

Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Doktorska disertacija

**VZPOSTAVITEV KORESPONDENCE PRI
VELIKIH ODMIKIH DVEH KAMER ZA
POLJUBNO IZBRANO TOČKO KOT
PRISPEVEK K IZBOLJŠANJU
RAZPOZNAVANJA SLIK**

Maribor, junij 2011

Avtor: Peter Podbreznik
Mentor: izr. prof. dr. Božidar Potočnik
Somentor: red. prof. dr. Danijel Rebolj

Avtor: Peter Podbreznik

Naslov: Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih dveh kamer za poljubno izbrano točko kot prispevek k izboljšanju razpoznavanja slik

UDK: 004.89/.93(043.3)

Ključne besede: spremljanje gradnje, spremljanje aktivnosti na gradbišču, ujemanje slik, korespondenčne točke, veliki odmiki kamer, poljubno izbrana točka, homografija, segmentacija, epipolarna geometrija, analitični model kamere, parametri kamere, projekcijska matrika, umerjanje kamer, 3D rekonstrukcija, temperaturne spremembe

Število izvodov: 8

Založniške pravice: Univerza v Mariboru



Univerza v Mariboru

Maribor, 29. 3. 2011
Številka: DR 28/2011/425-MGM

Na osnovi 287., 140., 142. in 144. člena Statuta Univerze v Mariboru (Statut UM-UPB8, Ur. l. RS, št. 1/2010) ter sklepa 40. redne seje Senata Univerze v Mariboru z dne 29. 3. 2011 v zvezi z vlogo doktorske kandidata Petra Podbreznika za sprejem odločitve o predlagani temi doktorske disertacije in mentorja,

izdajam naslednji

SKLEP

Odobri se tema doktorske disertacije Petra Podbreznika s Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko z naslovom »Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih dveh kamer za poljubno izbrano točko kot prispevek k izboljšanju razpoznavanja slik«. Za mentorja se imenujeizr. prof. dr. Božidar Potočnik, za somentorja pa red. prof. dr. Danijel Rebolj. Kandidat mora članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih najpozneje do 28. 3. 2015.

Obrazložitev:

Kandidat Peter Podbreznik je dne 18. 11. 2010 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko vložil vlogo za potrditev teme doktorske disertacije z naslovom »Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih dveh kamer za poljubno izbrano točko kot prispevek k izboljšanju razpoznavanja slik«. Za mentorja je bil predlaganizr. prof. dr. Božidar Potočnik, za somentorja pa red. prof. dr. Danijel Rebolj.

Senat Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko je na osnovi pozitivnega mnenja komisije za oceno teme doktorske disertacije, ki je ugotovila, da kandidat izpolnjuje pogoje za pridobitev doktorata znanosti, in ocenila, da je predlagana tema ustrezna, sprejel pozitivno mnenje in poslal predlog teme doktorske disertacije s predlogom mentorja in somentorja v odobritev Senatu univerze.

Senat Univerze v Mariboru je po proučitvi vloge in na osnovi določil Statuta Univerze v Mariboru sprejel svojo odločitev o predlagani temi doktorske disertacije in imenoval mentorja in somentorja, kot izhaja iz izreka.

V skladu s 144. členom Statuta Univerze v Mariboru mora kandidat za pridobitev doktorata znanosti najpozneje v štirih letih od dneva izdaje tega sklepa, članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih. Kandidatu je bil določen rok glede na datum sprejetja teme na pristojnem organu.

Pouk o pravnem sredstvu:

Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat Univerze v Mariboru v roku 8 dni od prejema tega sklepa.

Obvestiti:

1. Kandidata.
2. Fakulteto.
3. Arhiv.



Rektor:
Prof. dr. Ivan Rozman



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Na Univerzi v Mariboru,
Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko je

Peter Podbreznik, univ. dipl. inž. rač. in inf.,

dne 24. 6. 2011 uspešno zagovarjal svojo doktorsko disertacijo z naslovom

**Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih dveh kamer za
poljubno izbrano točko kot prispevek k izboljšanju razpoznavanja slik**

pred komisijo v sestavi:

prof. dr. Igor Tičar, predsednik
izr. prof. dr. Božidar Potočnik, mentor – član
prof. dr. Danijel Rebolj, somentor – član
doc. dr. Peter Peer, član

Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih dveh kamer za poljubno izbrano točko kot prispevek k izboljšanju razpoznavanja slik

UDK: 004.89/.93(043.3)

Ključne besede:

spremljanje gradnje, spremljanje aktivnosti na gradbišču, ujemanje slik, korespondenčne točke, veliki odmiki kamer, poljubno izbrana točka, homografija, segmentacija, epipolarna geometrija, analitični model kamere, parametri kamere, projekcijska matrika, umerjanje kamer, 3D rekonstrukcija, temperaturne spremembe

Povzetek:

Eden izmed možnih načinov spremljanja aktivnosti na gradbišču je zajemanje slik z več kamerami, kateremu sledi razpoznavanje posameznih gradbenih elementov in ugotavljanje izgotovljenosti objekta na osnovi 4D modela. Takšen pristop zahteva vzpostavitev korespondence med slikami, zajetimi iz različnih pogledov (kamer). Osnovni problem je torej vzpostavitev korespondence za poljubno izbrano točko, ki se lahko nahaja kjerkoli na sliki (tudi na področjih slike z zelo podobno barvo ali teksturo). V doktorski disertaciji smo razvili novo robustno metodo ASIFT-SH za vzpostavitev korespondence za poljubno izbrano točko pri velikih odmikih dveh kamer, ki je mešanica metod ASIFT, segmentacije in lokalne homografije. Ta metoda sestoji iz štirih korakov: i.) določitve začetnih korespondenčnih točk na slikah obeh pogledov z metodo ASIFT, ii.) združevanja korespondenčnih točk iz prvega koraka v ustrezne podmnožice na osnovi segmentiranih regij, iii.) izračuna lokalnih homografij za posamezno podmnožico korespondenčnih točk, ki pripadajo posamezni segmentirani regiji in iv.) izračuna korespondenčne točke z uporabo ustrezne lokalne homografije. Metoda ASIFT-SH v primerjavi z metodo, ki določi korespondenčne točke na osnovi iskanja v okolici epipremice (metoda EPI), zagotavlja bistveno boljše rezultate, še posebej na področjih slike s podobno intenziteto slikovnih elementov. Povprečna napaka korespondenčnih točk, izračunanih z našo metodo, je nekaj slikovnih elementov, medtem ko je odstopanje korespondenčnih točk, vzpostavljenih z metodo EPI, nekaj sto slikovnih elementov.

Kritičen korak metode ASIFT-SH predstavlja segmentacija. Metoda namreč predpostavlja, da segmentirane regije ustrezajo kriteriju koplanarnosti (tj. vse točke v segmentirani regiji ležijo v isti ravnini). V splošnem tega ni mogoče zagotoviti. V naš algoritem smo zato vpeljali še korak adaptivnega prilagajanja, s katerim lahko preoblikujemo segmentirane regije tako, da bolje izpolnjujejo zahtevani kriterij. Vpeljani korak temelji na 3D rekonstrukciji začetnih korespondenčnih točk in iskanju čim manjšega števila ravnin v prostoru, katerim te točke pripadajo. Točke, ki pripadajo posamezni ravnini, predstavljajo novo nastale podmnožice začetnih korespondenčnih točk. Rezultati meritev so pokazali, da vpeljava dodatnega koraka, ki omogoča adaptivno prilagajanje segmentiranih regij na osnovi 3D rekonstrukcije, tj. adaptivna različica metode ASIFT-SH, zagotavlja povečanje natančnosti izračunanih korespondenčnih točk.

Uspešnost adaptivnega prilagajanja segmentiranih regij je neposredno odvisna od 3D rekonstrukcije, na katero pa močno vplivajo notranji in zunanji parametri kamere. Ker so kamere na gradbišču izpostavljene različnim okoljskim dejavnikom, ki vplivajo tudi na parametre kamere, smo v naši raziskavi preučili tudi vpliv temperaturnih sprememb na geometrijske lastnosti kamere. Vpliv temperature smo ugotavljali tako za eno kamero, kot tudi za sistem kalibriranih kamer, pri čemer vpliva na elektroniko kamere nismo proučevali. Najprej smo dopolnili analitični model kamere s členom, ki modelira vpliv temperaturnih sprememb na delovanje posamezne kamere. Takšen modificirani analitični model kamere omogoča kvantitativno oceno vpliva temperaturnih sprememb na delovanje kamere.

Sprememba temperature neposredno vpliva tudi na natančnost sistema kalibriranih kamer. Oceno takšnega odstopanja smo določili eksperimentalno, saj analitična določitev napake ni mogoča. Na koncu smo definirali skupno odstopanje (napako) kalibriranih kamer, kjer smo upoštevali tako odstopanje zaradi numerične napake kalibracijske metode in postopka 3D rekonstrukcije, kot tudi odstopanje, ki je posledica vpliva temperaturnih sprememb. Rezultati raziskave so pokazali, da se vpliv temperature zmanjšuje z večanjem razdalje med kamero in opazovanim objektom. V predvidenih delovnih pogojih na gradbišču, se vpliv temperaturnih sprememb na sliki odraža za manj kot en slikovni element.

Estimating any correspondence between two widely-separated views for arbitrarily-selected point, as a contribution to improving image recognition

UDK: 004.89/.93(043.3)

Key words:

activity tracking, construction monitoring, image matching, corresponding points, large separated views, arbitrarily selected point, homography, segmentation, epipolar geometry, analytical camera model, camera parameters, projection matrix, camera calibration, 3D reconstruction, temperature variations

Abstract:

One possible method of monitoring activities on the building site is based on capturing images using multiple cameras, followed by the recognition of individual building components, and then identifying an object's status based on a 4D model. Such an approach requires the establishment of some correspondence between those images captured from different viewpoints (cameras). The basic problem is, therefore, the establishment of any correspondence at an arbitrarily selected point, which could be located anywhere on the image (also on image areas with uniform colour or texture). This doctoral dissertation develops a new robust ASIFT-SH method for establishing any correspondence between arbitrarily-selected points within two widely-baselined cameras, which is a combination of the ASIFT method, segmentation, and local homography. This method consists of four steps: i) determining the initial corresponding points within the images of both views by using the ASIFT method, ii.) grouping of initial corresponding points from the first step into subsets, based on segmented regions iii.) calculation of local homographies for a particular subset of corresponding points, and iv.) determining any correspondence between arbitrary points from a particular camera's viewpoint, by using a suitable local homography. The ASIFT-SH method, when compared to that of searching the area surrounding an epipolar line (EPI method), provides more accurate results, especially on surfaces with similar pixel intensities. The average error in our method comes within the order of a few pixels, whilst for the EPI method it is within the order of a few hundred pixels.

The critical step of the ASIFT-SH method concerns segmentation. The segmentation presupposes that the segmented regions correspond to the coplanarity criteria (i.e., all points in the segmented region are located within the same plane). In general, this cannot be ensured. Therefore, we have introduced into our algorithm a step for adaptive adjustment, within which segmented regions are remodelled so that they better meet the required criterion. This introduced step is based on 3D reconstruction of the initial corresponding points, and a search for the minimal number of planes within the 3D space, to which these points belong. Those points that belong to a particular plane, represent a newly-created subset of the initial corresponding points. The results point out that the introduction of additional step enables an adaptive adjustment of segmented regions based on the 3D reconstruction, i.e. an adaptive version of the ASIFT-SH method, thus assuring more accurate calculation of the corresponding points.

The success of adaptively adjusting segmented regions directly depends on the 3D reconstruction, which is, however, strongly affected by intrinsic and extrinsic camera parameters. Since cameras at a building site are exposed those different environmental factors which also affect the cameras' parameters, therefore, in our study we investigated any influence of temperature variations on the geometric properties of the camera. Temperature influence on the geometrical properties of both a single camera and a calibrated camera system was estimated, whereas the influence on camera electronics was ignored. Firstly, the analytical camera model was supplemented with a term, which models the influence of temperature variations over a single camera's operation. A modified analytical camera model enabled quantitative assessment regarding the influence of temperature variations on a camera's operation.

Temperature variations also directly influence the accuracies of calibrated cameras. The inability to analytically-determine the calibration method error magnitude, led us to experimentally-estimate any errors regarding calibrated cameras. Finally, the total errors regarding calibrated cameras were derived at by combining the numerical errors of the calibration method and 3D reconstruction with those errors originating from temperature variations. The results show that the influence of temperature variations decreases when increasing the distances of the observed objects from the cameras. On a typical building site, the temperature influence is reflected in the image as an error of less than one pixel.

Zahvala

Za strokovno pomoč in vodenje pri podiplomskem študiju in izdelavi doktorske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Božidarju Potočniku, ki me je tekom študija vzpodbujal in usmerjal pri raziskovalnem delu. Prav tako se zahvaljujem tudi somentorju prof. dr. Danijelu Rebolju, ki mi je pomagal pri odkrivanju in raziskovanju interdisciplinarnega področja gradbene informatike ter me pri tem aktivno vzpodbujal.

Za pomoč in vodenje se zahvaljujem tudi delovnemu mentorju študija prof. dr. Borutu Žaliku, ki mi je v prvih letih podiplomskega študija pomagal in me usmerjal.

Zahvaljujem se tudi sodelavcem Centra za gradbeno informatiko na Fakulteti za gradbeništvo, ki smo mi nemalokrat pomagali in mi svetovali.

