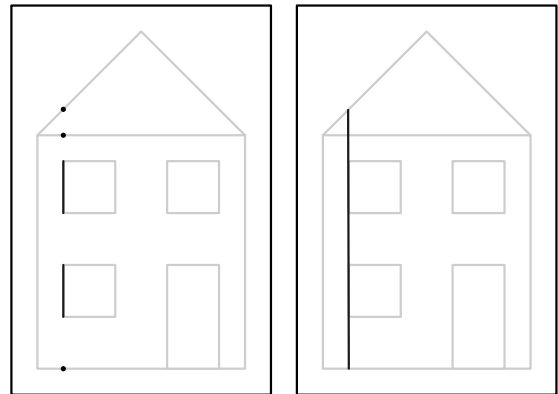


Figur 1: Eksempel på Klassisk Hough-transformation, for koordinaterne i det kartesisk koordinatsystem over i parameterplanet. [www.uni-koblenz.de]

Af figur 1 ses et eksempel på, hvordan en Hough transformation anvendes til at undersøge om punkterne  $P(1,2)$ ,  $Q(1\frac{1}{2},1\frac{1}{2})$  og  $R(2,1)$  ligger på en linje i koordinatsystemet. Punkterne transformeres hver især over i parameterplanet som linjer med ligningerne  $b_P=2-a_P$ ,  $b_Q=1\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}a_Q$  og  $b_R=1-2a_R$ . Som det ses, skærer linjerne hinanden i punktet  $(-1,3)$ , hvorfor punkterne  $P$ ,  $Q$  og  $R$  i koordinatsystemet ligger på linjen  $y=-x+3$ . Det er således muligt at undersøge, om mange punkter ligger på en linje.

Der er dog problemer med ovenstående model, idet  $y=ax+b$  blandt andet ikke kan beskrive en lodret linje. I stedet anvendes ofte polære koordinater, og ligningen tager således følgende form:  $r=x\cdot\cos\theta+y\cdot\sin\theta$ , hvor  $\theta\in[0;2\pi]$  og  $r$  ikke er større end diagonalen på det billede, der anvendes som input. Koordinaten  $(x,y)$  repræsenteres således af en kurve i stedet for en linje i parameterplanet, hvor  $\theta$  og  $r$  er parametrene i parameterplanet. Skæringspunktet for kurver, der skærer hinanden, repræsenterer parametrene for den linje, hvorpå punkterne ligger i koordinatsystemet.

Ulempen ved den Klassiske Hough Transformation er, at punkter som godt nok ligger på samme matematiske linje, men ikke fysisk er i nærheden af hinanden detekteres til at være en del af samme linje, jf. figur 2. Problemet kan dog løses ved at gennemføre en Connected Component-analyse (CCA), hvorved det detekteres, hvilke pixler der er



Figur 2: De to billeder forestiller den samme bygning. De grå streger illustrerer grå pixler og dermed kantpixler. Til venstre er kantpixler, der ligger på samme matematiske linje, markeret med sort. Til højre ses samme billede efter en Hough-transformation. Her er dannes altså én linje, hvor der i praksis ønskes to linjer; en for hver vinduekant.

naboer. En anden ulempe er, at pixler, der ligger lige ved siden af en linje og derfor eventuelt kan være en del af linjen, ikke kommer med som en del af linjen, selvom den i virkeligheden tilhører linjen.

[www.uni-koblenz.de], [www.cis.temple.edu], [Frederiksen m.fl., 2004, s. 29-31], [Schenk, 1999, 121-122, 344-345]

### Den Generelle Hough-transformation

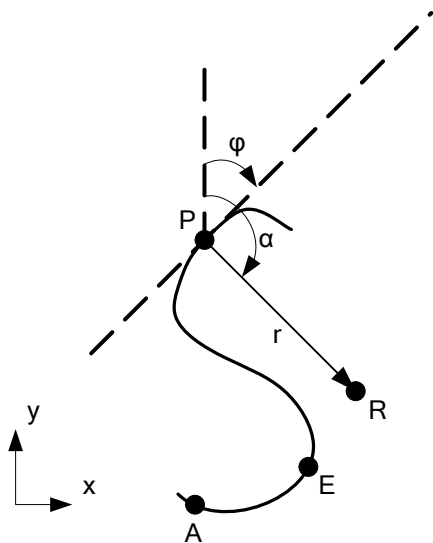
Som nævnt er Den Generelle Hough-transformation egnet til at finde objekter med vilkårlig form i billeder. Det forudsættes at objektets form kendes. Formen beskrives ved hjælp af en skabelon. Det kunne for eksempel være en krum linje, en sekskant etc.

For at beskrive teorien bag Den Generelle Hough-transformation, tages der udgangspunkt i et eksempel, hvor det ønskes at finde en krum linje i et billede. Først dannes en skabelon af den

krumme linje som et binært billede, jf. figur 3. Ideen er, at repræsentere hver pixel i skabelonen i polære koordinater i forhold til et referencepunkt R. Dette referencepunkt kan evt. være middel af alle pixelerne i skabelonen. Betragter vi pixel P i skabelonen, dannes en vektor  $r$  mellem P og R. Vektor  $r$  beskrives ved de polære koordinater  $r$ ,  $\alpha$  og  $\varphi$ .  $r$  er længden af vektoren  $r$ .  $\alpha$  er vinklen mellem y-aksen og vektoren  $r$ .  $\varphi$  er vinklen mellem y-aksen og tangenten til punktet P. Skabelonens form beskrives fuldstændigt ved parametrene ( $r$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$ ) for alle pixler i formen. Værdierne gemmes i en tabel kaldet R-tabel, jf. figur 3 og 4. Efter skabelonen og den tilhørende R-tabel er dannet, kan søgningen efter objekter, der ligner skabelonen i et andet billede, påbegyndes.

Hvis man forestiller sig et billede med linjerne L1, L2 og L3 af forskellig form, jf. figur 5, er opgaven at bestemme om nogle af disse tre linjer er magen til skabelonen. Til det formål kontrolleres alle rækker i R-tabellen for en matchende tangent i billedet.

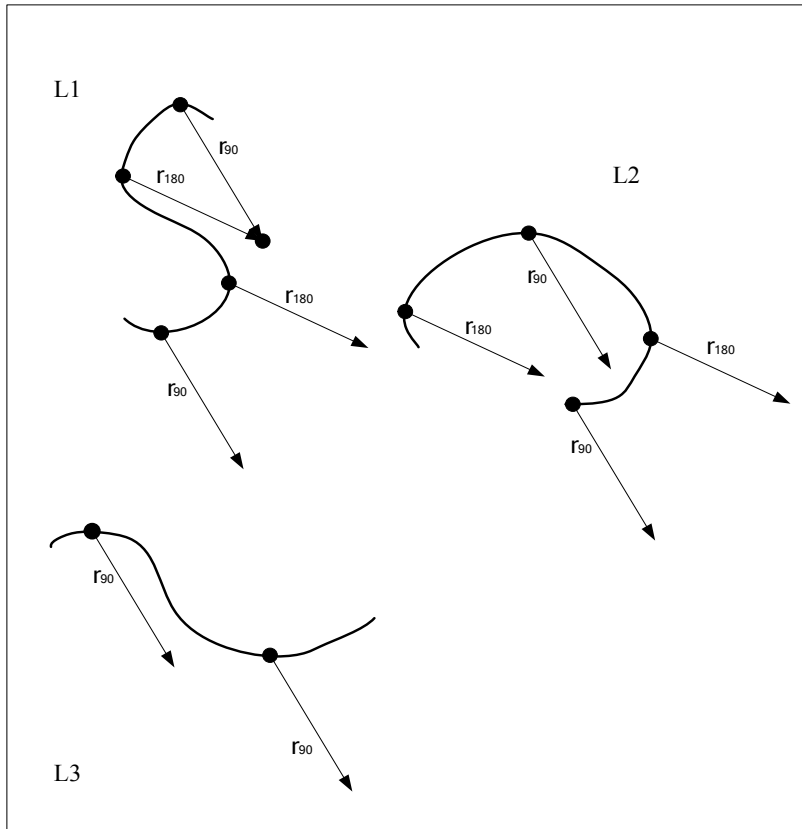
Figur 5 viser alle pixler i billedet som har en tangent  $\varphi=90^\circ$  og  $\varphi=180^\circ$ . Referencepunkterne for hver pixel med  $\varphi=90^\circ$  rekonstrueres ved at tillægge vektoren  $r$  fra den aktuelle række i R-tabellen



Figur 3: Skabelon for den krumme linje i et binært billede. Referencepunktet er angivet med R. For hver pixel P i skabelonen findes ( $r$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$ ), som skrives i en R-tabel. A, E og P er tilfældige pixler i skabelonen.

Pixel	Tangent $\varphi$ [°]	Polære koordinater	
		$r$ [mm]	$\alpha$ [°]
A	115	25	50
...			
E	25	10	35
...			
P	45	27	145

Figur 4: R-tabel med pixler i skabelon samt pixelernes ( $r$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$ ).



Figur 5:  
 Tre linjer i et billede. I billedet findes pixels med en tangent  $\varphi=90^\circ$ . Referencepunktet  $R$  rekonstrueres med de polære koordinater fra  $R$ -tabellen. I eksemplet findes på samme måde alle pixels med en tangent  $\varphi=180^\circ$  og  $R$  rekonstrueres med de polære koordinater fra  $R$ -tabellen. Sådan fortsættes til alle tangenter i  $R$ -tabellen er gennemløbet. Placeringen af alle rekonstruerede referencepunkter gemmes i et parameterrum opdelt i celler. Jo flere referencepunkter der er per celle, jo større sandsynlighed er der for at metoden har fundet samme form. I det viste billede ses, at L1 ville blive valgt som mængden til skabelon, hvis undersøgelsen fortsættes.

til pixelerne. Proceduren gentages for pixler med en tangent  $\varphi=180^\circ$ . Vektoren  $r_{90}$  tillægges altså alle pixler med en tangent på  $90^\circ$ , mens vektoren  $r_{180}$  tillægges alle pixler med en tangent på  $180^\circ$ . Samme procedure gentages for alle rækker i  $R$ -tabellen. Som et resultat fås mange rekonstruerede referencepunkter i billedet. Referencepunkterne afbilledes i et parameterrum opdelt i celler, hvor der foretages en clusteranalyse. For en eksakt kopi af skabelonen, for eksempel L1, findes samme referencepunkt  $n$  gange svarende til  $n$  antal pixler i L1. Der vil således fremkomme en tæt gruppe af punkter med mange punkter i parameterrummet. De to andre linjer i figur 5 har mindre elementer som minder om skabelonen, hvorfor der vil fremkomme mindre grupper af punkter med samme referencepunkt i parameterrummet. Antallet af punkter i én celle i parameterrummet siger altså noget om sandsynligheden for, at den søgte linje er fundet i billedet. Dog sikrer antallet alene ikke

at den rette linje er fundet, idet en celle med rette antal referencepunkter for eksempel også kan repræsentere tilfældige ikke sammenhængende pixler i billedet. Derfor skal placeringen af pixelerne i forhold til hinanden også tages i betragtning.

For at implementere denne metode i forbindelse med genkendelse af objekter i billeder, skal metoden yderligere generaliseres, således at formen, som der ledes efter, kan findes uanset om den i billedet er flyttet, roteret eller skaleret i forhold til skabelonen. Dette gør metoden mere fleksibel. Fleksibiliteten komplicerer dog også Hough-transformationen yderligere, hvorfor forklaringen ikke detaljeres yderligere i dette appendiks.

Det er vigtigt at holde sig for øje, at både Den Klassiske Hough-transformation, men specielt Den generelle Hough-transformation er beregnings-tunge. Derfor anvender eksisterende software

til Hough-transformation ofte adskillige modifikationer. Under implementering af metoden er det for eksempel en fordel at angive forventet nøjagtighed af den søgte forms placering, hvorved søgeområdet i billedet kan reduceres

[Schenk, 1999, s. 277-279], [Böhm m.fl., 2001, s. 3-4]



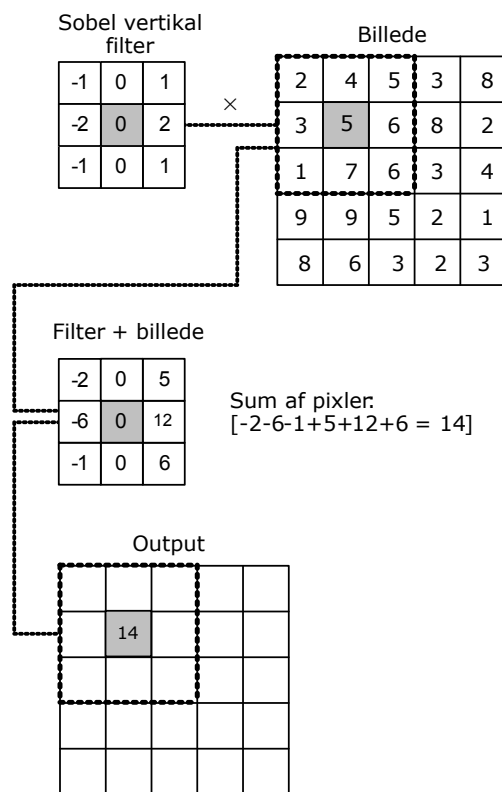
# Appendiks H: Filtrering

I projektsammenhæng har projektgruppen forsøgt at anvende filtrering til detektering af kantpixler i billeder i forbindelse med detektering af bygningsfacadernes kanter i facadebillederne. Formålet med dette appendiks er grundlæggende at forklare, hvad et filter er, og hvordan det virker.

Filtreringsteknikker anvendes til mange forskellige formål for eksempel i forbindelse med signalbehandling og billedbehandling. I dette appendiks omtales filtrering kun i forbindelse med billedbehandling.

Filtrering kan anvendes til at udglatte små variationer, at fremhæve detaljer, at fjerne støj, at finde kanter eller bestemte objekter i billedet etc. Generelt medfører filtrering, at der til hver pixel i billedet beregnes en ny værdi. Beregningen foretages ved hjælp af en matrix/søgemønster, der indeholder en aktiv pixel samt nogle omkringsende nabopixler. Filtret føres over billedet pixel for pixel, række for række og på baggrund af værdierne i søgemønsteret og i billedet beregnes en ny værdi for pixelen i billedet under den aktive pixel. Den nye værdi overføres til et output-billede. Filtreringsprincippet med et Sobel-filter som eksempel fremgår af figur 1. Ikke alle filtre fungerer som Sobel-filtret. Fælles for filtrene er dog princippet i bevægelsesmønsteret.

Der kan anvendes forskellige størrelser af søgematricer. Ofte anvendes en 3x3 matrix, men andre dimensioner på matricen kan også anvendes. [www.gis.nrcan.gc.ca] [Frederiksen m.fl., 2004, s.17-18]



Figur 1: Princip bag filtrering af billeder. Det viste filter er et eksempel på et Sobel-filter, der anvendes til at finde kantpixler. Det aktuelle filter fungerer ved, at filteret gennemløber billedet, således den aktuelle pixel angivet med gråt har været over hele billedet. Det aktuelle filter indeholder vægte til vægtning af nabopixlerne. Filteret ganges på billedet, og summen af pixelerne angiver den nye værdi til den aktive pixel.





# Appendiks I: Detektering af kantpixler

Der er i projektet foretaget nogle indledende forsøg med anvendelse af kantdetektering til genkendelse af facadekanterne i billederne. Formålet med dette appendiks er, grundlæggende at redegøre for forskellige typer af filtre til kantdetektering.

Detektering af kanter i et billede er en analyse af billedet med henblik på at finde store farveforskelle mellem nabopixler i billedet. Det antages, at en stor farveforskel betyder, at der er tale om en kant i billedet.