Zahvala gre tudi moji družini, predvsem moji partnerki in življenski sopotnici Mojci, ki me je na tej poti vseskozi podpirala.

Peter Podbreznik

Kazalo

Seznam pomembnejših oznak	xiii
Seznam pomembnejših okrajšav	xv
1 Uvod	1
2 Pregled	8
2.1 Sistemi za avtomatsko spremljanje gradnje	8
2.2 Vzpostavitev korespondence med slikami, na osnovi značilk	10
2.2.1 Vzpostavitev korespondence pri majhnih odmikih kamer	11
2.2.2 Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih kamer	12
2.3 Vpliv temperature na umerjene kamere	13
3 Teoretične osnove	15
3.1 Analitični model kamere	15
3.1.1 Parametri kamere	16
3.1.2 Kalibracija kamer	20
3.2 Homografija	22
3.3 Metoda ASIFT	25
3.3.1 Afini model kamere	25
3.3.2 Princip delovanja metode ASIFT	26
3.4 Vzpostavitev temeljne matrike \mathcal{F}	27
3.4.1 Linearne metode	27
3.4.2 Robustne metode	30
3.5 Segmentacijska metoda	37
3.5.1 Algoritem	38
3.6 3D rekonstrukcija	39
3.6.1 Projekcijska matrika kamere	39

3.6.2	Postopek 3D rekonstrukcije	41
3.7	Metoda RANSAC	42
4	Metoda ASIFT-SH	44
4.1	Postopek določanja korespondence za poljubno izbrano točko pri velikem odmiku dveh kamer	44
4.1.1	Začetne korespondenčne točke	45
4.1.2	Združevanje začetnih korespondenčnih točk v podmnožice	46
4.1.3	Izračun lokalne homografije	48
4.1.4	Določitev korespondenčne točke	48
4.2	Nadgradnja osnovnega postopka za vzpostavitev korespondence z izsledki 3D rekonstrukcije	49
4.2.1	Identifikacija nekoplanarnih segmentiranih regij	49
4.2.2	Preoblikovanje nekoplanarnih segmentiranih regij	50
4.3	Določitev parametrov	52
4.3.1	Segmentacijska metode	52
4.3.2	Metoda RANSAC	53
5	Vpliv temperature na kalibriran sistem kamer	54
5.1	Model temperaturnih sprememb	54
5.1.1	Vpliv temperature na notranje parametre	54
5.1.2	Vpliv temperature na zunanje parametre	56
5.1.3	Modificiranje analitičnega modela kamere	57
5.2	Določitev velikostnega razreda napake	58
5.3	Vpliv temperature na kalibrirani sistem kamer	61
5.3.1	Vpliv zunanje temperature na kalibracijo kamer	62
5.3.2	Vpliv zunanje temperature na določanje rekonstruiranih točk	62
6	Rezultati	65
6.1	Ocena kvalitete zajetih slik	66
6.2	Ocenitev uspešnosti metode ASIFT-SH	66
6.2.1	Rezultati metode ASIFT-SH	68
6.2.2	Rezultati metode ASIFT-SH za različno velike slike	73
6.2.3	Rezultati metode EPI	76
6.3	Ocenitev vpliva temperaturnih sprememb na sistem kalibriranih kamer	77

6.3.1	Vpliv temperaturnih sprememb za posamezno kamero	77
6.3.2	Vpliv temperaturnih sprememb na sistem kalibriranih kamer	80
7	Diskusija in sklepi	88
7.1	Metoda ASIFT-SH	88
7.1.1	Meritve s sintetično pripravljenimi slikami	88
7.1.2	Meritve s slikami stavb in gradbišč	90
7.1.3	Natančnost metode ASIFT-SH za različno velike vhodne slike	96
7.1.4	Metoda EPI	97
7.1.5	Časovna in prostorska zahtevnost delovanja metode ASIFT-SH	98
7.2	Vpliv temperature	103
7.2.1	Vpliv temperature eno kamero	104
7.2.2	Vpliv temperature na sistem kalibriranih kamer	104
7.2.3	Aplikativna vrednost raziskave	106
7.3	Obravnavna hipotez in zastavljene teze	106

Seznam pomembnejših oznak

OZNAKE

T, P	točka
\mathbf{T}, \mathbf{P}	točka v prostoru zapisana v vektorski obliki
Π, Δ	ravnina
\mathbf{u}, \mathbf{v}	vektor
$\mathbf{0}$	ničelni vektor $(0, 0, 0)^T$
\overrightarrow{OP}	vektor, ki povezuje točki O in P
\mathcal{A}	matrika
\mathcal{A}^T	transponirana matrika \mathcal{A}
a_{ij}	element matrike \mathcal{A}
\mathcal{M}	projekcijska matrika kamere
\mathcal{K}	kalibracijska matrika kamere
\mathcal{E}	osnovna matrika
\mathcal{F}	temeljna matrika
\mathcal{H}	matrika za opis homografije
\mathcal{T}	transformacijska matrika
θ, ξ, δ	kot med dvema vektorjema
t	vektor premika
Id	matrika identitete
e, e'	epipol
O, O'	optični center kamere
\mathcal{R}	segmentirana regija

OPERACIJE

$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}$	skalarni produkt vektorjev \mathbf{u} in \mathbf{v}
$\mathbf{u} \times \mathbf{v}$	vektorski produkt vektorjev \mathbf{u} in \mathbf{v}
$(\cdot)(\cdot)$	množenje matrik

Seznam pomembnejših okrajšav

4D model	geometrijski 3D model, ki vsebuje časovno komponento
CCD	svetlobno občutljivi detektor (<i>charge-coupled device</i>)
DLT	direktna linearna transformacija (<i>direct linear transformation</i>)
SVD	metoda singularnega razcepa (<i>singular value decomposition</i>)
LMedS	robustna metoda najmanjše mediane kvadratov (<i>least median of squares</i>) za vzpostavitev temeljne matrike
RANSAC	metoda soglasja naključnih vzorcev (<i>random sample consensus</i>)
PCA	metoda glavnih komponent (<i>principal component analysis</i>)
FOV	vidno polje (<i>field of vision/view</i>)

Poglavje 1

Uvod

Pri gradnji zahtevnih gradbenih objektov je zelo pomembno spremljanje aktivnosti na gradbišču. Če se aktivnosti ne izvajajo skladno s terminskim planom lahko projekt zaide v velike časovne in finančne težave. Zaradi mnogih nepredvidljivih vplivov na gradbišču so odstopanja od plana dokaj pogoste, za uspešne korekcije plana pa je pomembno, da jih zaznamo čim prej. Pomembni so predvsem kritični dogodki, to so tisti, ki se nanašajo na spremembe aktivnosti na t.i. kritični poti terminskega plana. Najpogosteje je ugotavljanje razlik med dejanskim stanjem in planiranim stanjem na gradbišču v domeni nadzorne osebe gradbišča. Reakcijski čas, od trenutka pojavitve odstopanja od načrtovanega poteka pa do trenutka, ko učinkovito ukrepamo, je običajno prevelik. Razlog je v neustreznih organizacijskih strukturah in tehnoloških omejitvah. Z realno-časovnim spremljanjem poteka gradnje [1, 2, 3, 4] želimo zmanjšati reakcijski čas. Hkrati nam 4D modeli omogočajo simulacije poteka gradnje, kar omogoča lažje ugotavljanje prostorsko-časovnih konfliktov (npr. lokacija in gibanje mehanizacije, delovnih skupin itd.) [5].

Navedeni problem lahko rešimo s sistemom 4D-ACT (*Automated Construction Tracking*) [6], katerega konceptualna osnova omogoča avtomatsko spremljanje poteka gradnje in obsega tri module: i) vizualno razpoznavanje posameznih gradbenih elementov [1, 2, 7], ii) spremljanje materialnih tokov in virov s pomočjo značk RFID [8] in iii) dinamičnega komunikacijskega okolja (DyCE – *Dynamic Communication Environment*) [9]. Sistem 4D-ACT omogoča vpogled v stanje poteka gradnje tudi osebam, ki niso neposredno prisotne na gradbišču in imajo le posredni vpliv na potek gradnje (npr. investitorji, vodje oddelkov, projektanti, tehnologi itd). Vloga sistema 4D-ACT je predvsem: i) predstaviti informacije o (ne)skladnosti realnega (tj. dejanskega) in planiranega stanja, ii) zagotavljati zbiranje informacij o materialnih tokovih na gradbišču, iii) vzpostavljati učinkovito komunikacijo med sodelujočimi akterji na aktualnem projektu, iv) zagotavljati komunikacijo z osrednjim informacijskim sistemom podjetja in v) omogočati dostop

do projektne dokumentacije. Ob uspešnem zagotavljanju konsistentnosti podatkov je pomemben vidik še kontekstno odvisni uporabniški vmesnik aplikacije, ki je prilagojen glede na vlogo uporabnika.

Raziskovalno delo v okviru te disertacije je usmerjeno predvsem v vizualno razpoznavanje gradbenih elementov iz digitalnih slik gradbišča. Klasičen pristop razpoznavanja gradbenih elementov iz slike s pomočjo učne množice za rešitev našega problema ni primeren, saj so gradbeni elementi za posamezni gradbeni objekt običajno geometrijsko unikatni. Za uspešno razpoznavanje bi tako potrebovali učno množico z veliko različnimi učnimi elementi, kar vodi v dolgotrajen postopek učenja že za majhen nabor gradbenih objektov. Vzpostavitev ustrezne učne množice bi tako predstavljala znaten napor v procesu gradnje, četudi njena uporaba ne bi bila povsem upravičena. Dodatno omejitev predstavlja še začasna oprema na gradbenem objektu (npr. gradbeni odri, opaži itd.) ter gradbena mehanizacija, ki sta sestavna dela procesa gradnje. Pridobivanje informacij o stanju opazovanega objekta in identifikacija gradbenih elementov z video kamero sta v takšnih okoliščinah omejena, saj med gradnjo objekt običajno ni v celoti viden. Razpoznavanje gradbenih elementov iz posamezne slike gradbišča s pomočjo učne množice zato ne bi zagotavljalo ustrezne stopnje zanesljivosti.

Proces razpoznavanja bistveno izboljšamo tako, da na vhodu zagotovimo dvoje: i.) 4D model, ki služi kot referenčni model, pri identifikaciji gradbenih elementov [2] in ii.) slike gradbišča zajete iz več fiksno nameščenih kamer [1]. 4D model izdelamo z ustreznimi 4D orodji, kot so: *Four-dimensional site management model* (4DSMM) [10, 11], *4D Integrated Site Planning System* (4D-ISPS) [12], *Project 4D Tools* [13], *Synchro Project Constructor* [14]), *VICO software* [15], *4D-ACT* [3, 7] itd. Sodobna 4D orodja vsebujejo veliko množico dodatnih funkcionalnosti, a vsem ostaja skupno povezovanje geometrijskih elementov modela z ustreznimi aktivnostmi iz terminskega plana. Izdelani 4D model zato omogoča za poljubno izbrano časovno značko med procesom gradnje generiranje 3D modela, ki ustreza planiranemu stanju geometrije objekta na gradbišču v danem trenutku. Takšen 3D model imenujemo 3D referenčni model. Zelo smiselno ga je uporabiti namesto učne množice pri identifikaciji gradbenih elementov.

Pri opisanem konceptu pa se pojavi naslednja težava. Pri uporabi 3D referenčnega modela kot učne množice je nujna vzpostavitev korespondence z zajetim slikovnim materialom iz gradbišča (tj. slikami). Posamezni gradbeni element je v 3D referenčnem modelu sestavljen iz množice oglišč ter povezav med njimi. Le-ti opisujejo topologijo gradbenega elementa in so ključnega pomena za njegovo predstavitev. Če projiciramo 3D referenčni model na sliko (ob predpostavki, da se pogleda ujemata), potem projicirana oglišča elementa na sliki v splošnem ne predstavljajo značilnk in posledično tudi ne korespondenčnih točk, saj niso invariantne na zasuk, premik in strig. V splošnem tako projicirane točke ne sovpadajo z značilnkami, zato jih lahko

opredelimo kot poljubno izbrane točke. Značilke so namreč tista karakteristična področja na sliki, ki določajo najbolj prominentne dele slike, glede na različne kriterije, kot so: barva, gradient, tekstura itd. Iz tega lahko zaključimo, da obstoječe metode za vzpostavitev korespondence [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23], ki delujejo zgolj na značilkah, ne omogočajo določitve ustrezne relacije med slikami gradbišča in 3D referenčnim modelom.