Kantdetekteringsprocessen er forholdsvis kompleks og består af to trin:

- Detektering af kantpixler
- Gruppering af kantpixler

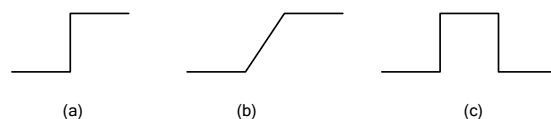
Detektering af kantpixler er den proces som bestemmer lokal diskontinuitet i pixelernes værdier; det vil sige store farveforskelle mellem nabopixler. Detektering af kantpixler foregår ved filtrering, jf. Appendiks H. Gruppering af kantpixler er den proces som grupper tæt liggende kantpixler eller identificerer linjer, cirkler eller andre objekter i billedet på baggrund af de detekterede kantpixler. [Schenk, 1999, s. 108]. Dette appendiks beskriver sig kun med detekteringen af kantpixler og ikke med grupperingen. I Appendiks G beskrives en metode til gruppering af kantpixler.

Der kan være flere forhold i et billede, der forårsager kanter i et billede. Det kan for eksempel være farveforskelle i et objekt eller mellem objekter, dybdeforskelle mellem objekter eller for-

skellige lysforhold i billedet forårsaget af skygger, refleksioner og lignende. Disse forhold kan alle give anledning til diskontinuitet mellem nabopixlers farveværdier. Denne diskontinuitet kan være af forskellig type, jf. figur 1, der viser nogle typiske kantprofiler. a) Trappetrin, der illustrerer en skarp kant i én pixels bredde. b) Rampe, der illustrerer en gradvis og mere uskarp og bred kant. c) Linje, der illustrerer en skarp kant i flere pixels bredde. Denne profil kan også opfattes som to enkeltstående kanter istedet for én bred kant. [Mikhail, 2001, s. 176]

Der er i ovenstående to forhold, der vanskeliggør kantdetekteringen. For det første er det sandsynligvis ikke alle kanter, der ønskes detekteret, idet man ofte leder efter objekter i billeder og ikke for eksempel kanter forårsaget af skygger og refleksioner. For det andet betyder de forskellige kantprofiler, at det kan være vanskeligt at vælge et filter, som kan håndtere alle typer af kanter.

Af et godt kantdetekteringsfilter forventes, at kanter i billedet lokaliseres nøjagtigt, at så godt som alle ønskede kantpixler findes, og at der ikke findes uønskede kantpixler. Ved detektering af kantpixler detekteres også støj, hvilket får indflydelse på selve kantdetekteringen. Derfor bør der foretages tiltag til at mindske støjen og dennes indflydelse



Figur 1: Typiske kantprofiler: (a) Trappetrin, (b) Rampe og (c) Linje [Mikhail, 2001, s. 164]. Figureerne angiver pixelværdien som en funktion af pixelkoordinaterne.

på kantdetekteringen. Det kan for eksempel ske ved at udglatte billedet inden kantdetekteringen. Udglatningen kan for eksempel foregå med et medianfilter, jf. figur 2. Medianfilteret sorterer pixelværdierne i størrelsesorden, hvorefter den midterste pixelværdi tildeles den aktive pixel. Medianfilteret kan fjerne støj, der fylder mindre end filterets størrelse. Ulempen er dog, at kanter eller dele af kanter, der fylder mindre end halvdelen af filtermatricen, fjernes. Dette er selvfølgelig ikke hensigtsmæssigt, hvorfor der findes langt mere komplicerede og mere hensigtsmæssige støjfiltre til formålet. En anden klassisk metode til fjernelse af støj er at anvende middel af værdierne inden for filtermatricen som ny værdi for den aktive pixel. Endelig findes også typer af filtre til kantdetektering, som tager højde for støj. Disse er dog ikke beskrevet i projektet. [Schenk, 1999, s. 110], [Mikhail, 2001, s. 164 og 176]

Ud over støjproblematikken kan det også forekomme, at der ikke er nok kontrast i billedet, hvor der ønskes en kant detekteret, hvorfor der ikke findes nogle kanter det pågældende sted.

23	25	26	30	40	Nabopixlernes værdier, sorteret: 15, 19, 20, 23, <b>24</b> , 25, 26, 27, 50 Median-værdi = 24
22	24	26	27	35	
18	20	50	25	34	
19	15	19	23	33	
11	16	10	20	30	

Figur 2: Eksempel på et 3x3 medianfilter. Filteret anvendes til at fjerne støj med. Filteret virker ved at finde medianen af værdierne inden for matricen og tilskrive den aktive pixel denne værdi. I dette eksempel betyder filtreringen, at pixlen med værdien 50 istedet får værdien 24. [Frederiksen m.fl., 2004, s. 19]

Som det fremgår af ovenstående er detektering af kantpixler ikke nogen triviel opgave, idet der er adskillige forhold at tage højde for i forbindelse med kantdetektering. Da billeder og kanter er meget forskellige, er der udviklet mange forskellige filtre til detektering af kantpixler. Der findes dog ingen ultimativ kantdetekteringsmetode, da resultatet af kantdetekteringen afhænger billedet, der analyseres og typen af kanter, man ønsker at detektere. Ofte anvendes flere filtre efter hinanden for at løse et specifikt problem. [Schenk, 1999, s. 110]

Filtre til detektering af kantpixler kan opdeles i tre kategorier:

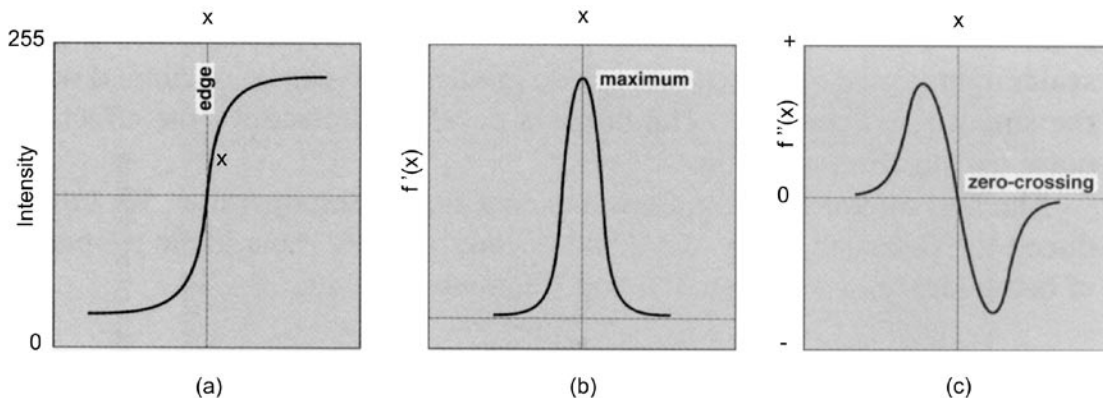
- Gradient filtre
- 2. afledte filtre
- Matching filtre

Gradient filtre analyserer den første afledte af pixelværdierne i billedet. Anvendes kurven i figur 3 (a) og (b) som eksempel, ses det, at den første afledtes maksimumsværdi kendetegner en kant i billedet.

2. afledte filtre analyserer den anden afledte af pixelværdierne i billedet. Anvendes kurven i figur 3 (c) som eksempel, ses det, at en kant detekteres, hvor den anden afledte er nul.

Et matching filter tilpasser en kantskabelon til et billede. Når der er fundet en god tilpasning, får pixelerne i billedet en label. Tilpasningen kan for eksempel ske ved autokorrelation, hvor skabelonen føres gennem billedet række for række og kolonne for kolonne. Kanten bestemmes der hvor der er god korrelation mellem billedet og skabelonen.

[Schenk, 1999, s. 111]



Figur 3: Første og anden afledte af en funktion. (a) viser en kant, hvor intensiteten stiger meget. Kanten identificeres i (b) som maksimum af de første afledte og i (c) som nul-værdien af de anden afledte. [Schenk, 1999, s. 111]

2. afledte filtre er mere følsomme over for støj end gradientfiltre, hvorfor nødvendigheden af udglatning er større. Derfor anvendes 2. afledte filtre også ofte sammen med et udglatningsfilter.

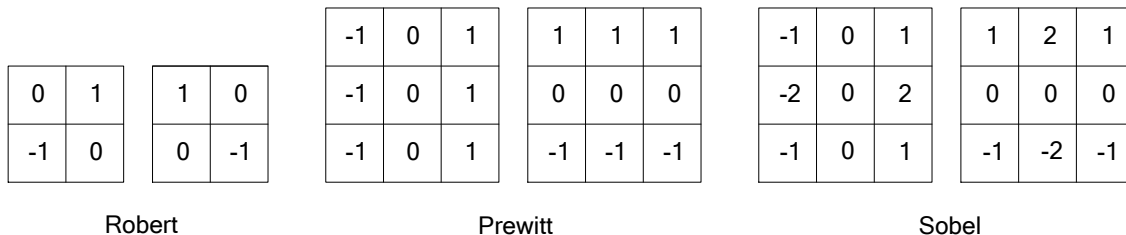
Som eksempler på gradient filtre henvises til figur I4. Filtrene fungerer, som vist i Appendiks H. Det ses af figur I4, at der findes filtre for detektering af henholdsvis horisontale og vertikale kanter. Ønskes alle kanter uanset retning, kan de horisontale og de vertikale kanter samles i én samlet kantdetektering. De afledte i kun én retning er som regel mere præcise, end når kantdetekteringen består af kanter fra flere retninger.

Robert beregner i modsætning til Prewitt og Sobel den afledte forskudt i forhold til pixelkoordinatsystemet. Det fremgår ligeledes, at filtrene kan have forskellige størrelser. Jo større filteret er, des bedre modstås støj. Omvendt har større filtre problemer

med at finde alle kanter i tilfælde af, at for eksempel to kanter ligger indenfor samme filtermatrice eller i tilfælde af, at der findes kanter grænsende op til hinanden eller kanter, der skærer hinanden, i billedet. [Mikhail, 2001, s.176-177]

Laplacian of Gaussian Method (LoG) er et eksempel på 2. afledte filtre. Filteret er et kombineret kantdetekterings- og udglatningsfilter. Således kombineres udglatning ved hjælp af et Gaussisk støjfilter med detektering af kanter ved brug af den 2. afledte. [Schenk, 1999, s. 112]

Når et billede er gennemløbes med et filter til detektering af kantpixels tilskrives hver pixel en ny værdi. For at producere kanter bestående af en vis forskel til de tilstødende pixels, kan en grænseværdi anvendes til for at styre tilskrivningen således, at pixels med værdier over grænseværdien får en label som kantpixel i modsætning til pixels med



Figur 4: Robert, Prewitt og Sobel gradient filtre til detektering af henholdsvis horisontale og vertikale kantpixels. [Mikhail, 2001, s. 177]

en værdi under grænseværdien. Denne metode er gavnligt i de tilfælde, hvor det vil være hensigtsmæssigt at frasortere nogle af kantpixelerne. Grænseværdien er vanskelig at bestemme, da den kan variere fra situation til situation, når billedets indhold varierer.

For at få noget anvendeligt ud af kantdetekteringen, indgår denne ofte som del af en større proces som for eksempel beskrevet i *Appendiks G*. Derfor er det ikke nødvendigvis afgørende, hvilket kantfilter der anvendes, blot der findes et passende antal kantpixeler.

# Bilag 1: CD

## Mappestruktur:

- [-] Bilag 1
  - [-] 1A Interviews
  - [+] 1B Artikler
  - [-] 1C Matlabscripts
    - [-] Data fra 6p\_transformation
    - [-] Data til opretning
      - [-] billeder
      - [-] hædningsresultatfiler
        - [-] Hadsundvej 176
        - [-] Optagelse 1
        - [-] Optagelse 2
        - [-] Systemkalibrering
        - [-] Østerbro 48
        - [-] Østerbro 50
        - [-] Østerbro 52
      - [-] Data til tilbageskæring
    - [-] GPS-Data
      - [+] Input decimalgrader
      - [+] Input transformation EUREF89 UTM
      - [+] Raadata fra GPS
      - [+] UTMkoordinater
    - [-] 1D Beregning af fremskæring
    - [-] 1E Filmklip med oprettet facader
    - [-] 1F Originale og oprettede billeder
      - [-] Oprettede billeder
      - [-] Originale billeder
    - [-] 1G Resultater fra detektering af kantpixler
    - [-] 1H Kalibreringsrapport Rollei
    - [-] 1I VRML-model

CD'en findes indersiden af bagsiden



# Bilag 2: Interviewspørgsmål til BlomInfo A/S og COWI A/S

## Spørgsmål til BlomInfo A/S

Hej Søren Buch

Vi er tre landinspektørstuderende, som er i gang med at skrive afgangsprøve om automatiseret påsætning af billeder på eksisterende bygningsmodeller ved hjælp af et Mobile Mapping System (MMS).

Vi ved, at BlomInfo A/S beskæftiger sig med fotorealisticke 3D-bymodeller. I den forbindelse har vi en række spørgsmål, som vi håber at I vil være behjælpelige med at besvare. Vi håber, du selv vil være behjælpelig med at besvare vores spørgsmål eller at finde en der kan.

Vi forestiller os at det nemmeste vil være at stille og besvare vores spørgsmål gennem en telefonsamtale, hvorfor vi gerne vil aftale en tid til en samtale på omkring ½ time. Vi sender her de spørgsmål (vedhæftet), vi ønsker besvaret, således I har en ide om, hvad vi gerne vil tale om.

Forslag til en tid for samtalen: onsdag d. 11/2 eftermiddag, torsdag d. 12/2 eller fredag d. 13/2 om formiddagen. Vi er selvfølgelig åbne overfor andre forslag.

Vi håber I har tid og lyst til at hjælpe os.

Med venlig hilsen

Jane Holmgaard

Kristian Vester

Lise Lausten Frederiksen

I det følgende uddybes ideen bag vores afgangsprøve, hvorefter de spørgsmål som ønskes besvaret er oplyst.

### Afgangsprøvet

Vores interesse bunder i at vi på 9. semester arbejdede med automatiseret bygningsmodellering på baggrund af laserscanningsdata. Under projektforløbet fandt vi, at der var stor interesse for fotorealisticke bymodeller. På baggrund af dette og et ønske om, at arbejde med integration af flere forskellige sensorer (kamera, GPS...) har vi besluttet at arbejde med påsætning af billeder på eksisterende bygningsmodeller ved hjælp af et Mobile Mapping System (MMS).

Det vi konkret forestiller os, er at gennemføre dataindsamlingen ved at kombinere kamera, GPS og studiets nyindkøbte IMU bestående af gyroer og accelerometre. Instrumenterne monteres på en bil. Ved hjælp af GPS og IMU bestemmes kameraets ydre orientering.

Påsætningen af billederne skal foregå så automatisk som muligt. Kendes den ydre orientering, kan billederne påsættes. Hvis den ydre orientering ikke kendes tilstrækkelig præcist, forestiller vi os, at der kan anvendes forskellige fotogrammetriske metoder eller billedbehandlingsmetoder til hjælp. Det kan for eksempel være brug af paspunkter. Det kan også være kantdetektering i billederne; de fundne kanter i billederne kan sammenlignes med facadernes kanter i den eksisterende bygningsmodel, hvilket kan være med til at transformere

billederne på plads. Efter den ydre orientering er på plads, skal billederne "sættes på" eller skæres til. Kendes hjørnekoordinaterne på bygningsfacaden fra den eksisterende bygningsmodel, skal disse anvendes til at "skære billedet til".

## Spørgsmål

Spørgsmålene omhandler kun fotorealisticke bymodeller.

- Hvem er Jeres kunder?
- Hvad bruger kunderne de fotorealisticke bymodeller til?
- Hvordan er markedet/ efterspørgslen efter fotorealisticke bymodeller?
- Hvor mange opgaver af denne art gennemfører I om året?
- Hvor store er opgaverne?
- Hvilke krav stilles der til de fotorealisticke bymodeller (for eksempel pixelstørrelse, skal det være monoplottet, stereomodeller, ortofotos...)?
- Hvad er Jeres datagrundlag (hvilken bymodel anvendes, hvad er bymodellens nøjagtighed...)?
- Hvordan fremstiller I fotorealisticke bymodeller (for eksempel spørgsmål omkring dataindsamling, påsætning, software, lagring og datamodel)?
- Hvilke erfaringer har I med de metoder i bruger (dataindsamlingen, påsætningen)?
- Hvor lang tid tager dataindsamlingen og påsætningen?