Relacijo (tj. korespondenco) med slikami gradbišča in 3D referenčnim modelom je mogoče vzpostaviti tudi na druge načine, in sicer: i.) z geodetskimi meritvami ali ii.) s postopkom za umerjanje kamer [24, 25, 26]. Oba načina sta precej dolgotrajna in v splošnem ne omogočata avtomatiziranega izračuna parametrov. V prvem primeru potrebujemo ustrezno kvalificirano osebo, tj. geodeta, v drugem pa je potrebno zagotoviti ustrezen kalibracijski vzorec, tj. običajno neke vrste šahovnico v vidnem polju kamer. Na osnovi tega vzorca se identificirajo značilke, nato se vzpostavi korespondenca in šele zatem se izvede postopek umerjanja. Dobljene vrednosti parametrov nato priredimo ustreznim pogledom v 3D referenčnem modelu. V idealnem primeru, tj. brez kakršnihkoli napak, bi zajete slike iz gradbišča in projicirane slike posameznih pogledov 3D referenčnega modela prikazovale iste dele gradbenega objekta, ali povedano drugače, slike modela in gradbišča bi bile skladne. Na sliki 1.1 je prikazan primer skladnosti med projiciranim 3D referenčnim modelom in sliko gradbišča, pri čemer je s prekinjeno črto ponazorjena korespondenca med slikama za eno točko. Zaradi dinamičnega dogajanja na gradbišču je potrebno



Slika 1.1: Korespondenca med 3D referenčnim modelom in sliko prve kamere (prekinjena črta). Korespondenca med točkama iz obeh slik je bila izračunana z metodo ASIFT-SH (polna črta).

položaj nameščenih kamer pogosto spreminjati. Dejansko jih prestavimo na ustrežnejšo lokacijo, s tem pa se spremenijo tudi parametri kamer. V tem primeru je potrebno ponovno uskladiti pogled kamere v 3D referenčnem modelu s pogledi prestavljenih kamer na gradbišču. Za ponovno določanje parametrov kamere je potrebno bodisi znova izvesti geodetske meritve ali pa kamere še enkrat umeriti. Kot smo že omenili, je v prvem primeru potrebno posredovanje geodeta, po drugi strani pa je tudi umerjanje kamer na gradbišču lahko problematično, saj potrebujemo kalibracijski vzorec za umerjanje in več kot dva pogleda kamer. Kamer na gradbišču ni mogoče

namestiti v neposredni bližini objekta. Vzrok zato je v samem procesu gradnje, zato morajo kamere biti nameščene vsaj nekaj deset metrov od objekta. Organizacija gradbišča in proces gradnje omejujeta število kamer, kar neposredno vpliva na postavitev sistema kamer (tj. na topologijo le-teh). Ko upoštevamo vse omejitve, so kamere na koncu nameščene tako, da je tudi razdalja med njimi nekaj deset metrov. Če sta medsebojna oddaljenost kamer in oddaljenost kamer od gradbenega objekta istega velikostnega razreda, tedaj govorimo o velikih odmikih kamer (*widely-separated views*). V takšnih primerih je prekrivanje pogledov relativno majhno, kar pomeni, da je posamezni del gradbenega objekta viden le iz dveh, največ treh pogledov (en pogled pomeni polje FOV kamere).

Naj še omenimo, da metode za umerjanje kamer za uspešno delovanje zahtevajo več kot dva pogleda. Problem je mogoče ublažiti tako, da zahtevamo skladnost med slikami gradbišča in 3D referenčnim modelom le za izbrane poglede, medtem ko za določitev relacij med preostalimi pogledi kamer uporabimo ustrezne metode, ki omogočajo vzpostavitev korespondence med slikami različnih pogledov pri velikih odmikih kamer. Ob upoštevanju vseh pogojev in omejitev je sistem kamer lahko zasnovan kot zaporedje medsebojno povezanih kamer, ki so običajno oddaljene nekaj deset metrov. Ker so odmiki med kamerami veliki, je potrebno uporabiti ustrezne metode za vzpostavitev korespondence, tj. metode za vzpostavitev korespondence za velike odmike kamer.

V splošnem je korespondenca med dvema slika določena z značilkami. Značilke predstavljajo le najbolj prominentne točke na sliki, ki so karseda invariantne (nespremenljive) za različne transformacije med pogledi kamer, npr. na zasuk, premik ali strig. Praviloma te točke niso enakomerno razpršene po celotni sliki, ampak so običajno zgoščene na posameznih delih slike. Kot primer navedimo, da so področja na slikah, ki predstavljajo predvsem ravne površine posameznih gradbenih elementov, običajno še zelo podobnih lastnosti (npr. podobna barva in tekstura), zelo slabo pokrita s korespondenčnimi točkami. Vzpostavitev korespondence za takšna območja obstoječe metode ne zagotavljajo.

Obstoječe metode, tudi najbolj sofisticirane kot npr. [16, 23], ne zagotavljajo ustrezne rešitve, s katero bi ohranili zastavljeno stopnjo avtomatizacije in fleksibilnosti pri reševanju našega osnovnega problema. V naši doktorski disertaciji bomo razvili metodo, ki bo omogočala izračun korespondenčne točke pri velikih odmikih kamer tudi za poljubno izbrano točko. Opisani problem bomo rešili z metodo ASIFT-SH (prvi preliminarni rezultati so bili objavljeni v [27, 28]), ki vzpostavi korespondenco za poljubno izbrano točko pri velikih odmikih dveh kamer (glej polno črto na sliki 1.1). Pri tem je potrebno zagotoviti skladnost s 3D referenčnim modelom le za eno kamero. Korespondenco za poljubno točko pa zagotovimo računsko z metodo ASIFT-SH. Le-ta temelji na uporabi značilk ASIFT [23], segmentacijske metode in lokalne homografije

[29, 30, 31, 32], od koder izvira tudi njeno ime ASIFT-SH (metoda [ASIFT], segmentacija [S] in homografija [H]). Z našo predlagano metodo je mogoče vzpostaviti korespondenco pri velikih odmikih dveh kamer za poljubno izbrano točko (glej polno črto na sliki 1.1), torej tudi za vse točke, ki so topološko zanimive (npr. oglišča in robovi gradbenih elementov) in se pri projekciji v splošnem ne preslikajo v točke na sliki, ki predstavljajo značilke. Tako projicirane točke lahko v splošnem obravnavamo kot poljubno izbrane točke.

Osnovno različico metode smo tudi izboljšati tako, da se nekoplanarne regije preoblikujejo z ustreznim adaptivnim prilagajanjem (zgolj osnovna ideja je bila predstavljena v [33]). Ideja izboljšave temelji na postopku 3D rekonstrukcije začetnih korespondenčnih točk, ki pripadajo posamezni segmentirani regiji. Za rekonstruirane korespondenčne točke se nato izvede postopek iskanja čim manjšega števila ravnin v prostoru, katerim te točke pripadajo. Točke, ki pripadajo posamezni ravnini nato predstavljajo novo nastale podmnožice začetnih korespondenčnih točk.

Postopek adaptivnega prilagajanja je zaradi 3D rekonstrukcije odvisen tudi od natančnosti določanja notranjih in zunanjih parametrov kamer, ki so na gradbišču izpostavljene različnim vremenskim vplivom, tj. vlagi, soncu, snegu, vetru itd. Za učinkovitejšo analizo teh vplivov bomo dopolnili analitični model kamere s členom, ki modelira vpliv temperaturnih sprememb na delovanje posamezne kamere. Tako definiran model bomo preverili s preizkusi in skušali dokazati ustreznost dopolnjenega analitičnega modela kamere. V fazi testiranja bomo ocenjevali vpliv temperaturnih sprememb tako na delovanje i.) posamezne kamere, kakor tudi ii.) na delovanje sistema umerjenih kamer. Pri slednjem testiranju bomo ocenjevali predvsem natančnost rekonstruiranih točk, ki je ključnega pomena v fazi adaptivnega koraka metode ASIFT-SH. Pričakujemo, da bomo s pomočjo predikcije in transformacije zajetih slik, lahko uspešno kompenzirali napako, ki nastane zaradi vpliva temperaturnih sprememb na delovanje kamer.

V skladu z zastavljenimi cilji dokazujemo v disertaciji naslednjo tezo:

Dobro vzpostavljene korespondenčne točke med dvema pogledoma kamer so ključnega pomena v mnogih aplikacijah računalniškega vida. V splošnem je problem vzpostavitve korespondence med dvema slikama že dobro rešen, vendar pa problem postane zahtevnejši pri velikih odmikih dveh kamer. Korespondence z obstoječimi metodami za poljubno izbrano točko na sliki ni mogoče zagotoviti, saj je korespondenca dobro vzpostavljena zgolj za značilke, ki so invariantne na določene transformacije (npr. zasuk, premik, skaliranje in osvetljenost). Z uporabo mešanice metod računalniškega vida pa lahko izračunamo korespondenco za poljubno izbrano točko tudi pri velikih odmikih dveh kamer.

Postavljeno tezo doktorske disertacije smo razširili na naslednje sklope hipotez:

1. Z uporabo mešanice metod ASIFT, izbrane segmentacijske metode in homografije lahko za pogleda dveh kamer z velikim odklikom vzpostavimo korespondenco med njunima slikama za poljubno izbrano točko.
2. Adaptivni pristop z uporabo 3D rekonstrukcije izboljša delovanje osnovne metode določanja korespondence.
3. Kamera, s katero spremljamo gradnjo na gradbišču, je izpostavljena temperaturnim spremembam. Če poznamo razdaljo od vpetja nosilne konstrukcije do kamere in spremembo temperature, potem lahko vpliv temperature na umerjeni sistem kamer ustrezno analitično modeliramo.
4. Spremembo zunanjih parametrov kamere zaradi vpliva temperaturnih sprememb lahko kompenziramo z ustrezno transformacijo slik, ki temelji na dopolnjenem analitičnem modelu kamere.

Doktorsko delo smo zasnovali v sedmih poglavjih. V drugem poglavju pregledno opišemo obstoječe sisteme za avtomatsko spremljanje poteka gradnje, metode za vzpostavitev korespondence med dvema slikama, tako za velike, kot za majhne odklike kamer in na koncu predstavimo raziskave, ki so proučevale vpliv temperaturnih sprememb na kalibrirani sistem kamer.

V tretjem poglavju pregledno opišemo teoretične osnove, ki so potrebne za razumevanje vsebine. Razvrstili smo jih po naslednjih podpoglavjih: i.) analitični model kamere z opisom notranjih in zunanjih parametrov kamere ter projekcijsko matriko kamere, ii.) metoda za kalibracijo kamer, iii.) metodi za izračun homografije, iv.) metoda za vzpostavitev korespondence med dvema slikama, v.) metode za vzpostavitev temeljne matrike \mathcal{F} in vi.) metodi za izračun projekcijske matrike kamer ter postopek 3D rekonstrukcije.

Četrto poglavje predstavlja jedro našega raziskovalnega dela, kjer predstavimo metodo ASIFT-SH, ki omogoča izračun korespondenčne točke na drugi sliki pri velikih odklikih dveh kamer za poljubno izbrano točko iz prve slike. Predstavljena metoda ASIFT-SH je mešanica metod ASIFT, izbrane segmentacijske metode in homografije. Metoda je štiri korakna in poteka tako, da združi z metodo ASIFT vzpostavljene korespondenčne točke v ustrezne podmnožice na osnovi pripadnosti posamezni segmentirani regiji. Za točke vsake podmnožice se izračunajo lokalne homografije, ki omogočajo izračun korespondenčne točke na drugi sliki za poljubno izbrano točko iz prve slike. Ključni problem predlagane metode je zagotavljanje koplanarnost točk posamezne podmnožice. Problem morebitne nekoplanarnosti posamezne regije rešimo z ustreznim preoblikovanjem le-te. Postopek preoblikovanja segmentiranih regij smo v nalogi poimenovali adaptivno prilagajanje s pomočjo 3D rekonstrukcije.

V petem poglavju se posvetimo znanstvenemu prispevku, kjer proučujemo vpliv temperaturnih sprememb na sistem kalibriranih kamer. Osredotočili smo se predvsem nato, kako sprememba temperature vpliva na rekonstruirane korespondenčne točke in kolikšna so njihova odstopanja. Tako smo najprej dopolnili analitični model kamere s členom za opis vpliva temperaturnih sprememb na kamero in nato izpeljali model vpliva za kalibriran sistem kamere.

Rezultate eksperimentov za posamezne meritve smo predstavili v šestem poglavju. V prvem delu so predstavljeni rezultati za osnovno različico metode ASIFT-SH. K tem rezultatom smo nato dodali še rezultate modificirane metode ASIFT-SH z adaptivnim prilagajanjem s pomočjo 3D rekonstrukcije. V drugem delu pa sledijo rezultati, ki opisujejo vpliv temperaturnih sprememb na delovanje, bodisi ene kamere, ali pa sistema kalibriranih kamer.

Sedmo poglavje je namenjeno diskusiji in interpretaciji rezultatov, pojasnimo pa tudi morebitne anomalije. V tem poglavju dodatno predstavimo prednosti in slabosti posameznih postopkov in nakažemo potencialne smernice za bodoči razvoj in izboljšave. Podobno kot poglavje z rezultati, je tudi diskusija razdeljena v dva dela, tj. v diskusijo za metodo ASIFT-SH in diskusijo za vpliv temperaturnih sprememb na sistem kalibriranih kamer. Na koncu poglavja podamo še sklepe, kjer strnemo ugotovitve iz prejšnjih poglavij in potrdimo oziroma zavržemo postavljene hipoteze ter tezo doktorske disertacije.

Poglavje 2

Pregled

V tem poglavju pregledno opisujemo področja, s katerimi se srečujemo v disertaciji. Najprej na kratko opisujemo že obstoječe sisteme za spremljanje gradnje in osvetlimo njihove omejitve. V drugem delu se osredotočimo na metode za vzpostavitev korespondence med značilkami slik, na koncu pa podamo še pregled literature, kjer so avtorji proučevali vpliv spremembe temperature na umerjene kamere.

2.1 Sistemi za avtomatsko spremljanje gradnje

Z avtomatiziranim spremljanjem gradnje se ukvarjajo različne raziskovalne skupine, ki pri svojih rešitvah uporabljajo zelo različne pristope. Osnovni problem vseh pristopov je ustrezna identifikacija gradbenih elementov. Le-ta se lahko izvede na različne načine, kot so: i.) identifikacija s pomočjo značk RFID [34, 35], ii.) lasersko skeniranje gradbenega objekta in nato razpoznavanje gradbenih elementov iz oblaka točk [36, 37, 38, 39, 40] in iii.) razpoznavanje iz slikovnega materiala z metodami računalniškega vida [6, 41, 42, 43]. Zaradi kompleksnosti problema so do sedaj predlagane rešitve bolj usmerjene v reševanje podproblemov in zato ne zagotavljajo celovite rešitve za povsem avtomatizirano spremljanje gradnje.

Razpoznavanje zgradb v urbanih področjih se praviloma izvaja z uporabo aero posnetkov [44, 45, 46, 47, 48, 49, 50]. Takšen pristop je primeren za ugotavljanje stanja in identifikacijo obstoječih stavb, manj pa za spremljanje aktivnosti na gradbišču. Sistemi, ki temeljijo na razpoznavanju objektov iz aero posnetkov, za realno-časovno spremljanje gradnje niso primerni zaradi naslednjih razlogov: i.) kvaliteta slikovnega materiala je neustrezna, saj se slike zajemajo iz (pre)velike razdalje, ii.) vsi pogledi so praviloma iz ptičje perspektive in iii.) realno-časovno zajemanje slik je praviloma oteženo. Prav zaradi navedenih razlogov se je uporaba teh pristopov omejila na 3D rekonstrukcijo starih mestnih jeder in večjih stavb, (pol)avtomatsko pripravo

digitalnih modelov urbanih področij ipd. Rezultat postopka takšne 3D rekonstrukcije je digitalni model opazovanega objekta ali področja.

Zajemanje slik na gradbišču se običajno izvede bodisi s premikajočimi se, bodisi s fiksno nameščenimi kamerami. V obeh primerih je potrebno zagotoviti ustrezno število zajetih slik, ki zagotavljajo primerno pokritost opazovanega objekta. Avtor Trucco s sodelavci [41] je predlagal sistem za spremljanje gradnje, ki temelji na razpoznavanju gradbenih elementov in določenih specifičnih struktur s pomočjo učne množice. Pri tem so razvili algoritem za iskanje ujemanja med objekti učne množice in sceno gradbišča, ki temelji na Hausdorffovi razdalji. Sistem uspešno identificira gradbene elemente in določi njihovo lokacijo, vendar pa ne omogoča uspešne identifikacije posameznega gradbenega elementa med procesom gradnje. Proces razpoznavanja poteka zgolj iz ene slike, pri čemer je identifikacija prikritih gradbenih elementov lahko otežena.

Scena na slikah gradbišča je iz stališča avtomatskega razpoznavanja vzorcev zelo kompleksna struktura, ki je običajno ni mogoče razgraditi izključno z enim postopkom. Tako je avtor Brilakis s sodelavci [42] predlagal postopek razpoznavanja gradbenih elementov iz slik gradbišča na osnovi klasifikacije identificiranih materialov. Za ustrezno identifikacijo materialov se najprej določijo zanimiva področja na slikah, pri čemer se uporabijo različni kriteriji, kot so: i.) barve z uporabo histograma, ii.) teksture, kjer se spremenljiva področja slike ločijo z uporabo različnih metod (npr. Gaussov filter in valčna transformacija za izločanje šuma, Fourierjeva analiza kot nizkopasovni filter, valčna dekompozicija, Laplaceov filter, orientirani piramidni in Gaborov filter [51] itd.) in iii.) oblike, dobljene z različnimi metodami za detekcijo oglišč [52, 53, 54, 55, 56], robov [57, 58, 59], metodami za poudarjanje robov [60, 61]. V drugem koraku metode se slika s postopkom rojenja razdeli na regije, nato pa se izračunajo vrednosti značilik za posamezni roj. Klasifikacija materiala za posamezni roj se nato izvede s pomočjo učne množice. V [42] so pokazali, da je z izbrano mešanico metod in ustrezno izbiro parametrov mogoče razpoznavati posamezne materiale iz slik gradbišča s pomočjo učne množice. Pristop razpoznavanja z uporabo učne množice za identifikacijo materialov iz slik se dobro obnese v kontroliranih svetlobnih pogojih. Dela na gradbišču pa potekajo v različnih vremenskih pogojih (npr. v dežju, megli, snegu, soncu itd.) in mnogokrat tudi v obeh delih dneva, tj. podnevi in ponoči. Identifikacija na osnovni materiala zato ne zagotavlja ustrezne stopnje zanesljivosti. Dodatna omejitev opisane metode je tudi, da postopek razpoznavanja poteka iz ene same slike, kar mnogokrat onemogoča identifikacijo zakritih gradbenih elementov.

Avtor Golparvar-Fard s sodelavci [43] pa je predlagal rešitev, imenovano D^4AR , ki je v nekaterih segmentih podobna ideji našega sistema 4D-ACT [6]. Sistem za avtomatsko spremljanje gradnje D^4AR temelji na iskanju korespondence med različnimi pogledi z metodo SIFT [16]. Določitev korespondence med različnimi pogledi je eden izmed kritičnih korakov v postopkih

razpoznavanja z več kamerami. Z dobro vzpostavljenimi korespondenčnimi točkami so izvedli kalibracijo kamer, določili lokacijo ter orientacijo posameznih kamer (tj. določili notranje in zunanje parametre kamer). Za korespondenčne točke se nato izvede postopek 3D rekonstrukcije in rezultat je oblak točk, ki predstavlja posamezne gradbene elemente. S 3D poravnavo med točkami oblaka in točkami iz geometrijskega modela (3D model v posamezni časovni rezini) so poizkušali vzpostaviti ustrezne povezave med oblakom točk in geometrijskimi elementi iz 3D modela. Poravnava in primerjanje temeljita na iskanju najmanjše vsote kvadratov napak med točkami iz oblaka in točkami iz geometrijskega modela. Tako vzpostavljena povezava je omogočala identifikacijo razlik med načrtovanim in planiranim stanjem. Slike na gradbišču so zajemali iz poljubne lokacije, kar je omogočalo zajem zadostnega števila slik, potrebnih za izvedbo metrične 3D rekonstrukcije (iz teorije vemo, da so potrebni vsaj trije pogledi). Če želimo z metodo SIFT določiti zadostno število korespondenčnih točk, morajo premiki med različnimi pogledi biti relativno majhni. Takšna omejitev pa ima za posledico, da je potrebno izdelati relativno veliko število slik, ki jih lahko sicer zajamemo ročno ali pa avtomatično (v primeru, da so kamere fiksno nameščene in ustrezno povezane z nadzornim centrom). Prav zaradi majhnih premikov med kamerami, bi morale biti le-te gosto nameščene na gradbišču. To pa je zaradi narave gradbišča seveda neizvedljivo. Problem zajemanja množice slik se lahko reši s premikajočimi se kamerami ali, z drugimi besedami povedano, zajem slik lahko izvede oseba s pomočjo fotoaparata, kar pa močno znižuje stopnjo avtomatiziranosti sistema D⁴AR.

2.2 Vzpostavitev korespondence med slikami, na osnovi značilnk

Ujemanje dveh slik ali vzpostavitev korespondence med njima, je temeljni korak mnogih aplikacij računalniškega vida in obdelave slik, kot so [62]: razpoznavanje objektov iz slik, 3D rekonstrukcija, sledenje objektov, registracija slik itd. Algoritmi za določitev stopnje ujemanja med slikama tipično sestojijo iz dveh delov: detektorja in deskriptorja. Detektor poišče točke zanimanja na vseh slikah, med katerimi iščemo ujemanje. Označi pa tudi regijo, v kateri se nahaja posamezna točka zanimanja, zatem pa priredi še ustrezni invariantni deskriptor za izbrano regijo. Korespondenca se nato vzpostavi z iskanjem ujemanja med deskriptorji. Detektorji in deskriptorji bi naj bili karseda invariantni.

2.2.1 Vzpostavitev korespondence pri majhnih odmikih kamer

Razvoj algoritmov za iskanje ujemanja oziroma korespondence med slikami je večinoma potekal po principu nadgradnje predhodnih zapisov detektorjev ali deskriptorjev. Vsi detektorji, ki jih bomo opisali, so invariantni na premik. Začetki razvoja teh algoritmov segajo v leto 1981, ko je avtor Moravec [63] predstavil algoritem za iskanje ujemanja med stereo posnetki na osnovi oglišč. Njegov algoritem za detekcijo oglišč sta nadgradila Harris in Stephens [53]. Predlagani detektor je invarianten na zasuk, dobro pa deluje pri majhnih spremembah pogledov kamer. Algoritem se je še posebej izkazal za učinkovitega pri sledenju gibanja in odkrivanju 3D struktur iz gibanja [64] ter tako postal sestavni del mnogih postopkov za iskanje ujemanja med slikami. Harrisov algoritem ni iskal več samo oglišč, ampak tudi območja z velikim gradientom.

S časoma so se pojavili še zahtevnejši problemi pri sledenju objektov iz niza slik, tj. večji premiki med pogledi, sledenje več objektov, sledenje deloma zakritih objektov itd. Avtor Zhang s sodelavci je v članku [65] pokazal, da je mogoče uporabiti Harrisov detektor za vzpostavitev korespondence med slikami z uporabo korelacijskega okna, ki ga postavimo v okolico izbranega oglišča. Napačno povezane točke se nato odstranijo ob izračunu temeljne matrike, ki opisuje geometrijsko omejitev med dvema pogledoma. Pri tem se odstranijo le tisti potencialni korespondenčni pari točk, ki ne ustrezajo geometrijski omejitvi, določeni s temeljno matriko. V istem času je podobno rešitev predlagal Torr [66], pri čemer so se napačno vzpostavljene korespondenčne točke izločile na osnovi epipolarne omejitve. Oba algoritma sta se množično pojavljala v metodah za sledenje objektov.

Naslednjo prelomnico predstavlja algoritem, ki sta ga predlagala Schmid in Mohr [66]. Pokazala sta, da lahko lokalne invariantne deskriptorje za iskanje ujemanja slik, uporabimo tudi za iskanje in razpoznavanje objektov v veliki množici slik. Uporabila sta Harrisov detektor za iskanje zanimivih točk, namesto korelacijskega okna pa sta uporabila deskriptor, ki je invarianten na zasuk. S tem sta omogočila uspešnejšo iskanje ujemanja pri poljubni orientaciji dveh slik.

Harrisov detektor je zelo občutljiv na spremembo v velikosti slike in tako ne omogoča uspešnega ujemanja slik različnih velikosti. Avtor Lowe [67] je nadgradil zapis tega detektorja tako, da je postal invarianten na spremembo velikosti slike. Obstaja kar nekaj predhodnih raziskav, ki naslavlja problem iskanja ujemanja slik različnih velikosti. Pionirja na tem področju sta Crowley in Parker z delom [68]. Razvila sta algoritem, ki omogoča identifikacijo vrhov in slemen. Zapisala sta jih v različno skalirani prostor v obliki drevesne strukture. Iskanje ujemanja med posameznimi slikami je tako mogoče s primerjanjem drevesnih struktur slik, pri čemer so slike lahko poljubno skalirane. Kar nekaj let je minilo do naslednje uspešne rešitve, ki prav tako temelji na primerjanju grafov. Avtor Shokoufandeh s sodelavci je v članku [69] predstavil bolj

učinkovit zapis značilke z uporabo valčkov.

2.2.2 Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih kamer

Metode za vzpostavitev korespondence pri t.i. majhnih odmikih kamer delujejo dobro le pri ustrezno majhnih zasukih, premikih in skaliranju slik. Majhen odmik dveh kamer je v splošnem definiran s transformacijo, kjer se pogled kamere pred in po transformaciji bistveno ne razlikuje. Mnogokrat pa problemi na področju računalniškega vida presegajo omenjene omejitve. Vzpostavitev korespondence med slikami je velikokrat nujna tudi tedaj, ko se orientacija ali lokacija kamer, s katerimi zajemamo slike, bistveno razlikujejo. Za uspešno vzpostavitev korespondence je v takšnih primerih potrebno uporabiti detektorje, ki so invariantni na afine transformacije. Primera takšnih detektorjev sta detektor Hessian-Laplace [70] in DoG (*Difference-Of-Gaussian*) [16]. Podobno kot pri metodah za majhne odmike kamer, je tudi tukaj razvoj potekal postopoma. Prve metode niti niso v celoti zagotavljale invariantnosti na afine transformacije. Kronološko je bil razvoj opaznejših detektorjev, ki so bistveno vplivali na ta segment računalniškega vida, naslednji: i.) detektor, definiran z lastnimi vrednostmi drugega momenta, ki temelji na Harris-afinem in Hessian-afinem detektorju [70, 71] sta najprej predlagala avtorja Lindeberg in Garding [72], kasneje pa ga je dopolnil Baumberg [17], ii.) detektor, temelječ na robovih [73, 74], iii.) detektor, katerega zapis temelji na intenziteti [74, 75], iv.) detektor na osnovi entropije [76], v.) dvonivojski detektor linij MSER (*Maximally Stable Extremal Region*) [77] in vi.) detektor LLD (*Level Line Detector*) [78, 79, 80]. V raziskavi, objavljeni v [81], so pokazali, da metoda MSER v splošnem zagotavlja boljše rezultate od ostalih afino invariantnih detektorjev, kot so Hessian-afini in Harris-afini detektor.