- Har I nogen ideer til hvordan indsamlingen og påsætningen kan foregå i fremtiden?
- Hvordan ser I muligheden for at anvende et system, som det vi har beskrevet ovenfor, til automatiseret indsamling og påsætning af billeder?
- Hvilke muligheder og problemer ser I i den forbindelse?
- Hvis I skulle investere i et MMS, vil I så foretrække et færdigt system/koncept, hvor alt udstyr er fastmonteret eller vil I foretrække et system, hvor I kan bruge noget af det udstyr, I allerede råder over?
- Kan I forestille Jer at bruge et MMS til andre opgaver i Jeres firma?

## Spørgsmål til COWI A/S

### Hej Johnny Koust Rasmussen

Vi er tre landinspektørstuderende, som er i gang med at skrive afgangprojekt om automatiseret påsætning af billeder på eksisterende bygningsmodeller ved hjælp af et Mobile Mapping System (MMS).

Vi ved, at COWI beskæftiger sig med fotorealisticke 3D-bymodeller. I den forbindelse har vi en række spørgsmål, som vi håber at I vil være behjælpelige med at besvare. Vi håber, du selv vil være behjælpelig med at besvare vores spørgsmål eller at finde en der kan.

Vi forestiller os at det nemmeste vil være at stille og besvare vores spørgsmål gennem en telefonsamtale, hvorfor vi gerne vil aftale en tid til en samtale på omkring ½ time. Vi sender her de spørgsmål (vedhæftet), vi ønsker besvaret, således I har en ide om, hvad vi gerne vil tale om.



Forslag til en tid for samtalen: onsdag d. 11/2 eftermiddag, torsdag d. 12/2 eller fredag d. 13/2 om formiddagen. Vi er selvfølgelig åbne overfor andre forslag.

Vi håber I har tid og lyst til at hjælpe os.

Med venlig hilsen

Jane Holmgaard

Kristian Vester

Lise Lausten Frederiksen

## Afgangsprojektet

Vores interesse bunder i at vi på 9. semester arbejdede med automatiseret bygningsmodellering på baggrund af laserscanningsdata. Under projektforløbet fandt vi, at der var stor interesse for fotorealisticke bymodeller. På baggrund af dette og et ønske om, at arbejde med integration af flere forskellige sensorer (kamera, GPS...) har vi besluttet at arbejde med påsætning af billeder på eksisterende bygningsmodeller ved hjælp af et Mobile Mapping System (MMS).

Det vi konkret forestiller os, er at gennemføre dataindsamlingen ved at kombinere kamera, GPS og studiets nyindkøbte IMU bestående af gyroer og accelerometre. Instrumenterne monteres på en bil. Ved hjælp af GPS og IMU bestemmes kæreets ydre orientering.

Påsætningen af billederne skal foregå så automatisk som muligt. Kendes den ydre orientering, kan billederne påsættes. Hvis den ydre orientering ikke kendes tilstrækkelig præcist, forestiller vi os, at der kan anvendes forskellige fotogrammetriske metoder eller billedbehandlingsmetoder til hjælp. Det kan for eksempel være brug af paspunkter. Det kan også være kantdetektering i billederne; de fundne kanter i billederne kan sammenlignes med facadernes kanter i den eksisterende bygnings-

model, hvilket kan være med til at transformere billederne på plads. Efter den ydre orientering er på plads, skal billederne "sættes på" eller skæres til. Kendes hjørnekoordinaterne på bygningsfacaden fra den eksisterende bygningsmodel, skal disse anvendes til at "skære billedet til".

## Spørgsmål

Spørgsmålene omhandler kun fotorealisticke bymodeller.

- Hvem er Jeres kunder?
- Hvad bruger kunderne de fotorealisticke bymodeller til?
- Hvordan er markedet/ efterspørgslen efter fotorealisticke bymodeller?
- Hvor mange opgaver af denne art gennemfører I om året?
- Hvor store er opgaverne?
- Hvilke krav stilles der til de fotorealisticke bymodeller (for eksempel pixelstørrelse, skal det være monoplotting, stereomodeller, ortofotos...)?
- Hvad er Jeres datagrundlag (hvilken bymodel anvendes, hvad er bymodellens nøjagtighed...)?
- Hvordan fremstiller I fotorealisticke bymodeller (for eksempel spørgsmål omkring dataindsamling, påsætning, software, lagring og datamodel)?
- Hvilke erfaringer har I med de metoder I bruger (dataindsamlingen, påsætningen)?
- Hvor lang tid tager dataindsamlingen og påsætningen?

- Har I nogen ideer til hvordan indsamlingen og påsætningen kan foregå i fremtiden?
- Vi ved at I har fået taget det, I kalder »skråfotos«. Hvordan er disse billeder optaget?
- Skal skråfotos anvendes i forbindelse med fotorealistiske bymodeller?
- I så fald hvilke fordele og ulemper ser I ved anvendelse af skråfotos frem for de nuværende metoder?
- Og hvordan vil I sætte skråfotos på bymodellerne (har I position og orientering til billederne, hvor godt)?
- Og hvilke nøjagtigheder/pixelstørrelser regner I med at kunne opnå ved denne metode?
- Hvordan ser I muligheden for at anvende et system, som det vi har beskrevet ovenfor, til automatiseret indsamling og påsætning af billeder?
- Hvilke muligheder og problemer ser I i den forbindelse?
- Hvis I skulle investere i et MMS, vil I så foretrække et færdigt system/koncept, hvor alt udstyr er fastmonteret eller vil I foretrække et system, hvor I kan bruge noget af det udstyr, I allerede råder over?
- Kan I forestille Jer at bruge et MMS til andre opgaver i Jeres firma?

De fulde interviews med BlomInfo A/S og COWI A/S fremgår af bilag 1a.

# Bilag 3: Opretning af facadebilleder

Dette bilag indeholder en række eksempler på opretning af facadebilleder. Det gælder både facader i skråfotos, men også facader i billeder taget fra gadeplan. Formålet med de viste eksempler er, at vurdere de to billedtypers egnethed til brug ved påsætning af facadebilleder på fotorealistiske 3D-bymodeller. Billederne er kun oprettet for hældningsforskydninger og opretningerne er foretaget i programmet Paint Shop Pro.

## 1 Skråfotos

I det følgende vises forskellige bygningsfacader fra skråfotos, der er oprettet. I figur 1 er de bygninger, der er oprettet markeret med rødt, og tallene på figurerne henviser til bygningernes respektive figurnumre i dette bilag.



Figur 1: Bygninger, der er oprettet fra skråfotoet er markeret med rødt. Tallene henviser til figurnumrene i bilaget. [CD fra COWI]

## Figur 2

Facaden er kendetegnet ved at have altaner, det vil sige bygningselementer, der ikke er i plan med resten af bygningen. Som det ses af figuren, dominerer altanerne voldsomt i billedet, og de skygger lidt for vinduerne. Billedet vil ikke være egnet til visualiseringsformål fra gadeplan i en 3D-bymodel, da der er store døde områder på facaden under altanerne, og facaden er ikke specielt genkendelig.

## Figur 3

Det øverste af facaden er dækket af tagudhænget. I det oprettede billede ser det således ud som om, at de øverste vinduer slutter lige under taget, hvilket sandsynligvis ikke er tilfældet i virkeligheden. Billedet vurderes dog at kunne anvendes til visua-



liseringsformål fra gadeplan i en 3D-bymodel, hvis opløsningen af billedet er tilfredsstillende.

#### Figur 4

Facaden indeholder karnapper, og ved opretningen af facaden ser det ud til, at karnapperne stadig ses fra oven. Ved anvendelse af et sådant billede i en 3D-bymodel, der skal anvendes til visualisering fra gadeplan, kan det være forvirrende, at det ser ud til, at man ser bygningen fra oven. Var billedet taget fra jorden, ville karnapperne se mere korrekte ud i forhold til visualisering fra gadeplan. Billedet kan anvendes til påsætning i en 3D-bymodel, der skal anvendes til visualisering fra gadeplan, da facaden stadig er genkendelig, men vil egne sig bedst i 3D-bymodeller, der skal anvendes til visualisering fra luften.

#### Figur 5

Facaden indeholder en port af en art. Ved opretning af facaden ser det ud som om, at man kigger ind i porten fra siden, hvilket er lidt forvirrende. Samme problem kan dog forekomme, hvis billedet var taget fra jorden. Det er en fordel ved bygningen, at der ikke er tagudhæng, der skygger for facaden. Billedet findes velegnet til visualiseringsformål fra gadeplan, da facaden stadig er genkendelig.

#### Figur 6

Fotoet er taget meget skrå på bygningen, og de øverste vinduer er således delvist dækket af tagudhænget. Det betyder, at de øverste vinduer i det oprettede billede er halve, hvilket ikke er hensigtsmæssigt. Endvidere medfører den skrå optagevinkel, at facadens billedinformation er begrænset, på grund af der kun er få pixler til at definere facaden. Billedet findes således ikke velegnet til visualiseringsformål fra gadeplan i en 3D-bymodel.

## 1.1 Samlet vurdering af skråfotos

Problemet med anvendelse af oprettede facader fra skråfotos i en 3D-bymodel er, at hvis facaden indeholder bygningsdetaljer, der stikker ud fra facaden, så vil de oprettede billeder stadig give det indtryk, at bygningen ses fra oven, jf. figur 4. Endvidere skal der ikke være et stort tagudhæng på bygningen, før dette dækker for noget af facaden eller tilmed dækker for noget af de øverste vinduer. Dette er ikke hensigtsmæssigt i forbindelse med anvendelse af billederne i en 3D-bymodel. Mange af bygningerne i et skråfoto er endvidere ikke gode at bruge, fordi billedet enten er taget meget skrå på facaden. Findes facaden i flere billeder, gælder det selvfølgelig om at finde det foto, hvor facaden er bedst repræsenteret.

De facader, der er helt plane, og ikke er påvirket af tagudhæng, vil, hvis fotoet er taget forholdsvis lige på facaden, stadig være genkendelige i et oprettet billede. Det vil således kunne anvendes i en 3D-bymodel, der skal anvendes til visualisering fra gadeplan. Billederne skal dog have en tilfredsstillende opløsning.

Generelt findes facader i skråfotos mindre egnet til visualisering i en 3D-bymodel fra gadeplan. De vil egne sig bedre i en 3D-bymodel, der skal anvendes til visualisering fra luften.

## 2 Terrestriske fotos

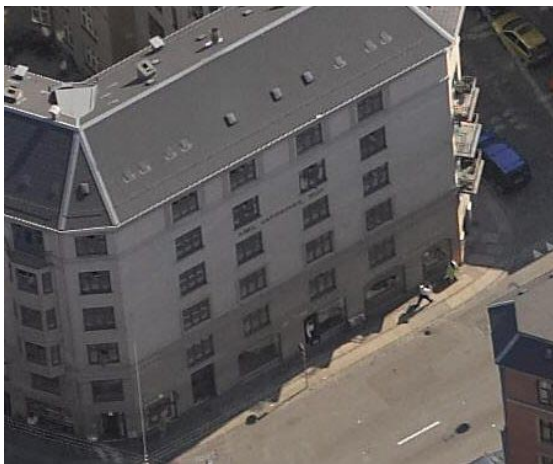
Projektgruppen har taget nogle terrestriske billeder i Øgadekvarteret i Aalborg, for at undersøge hvilke problemer, der kan opstå ved opretningen af sådanne billeder. Øgadekvarteret repræsenterer nogle typiske bygninger, der kan forekomme i en 3D-bymodel i tætbyområder.

#### Figur 7

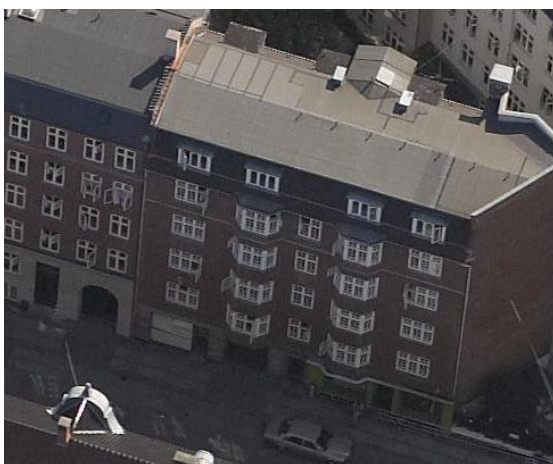
Facaden indeholder altaner, som stikker ud af bygningen. Når facaden oprettes, ser det ud til, at altanerne ses nedefra. Skal billedet anvendes i en 3D-bymodel til visualisering i gadeplan, kan der



Figur 2: Venstre billede: Bygning fra skråfoto.  
Højre billede: Oprettet bygning.



Figur 3: Venstre billede: Bygning fra skråfoto.  
Højre billede: Oprettet bygning.

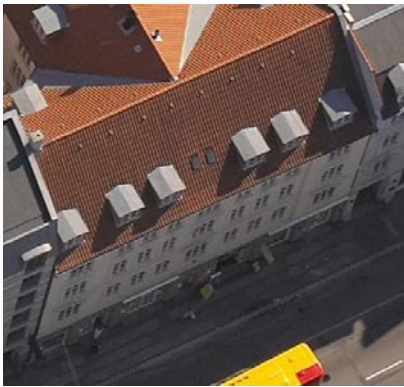


Figur 4: Venstre billede: Bygning fra skråfoto.  
Højre billede: Oprettet bygning.





Figur 5: Venstre billede: Bygning fra skråfoto.  
Højre billede: Oprettet bygning.



Figur 6: Venstre billede: Bygning fra skråfoto.  
Højre billede: Oprettet bygning.

ses bort fra denne problemstilling, idet billedet vil give samme indtryk af at bygningen ses nedefra.

### Figur 8

Er billedet taget lidt skævt på bygningen, vil indhak i bygningen i det oprettede billede se ud som om, de ses fra siden. Dette er en smule forvirrende, men afhængig af hvor skævt på facaden billedet er taget, vurderes det, at det oprettede billede kan anvendes i en 3D-bymodel.

### Figur 9

Også her ses problemstillingen med den skæve vinkel på indhakkene i bygningen. Endvidere er der parkeret en række biler foran bygningen, som i en fotorealistic 3D-bymodel helst undgås.

### Figur 10

Billedet er taget skævt på bygningen. Det betyder, at vinduesrammerne på bygningen til højre ikke helt kommer med i det oprettede billede. Det samme gælder den højre tilbagetrukne del



Figur 7: Venstre billede: bygning fra terrestrisk billede.  
Højre billede: Oprettet bygning.



Figur 8: Venstre billede: bygning fra terrestrisk billede.  
Højre billede: Oprettet bygning.

af bygningen, hvilket er ødelæggende for det visuelle indtryk. Endvidere sidder den ene række vinduer helt op ad nedløbsrøret, hvilket også ser mærkeligt ud.

### Figur 11

Igen ses et billede, der er taget skævt på bygningen. Her gælder det samme som ved figur 6, at der ikke eksisterer meget billedinformation til de bagerste facader. Dette betyder, at disse bygnin-

ger ikke er så genkendelige. Desuden gælder det, at indhakkene ikke er synlige, når billederne tages for skævt på bygningen.

## 2.1 Samlet vurdering af terrestriske fotos

Der er også problemer ved anvendelse af terrestriske fotos på 3D-bymodeller. Generelt er det et problem, når billederne tages for skråt på bygningen, da indhakkene og noget af vinduerne



Figur 9: Venstre billede: bygning fra terrestrisk billede.  
Højre billede: Oprettet bygning.



Figur 10: Venstre billede: bygning fra terrestrisk billede.  
Højre billede: Oprettet bygning.



Figur 11: Venstre billede: bygning fra terrestrisk billede.  
Højre billede: Oprettet bygning.





ikke bliver synlige og facaderne længst tilbage bliver ubetydelige. Derfor er det vigtigt, at billederne tages forholdsvis lige på bygningen.

De terrestriske fotos findes dog velegnede til visualiseringsformål, blot skal der tages hensyn til de forskellige problemstillinger ved fotograferingen.