Pomembno prelomnico predstavlja metoda SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) [16], ki je invariantna na zasuk in skaliranje ter delno tudi na osvetljenost in spremembo pogledov. Metoda SIFT, ki je delo avtorja Lowe, kombinira detektor DoG, ki zagotavlja invariantnost na zasuk, premik in skaliranje (matematični dokaz za invariantnost na skaliranje je podan v [82]) z deskriptorjem, ki temelji na orientiranem gradientu regije [16]. Metoda SIFT torej sestoji iz dveh ključnih delov: detektorja SIFT in deskriptorja SIFT. Detektor SIFT je sicer manj invarianten na afine transformacije kot Hessian-afini [83] in Harris-afini [70] detektor. Ne glede nato, pa njegova kombinacija skupaj s deskriptorjem SIFT zagotavlja primerljive rezultate, kar so pokazali številni eksperimenti [81].

Deskriptor SIFT se je izkazal kot superioren [84] v primerjavi z mnogimi drugimi deskriptorji kot so: i.) deskriptor, predstavljen z geometrijskim histogramom [85], ii.) deskriptor, sestavljen iz kompleksnih filtrov [17], iii.) deskriptor invariantnih momentov [86] itd. Poznamo veliko različic in izvedenk deskriptorja SIFT. Naštejmo le nekatere, in sicer deskriptor PCA-SIFT

(*Principal Components Analysis SIFT*) [87], deskriptor GLOH (*Gradient Location-Orientation Histogram*) [84] in deskriptor SURF (*Speeded Up Robust Features*) [88] z izvedenkami [89, 90]. Deskriptor SIFT je torej doživel mnoge izboljšave in izpeljanke, hkrati pa se je dokazal izjemno uporaben v mnogih aplikacijah, kot so razpoznavanje scene [91, 92, 93], upravljanje robotov [94, 95], poravnava slik [96], sledenje objektov [97, 98], 3D rekonstrukcija [99] itd.

Vse zgoraj omenjene metode za vzpostavitev korespondence med slikami dosegajo dobre rezultate, vendar pa nobena od njih ni popolnoma invariantna na afine transformacije. Detektorja MSER in LLD nista invariantna niti na skaliranje, kot je pokazal Morel s soavtorji v [23]. Isti avtorji so tudi pokazali [23], da je metoda SIFT edina, ki je popolnoma invariantna na skaliranje, vendar pa ni povsem invariantna na afine transformacije. Prav zato se zmogljivost metode SIFT drastično zmanjša ob velikem razlikovanju pogledov. Zato lahko trdimo, da metoda SIFT ni najbolj primerna za vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih kamer. Metodo SIFT so kasneje nadgradili v afino invariantno in jo poimenovali ASIFT (*Affine Scale-Invariant Feature Transform*) [23, 100]. Za razliko od metod MSER, LLD, Harris-afine in Hessian-afine, ki normalizirajo vseh šest afinih parametrov, metoda ASIFT simulira tri parametre (skaliranje in spremembo osi, ki opisujejo orientacijo kamere) ter normalizira ostale parametre, tj. zasuk in premik kamere. Metoda ASIFT vzpostavi bistveno več korespondenčnih točk kot ostale metode (npr. metoda SIFT, MSER, Hessian-afina, Harris-afina). To število je večje tudi za faktor sto in več [23]. Številni rezultati dokazujejo [101], da metoda ASIFT v vseh segmentih delovanja prekaša obstoječe metode, žal pa jih prekaša tudi po časovni in prostorski zahtevnosti.

2.3 Vpliv temperature na umerjene kamere

Vpliv temperature na spremembo lastnosti splošno dostopnih kamere je v literaturi slabo obdelano področje. Obstaja le nekaj posredno povezanih raziskav. V projektu ESTEC [102] so preizkušali vpliv temperature na delovanje miniaturnih kamer, ki so jih vstavili v termično vakuumsko komoro in jih izpostavili ekstremno visoki temperaturi. Pri tem so merili napako ob zajemanju slike. Delovanje kamer se je izkazalo kot zelo zanesljivo, saj je odstopanje od prvotne lokacije bilo reda mikron.

Umerjene nizkocenovne CCD-kamere se uporabljajo tudi v geodeziji za merjenje oddaljenosti. Napaka, ki se pri takšnih meritvah pojavi, je okoli $8 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ od prave vrednosti [103]. V naslednji raziskavi so prav tako analizirali nizkocenovne CCD-kamere [104]. Med eksperimentiranjem so zaznali majhno spremembo notranjih parametrov kamere. Z ocenjevanjem vpliva temperature na delovanje sistema kamer za merjenje razdalje se je ukvarjal tudi avtor Kruth s sodelavci [105]. V raziskavi so določili velikostni razred odstopanj, ustrezno dopolnili analitični

model kamere in nato kompenzirali vpliv temperature. Kompenzacija je v veliki meri uspela, vendar so pri svojem delu bili osredotočeni le na kamere LED-CMOS.

Poglavje 3

Teoretične osnove

Za lažje razumevanje izpeljav in algoritmov, predstavljenih v nadaljevanju te disertacije, bomo v tem poglavju na kratko opisali najnujnejše teoretične osnove. Predstavili bomo: i.) analitični model kamere z opisom njenih notranjih in zunanjih parametrov, definirali pa bomo tudi projekcijsko matriko kamere in metodo za kalibriranje kamere ii.) metodi za izračun homografije, iii.) metodo za vzpostavitev korespondence med dvema slikama, iv.) metode za vzpostavitev temeljne matrike \mathcal{F} , v.) segmentacijsko metode, vi.) postopek 3D rekonstrukcije in vii.) metodo RANSAC.

3.1 Analitični model kamere

Analitični model kamere opisuje transformacijo prostorskih objektov na sliko. Transformacija je odvisna od notranjih in zunanjih parametrov kamere, opišemo pa jo lahko z enačbo:

$$\mathbf{p} = \frac{1}{z} \mathcal{M} \mathbf{P}, \quad (3.1)$$

kjer je z oddaljenost točke \mathbf{P} od kamere, \mathbf{p} je projekcija točke \mathbf{P} na projekcijski oziroma slikovni ravnini in \mathcal{M} je perspektivna projekcijska matrika. Matriko \mathcal{M} določimo kot:

$$\mathcal{M} = \mathcal{K} \begin{pmatrix} \mathcal{R} & \mathbf{t} \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

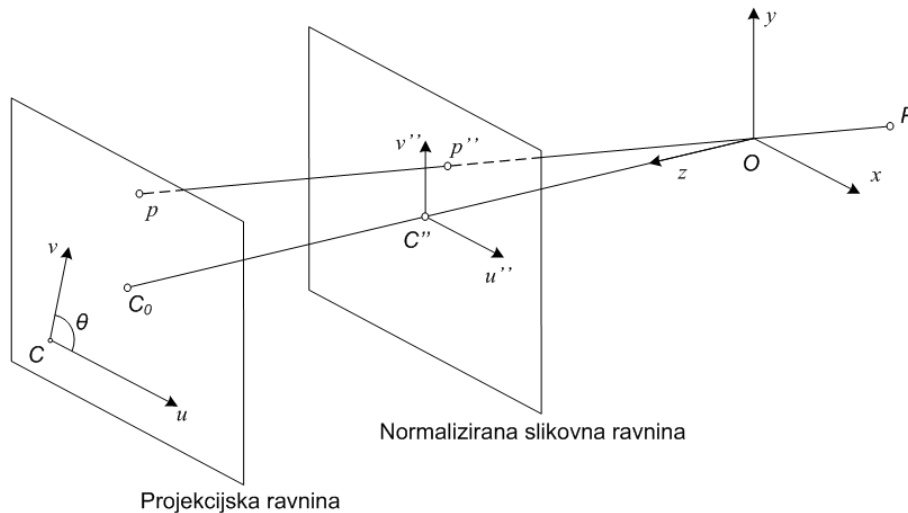
pri čemer je \mathcal{K} kalibracijska matrika, \mathcal{R} je matrika zasuka in \mathbf{t} je vektor premika [31, 61]. Kalibracijska matrika \mathcal{K} definira notranje parametre, medtem ko matrika \mathcal{R} in vektor premika \mathbf{t} opisujeta zunanje parametre kamere [24, 31, 61, 106].

3.1.1 Parametri kamere

Pri razpoznavanju gradbenih elementov je potrebno zajemati slike iz gradbišča s pomočjo kamere, zato se vsaka točka P , $P=(x, y, z)$, v opazovanem prostoru preslika v točko na sliki p , $p=(x', y')$. Projekcijska slika je odvisna od parametrov kamere, ki jih delimo na notranje in zunanje. Notranji parametri obravnavajo goriščno razdaljo in velikost slikovnih elementov, medtem ko zunanji parametri kamere zajemajo lokacijo kamere, njeno orientacijo in smer gledanja. Za lažjo izpeljavo omenjenih parametrov bomo kamero predstavili kot točkovni objekt oziroma bomo kamero modelirali kot luknjico.

Notranji parametri

Za predstavitev projekcije imejmo normalizirano slikovno ravnino in projekcijsko ravnino, kot prikazuje slika 3.1. Osnovna lastnost normalizirane slikovne ravnine je oddaljenost od kamere



Slika 3.1: Normalizirana slikovna in projekcijska ravnina.

(gledišča) za eno enoto, kjer točka C'' predstavlja mesto preboja optične osi. Perspektivno projekcijo lahko zapišemo kot:

$$\begin{cases} u'' = \frac{x}{z} \\ v'' = \frac{y}{z} \end{cases} \iff \mathbf{p}'' = \frac{1}{z} \begin{pmatrix} Id & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \text{kjer je } Id = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

in $\mathbf{p}'' = (u'', v'', 1)^T$ je vektor, zapisan v homogenih koordinatah, ki predstavlja projekcijo točke \mathbf{P} na normalizirano slikovno ravnino.

Projekcijska ravnina (slika 3.1) se nahaja na razdalji različni od ena ($f \neq 1$) od kamere, projekcijo točke \mathbf{P} pa opisuje s koordinatama (u, v) . Točka \mathbf{p} , zapisana s koordinatama (u, v) , je izražena z enoto slikovnega elementa, kar lahko zapišemo kot:

$$\begin{cases} u = kf \frac{x}{z} \\ v = lf \frac{y}{z} \end{cases}, \quad (3.4)$$

kjer je f goriščna razdalja kamere izražena v metrih, slikovni element pa ima dimenzijo $\frac{1}{k} \times \frac{1}{l}$, kot prikazuje slika 3.2b. Faktorja k in l predstavljata število slikovnih elementov na enoto razdalje v x oziroma y smeri in sta izražena v enoti slikovnih elementov na enoto dolžine. Ker nista neodvisna, ju lahko izrazimo kot parametra:

$$f_\alpha = kf \text{ in } f_\beta = lf, \quad (3.5)$$

kjer parametra f_α in f_β predstavljata goriščno razdaljo, izraženo v enoti slikovnih elementov.

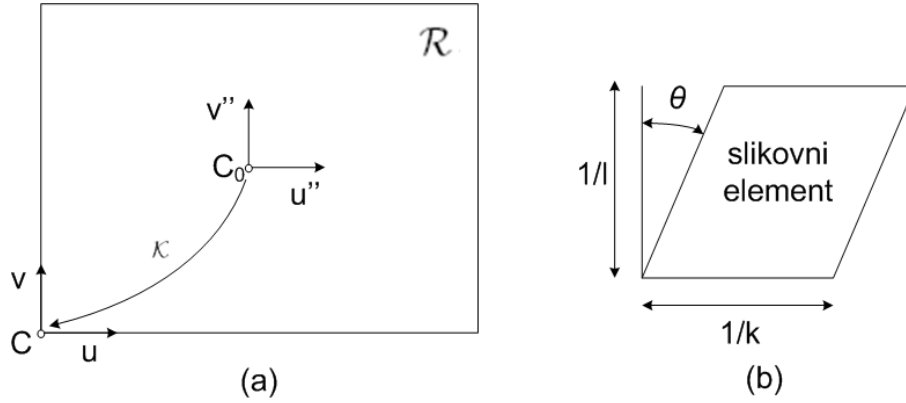
Kot vidimo na sliki 3.1 in 3.2a, se koordinatno izhodišče C razlikuje od točke C_0 , kjer optična os prebada projekcijsko ravnino. Zato je potrebno izvesti korekcijo z dvema novima parametroma u_0 in v_0 , ki definirata lego točke C_0 v koordinatah projekcijske ravnine. Enačbo (3.4) sedaj zapišemo:

$$\begin{cases} u = f_\alpha \frac{x}{z} + u_0 \\ v = f_\beta \frac{y}{z} + v_0 \end{cases}. \quad (3.6)$$

Pri opisu modela kamere bomo upoštevali tudi napako koordinatnega sistema kamere, ki nastane kot posledica nenatančne izdelave kamer CCD. Zasuk koordinatnega sistema projekcijske ravnine določa kot θ (slika 3.1 in 3.2b) in ga izrazimo s parametrom poševnosti s [31, 107], ki opisuje popačen slikovni element (slika 3.2b). Dopolnimo še enačbo (3.6), pri čemer upoštevamo parameter poševnosti s za koordinatni sistem projekcijske ravnine:

$$\begin{cases} u = f_\alpha \frac{x}{z} + s \frac{y}{z} + u_0 \\ v = f_\beta \frac{y}{z} + v_0 \end{cases}. \quad (3.7)$$

Po združevanju enačb (3.3) in (3.7) zapišemo spremembo koordinat med projekcijsko ravnino



Slika 3.2: Notranji parametri kamere in njihov vpliv pri transformaciji slike iz normalizirane slikovne ravnine na projekcijsko ravnino (a) in oblika slikovnega elementa zaradi zamika kota med koordinatnima osema kamere (b).

in normalizirano ravnino v ravninsko afino transformacijo:

$$\mathbf{p} = \mathcal{K}\mathbf{p}'', \quad \text{kjer sta} \quad \mathbf{p} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{p}'' = \begin{pmatrix} u'' \\ v'' \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3.8)$$

kalibracijska matrika \mathcal{K} pa je definirana kot:

$$\mathcal{K} = \begin{pmatrix} f_\alpha & s & u_0 \\ 0 & f_\beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

Zgornjo enačbo (3.8) lahko zapišemo tudi krajše:

$$\mathbf{p} = \frac{1}{z}\mathcal{M}\mathbf{P}, \quad \text{kjer} \quad \mathcal{M} = \begin{pmatrix} \mathcal{K} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

kjer oznaka \mathbf{P} predstavlja vektor točke P , zapisan s homogenimi koordinatami, matrika \mathcal{K} pa je kalibracijska matrika kamere [24, 31]. Matrika \mathcal{M} , velikosti 3×4 , predstavlja afino transformacijo in vsebuje vse opisane notranje parametre kamere (tj. u_0 , v_0 , f_α , f_β in s), pri čemer matrika \mathcal{K} normira koordinate slike v koordinatni sistem projekcijske ravnine.

Zunanji parametri

Z zunanjimi parametri opišemo lokacijo in orientacijo kamere. Za takšen opis potrebujemo šest parametrov. Prvi trije parametri – α , β in γ – so koti zasuka kamere in so posredno zapisani v

matriki zasuka \mathcal{R} , ki jo opišemo z enačbo:

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

kjer so posamezni členi matrike izrazi, dobljeni z zaporednim množenjem posameznih matrik zasukov (najprej zasuk za kot α , nato za kot β in na koncu še za kot γ), in sicer:

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \alpha \sin \beta \\ r_{12} &= -\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ r_{13} &= \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ r_{21} &= \sin \alpha \cos \beta \\ r_{22} &= \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma, \\ r_{23} &= -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ r_{31} &= -\sin \beta \\ r_{32} &= \cos \beta \sin \gamma \\ r_{33} &= \cos \beta \cos \gamma \end{aligned} \quad (3.12)$$

kjer so koti α , β in γ zasuki kamere okoli njenih osi. Drugi trije parametri pa so komponente vektorja premika \mathbf{t} , ki je zapisan kot:

$$\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z). \quad (3.13)$$

Sedaj lahko dopolnimo enačbo (3.10) na naslednji način:

$$\mathbf{p} = \frac{1}{z} \mathcal{M} \mathbf{P}, \quad \text{kjer je } \mathcal{M} = \mathcal{K} \begin{pmatrix} \mathcal{R} & \mathbf{t} \end{pmatrix}. \quad (3.14)$$

Kot je razvidno iz enačbe 3.14 perspektivna projekcijska matrika \mathcal{M} predstavlja notranje (tj. kalibracijsko matriko \mathcal{K}) in zunanje (tj. matriko zasuka \mathcal{R} ter vektor premika \mathbf{t}) parametre kamere.

Perspektivna projekcijska matrika \mathcal{M}

Navadno projekcijsko enačbo zapišemo kot $z\mathbf{P} = \mathcal{M}\mathbf{P}$ ali kar $\mathbf{p} = \mathcal{M}\mathbf{P}$, če projicirano točko \mathbf{P} zapišemo kot $\mathbf{p} = (u, v, w)^T$, pri čemer sta posamezni koordinati definirani kot: u/w in v/w . Matrika \mathcal{M} sedaj vsebuje 11 medsebojno neodvisnih parametrov kamere, in sicer 5 notranjih (tj. $u_0, v_0, f_\alpha, f_\beta$ in s) ter 6 zunanjih (tj. tri kote zasuka matrike \mathcal{R} in vektor premika \mathbf{t} s tremi

komponentami), ki jih lahko združimo v eno samo perspektivno projekcijsko matriko

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} f_\alpha \mathbf{r}_1^T + s \mathbf{r}_2^T + u_0 \mathbf{r}_3^T & f_\alpha t_x + s t_y + u_0 t_z \\ f_\beta \mathbf{r}_2^T + v_0 \mathbf{r}_3^T & f_\beta t_y + v_0 t_z \\ \mathbf{r}_3^T & t_z \end{pmatrix}, \quad (3.15)$$

kjer so \mathbf{r}_1^T , \mathbf{r}_2^T in \mathbf{r}_3^T vrstice matrike zasuka \mathcal{R} , t_x , t_y ter t_z koordinate vektorja premika \mathbf{t} , parametra f_α in f_β iz enačbe (3.5) določata pretvorbo dolžinskih dimenzij v dimenzije slikovnih elementov in parameter poševnosti s določa popačenost posameznih slikovnih elementov (slika 3.2b).

3.1.2 Kalibracija kamer

Kalibracija kamer je nepogrešljivi postopek na področju 3D računalniškega vida. Omogoča namreč določitev notranjih in zunanjih parametrov kamere (glej podpoglavje 3.1.1). Le-ti so ključnega pomena pri določanju prostorskih informacij iz 2D slik. Kalibracijske metode se v grobem delijo v dve kategoriji, in sicer fotogrametrijske kalibracijske metode in avto-kalibracijske metode [26].

V literaturi lahko zasledimo le nekaj izčrpnih analiz stabilnosti in natančnosti kalibracijskih metod [108, 109], medtem ko se nekatere druge študije osredotočajo na primerjavo zgolj dveh ali treh kalibracijskih metod [24, 110]. Ena izmed najpogosteje uporabljenih kalibracijskih metod je Zhangova kalibracijska metoda [26], ki je zelo prilagodljiva in enostavna za uporabo. Za svoje delovanje potrebuje slike kalibracijskega vzorca (npr. šahovnice) iz vsaj dveh pogledov, lahko pa tudi več. Transformacije med posameznimi pogledi ne rabijo biti poznane. Opis popačenosti leč v optičnem sistemu kamere je omejen zgolj na radialno distorzijo, ki je modelirana z dvema koeficientoma, tj. k_1 in k_2 . Zaradi opisanih lastnosti je metoda pogosto uporabljena v različnih aplikacijah računalniškega vida, njena implementacija pa je prosto dostopna v orodju Matlab [111] ali kot funkcija v odprtokodni knjižnici OpenCV [112].

Zhangova kalibracijska metoda

Delovanje kalibracijske metode lahko na kratko strnemo v naslednje korake:

1. Začetna projekcijska matrika kamere \mathcal{M}_j se izračuna iz slik kalibracijskega vzorca, tj. vzorec podoben šahovnici, pri čemer se uporabi neiterativna metoda na naslednji način. Najprej se izračunajo notranji parametri kamere, ki so zapisani v kalibracijski matriki \mathcal{K}

(glej enačbo (3.9)). Definirajmo matriko \mathcal{B} z naslednjim matričnim produktom:

$$\mathcal{B} = \mathcal{K}^{-T} \mathcal{K}^{-1}, \quad (3.16)$$

kjer je matrika \mathcal{B} sestavljena iz naslednjih členov:

$$\mathcal{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}. \quad (3.17)$$

Matrika \mathcal{B} je simetrična, zato jo lahko zapišemo v obliki 6D vektorja kot:

$$\mathbf{b} = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T. \quad (3.18)$$

Imejmo tudi i -ti stolpcični vektor matrike \mathcal{H} , ki je definiran kot $\mathbf{h}_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$, potem enačba

$$\mathbf{h}_i^T \mathcal{B} \mathbf{h}_j = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{b}, \quad (3.19)$$

kjer je

$$\mathbf{v}_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{21}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T,$$

pripelje do homogenega sistema dveh enačb:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_{12}^T \\ (\mathbf{v}_{11} - \mathbf{v}_{22})^T \end{pmatrix} \mathbf{b} = \mathbf{0}. \quad (3.20)$$

Tako za n različnih pogledov, zapisanih z n enačbami (3.20), zapišemo naslednji sistem enačb:

$$\mathbf{V} \mathbf{b} = \mathbf{0}, \quad (3.21)$$

kjer oznaka \mathbf{V} predstavlja matriko velikosti $2n \times 6$. Če je $n \geq 3$, potem obstaja enolična rešitev za vektor \mathbf{b} . Rešitev sistema enačb (3.21) temelji na iskanju najmanjšega lastnega vektorja. Dobljeni vektor \mathbf{b} nato omogoča določitev kalibracijske matrike \mathcal{K} . Z znanimi postopkom (glej prilogo v [26]) je mogoče izračunati tudi zunanje parametre kamere.

2. Z začetno rešitvijo se nato s postopkom optimizacije izračuna končna rešitev, ki temelji na minimizaciji razdalje. Za n slik in m korespondenčnih parov točk je minimizacijska

funkcija definirana sledeče:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|\mathbf{m}_{ij} - \mathbf{m}(\mathcal{K}, \mathcal{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{P}_j)\|^2, \quad (3.22)$$

kjer je $\mathbf{m}(\mathcal{K}, \mathcal{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{P}_j)$ projekcija točke \mathbf{P}_j na sliki i , \mathcal{R} je matrika zasuka in \mathbf{t} je vektor premika. Pri postopku minimizacije se uporabi metoda Levenberg-Marquardt [113, 114].

3. Sledi določitev začetne ocene koeficientov radialnega popačenja. Določimo idealno točko na sliki (x, y) in točko (x', y') , ki je podvržena radialnemu popačenju. Njuno zvezo lahko opišemo kot:

$$x' = x + x[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (3.23)$$

$$y' = y + y[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2], \quad (3.24)$$

kjer sta k_1 in k_2 koeficienta, ki opisujeta radialno popačenje in se njune začetne vrednosti izračunajo po metodi najmanjše kvadratne napake. Za koeficienta k_1 in k_2 se pričakuje da sta majhna, zato ju lahko izračunamo tudi z minimizacijsko metodo, po zgledu iz točke 2.

4. Na koncu se lahko še dodatno izvede postopek minimizacije za vse parametre, ki ga opišemo kot:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|\mathbf{m}_{ij} - \mathbf{m}(\mathcal{K}, k_1, k_2, \mathcal{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{P}_j)\|^2, \quad (3.25)$$

kjer je $\mathbf{m}(\mathcal{K}, k_1, k_2, \mathcal{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{P}_j)$ projekcija točke \mathbf{P}_j na sliko i z radialnim popačenjem, opisanim z enačbama (3.23) in (3.24). Minimizacijski problem iz enačbe (3.25) je nelinearen, zato se lahko reši z metodo Levenberg-Marquardt [113, 114].

3.2 Homografija

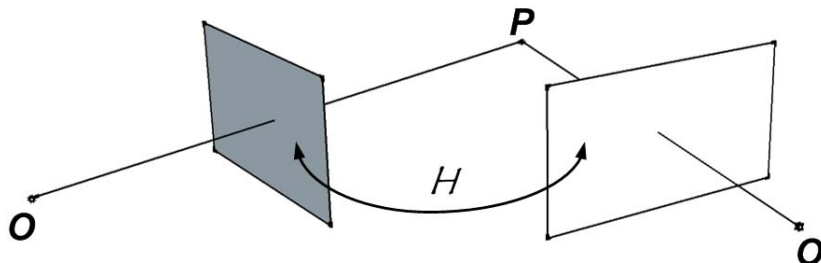
Homografija definira projekcijsko transformacijo, ki omogoča preslikavo koplanarnih točk (tj. točk, ki ležijo na skupni ravnini) med dvema slikama, kot prikazuje slika 3.3. Za uspešno določitev transformacije, ki je zapisana z matriko \mathcal{H} , je potrebno zagotoviti zadostno število začetnih korespondenčnih parov točk $(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i)$, pri čemer je \mathbf{p}_i točka s prve slike, \mathbf{p}'_i pa je njena pripadajoča točka na drugi sliki. Z matriko \mathcal{H} se tako lahko izračuna poljubna korespondenčna točka na drugi sliki po enačbi:

$$\mathbf{p}' = \mathcal{H}\mathbf{p}, \quad (3.26)$$

kjer sta \mathbf{p} in \mathbf{p}' točki iz prve oziroma druge slike. Preslikavo je mogoče uporabiti tudi v obratni smeri, in sicer:

$$\mathbf{p} = \mathcal{H}^{-1} \mathbf{p}', \quad (3.27)$$

kjer \mathcal{H}^{-1} pomeni inverz matrike \mathcal{H} .



Slika 3.3: Homografija v ravnini, definirana z matriko \mathcal{H} . Točki O in O' predstavljata legi prve in druge kamere, P pa je opazovana točka v prostoru.

Matrika \mathcal{H} se lahko izračuna z različnimi metodami, kot so: metoda najmanjših kvadratov, metoda DLT (*Direct Linear Transformation*), metoda Sampson itd. Neodvisno od izbrane metode, vse metode potrebujejo začetne korespondenčne točke. Nekatere metode so zelo občutljive na napačno vzpostavljene začetne korespondenčne točke, druge manj. Avtor Agarwal s sodelavci je v [30] opisal različne metode za določitev homografije in primerjal njihovo natančnost ter robustnost na napačno vzpostavljene začetne korespondenčne točke. V nadaljevanju bomo na kratko opisali le dve metodi za določitev matrike \mathcal{H} . Prva metoda je zelo preprosta za implementacijo in hkrati nerobustna za napačno vzpostavljene začetne korespondenčne točke. Druga metoda, tj. metoda DLT, pa omogoča bolj natančno in robustno določitev matrike \mathcal{H} .