# Bilag 4: Inertial Measurement System

Fra projektperiodens start havde projektgruppen en intention om at anvende Inertial Measurement System (IMU) integreret med GPS til bestemmelse af et kameras ydre orientering på et MKS. Derfor påbegyndte projektgruppen også undersøgelser af den IMU, som Institut for Samfundsudvikling og Planlægning på Aalborg Universitet har købt vinteren 2003/2004. Efter de første litteraturstudier og undersøgelser af IMU'en besluttede projektgruppen dog kun at benytte GPS til bestemmelse af et kameras ydre orientering af tidsmæssige årsager grundet emnets omfang.

Det følgende er et resultat af det arbejde, projektgruppen har foretaget, inden projektgruppen besluttede at udelade IMU'en til bestemmelse af kameraets ydre orientering. Først beskrives kort forskellige typer af inertial sensorer og disses fejlkilder. Sidst beskrives nogle forsøg projektgruppen har foretaget med IMU'en.

## 1 Inertial sensorer

Inerti er et objekts tilbøjelighed til at modstå et hvert forsøg på at ændre et objekts hastighed. En inertial sensor måler ændringen af inerti i forhold til en inertial referenceramme. En inertial referenceramme er en referenceramme med acceleration nul. I denne sammenhæng antages Jorden at være en inertial referenceramme. Der tages således udgangspunkt i Newtons bevægelseslove:

Newton's 1. lov:

*"Et objekt i hvile forbliver i hvile og et objekt i bevægelse forbliver i bevægelse med en konstant hastighed, hvis ingen ydre kræfter påvirker objektet."*

og

Newton's 2. lov:

$$F = m \cdot a$$

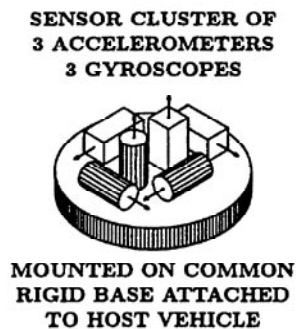
hvor  $F$  er den resulterende kraft,  $m$  er massen og  $a$  er accelerationen.

Mere konkret består en IMU af en række inertial sensorer; gyroer og accelerometre - oftest tre af hver. Gyroerne og accelerometrene er parvis placeret vinkelret på hinanden. Disse inertial sensorer måler henholdsvis vinkelhastigheder og lineære accelerationer i tre på hinanden vinkelrette retninger i forhold til en inertial referenceramme. Observationerne omregnes til en orientering og en hastighed, som igen kan omregnes til en relativ position.

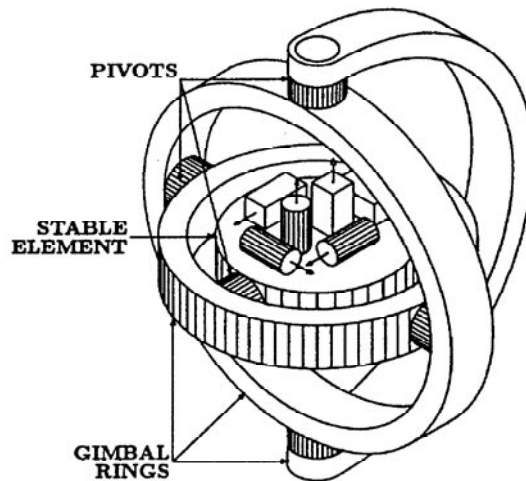
Der findes overordnet set to typer af IMU'er; kardansk ophængte systemer og "strapdown" systemer, jf. figur 1.

I kardansk ophængte systemer er de tre accelerometre og gyroer monteret på en platform (stable element) i det inderste af IMU'ens stel. Den indre platform er isoleret fra køretøjets rotationer og den forbliver vandret under alle forhold. På samme måde bevares orienteringen i rummet, når systemet er i bevægelse. De kardansk ophængte systemer er meget mekanisk komplekse, og derfor også forholdsvis dyre. Til gengæld er systemerne meget nøjagtige.

Strapdown systemer består ligeledes af accelerometre og gyroer placeret vinkelret på hinanden på



(a) Strapdown



(b) Gimbaled

Figur 1: Skitse af to forskellige typer af IMU - strapdown og kardansk ophængt system. [Mohinder, 2001, s. 155]

samme platform. Platformen er dog i modsætning til kardansk ophængte systemer monteret direkte på for eksempel et køretøj. Accelerometrene og gyroerne forbliver således ikke vandret under bevægelse, men følger køretøjets bevægelse. Strapdown systemer er derfor mekanisk simple og betydeligt billigere end kardansk ophængte systemer. Strapdown systemer er mindre nøjagtige end kardansk ophængte systemer.

[Mohinder m.fl., 2001, s. 10-14] [Serway, m.fl., 2000, s. 114-117]

## 2 Inertialsensorernes fejlkilder

Ved brug af inertial sensorer giver hver sensor et output som følge af enten lineær acceleration og/eller rotation. Der er i forbindelse med inertial navigation flere forskellige fejlkilder. Det drejer sig i hovedtræk om nulpunktsfejl, skalafejl, akseskævhed, tiltfejl og ydre påvirkninger fra omgivelserne. I det følgende redegøres kort for de enkelte fejlkilder.

### Nulpunktsfejl

Hver sensor har en nulpunktsfejl. Nulpunktsfejlen er defineret som en forskydning; det vil sige den outputværdi systemet giver, når inputtet er nul. Output skal således korrigeres for nulpunktsfejl. Der er generelt tre former for nulpunktsfejl:

- Konstant nulpunktsfejl - Kalibreres en gang for alle
- Nulpunktets stabilitet - Nulpunktet kan variere fra opstart til opstart
- Nulpunktets drift - Nulpunktet varierer over tid efter sensoren er opstartet

En sensors nulpunktsfejl består således af en konstant værdi samt et fejlbidrag, der skyldes nulpunktets variation fra opstart til opstart og et fejlbidrag, der varierer over tid, efter sensoren er opstartet.

[Lawrence, 1998, s. 25-33] [Mohinder m.fl., 2001, s.144-146, s. 150-151]

## Skalafejl

På samme måde som nulpunktsfejlen har hver sensor også en skalafejl. Skalafejlen er defineret som forholdet mellem en ændring i inputsignal og en ændring i outputsignal. Output skal således så vidt muligt korrigeres for skalafejl. Der er forskellige former for skalafejl:

- Konstant skalafejl - Kan korrigeres en gang for alle
- Skalaens stabilitet - Skalaen kan variere fra opstart til opstart
- Skalaens drift - Skalaen varierer over tid efter sensoren er opstartet
- Skalaens non-linearitet - Det kan forekomme at skalaen ikke er fuldstændig lineær, men kan beskrives som en funktion af et højere ordensled. Non-lineariteten kan bestemmes ved at foretage en test, hvor rotationen eller accelerationen varieres, mens outputtet indsamles.
- Skalaens asymmetri - En skala kan være asymmetrisk. Plottes output som en funktion af input viser dette sig ved et knæk på grafen. Oftest er asymmetrien af ubetydelig størrelse

Skalaen består altså af et konstant værdi samt en række fejlbidrag, der skyldes skalaens stabilitet, drift, non-linearitet og asymmetri.

[Lawrence, 1998, s. 25-33] [Mohinder m.fl., 2001, s.144-146, s. 150-151]

## Akseskævhed

For både gyro og accelerometre kan forekomme akseskævhed. Akseskævheden kan have tre årsager

- Sensorerne er ikke monteret vinkelret på hinanden
- Sensorerne er ikke monteret i overensstemmelse med sensorboksens angivelser
- Sensorboksen er ikke monteret i overensstemmelse med køretøjets koordinataks

Gyroens akseskævhed giver sig til udtryk ved, at der registreres rotationer om en anden akse end den forventede. Accelerometerets akseskævhed giver sig til udtryk ved, at der registreres accelerationer på tværs af kørselsretningen og at den registrerede acceleration i kørselsretningen ikke er korrekt.

[Hansen m.fl., 2003, s. 33-34]

## Tiltfejl

Tiltfejl defineres som den fejl accelerometerens output påvirkes af som følge af, at accelerometrene ikke befinder sig vinkelret på tyngdeaccelerationens retning; lodlinen. Hvis accelerometrene med andre ord ikke befinder sig vandret, opstår en fejl. Denne fejl er særlig udpræget ved strap-down systemer, hvor accelerometrenes orientering følger køretøjets orientering. Fejlen kan for eksempel forekomme, hvis bilen kører ned ad en bakke, og bilens front derfor vender nedad. I dette tilfælde påvirkes accelerationen i kørselsretningen af tyngdekraften, og accelerationen vil derfor blive registreret større, end den i virkeligheden er. Tiltfejlen har størst betydning i bakkefuldt terræn og har en betydelig størrelse. Det er derfor en nødvendighed, at der korrigeres for tiltfejl.

## Øvrige fejlkilder

I det forrige er de vigtigste fejlkilder nævnt, men der er flere. Det drejer sig hovedsageligt om ydre påvirkninger; blandt andet om jordens rotation,

der påvirker gyroens output. Denne fejlkilde er dog for sensorer i den billige ende ubetydelig, da sensorernes nøjagtighed er begrænset.

En anden form for fejlkilde opstår som følge af sensorernes opløsning; det vil sige hvor små ændringer i input, der giver anledning til outputs-ændringer. I samme boldgade kan nævnes sensorernes evne til at registrere input nær nul, idet visse sensortyper kan lide af en form for træghed for at måle små ændringer fra nul.

## 3 Specifikationer for IMU 400CC-100

Institut for Samfundsudvikling og Planlægning har en IMU af mærket IMU400CC100 fra firmaet Crossbow og er en strapdown IMU. Specifikationerne for IMU'en fremgår af figur 2. Endvidere kan det nævnes at IMU'en automatisk kompenserer for temperaturens påvirkninger af sensorerne.

Specifications	IMU400CC-100
<b>Performance</b>	
Update Rate (Hz)	> 100
Start-up Time Valid data (sec)	< 1
<b>Angular Rate</b>	
Range Roll, Pitch, Yaw (°/sec)	± 100
Bias: Roll, Pitch, Yaw (°/sec)	<± 1.0
Scale Factor Accuracy (%)	< 1
Non-Linearity (% FS)	< 0.3
Resolution (°/sec)	< 0.025
Bandwidth (Hz)	> 25
Random Walk (°/hr <sup>1/2</sup> )	< 2.25
<b>Acceleration</b>	
Range X/Y/Z (g)	± 2
Bias: X/Y/Z (mg)	<± 8.5
Scale Factor Accuracy (%)	< 1
Non-Linearity (% FS)	< 1
Resolution (mg)	< 0.25
Bandwidth (Hz)	> 75
Random Walk (m/s/hr <sup>1/2</sup> )	< 0.1

Figur 2: Specifikationer for IMU 400CC-100. [Crossbow 1]

Af figur 2 kan der beregnes nogle eksempler for, hvor meget de i specifikationen nævnte fejlkilder for nulpunktsfejl og skalafejl har betydning for resultater af IMU'en.

### 3.1 IMU'ens nulpunktsfejl

#### Gyroerne

Gyroerne har en maksimal nulpunktsfejl på +/- 1.0 %/s. Medtages denne fejl over et givet interval kan nulpunktsfejlen omregnes til en vinkelændringsfejl. Af figur 2 kan det ses at fejlen over en periode på 1 sekund bliver til 1 grad.

#### Accelometrene

Accelometrene har en nulpunktsfejl på +/- 0,0085 g - svarende til 0,083 m/s<sup>2</sup>. Accelometrens nulpunktsfejl vil over en periode på 1 sekund give en hastighedsændring på 0,083 m/s. Afhængig af MKS'ets starthastighed vil dette betyde en positionsfejl af større eller mindre grad.

### B4.3.2 IMU'ens skalafejl

Det er ud fra IMU'ens skalafejl ikke muligt at give et realistisk bud på hvordan denne fejl vil spille ind på vinkelændringen eller hastighedsændringen, da størrelsen er en procentsats af den aktuelle inputværdi. Dette betyder, at hvis IMU'en er meget bevægelig, vil skalafejlen blive større.

#### Gyroerne

Beregnes den største skalafejl alligevel vil det for gyroerne svare til en vinkelfejl over 1 sekund ligeledes bliver 1 grad.

#### Accelometrene

For accelometrene vil skalafejlen ved 2g over en periode på 1 sekunder give en hastighedsfejl på 0,196 m/s.

## 4 Statiske forsøg med IMU 400CC-100

Projektgruppen har udført nogle forsøg med IMU'en dels for at klarlægge nogle af dens fejlkilder og dels for at lære at betjene den. Forsøgene klarlægger IMU'ens nulpunktsstabilitet samt nulpunktets drift.

Forsøgene 1-6 er alle statiske forsøg, hvilket vil sige, at IMU'en har stået helt stille under forsøgene. IMU'en er været påmonteret et fodstykke fra en teodolit, hvorpå det er muligt ved hjælp af fodskruerne og en rørlibelle at sætte IMU'en vandret. Der er indsamlet observationer med en frekvens på 50 Hz. De første 5 minutter af observationerne er sat af til at varme IMU'en op og anvendes ikke i forsøgene [Crossbow 2, s. 23]. Herefter er sensorerne nulstillet på baggrund af et middel af de næste 10 sekunders observationer. Forsøgene 1-6 er foretaget direkte efter hinanden.

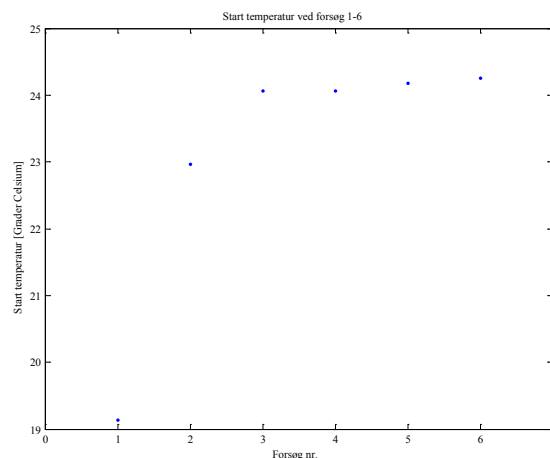
### 4.1 IMU'ens nulpunktsstabilitet

Fra gang til gang IMU'en opstartes kan sensorerne have forskellige nulpunkter. Nulpunktstabiliteten er kontrolleret ved at sammenligne nulpunktverdierne ved seks forsøg. Nulpunktverdierne er beregnet af et middel af de første 500 observationer svarende til de 10 første sekunder. Af figurene 3 til 8 kan nulpunkterne for henholdsvis roll rate, pitch rate, yaw rate, x-acceleration, y-acceleration og z-acceleration. Det skal nævnes, at de tre første figurer har samme skala, og de tre næste har samme skala, således det er lettere at sammenligne nulpunkternes stabilitet for henholdsvis gyroerne og accelerometrene.

Det ses i figur 3 og 7 at nulpunktet i forsøg 1 varierer meget i forhold til nulpunktet i de andre forsøg. Af figur 9 kan spredningen ses for de enkelte sensorer. IMU'en korrigerer i følge specifikationerne automatisk for nulpunktsforskydning forårsaget af temperaturen. Sammenlignes nulpunkterne alligevel med starttemperaturen, se figur 9, er

det i forsøg 1, starttemperaturen varierer mest i forhold til starttemperaturen i de andre forsøg. Hvorfor nulpunktet kun varierer i forsøg 1 ved roll rate sensoren og y-accelerationen og ikke ved de andre sensorer, kan ikke umiddelbar forklares af projektgruppen?