Metoda najmanjše kvadratne napake

Metoda najmanjše kvadratne napake omogoča določitev matrike \mathcal{H} iz poljubnega števila začetnih korespondenčnih točk. Večje kot je to število in bolj kot so začetne korespondenčne točke porazdeljene po sliki, bolj natančno se izračuna preslikava iz ene slike na drugo. Za izračun matrike \mathcal{H} je potrebno pripraviti matriki \mathcal{X} in \mathcal{X}' , ki vsebujeta koordinate začetnih korespondenčnih točk \mathbf{p}_i in \mathbf{p}'_i ($i = 1, \dots, n$), kjer je n število začetnih korespondenčnih točk. Posamezna matrika je sestavljena na naslednji način:

$$\mathcal{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_2 & \dots & \mathbf{p}_n \end{pmatrix}, \quad (3.28)$$

kjer je \mathbf{p}_i i -ta začetna korespondenčna točka s koordinatami $\mathbf{p} = (p_x, p_y, 1)^T$. Enako sestavimo matriko \mathcal{X}' iz množice začetnih korespondenčnih točk iz druge slike \mathbf{p}'_i ($i = 1, \dots, n$). Matriko za projekcijsko transformacijo sedaj izračunamo po enačbi:

$$\mathcal{H} = \mathcal{X}' \mathcal{X}^T (\mathcal{X} \mathcal{X}^T)^{-1}. \quad (3.29)$$

Opisana metoda je hitra, vendar je zelo občutljiva na morebitno napačno vzpostavljene začetne korespondenčne točke. Metoda je seveda primerna tedaj, ko obstaja dovolj velika verjetnost, da so začetne korespondenčne točke dobro vzpostavljene. Primerna je tudi za vzpostavitev začetne matrike \mathcal{H} , ki se nato uporabi kot vhodni podatek za različne metode, ki uporabljajo optimizacijske postopke za vzpostavitev matrike \mathcal{H} (npr. metoda Sampson).

Metoda DLT

Metoda DTL (*Direct Linear Transformation*) za vzpostavitev matrike \mathcal{H} potrebuje le štiri začetne korespondenčne točke. Začetna enačba je nastavljena kot vektorski produkt $\mathbf{p}'_i \times \mathcal{H} \mathbf{p}_i = 0$, pri čemer velja:

$$\mathcal{H} \mathbf{x}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{h}^{1T} \mathbf{p}_i \\ \mathbf{h}^{2T} \mathbf{p}_i \\ \mathbf{h}^{3T} \mathbf{p}_i \end{pmatrix}, \quad (3.30)$$

kjer je $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, w_i)^T$ in \mathbf{h}^{jT} je j -ta transponirana vrstica matrike \mathcal{H} . Sedaj pa lahko zapišemo eksplicitno enačbo za vektorski produkt kot:

$$\mathbf{p}'_i \times \mathcal{H} \mathbf{p}_i = \begin{pmatrix} y'_i \mathbf{h}^{3T} \mathbf{p}_i - w'_i \mathbf{h}^{2T} \mathbf{p}_i \\ w'_i \mathbf{h}^{1T} \mathbf{p}_i - x'_i \mathbf{h}^{3T} \mathbf{p}_i \\ x'_i \mathbf{h}^{2T} \mathbf{p}_i - y'_i \mathbf{h}^{1T} \mathbf{p}_i \end{pmatrix}. \quad (3.31)$$

Dobljeni vektorski produkt se nato pretvori v sistem enačb:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{0}^T & -w'_i \mathbf{p}_i^T & y'_i \mathbf{p}_i^T \\ w'_i \mathbf{p}_i^T & \mathbf{0}^T & -x'_i \mathbf{p}_i^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{h}^1 \\ \mathbf{h}^2 \\ \mathbf{h}^3 \end{pmatrix} = \mathbf{0}, \quad (3.32)$$

ki ga rešimo z metodo singularnega razcepa [31].

Preden se lotimo iskanja rešitve je potrebno množico začetnih korespondenčnih točk normalizirati, kar bistveno izboljša rešitev. Postopek normalizacije je dvokoračen. V prvem koraku izračunamo težišče vseh korespondenčnih točk in nad njimi izvedemo premik tako, da je njihovo

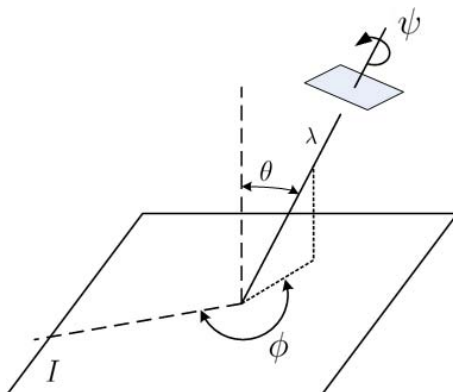
težišče v koordinatnem izhodišču. V drugem koraku pa še izvedemo skaliranje korespondenčnih točk tako, da so vse točke v povprečju oddaljene od koordinatnega izhodišča za vrednost $\sqrt{2}$. Normalizirane točke uporabimo v metodi DLT, koncu pa dobljeni rezultat, tj. matriko \mathcal{H} , še denormaliziramo [31].

3.3 Metoda ASIFT

Metodo ASIFT, ki sta jo predlagala avtorja Morel in Yu [23, 100], za delovanje uporablja deskriptor SIFT [16]. S simulacijo nekaterih parametrov kamere metoda zelo dobro vzpostavi korespondenco med slikama dveh pogledov, ki se med seboj bistveno razlikujeta. V nadaljevanju bomo opisali afini model kamere in nato tudi delovanje metode ASIFT.

3.3.1 Afini model kamere

Metoda ASIFT [23, 100] je invariantna na affine transformacije. Matematični dokaz za to trditev je podan v petem poglavju članka [23]. Invariantnost metode je zagotovljena z ustreznim afinim



Slika 3.4: Geometrijska interpretacija dekompozicije iz enačbe (3.34). Slika I je ravninski fizični objekt. Manjši paralelogram levo zgoraj predstavlja pogled kamere na sliko I . Kota ϕ in θ določata optično os kamere v smeri x in y glede na sliko I . Tretji kot, tj. ψ , pa določa zasuk kamere okoli osi gledanja in λ je faktor skaliranja.

modelom kamere, ki je definiran kot:

$$I = S_1 G_1 \mathcal{A} \mathcal{T} I_0, \quad (3.33)$$

kjer je I digitalna slika, I_0 je frontalni pogled na opazovani objekt z neskončno ločljivostjo (lahko interpretiramo kot zvezno sliko), matriki \mathcal{A} in \mathcal{T} pa predstavljata ravninsko transformacijo in ravninsko projekcijo, ki nastaneta zaradi gibanja kamere.

Gaussovo glajenje slike je definirano s spremenljivko G_1 , medtem ko spremenljivka S_1 predstavlja standardni operator vzorčenja. Afina transformacija je v splošnem definirana kot:

$$\mathcal{A} = \mathcal{H}_\lambda \mathcal{R}_1(\psi) \mathcal{T}_t \mathcal{R}_2(\phi) = \lambda \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix}, \quad (3.34)$$

kjer je $\lambda > 0$, λt je determinanta matrike \mathcal{A} , matriki \mathcal{R}_1 in \mathcal{R}_2 sta matriki zasuka, ki sta definirani s kotoma zasuka ψ in ϕ , matrika \mathcal{T}_t pa opisuje nagib pogleda kamere. Iz enačbe (3.34) je razvidno, da je matrika \mathcal{T}_t diagonalna s prvo lastno vrednostjo $t > 1$ in drugo, ki je enaka 1. Geometrijska interpretacija afine dekompozicije iz enačbe (3.34) je prikazana na sliki 3.4, kjer kota ϕ in θ definirata zasuk optične osi kamere, spremenljivka ψ definira kot zasuka kamere okoli optične osi kamere, λ pa določa faktor skaliranja.

3.3.2 Princip delovanja metode ASIFT

Osnovna ideja metode ASIFT je kombinirati simulacije in normalizacije posameznih transformacij kamere. Ujemanje med slikami za posamezne lokacije in orientacije kamer, ki so posledica simuliranih transformacij, se izvede z metodo SIFT [16]. Detektor SIFT normalizira zasuk in premik ter simulira skaliranje (glej podpoglavje 2.2.2), zaradi česar je v celoti invarianten na skaliranje. V metodi ASIFT pa se še dodatno izvede simulacija treh parametrov: skaliranja in obeh kotov zasuka kamere, tj. kota ϕ in θ (glej sliko 3.4). Spreminjanje kotov ϕ in θ je ekvivalentno spremembi nagiba optične osi kamere, ki ga označimo s spremenljivko t . Ostala dva parametra, tj. premik in kot zasuka ψ , pa se normalizirata. Osnovni princip delovanja metode ASIFT sestoji iz naslednjih korakov:

1. Transformiranje slike I_i na osnovi simulacije popačenja zaradi spremembe orientacije optične osi kamere. Slednje vpliva na dva parametra, tj. kot zasuka ϕ in θ . Sprememba kota θ neposredno vpliva na parameter nagiba t po enačbi $t = \left| \frac{1}{\cos(\theta)} \right|$, kar se na sliki odraža s preslikavo $I(x, y) \rightarrow I(tx, y)$.
2. Simuliranje kotov zasuka (ϕ in θ) in nagiba t se izvede z ustreznimi koraki vzorčenja, kar zagotavlja, da se spremembe simuliranih slik nahajajo znotraj pričakovanih meja orientacije optične osi.
3. Za vse slike, dobljene s simuliranimi transformacijami, se izvede postopek iskanja ujemanja z metodo SIFT.

Metoda ASIFT v primerjavi z ostalimi metodami, kot so: SIFT [16], MSER [77], Haris-afini [70] in Hessian-afini [83], zagotavlja bistveno večje število dobro vzpostavljenih korespondenčnih

parov točk. Eksperimenti metode ASIFT, izvedeni v [23], temeljijo na standardni bazi slik avtorja Mikolajczyk [115].

3.4 Vzpostavitev temeljne matrike \mathcal{F}

Temeljna matrika \mathcal{F} , razsežnosti 3×3 , definira relacijo med dvema slikama. Vzpostavljena relacija omogoča izračun epipremice \mathbf{l}' na drugi sliki za izbrano točko \mathbf{p} iz prve slike. Osnovna metoda za vzpostavitev temeljne matrike \mathcal{F} , tj. metoda osmih točk, je zelo občutljiva na slabo in napačno vzpostavljene korespondenčne točke. Kadar je potrebno zagotoviti dobro vzpostavljeno matriko \mathcal{F} , je bolje uporabiti robustne metode, kot so: metoda LMedS, metoda M-cenilk, metoda RANSAC itd. [106, 116]. V nadaljevanju bomo opisali osnovno delovanje linearne metode osmih točk in delovanje dveh robustnih metod, tj. metode najmanjše mediane kvadratov (LMedS) in metode M-cenilk.

3.4.1 Linearne metode

Linearne metode so najbolj občutljive na vhodne podatke, tj. začetne korespondenčne točke. Neprimerno določeni korespondenčni pari točk (npr. točke preblizu druga drugi, nenatančno ali napačno določena korespondenca) povzročijo napačen izračun temeljne matrike \mathcal{F} . Napačno izračunana matrika pa je za vzpostavljanje relacij med slikami kamer seveda neuporabna.

Linearna metoda osmih točk za določanje temeljne matrike

Zelo splošna in mnogokrat uporabljena metoda za določanje temeljne matrike \mathcal{F} je linearna metoda, ki temelji na algoritmu osmih točk. Imejmo opazovano točko \mathbf{P} v prostoru, dve kameri z optičnima centroma \mathbf{O} in \mathbf{O}' ter sliki Π in Π' , ki vsebujeta projekciji \mathbf{p} in \mathbf{p}' opazovane točke \mathbf{P} v prostoru. Enačba

$$\mathbf{p}'^T \mathcal{F} \mathbf{p} = 0 \quad (3.35)$$

določa relacijo med projekcijama \mathbf{p} in \mathbf{p}' , ki je definirana s temeljno matriko \mathcal{F} . Zgornjo enačbo lahko zapišemo v razširjeni obliki:

$$(u', v', 1) \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = 0, \quad (3.36)$$

ki jo preoblikujemo v:

$$\mathbf{w}^T \mathbf{f} = 0, \quad (3.37)$$

pri čemer sta

$$\mathbf{w} = [u' u, u' v, u', v' u, v' v, v', u, v, 1]^T$$

in

$$\mathbf{f} = [F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}, F_{31}, F_{32}, F_{33}]^T. \quad (3.38)$$