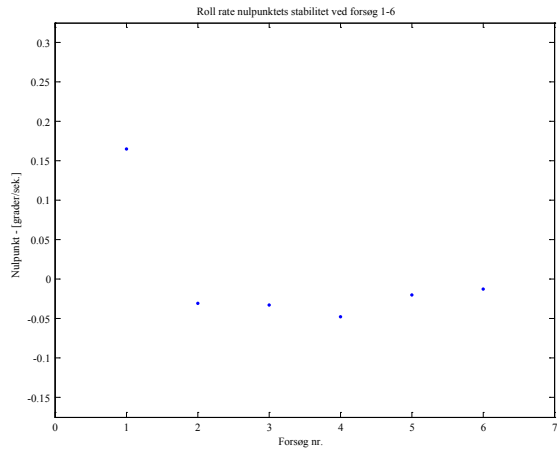
Ud fra de seks forsøg kan der regnes en spredning for hvor meget nulpunkterne for de forskellige sensorer varierer. Disse kan ses af figur 10. Sammenlignes disse spredninger med sensorernes mindste enhed på 0,025 °/s og 0,00245 m/s<sup>2</sup> for henholdsvis gyroerne og accelerometrene må



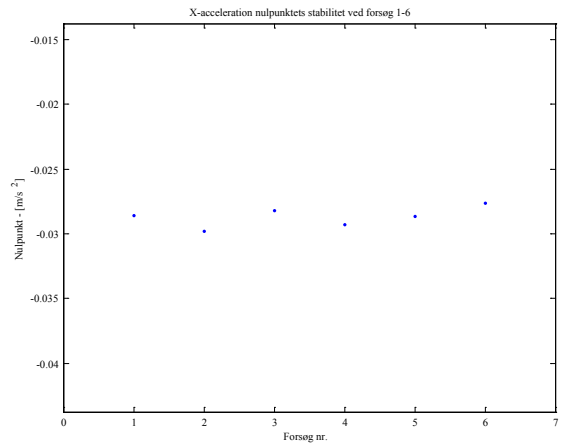
Figur 9: Starttemperaturerne ved forsøg 1-6.

Sensor	Spredning
Roll rate	0,00641 °/sek.
Pitch rate	0,00015 °/sek.
Yaw rate	0,00024 °/sek.
X-accelerometer	0,000001 m/s <sup>2</sup>
Y-accelerometer	0,000075 m/s <sup>2</sup>
Z-accelerometer	0,000001 m/s <sup>2</sup>

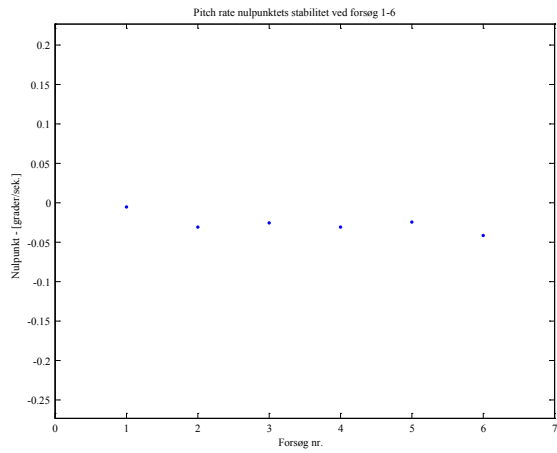
Figur 10: Beregnet spredninger af sensorernes præcision ud fra seks forsøg.



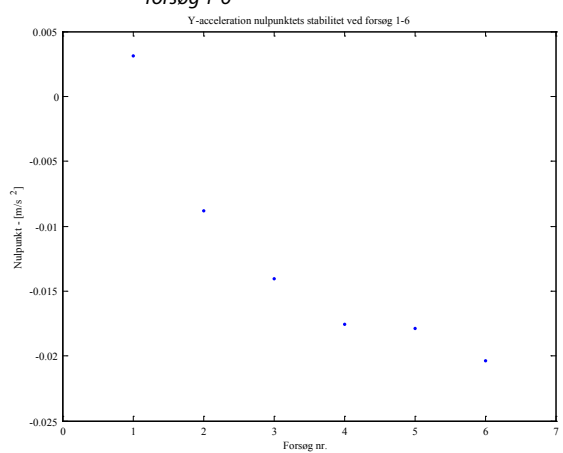
Figur 3: Nulpunkterne for gyroens roll rate ved forsøg 1-6.



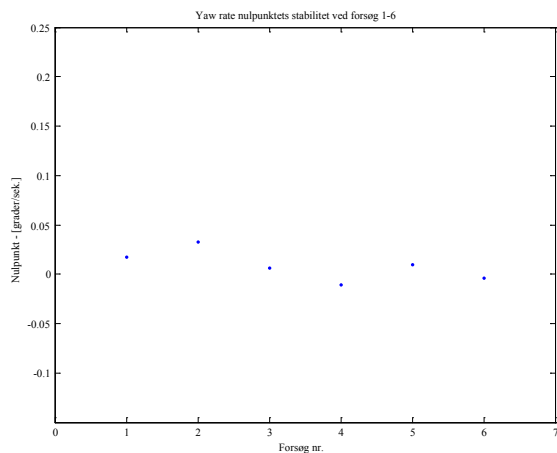
Figur 6: Nulpunkterne for accelerometrene i x-retning ved forsøg 1-6



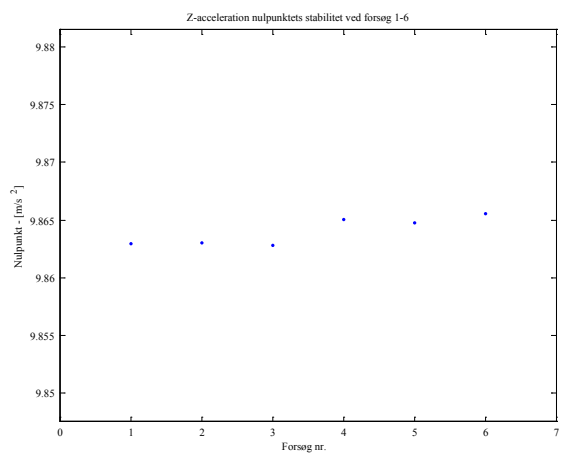
Figur 4: Nulpunkterne for gyroens pitch rate ved forsøg 1-6.



Figur 7: Nulpunkterne for accelerometrene i y-retning ved forsøg 1-6



Figur 5: Nulpunkterne for gyroens yaw rate ved forsøg 1-6.



Figur 8: Nulpunkterne for accelerometrene i z-retning ved forsøg 1-6



nulpunktets stabilitet betegnes stabilt og ubetydelig.

Fabrikanten anbefaler i manualen at gyroerne nulstilles efter at have varmet op i 5 minutter. Dette skal gøres, mens IMU'en står stille. [CrossBow 2, side 23] Hvis denne metode anvendes, får gyroernes nulpunktsstabilitet ikke en nogen egentlig betydning.

## 5 Sensorernes nulpunktsdrift

Under anvendelse af IMU'en kan sensorernes nulpunkt drive over tid, hvilket vil betyde, at observationerne bliver fejlbehæftet med en systematisk fejl. I denne undersøgelse analyseres nulpunktets drift over tid. Af figur 11-16 kan nulpunkternes drift ses for de enkelte sensorer ved de seks forsøg. Nulpunkterne er beregnet på baggrund af 10 sekunders observationer i et interval på 100 sekunder over cirka én time.

Af figurene 11 til 16 kan det ses, at nulpunktet for sensorerne driver lidt op og ned, men trods denne vandring forbliver nulpunktet omtrent samme sted over en times observationer, hvilket antyder, at støjen er tilfældig og ikke systematisk.

Bilag 1C indeholder et regneark, hvor spredningerne på sensorernes observationer er beregnet. Ud fra dette bilag ses at spredningerne på gyroernes observationer er omkring  $0,245 \text{ }^\circ/\text{s}$  og spredningerne på accelerationen er omkring  $0,0086 \text{ m/s}^2$ . Sammenlignes disse værdier med sensorernes mindste enhed på  $0,025 \text{ }^\circ/\text{s}$  og  $0,00245 \text{ m/s}^2$  for henholdsvis gyroerne og accelerometrene må observationerne betegnes støjpåvirket. Det nævnes i litteratur om IMU, at observationerne bør igennem et støjfilter før at de enkelte observationer direkte kan anvendes. [Walchko m.fl., 2002, s. 2]

Det ses dog af figur 11 og 12 at y-accelerometret har en tendens til at drive systematisk ved forsøg 1 og 2 sammenlignet med accelerometrene i de andre forsøg. Aflæses figur 11 og 12 ses at y-ac-

celerometret er drevet henholdsvis  $0,01 \text{ m/s}^2$  og  $0,005 \text{ m/s}^2$ , hvilket svarer til en hastighedsfejl efter 10 sekunder på henholdsvis  $0,1 \text{ m/s}$  og  $0,05 \text{ m/s}$ . I løbet af forsøg 1 og 2 er der en temperaturvariation på henholdsvis  $3,94 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $1,24 \text{ }^\circ\text{C}$ . I forsøgene 3-6 er temperatur variation under  $0,43 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ud fra disse iagttagelser kunne det tyde på, at IMU'ens automatiske korrektion for nulpunktetsforskydelse forårsaget af temperaturændringerne for netop y-accelerometret ikke virker helt korrekt.

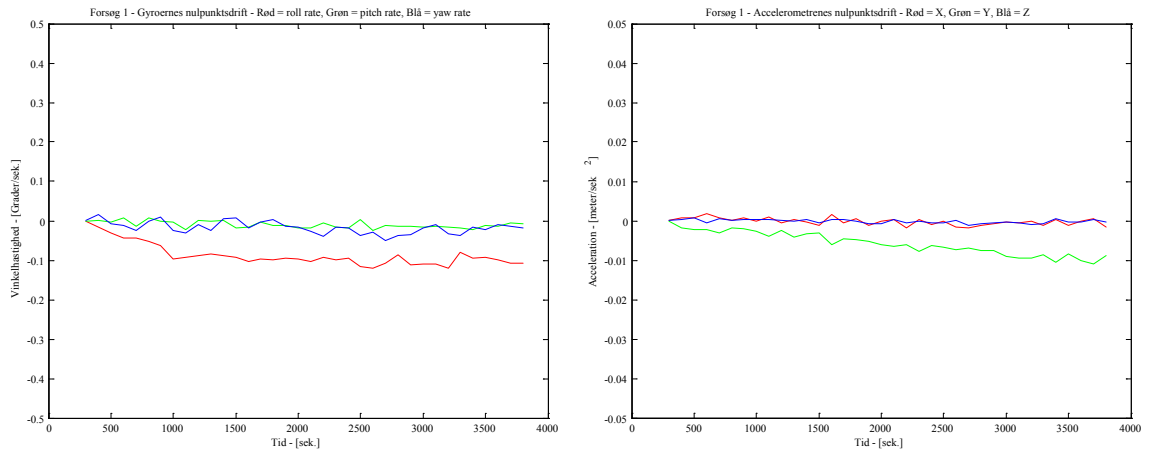
## 6 Y-accelerationens nulpunktsdrift ved varierende temperatur

Som beskrevet tidligere har temperaturen indflydelse på nøjagtigheden af observationerne fra IMU'en. Den IMU projektgruppen har til rådighed korrigerer ved hjælp af et indbygget termometer samt nogle algoritmer for de fejl, der introduceres af temperaturen.

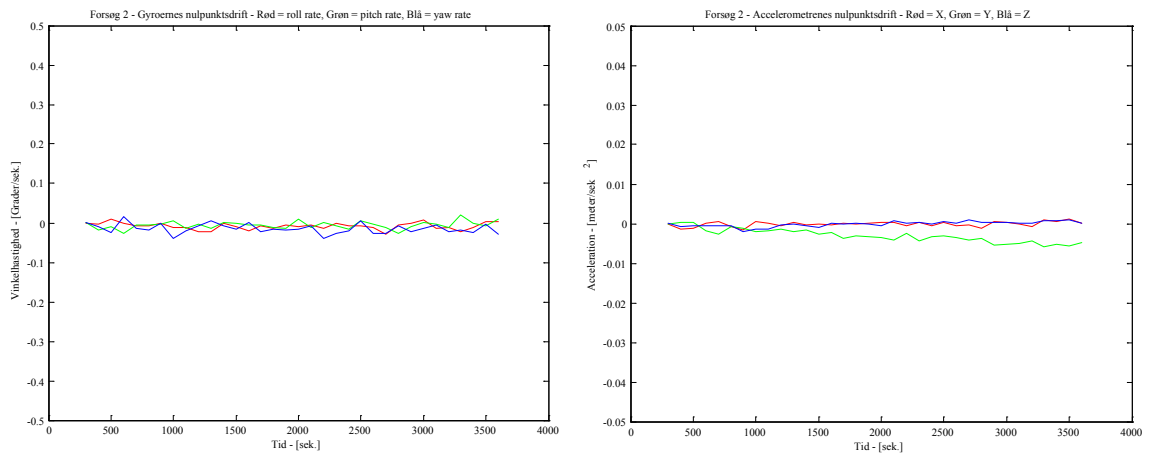
Projektgruppen har valgt at undersøge nærmere, om varierende temperatur har indflydelse på nulpunktets drift, grundet y-accelerometerets drift ved forsøg 1-2.

Projektgruppen har foretaget to forsøg, der har til formål at kontrollere om IMU'en korrigerer korrekt for temperaturen korrekt, men i realiteten burde der laves flere gentagende forsøg for at få et pålideligt resultat. Forsøgene er udført ved indledningsvist at nedkøle IMU'en til ca.  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  i et køleskab. Efterfølgende er IMU'en sat ud i stuetemperatur, og stillet vandret ved hjælp af fodskruer og libelle, og der er således indsamlet data, indtil IMU'en har nået den maksimale temperatur i rummet. Der er i forsøgene indsamlet data i cirka to timer med en frekvens på 1 Hz. Ligesom forsøgene 1-6 er observationerne i de første 5 minutters af hver forsøg ikke anvendt.

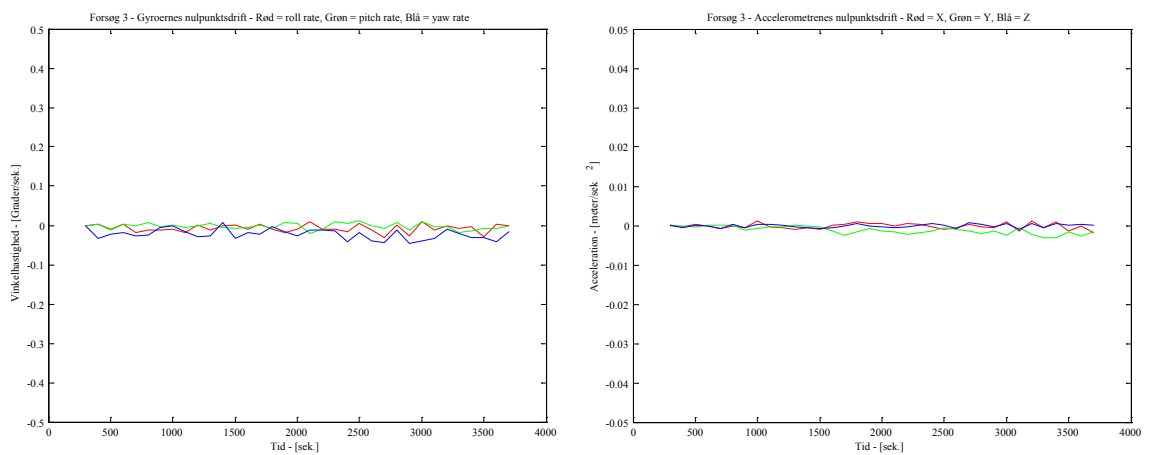
Først er accelerationernes nulpunktsdrift kontrolleret i forhold til tiden for at se om nulpunktet driver ligesom i forsøg 1 og 2. På figur 18 ser det ud til at y-accelerationens nulpunkt driver mere end de



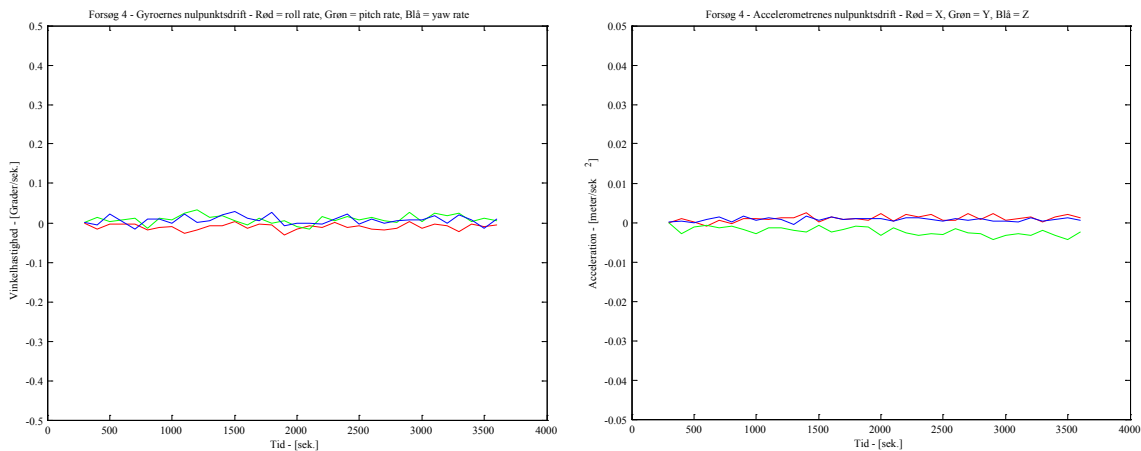
Figur 11: Gyroernes og accelerometrenes nulpunktsdrift over cirka én time ved forsøg 1.



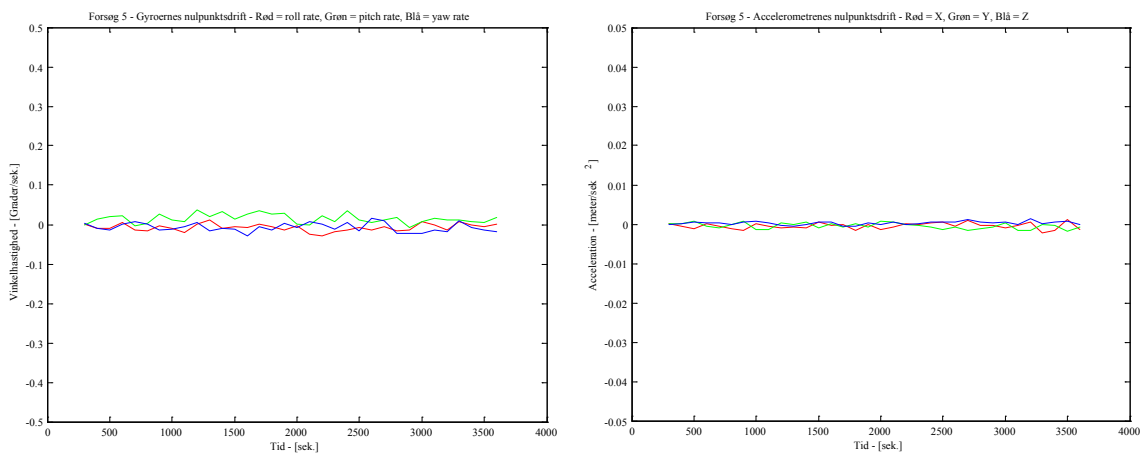
Figur 12: Gyroernes og accelerometrenes nulpunktsdrift over cirka én time ved forsøg 2.



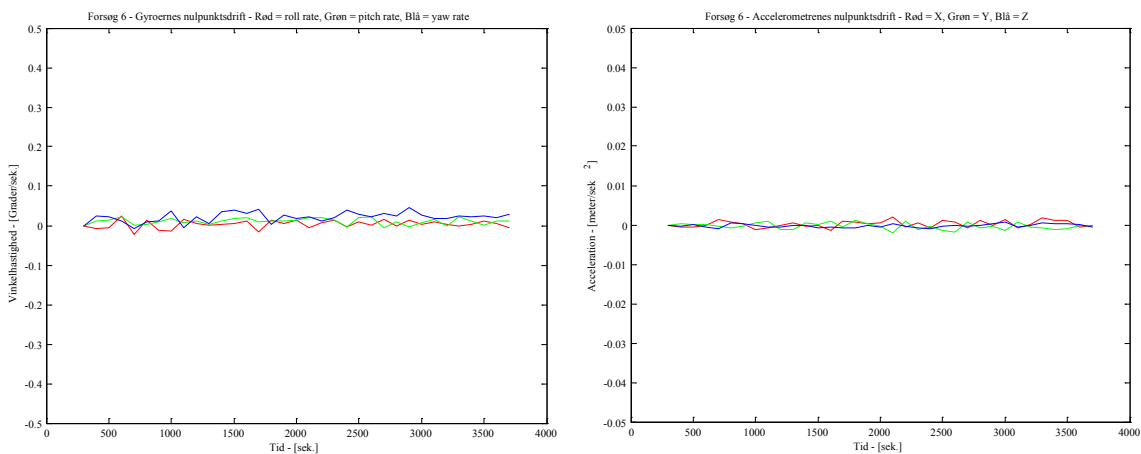
Figur 13: Gyroernes og accelerometrenes nulpunktsdrift over cirka én time ved forsøg 3.



Figur 14: Gyroernes og accelerometrenes nulpunktsdrift over omtrent én time ved forsøg 4.



Figur 15: Gyroernes og accelerometrenes nulpunktsdrift over omtrent én time ved forsøg 5.



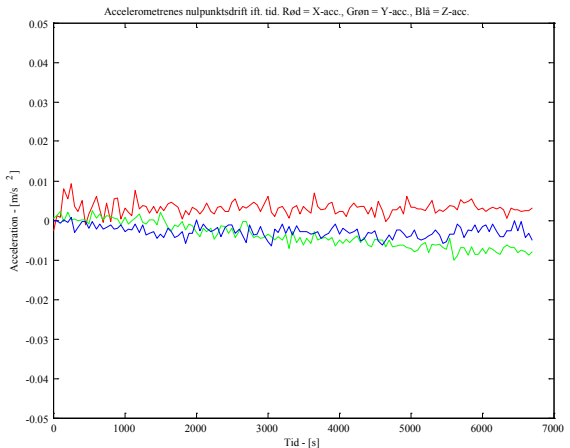
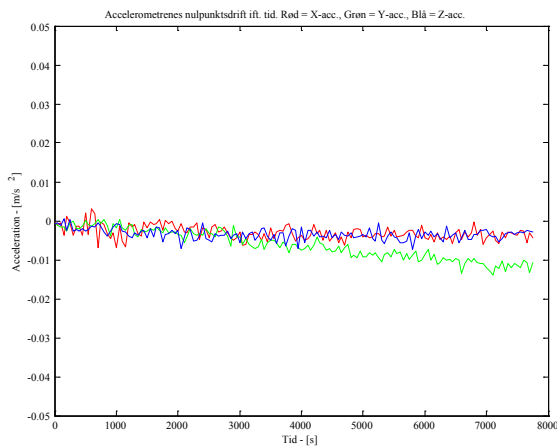
Figur 16: Gyroernes og accelerometrenes nulpunktsdrift over cirka én time ved forsøg 6.

andre i forsøg 7. I forsøg 8 er nulpunktets drift af mere tilfældig karakter.

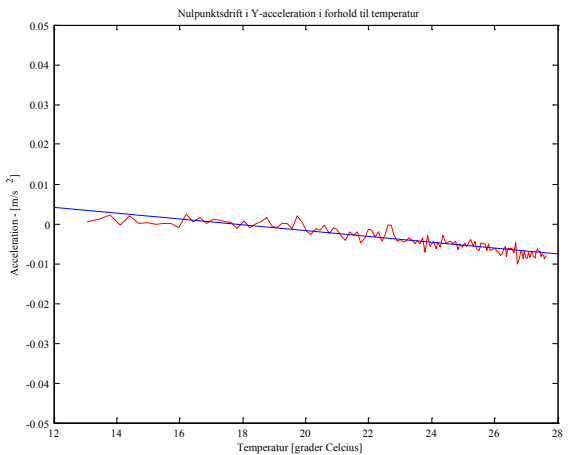
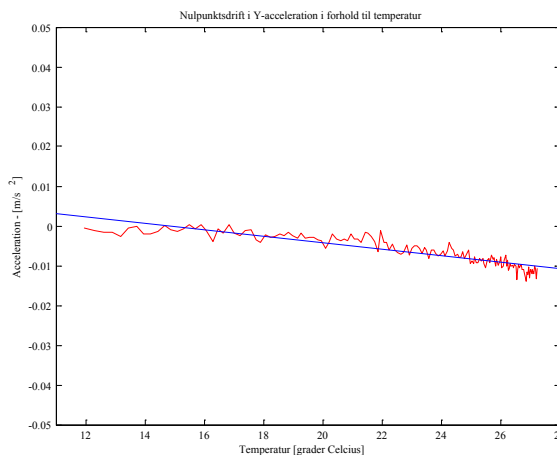
Af figur 18 kan det ses at y-accelerationen igen er drevet cirka  $0,01 \text{ m/s}^2$  ved forsøg 7 og 8 dog over en længere periode.

For at vurdere om det er temperaturen, der påvirker observationerne i y-accelerationerne, undersøges observationerne i forhold til temperaturen. I figur 19 ses nulpunktets drift ved y-accelerationen i de to forsøg som funktion af temperaturen.

Da projektgruppen på baggrund af figurerne vurderer, at der er en lineær sammenhæng mellem temperatur og observationer i y-accelerationen, foretages der en lineær regression. En lineær regression er en tilpasning af en linje til et observationsæt ved hjælp af mindste kvadraters princip. Den lineære regression er foretaget i Matlab. Mens hældningerne på linierne for x- og z-accelerationerne er nær nul, er hældningerne på linierne for y-accelerationerne i forsøg 7 og forsøg 8 henholdsvis  $-0,0008$  og  $-0,00075$ . Reelt betyder det, at nulpunktet for y-accelerationen falder med ca.  $0,0008 \text{ m/s}^2/^\circ\text{C}$ . Foretages der flere forsøg af



Figur 18: Accelerationernes nulpunktsdrift i forhold til tiden. Til venstre ses resultaterne fra forsøg 7 og til højre ses resultaterne fra forsøg 8.



Figur 19: Nulpunktsdriften ved y-accelerationen i forhold til temperaturen. Til venstre ses resultaterne fra forsøg 7, mens resultaterne fra forsøg 8 ses til højre. De blå linier er tilnærmet observationerne ved hjælp af lineær regression.

denne type og resultaterne forbliver konstante, kan observationerne korrigeres for nulpunktet temperaturnafhængige drift.

## B4.7 Afsluttende kommentar

Dette bilag har kun overfladisk omhandlet IMU'ens fejlkilder, men der kan opstilles mange praktiske problemstillinger, som burde løses inden den enkelte IMU kunne tages i brug i et MKS. Disse problemstillinger er ikke løst eller alle belyst i dette bilag. Nedenstående er nogle problemstillinger dog belyst, som projektgruppen mener burde analyseres nærmere, hvis en IMU skal anvendes i et MKS.

- Fejlkildernes størrelse bør nærmere analyseret for at se, hvad disse vil betyde for nøjagtigheden af et samlet MKS.
- IMU'ens observationer kan på forskellig vis anvendes til den ydre orientering af MKS'et afhængigt af hvorledes beregningsmodellen for den ydre orientering opstilles. Det kunne undersøges om alle IMU'ens observationer var nødvendig til at beregne en tilstrækkelig nøjagtig ydre orientering.
- Hvordan og hvor ofte skal IMU'en korrigeres, således at IMU'ens fejlbidrag bliver ubetydelige, samt hvordan korrigeres IMU'en i praksis.

Projektgruppen anser det stadig her efter de indledende litteraturstudier og forsøg stadig det muligt at anvende en IMU. Men anvendes et færdigt INS med GPS og IMU med integrerede beregningsalgoritmer vil outputtet af INS'et være en position og orientering, der vil kunne anvendes direkte i MKS'et.



# Bilag 5: Døde områder

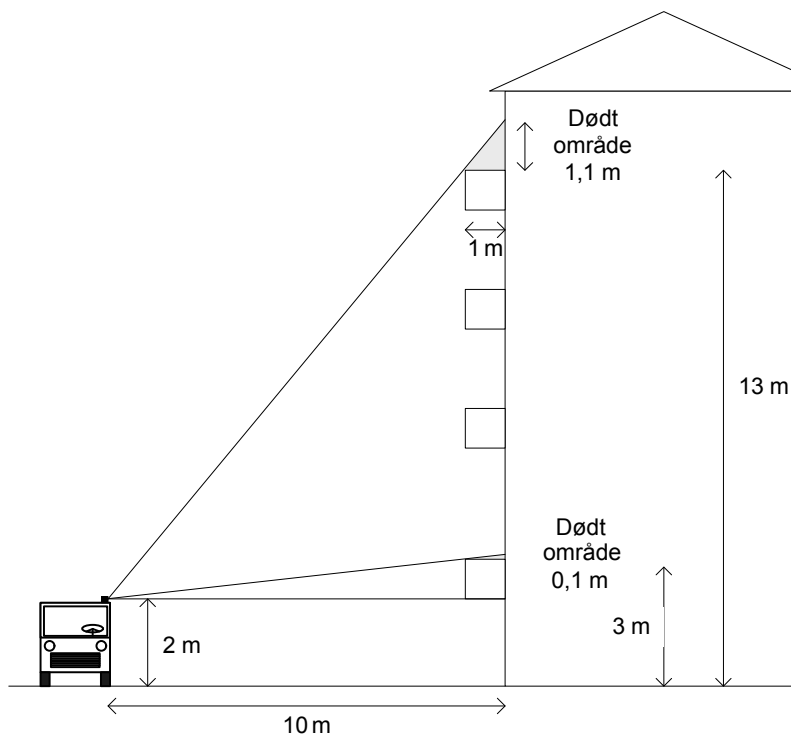
I forbindelse med fotografering af facader vil der opstå døde områder, hvis der på facaden findes altaner, karnapper eller andre bygningsdele, der ikke er i samme plan som facaden. I det følgende ses der på et par eksempler på størrelsen af døde områder fra henholdsvis fotografering fra jorden, samt fra fly i forbindelse med skrå-fotografering (skråfotos).

## Terrestriske fotos

Følgende eksempel henviser til figur 1.

Er kameraet placeret i 2 meters højde over jorden, og en høj bygning fotograferes i en afstand af 10 meter, vil en 1 meter dyb altan i 13 meters højde give et dødt område på 1,1 m.

I samme situation vil en 1 meter bred altan i 3 meters højde give et dødt område på 0,1 m.



Figur 1: Eksempel på døde områder, der vil opstå i forbindelse med terrestriske fotos af facaderne.

## Skråfotos

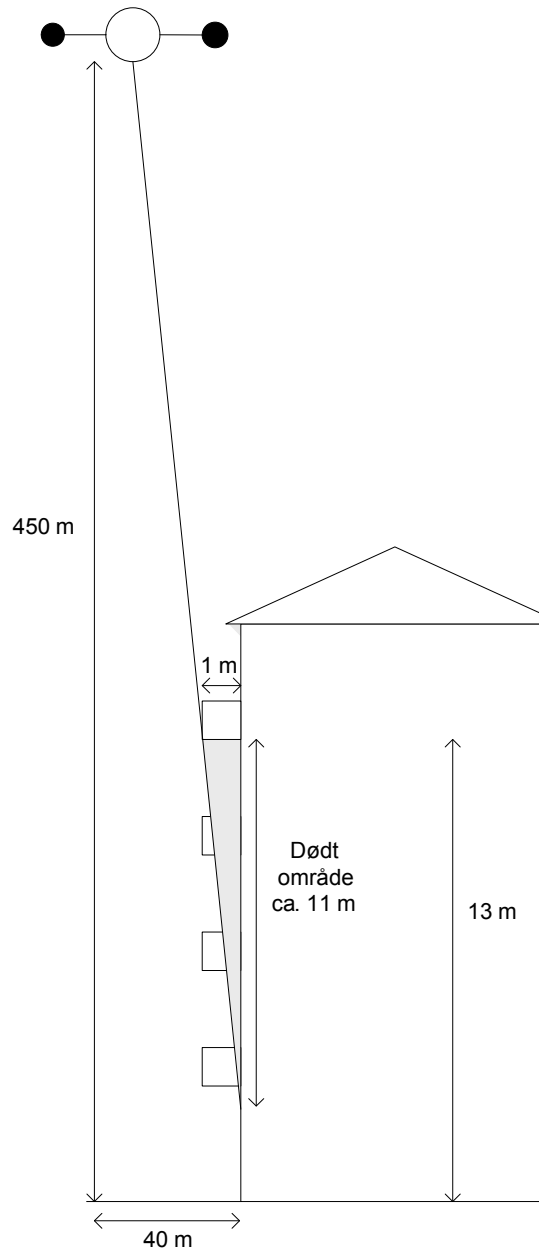
Projektgruppen har ikke kendskab til det kamera, der anvendes til fotografering af skråfotos, og der er derfor i eksemplet foretaget en antagelse om at kameraet har en åbningsvinkel på  $50^\circ \times 50^\circ$ .

Flyet flyver vandret i en højde af 450 m, og kameraerne er monteret i en vinkel på  $30^\circ$  i forhold til lodlinien. Med den givne åbningsvinkel betyder det, at der fotograferes bygninger i en vandret afstand fra flyet på mellem 40 og 640 m. Ved disse afstande er det beregnet hvor store døde områder, der vil opstå i forbindelse med fotografering, jf. figur 2 og figur 3.

Figur 2 viser, at en 1 m dyb altan placeret i 13 meters højde på en bygning, vil give et dødt område på ca. 11 m, hvis bygningen er placeret 40 m i vandret afstand fra flyet.

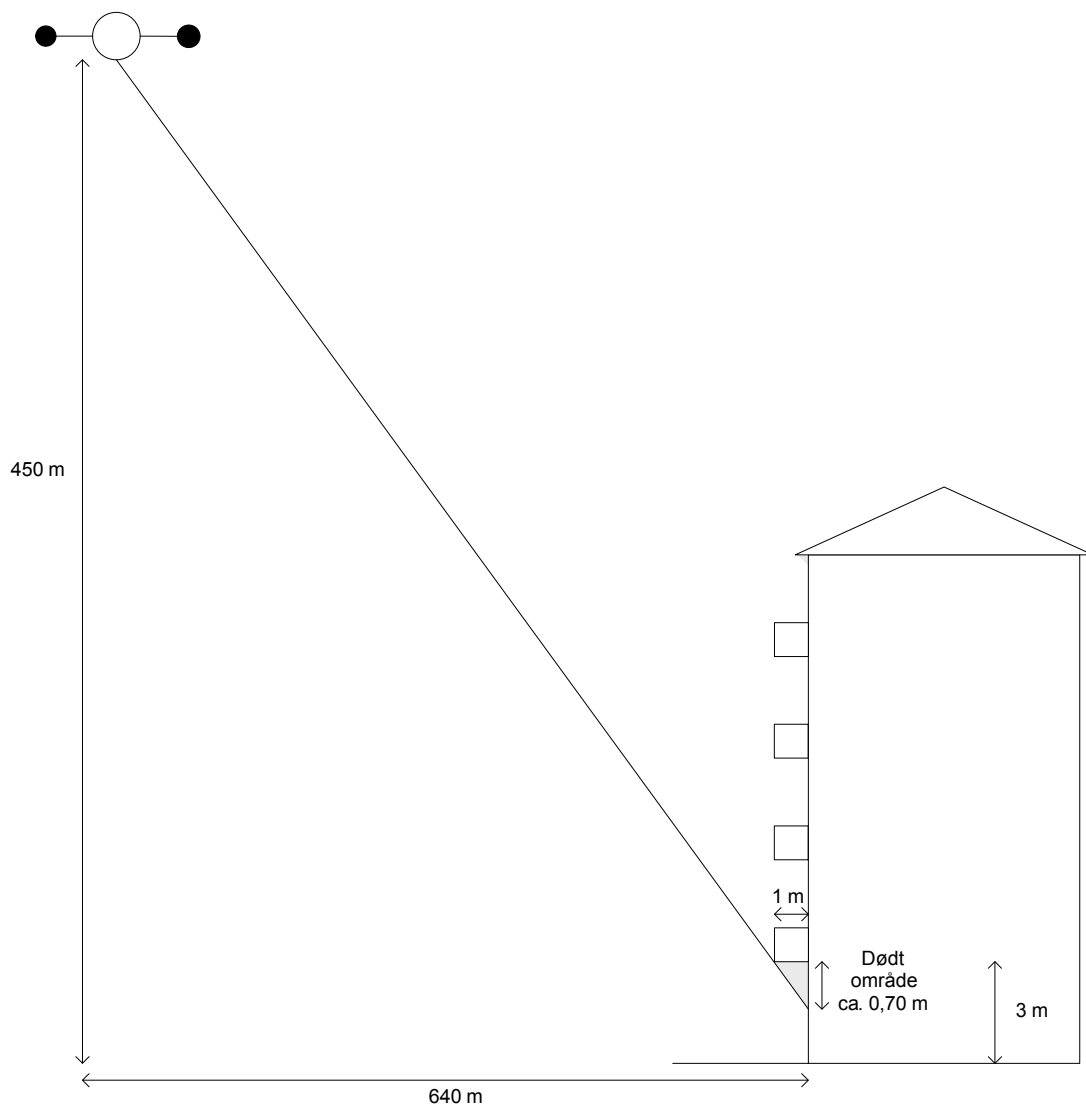
Figur 3 viser, at en 1 m dyb altan placeret i 3 meters højde på en bygning, vil give et dødt område på ca. 0,75 m, hvis bygningen er placeret 640 m i vandret afstand fra flyet.

Der er nu vist forskellige eksempler på størrelsen af de døde områder ved henholdsvis terrestriske fotos og skråfotos. Eksemplerne giver et billede af, at der er større risiko for store døde områder ved anvendelse af skråfotos, idet det ikke kan forventes at alle bygninger er placeret hensigtsmæssigt i forhold til flyet.



Figur 2: Eksempel på døde områder, der vil opstå i forbindelse med skråfotos ved vandret afstand på 40 m mellem bygning og fly.





Figur 3: *Eksempel på døde områder, der vil opstå i forbindelse med skråfotos ved vandret afstand på 640 m mellem bygning og fly.*



# Bilag 6: Resultater fra detektering af kantpixler

Dette bilag indeholder resultaterne af de gennemførte forsøg på detektering af kantpixler.

Forsøgene er foretaget i Matlab med Image Processing Toolbox, der indeholder seks foruddefinerede filtre til detektering af kantpixler.

Der er først gennemført et forsøg med henblik på at sammenligne de seks forskellige filtre til detektering af kantpixler. Alle seks filtre er derfor anvendt på to forskellige bygninger, jf. figur 1. Der anvendes automatisk fastsættelse af grænseværdi. Figur 2 viser en tabel over forsøget, mens



Figur 1: Facadebilleder af bygningerne Østerbro 48 og Hadsundvej 170. Billederne er oprettet i Paint Shop Pro.

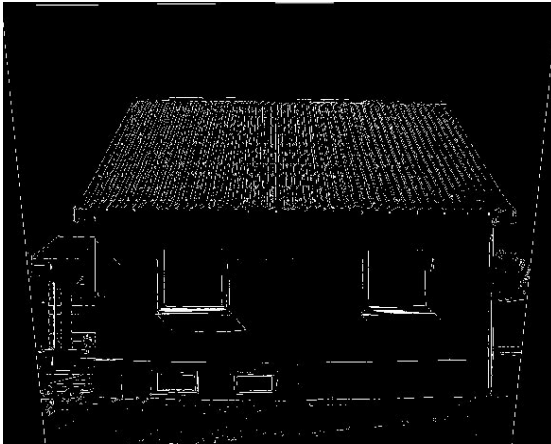
figurerne 3-14 viser resultatet af forsøget i form af binære billeder. Det hvide i billederne viser de detekterede kantpixler.

Filter	Grænseværdi (automatisk)				Kommentar
	Hadsundvej 170	Figur	Østerbro 48	Figur	
Sobel	0.0979	3	0.1229	9	Fine facadekanter på Hadsundvej. Dog ej top. Ingen græs vist. På Østerbro facadekanter ok.
Prewitt	0.0968	4	0.1216	10	Fine facadekanter på Hadsundvej. Dog ej top. Ingen græs vist. På Østerbro er facadekanter ok.
Roberts	0.1383	5	0.1845	11	Fine facadekanter på Hadsundvej. Dog ej top. Ingen græs vist. På Østerbro er facadekanter utydelige, men ellers få kanter.
Canny	0.0250/0.0625	6	0.0375/0.0938	12	Alle facadekanter fundet. Dog ej bund i Hadsundvej. Græs osv. vist. På Østerbro lidt for mange kanter.
LoG	0.0046	7	0.0061	13	Kanter ej skarpe på Hadsundvej. Græs osv. vist. Østerbro også med uskarpe kanter. En del mursten detekteret.
Zero cross	0.0250/0.0625	8	0.0375/0.0938	14	Alle facadekanter fundet. Dog ej bund i Hadsundvej. Græs osv. vist. På Østerbro lidt for mange kanter. Som Canny

Figur 2: Liste over forsøg med forskellige filtre i Matlab.

Derefter er der gennemført et forsøg med de tre filtre Prewitt, LoG og Canny med henblik på at se grænseværdiens indflydelse på det færdige resultat. Her sættes grænseværdierne manuelt til forskellige værdier. Figur 15 viser en tabel over forsøget, mens figurerne 16-28 viser resultatet af forsøget i form af binære billeder. Resultaterne kan også ses på CD'en i bilag 1G i en højere opløsning.

Resultaterne af begge forsøg kommenteres i figur 2 og 15.



Figur 3: Hadsundvej 170. Kantpixler detekteret med Sobel filter. Grænseværdien er sat automatisk.



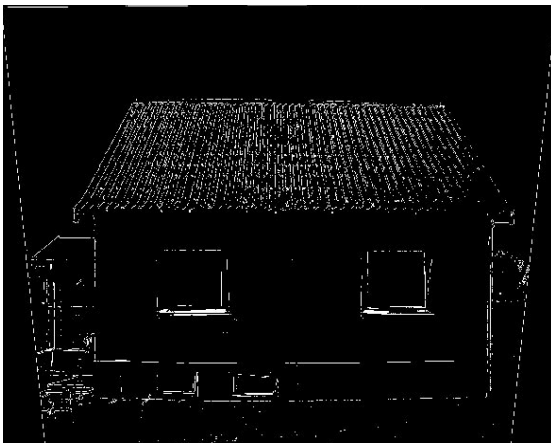
Figur 6: Hadsundvej 170. Kantpixler detekteret med Canny filter. Grænseværdien er sat automatisk.



Figur 4: Hadsundvej 170. Kantpixler detekteret med Prewitt filter. Grænseværdien er sat automatisk.



Figur 7: Hadsundvej 170. Kantpixler detekteret med LoG filter. Grænseværdien er sat automatisk.



Figur 5: Hadsundvej 170. Kantpixler detekteret med Roberts filter. Grænseværdien er sat automatisk.



Figur 8: Hadsundvej 170. Kantpixler detekteret med Zero-cross filter på et Canny filter. Grænseværdien er sat automatisk.



Figur 9: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Sobel filter. Grænseværdien er sat automatisk.



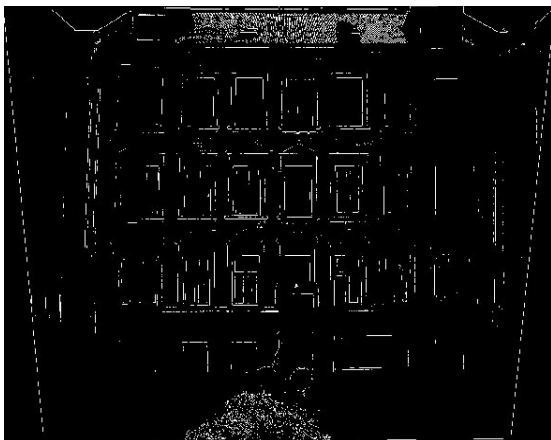
Figur 12: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Canny filter. Grænseværdien er sat automatisk.



Figur 10: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Prewitt filter. Grænseværdien er sat automatisk.



Figur 13: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med LoG filter. Grænseværdien er sat automatisk.



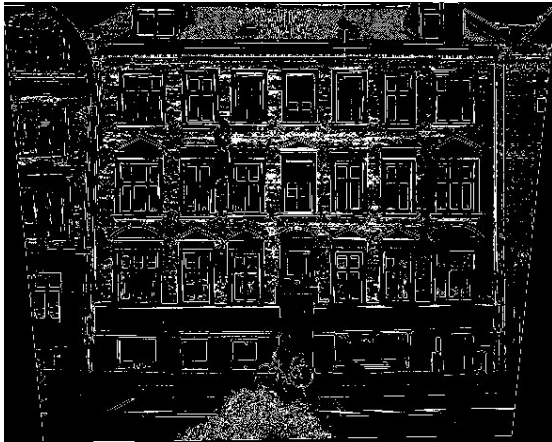
Figur 11: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Roberts filter. Grænseværdien er sat automatisk.



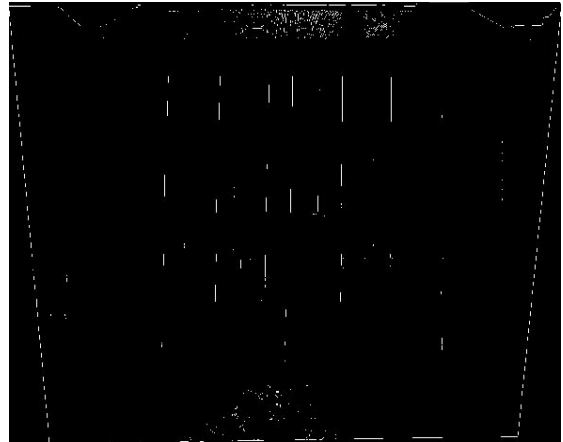
Figur 14: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Zero-cross filter på et Canny filter. Grænseværdien er sat automatisk.

Figur	Filter	Grænseværdi	Kommentar
16	Prewitt	0.05	Indeholder for mange kanter pga. mursten m.v.
17	Prewitt	0.15	Indeholder ca. kun facadens kanter og vinduer. Dog ej bunden. Bedste bud blandt Prewitt
18	Prewitt	0.20	Indeholder for få kanter til genkendelse af facadens kanter
19	Prewitt	0.25	Indeholder for få kanter til genkendelse af facadens kanter. Grænseværdier over 0.5 = sort billede
20	LoG	0.001	Alt for mange kanter. Nær alle mursten vist.
21	LoG	0.005	Lidt bedre end det forrige, men stadig for mange kanter
22	LoG	0.01	De fleste mursten forsvundet. Ok bud på facadekanter
23	LoG	0.015	Indeholder ca. kun facadens kanter og vinduer. Dog ej bunden og kun lidt af toppen. Ok bud
24	Canny	0.05/0.1	Alt for mange kanter. Der vises mursten
25	Canny	0.05/0.2	Viser næsten kun facadekanter og vinduer. Fint bud
26	Canny	0.01/0.011	Alt for mange kanter. Nær alle mursten vist.
27	Canny	0.01/0.1	For mange kanter. Mange mursten vist.
28	Canny	0.01/0.2	Viser næsten kun facadekanter og vinduer. Fint bud

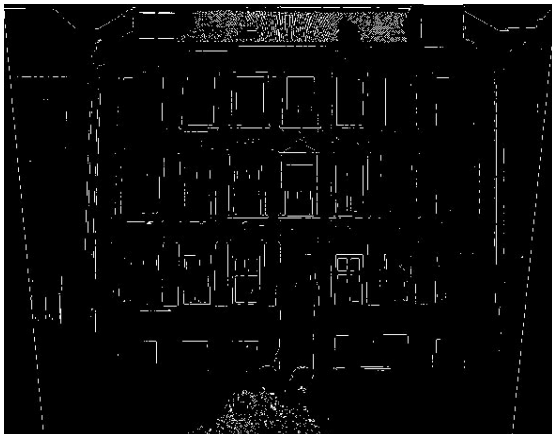
Figur 15: Forsøg med forskellige grænseværdier ved anvendelse af tre forskellige filtre. Input billedet stammer fra Østerbro 48.



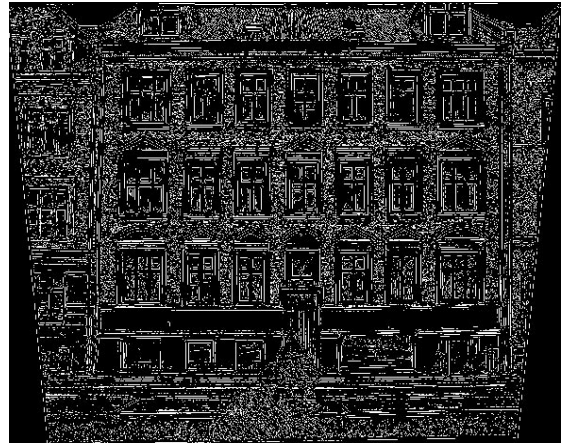
Figur 16: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Prewitt filter. Grænseværdien er 0.05.



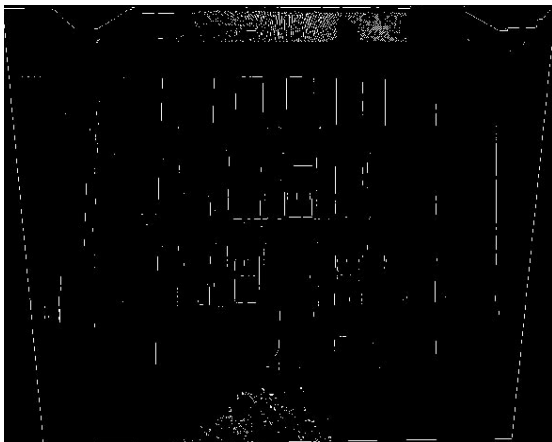
Figur 19: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Prewitt filter. Grænseværdien er 0.25.



Figur 17: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Prewitt filter. Grænseværdien er 0.15.



Figur 20: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med LoG filter. Grænseværdien er 0.001



Figur 18: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Prewitt filter. Grænseværdien er 0.20.



Figur 21: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med LoG filter. Grænseværdien er 0.005.

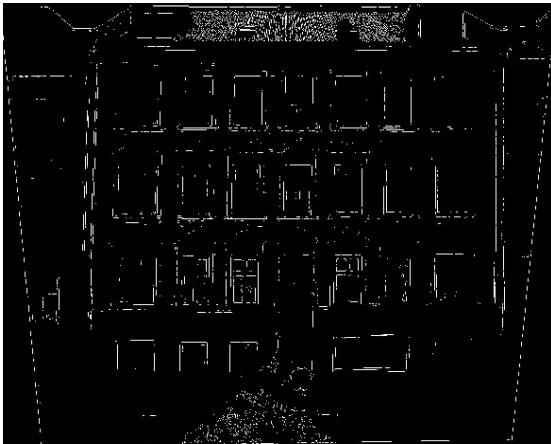




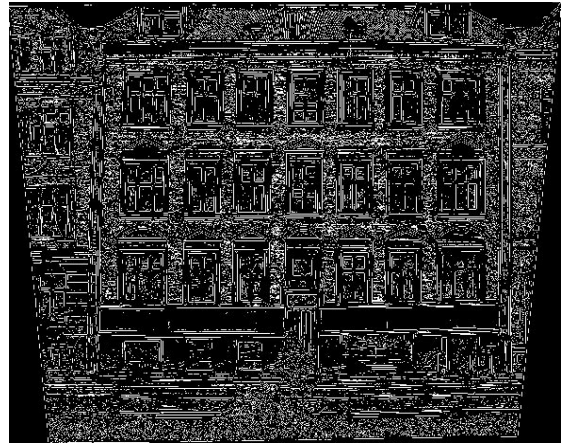
Figur 22: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med LoG filter. Grænseværdien er 0.01.



Figur 25: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Canny filter. Grænseværdien er 0.05/0.2.



Figur 23: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med LoG filter. Grænseværdien er 0.015.



Figur 26: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Canny filter. Grænseværdien er 0.01/0.011.



Figur 24: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Canny filter. Grænseværdien er 0.05/0.1.



Figur 27: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Canny filter. Grænseværdien er 0.01/0.1.



Figur 28: Østerbro 48. Kantpixler detekteret med Canny filter. Grænseværdien er 0.01/0.2.





# Bilag 8: Ordliste

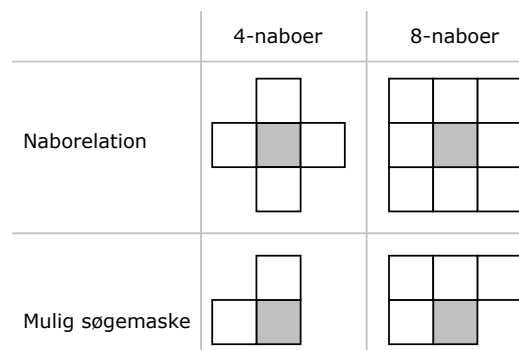
## Billedfilens header

Digitale billeder kan beskrives som en lang tekststreng, der beskriver de enkelte pixels farveværdi. Den første del af denne tekststreng kaldes for "headeren". Heri kan der blandt andet også stå noget om, hvilket format billedet er gemt for eksempel jpeg eller tif. Altså en slags metadata for billedet.

## CC-analyse

CC-analyse er en forkortelse for Connected Components Analyse, der anvendes til at finde de pixler, som tilhører de enkelte bygninger. En CC-analyse markerer hvilke pixler, der hører sammen i ét objekt ved at sætte en "mærkat" på det pågældende objekt. CC-analysen markerer pixler som objekter på baggrund af pixelværdien samt pixelernes naborelationer, det vil sige sammenhæng med hinanden. For binære billeder markeres pixler som ét objekt, hvis de har pixelværdien 1. Arbejdes med gråtoneværdier, markeres pixelerne som et objekt, hvis pixelernes gråtoneværdier ligger indenfor et forud defineret interval. Der findes to grader af naborelationer: 4-naboer og 8-naboer. På figuren ses definitionen af de to typer naborelationer. En 4-naborelation har fire naboer - to horisontalt og to vertikalt, mens en 8-naborelation også har fire naboer på diagonalerne. Figuren viser endvidere nogle mulige søgemasker for henholdsvis 4-naborelationen og 8-naborelationen. Nogle gange ønskes også at inkludere "naboens nabo" som tilhørende objektet. Derfor kan søgemaskernes størrelser variere. Billedet gennemses pixel for pixel begyndende i øverste venstre hjørne mod højre, og for den aktuelle pixel kontrolleres, om der findes en pixel i søgemasken, der allerede har

fået angivet en mærkat. Er dette tilfældet, gives den aktuelle pixel samme mærkat, hvorved de to pixlers sammenknyttes. [Frederiksen m.fl., 2004, s. 20], [www.tjhsst.edu, 05.11.2003]



*De to grader af naborelationer. [Frederiksen m.fl., 2004, s. 20]*

## CCD

Charge-Coupled Device (CCD) er en lysfølsom chip, der lagrer dataet for et billede i digitale kamera, således at hver pixel (billed element) er konverteret til et elektrisk ladning med intensitet svarende til en farve i farvespektret.

## Clusteranalyse

En clusteranalyse er en metode til at klassificere og gruppere pixler i et billede med samme egenskaber. Pixelerne kan opdeles i grupper efter for eksempel RGB-farver, hvor hver farve er en parameter. De pixler som har samme eller lignende RGB værdi grupperes i et cluster ved hjælp af statistiske værktøjer. Det kan dog også handle om andre parametre. Metoden anvendes hovedsageligt i forbindelse med remote sensing, men kan også anvendes i forbindelse med laserscanning.

## DTM

DTM står for Digital Terræn Model, der som ordene siger er en model af terrænet. Modellen består af en række tredimensionelle punkter og kan være fremkommet ved laserscanning, fotogrammetri eller ved terrestrisk måling af punkter på jorden. Ved laserscanning dannes først en DSM, hvorefter der ud fra denne model dannes en DTM. Fotogrammetrisk kan modellen fremstilles manuelt ved måling af punkter i en stereomodel eller automatisk ved hjælp af interessepunkter og autokorrelation. Punkterne i modellen kan være organiseret irregulært eller som et grid. Nøjagtigheden af terrænmodellen afhænger af fremstillingsmetoden.

## DSM

DSM står for Digital Surface Model, eller på dansk Digital Overfalde Model, der som ordene siger er en model af en overflade. Modellen indeholder ud over terræn også bygninger, træer, etc. Modellen består af en række tredimensionelle punkter og kan være fremkommet ved laserscanning, fotogrammetri. Fotogrammetrisk kan modellen fremstilles manuelt ved måling af punkter i en stereomodel eller automatisk ved hjælp af interessepunkter og autokorrelation. Punkterne i modellen kan være organiseret irregulært eller som et grid. Nøjagtigheden af overflademodellen afhænger af fremstillingsmetoden.

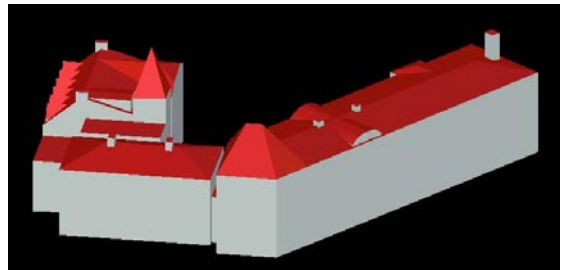
## Dynamisk model

I en dynamisk model ændres positionen for at kigge på modellen kontinuerligt, og for hver ny position beregnes og vises modellen i et nyt perspektiv. De genererede to-dimensionelle perspektivbilleder kan vises ét efter ét langsomt efter hinanden som en billedserie eller hurtigt efter hinanden som en film. [Höhle, 1998, s.143]

## Flademodel

En flademodel er en 3D-model dannet på bag-

grund af en trådmodel. Der dannes således flader på baggrund af vektorerne i trådmodellen.



Eksempel på en flademodel. [CD fra COWI]

## Fotorealistisk 3D-bymodel

En fotorealistisk 3D-bymodel består af en flademodel af byen, hvor fladerne udfyldes af digitale billeder [Höhle, 1998, s.142-143]. Endvidere kan 3D-bymodellen indeholde terrænet, veje, træer eller andre fysiske objekter.

## Geometrisk opløsning

Udtrykket billedets "geometriske opløsning" er en beskrivelse af hvad en pixel i billedet svarer til i virkeligheden. Den geometriske opløsning beregnes ved hjælp af billedets målforhold og kendskab til pixelernes størrelse.

## GPS

Global Position System forkortes GPS. GPS er et system til bestemmelse af positioner. Ved afstandsmålinger mellem navigationssatellitter og en modtager kan modtagerens position bestemmes. Det amerikanske GPS-system hedder NAVSTAR, og det Russiske GPS-system hedder GLONASS. Europæerne planlægger at lancere et nyt GPS-system kaldet Galileo, der forventes at kunne tages i brug 2008.

## Højrehåndsreglen

Rotationer er ofte defineret ved højrehåndsreglen, hvilket betyder, at der gribes om den pågældende akse, der skal roteres om, således at tommelfin-

geren peger væk fra origo. Rotationen om den pågældende akse er således positiv i den retning, som de øvrige finger griber om akslen.

## IMU

IMU står for Inertial Measurement Unit. En IMU består af tre gyroer og tre accelerometre, der henholdsvis måler vinkelhastigheder og accelerationer. Disse observationer kan omregnes til vinkler og hastigheder i forhold til IMU'ens tredimensionelle koordinatsystem.

## Inklinometer

Et inklinometer kan bestemme om der er vipning omkring lodlinien, eller en anden defineret reference. Et inklinometer hedder også et tiltmeter.

## INS

INS står for Inertial Navigation System. Et INS indeholder en IMU, men består også af beregningsrutiner til bestemmelse af position, rotationer og hastighed på baggrund af output fra IMU'en. INS'et anvendes ofte i flyfotografering sammen med GPS til bestemmelse af flyets position og orientering.

## Landmark

Et landmark er fremtrædende i bybilledet. Et landmark kan for eksempel være en domkirke, et rådhus, etc.

## Location Based Service

En location based service finder den geografiske placering af en mobil enhed, og kan på baggrund af den geografiske placering give oplysninger om det givne sted.

## Navigerbar model

I en navigerbar model kan brugeren selv bestem-

me positionen og retningen, hvorfra modellen ønsket set. Brugeren kan også vælge at rotere eller tippe modellen for at se modellen fra en bestemt position. Fra hver position dannes to-dimensionelle perspektivbilleder, som beregnes direkte. [Höhle, 1998, s.143]

## Odometer

Et odometer er en triptæller. Det vil sige, at et odometer anvendes til bestemmelse af hvor langt et køretøj bevæger sig.

## PDA

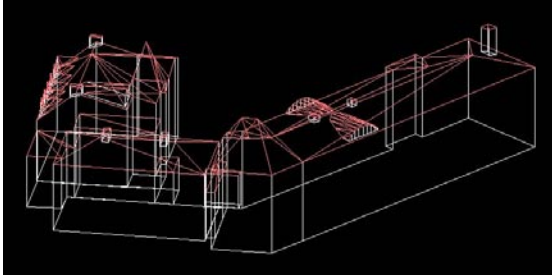
PDA står for Personal Digital Assistant. Anvendes som digital kalender, telefonbog, etc. Flere PDA'er har trådløs adgang til internettet. Kan også indeholde GPS-modtager og kortværk, og kan således anvendes til navigation.

## True ortofotos

Et almindeligt ortofoto er korrigeret for højdeforskydninger ved hjælp af en DTM. Det betyder, at der i et almindeligt ortofoto ikke er korrigeret for de højdeforskydninger, der kommer som følge af bygningers højde, og bygninger, der ligger uden for billedmidtpunktet, hælder således. I et true ortofoto anvendes en DSM, hvilket betyder, at der også kan korrigeres for højdeforskydninger på bygninger. Når bygningerne flyttes på plads, vil der forekomme skjulte områder bag bygninger. Disse skjulte områder udfyldes med billedmateriale fra nabobilledet.

## Trådmodel

En trådmodel er den simpleste form for en 3D-model. Den består af vektorer, der tilsammen danner bygninger etc. i form af lukkede polygoner. [Höhle, 1998, s.142] Nedenstående kan et eksempel på en trådmodel ses.



*Eksempel på trådmodel. [CD fra COWI]*



Dette afgangsprøve omhandler konstruering af et mobilt kortlægnings-system til automatiseret indsamling og påsætning af facadebilleder på en eksisterende 3D-bymodel. I projektet belyses endvidere de problemer, der er ved opbygningen af et mobilt kortlægnings-system.

Inden konstrueringen af det mobile kortlægnings-system analyseres hvilke krav, de danske producenter har i forbindelse med de nuværende metoder til fremstilling af fotorealistiske 3D-bymodeller. Ud fra denne analyse samt projektgruppens interesser vælges det at konstruere en bil med en positioneringsenhed og en kortlægningsenhed til indsamling af data til en fotorealistisk 3D-bymodel. Som positioneringsenhed vælges tre GPS-modtagere, der måler RTK, og som kortlægningsenhed vælges et digitalt kamera.

I projektet konstrueres det mobile kortlægnings-system med beregnings-rutiner til bestemmelse af kameraets ydre orientering i forhold til referen-cekoordinatsystemet. Endvidere udarbejdes en billedopretningsrutine, og der opstilles et løsningsforslag til en metode til korrektion for afvigelsen mellem størrelsen på facaden i 3D-bymodellen og den virkelige facade. Denne metode indebærer kantdetektering og den kan fjerne de sidste hældningsforskydninger i det oprettede facadebillede forårsaget af positioneringsenhedens manglende nøjagtighed. Da kantdetekteringsmetoden ikke implementeres i projektet, udarbejdes en alternativ metode til korrek-tion for afvigelsen mellem den virkelige facade og facaden i 3D-modellen, ved at angive tagudhængets størrelse. Denne metode implementeres og kontrolleres.

Det konkluderes, at den implementerede metode er anvendelig til at ind-samle og oprette facadebilleder til en fotorealistisk 3D-bymodel, hvis byg-ningerne ikke skal ses på klods hold. Stilles der derimod større krav til den fotorealistiske 3D-bymodel, skal den ydre orientering af kameraet bestem-mes bedre. Overordnet set er der stadig en del problemer, der skal løses, før det mobile kortlægnings-system med fordel kan anvendes i praksis.