Rezultat množenja enačbe (3.37) je enak:

$$\begin{aligned} u' u F_{11} + u' v F_{12} + u' F_{13} + \\ v' u F_{21} + v' v F_{22} + v' F_{23} + \\ u F_{31} + v F_{32} + F_{33} = 0 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Posamezni začetni korespondenčni točki obeh slik predstavljata eno vrstico v matriki, ki jo označimo kot matrika \mathcal{A} . Potrebno je torej rešiti sistem enačb z devetimi neznankami in devetimi enačbami. Ker je sistem enačb homogen, lahko vrednost F_{33} nastavimo na 1 in sistem bo še vedno enolično rešljiv. Tako za enolično rešitev zadostuje že osem začetnih korespondenčnih točk, ki nastopajo v parih $\mathbf{p}_i \leftrightarrow \mathbf{p}'_i$, ($i = 1, \dots, 8$) in napolnijo homogen sistem linearnih enačb, velikosti 8×8 :

$$\begin{pmatrix} u' u_1 & u' v_1 & u'_1 & v' u_1 & v' v_1 & v'_1 & u_1 & v_1 \\ u' u_2 & u' v_2 & u'_2 & v' u_2 & v' v_2 & v'_2 & u_2 & v_2 \\ u' u_3 & u' v_3 & u'_3 & v' u_3 & v' v_3 & v'_3 & u_3 & v_3 \\ u' u_4 & u' v_4 & u'_4 & v' u_4 & v' v_4 & v'_4 & u_4 & v_4 \\ u' u_5 & u' v_5 & u'_5 & v' u_5 & v' v_5 & v'_5 & u_5 & v_5 \\ u' u_6 & u' v_6 & u'_6 & v' u_6 & v' v_6 & v'_6 & u_6 & v_6 \\ u' u_7 & u' v_7 & u'_7 & v' u_7 & v' v_7 & v'_7 & u_7 & v_7 \\ u' u_8 & u' v_8 & u'_8 & v' u_8 & v' v_8 & v'_8 & u_8 & v_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \\ F_{31} \\ F_{32} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

ali zapisano krajše

$$\mathcal{A} \mathbf{f} = 0, \quad (3.41)$$

kjer matrika \mathcal{A} predstavlja sistem enačb in njeni elementi posamezne koeficiente enačb. Tako dobljen sistem zadostuje za določitev temeljne matrike. Algoritem osmih točk potrebuje n parov točk, ki predstavljajo začetne korespondenčne točke. Če je $n = 8$, obstaja enolična rešitev za dani sistem. Za natančnejšo določitev temeljne matrike \mathcal{F} običajno uporabimo več kot osem točk, npr. $n > 8$. Tedaj imamo na voljo več načinov reševanja sistema enačb. Ena izmed

metod je linearna metoda najmanjših kvadratov, kjer je za določitev temeljne matrike potrebno poiskati minimum enačbe

$$\min \sum_i (\mathbf{p}'^T \mathcal{F} \mathbf{p})^2. \quad (3.42)$$

Najpogosteje sisteme enačb z m -enačbami in n -neznankami, kjer je $m > n$ rešujemo z metodo singularnega razcepa (*singular value decomposition* - *SVD*). Temeljno matriko v splošnem izračunamo z

$$\mathcal{A} = \mathcal{U} \mathcal{S} \mathcal{V}^T, \quad (3.43)$$

kjer sta \mathcal{U} in \mathcal{V} ortogonalnih matriki ter $\mathcal{S} = \text{diag}(r, s, t)$ je diagonalna matrika, pri čemer velja pogoj $r \geq s \geq t$.

Preden se lotimo iskanja rešitve je potrebno vsako množico začetnih korespondenčnih točk normalizirati, kar bistveno izboljša rešitev. Postopek normalizacije je dvokoračen. V prvem koraku izračunamo težišče vseh začetnih korespondenčnih točk in nad njimi izvedemo premik tako, da je njihovo težišče v koordinatnem izhodišču. V drugem koraku izvedemo skaliranje začetnih korespondenčnih točk tako, da so vse točke v povprečju oddaljene od koordinatnega izhodišča za vrednost $\sqrt{2}$. Translacijsko matriko in matriko skaliranja začetnih korespondenčnih točk združimo v transformacijsko matriko \mathcal{T} . Normirane točke sedaj uporabimo za vzpostavitev sistema enačb (glej enačbo (3.41)), ki ga je potrebno rešiti.

Za normirane točke sestavimo sistem enačb, ki ga zapišemo v matriko \mathcal{A} in z metodo SVD rešimo sistem, kar zapišemo kot:

$$\mathcal{A} = \mathcal{U} \mathcal{S} \mathcal{V}^T. \quad (3.44)$$

Matrika \mathcal{A} je sestavljena iz treh matrik \mathcal{U} , \mathcal{S} in \mathcal{V} , kjer zadnji stolpec matrike \mathcal{V} predstavlja vektor rešitve \mathbf{f} , kot je zapisan v enačbi (3.38). Iz vektorja \mathbf{f} sestavimo temeljno matriko \mathcal{F}'' , velikosti 3×3 . Pomembna lastnost temeljne matrike je singularnost matrike, ki ga matrika \mathcal{F}'' v splošnem ne izpolnjuje [31]. Zato jo nadomestimo z matriko \mathcal{F}' , ki se izračuna kot

$$\mathcal{F}' = \mathcal{U} \text{diag}(r, s, 0) \mathcal{V}^T,$$

kjer je \mathcal{F}' singularna matrika in ima rang dva. Ker dobljena rešitev temelji na normiranih točkah, je potrebno matriko \mathcal{F}' ustrezno preoblikovati s transformacijskima matrikama obeh slik \mathcal{T} in \mathcal{T}' po enačbi

$$\mathcal{F} = \mathcal{T}'^T \mathcal{F}' \mathcal{T}. \quad (3.45)$$

Dobljena matrika \mathcal{F} predstavlja temeljno matriko, ki je singularna in omogoča vzpostavitev relacij med točkami $\mathbf{p}_i \leftrightarrow \mathbf{p}'_i$ obeh slik. Linearne metode so zelo občutljive na šum, napake pri

vzpostavljanju korespondenčnih točk pa povzročijo napako pri izračunu temeljne matrike. Če množica začetnih korespondenčnih točk vsebuje točke z nepravilno lego ali napačno vzpostavljenimi relacijami, potem je bolje uporabiti robustne metode.

3.4.2 Robustne metode

Če so korespondenčne točke slabo ali napačno vzpostavljene, tedaj linearne metode ne zagotavljajo dovolj dobre vzpostavitve temeljne matrike \mathcal{F} . V takšnih primerih je potrebno uporabiti robustne metode, ki omogočajo eliminacijo napačno in korekcijo slabo vzpostavljenih korespondenčnih točk. V naslednjih podpoglavjih bomo opisali osnovno delovanje dveh robustnih metod, tj. metodo najmanjše mediane kvadratov (LMedS) in metodo M-cenilk.

Metoda najmanjše mediane kvadratov (LMedS)

Metoda najmanjše mediane kvadratov (*Least Median of Squares – LMedS*) vzpostavi temeljno matriko \mathcal{F} z nelinearno minimizacijo:

$$\min \text{median } r_i^2,$$

kjer poiščemo najmanjše odstopanje r_i od mediane kvadratov. Za obravnavano metodo ni mogoče zapisati enačbe, po kateri bi dobili zelen rezultat, ampak je rešitev potrebno dobiti z iskanjem. Ker preiskovanje celotnega prostora predstavlja preveliko časovno zahtevnost, se izbere le podmnožica naključno izbranih vzorcev. Metodo izpeljemo po naslednjem postopku:

1. Izmed n parov začetnih korespondenčnih točk, izberemo $k \geq 8$ parov začetnih korespondenčnih točk. Ti začetni pari tvorijo posamezni vzorec. Število vseh vzorcev naj bo enako m .
2. Za vsak vzorec izračunamo temeljno matriko \mathcal{F} z linearno metodo (podpoglavje 3.4.1), ki jo označimo z \mathcal{F}_J , kjer je J indeks posameznega vzorca.
3. Vsaki matriki \mathcal{F}_J izračunamo mediano kvadratov razlik po enačbi:

$$M_J = \text{median}_{i=1, \dots, n} \left[d^2(\mathbf{p}'_i, \mathcal{F}_J \mathbf{p}_i) + d^2(\mathbf{p}_i, \mathcal{F}_J^T \mathbf{p}'_i) \right], \quad (3.46)$$

glede na vse pare začetnih korespondečnih točk, kjer d predstavlja razdaljo med točko \mathbf{p}'_i

in njeno epipolarno premico \mathbf{l}'_i ($d(\mathbf{p}'_i, \mathbf{l}'_i)$). Razdaljo d izračunamo po enačbi:

$$d(\mathbf{p}'_i, \mathbf{l}'_i) = \frac{\mathbf{p}'_i{}^T \mathbf{l}'_i}{\sqrt{l_1'^2 + l_2'^2}}, \quad (3.47)$$

kjer se epipremica \mathbf{l}' izračuna po naslednji enačbi:

$$\mathbf{l}' = \mathcal{F}\mathbf{p}. \quad (3.48)$$

4. Izmed m ocen M_J izberemo temeljno matriko \mathcal{F}_J z najnižjo vrednostjo M_J . Obstaja verjetnost, da je temeljna matrika dobro vzpostavljena, vendar lahko ima zaradi posameznih točk, ki močno odstopajo, večjo mediano in zato ne bo izbrana.
5. Za množico točk zato izračunamo standardni odklon σ in izberemo temeljno matriko z mediano izračunano po enačbi:

$$\min \text{median } w_i r_i^2,$$

kjer je w_i utež določena s pravilom:

$$w_i = \begin{cases} 1, & \text{če } (r_i^2 \leq (2,5\sigma)^2), \\ 0, & \text{sicer,} \end{cases}$$

pri čemer je standardni odklon σ pomnožen s faktorjem 2,5 [106] in r_i je i -ta razdalja točke od epipolarne premice na prvi in drugi sliki po enačbi:

$$r_i^2 = d^2(\mathbf{p}'_i, \mathcal{F}_J \mathbf{p}_i) + d^2(\mathbf{p}_i, \mathcal{F}_J^T \mathbf{p}'_i).$$

V izračunu mediane tako upoštevamo le točke, ki ne odstopajo od predpisane vrednosti, kar vpliva na izboljšanje rezultata.

Kot vidimo je kvaliteta določanja minimuma odvisna od števila vzorcev m . Optimalno število vzorcev nas torej vodi k manjši časovni zahtevnosti na eni strani in izračunu dovolj dobre temeljne matrike \mathcal{F} na drugi strani. Vzorec je dober, če vsebuje k začetnih korespondenčnih točk z dobro vzpostavljenimi relacijami. Predpostavimo, da celotna množica točk vsebuje ε odstotkov slabih parov točk. Verjetnost Υ , da je vsaj eden od m vzorcev dober, je potem enaka:

$$\Upsilon = 1 - \left[1 - (1 - \varepsilon)^k\right]^m. \quad (3.49)$$

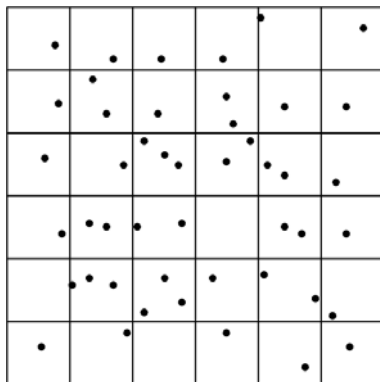
Pri zahtevani verjetnosti Υ , znanem številu korespondenčnih točk k in pri znani oceni deleža slabo oziroma napačno vzpostavljenih korespondenčnih točk ε , lahko iz enačbe (3.49) izračunamo potrebno število vzorcev m na naslednji način:

$$m = \frac{\log(1 - \Upsilon)}{\log[1 - (1 - \varepsilon)^k]} \quad (3.50)$$

Ob predpostavki, da je $\varepsilon = 40\%$, zahtevana verjetnost $\Upsilon = 0,99$ in število začetnih korespondenčnih točk v posameznem vzorcu $k = 8$, je potrebno zagotoviti 272 različnih vzorcev.

Kot vidimo, potekajo izračuni posameznih temeljnih matrik neodvisno. Narava postopka LMedS omogoča zelo dobro paralelno računanje, kar lahko bistveno pohitri delovanje metode.

Opisana metoda postane nestabilna, če so začetne korespondenčne točke izbrane preblizu druga drugi. Zato je smiselno izvesti izbiro s pomočjo grupiranja. To najlažje izvedemo tako, da sliko razdelimo na $a \times a$ enako velikih pravokotnikov, kot prikazuje slika 3.5, zatem pa



Slika 3.5: Slika razdeljena na 6×6 območij (pravokotnikov), iz katerih izbiramo točke.

določimo ustrezno število kvadratov, iz katerih izbiramo začetne točke. Takšno izbiranje nam zagotavlja, da bodo izbrane točke bolj razpršene po celotni sliki. Posledično bodo tudi razdalje med točkami večje, kar pripomore k večji numerični stabilnosti metode.

Metoda M-cenilk

Dana je množica začetnih korespondenčnih točk, kjer je r_i razlika i -te točke od njene prave vrednosti. Klasična metoda najmanjših kvadratov skuša minimizirati izraz $\sum_i r_i^2$, pri čemer sistem postane nestabilen, če posamezna točka močno odstopa. V tem primeru postopek minimizacije popači vrednosti temeljne matrike, ki je tako neuporabna. Metoda M-cenilk poskuša zmanjšati vpliv močno odstopajočih točk tako, da kvadratno funkcijo zamenja z ustrežnejšo funkcijo ρ .

Enačbo za minimizacijo lahko sedaj zapišemo kot:

$$\min \sum_i \rho(r_i), \quad (3.51)$$

kjer je ρ simetrična in pozitivna funkcija z unikatnim minimumom.

Naj bo $\mathbf{e} = (e_1, \dots, e_m)^T$ ocenitveni vektor. Njegova M-cenilka temelji na funkciji $\rho(r_i)$ ter ima rešitev za m enačb:

$$\sum_i \psi(r_i) \frac{\partial r_i}{\partial e_j} = 0, \quad \text{za } j = 1, \dots, m, \quad (3.52)$$

kjer se odvod $\psi(x) = d\rho(x)/dx$ imenuje funkcija vpliva, e_j predstavlja element ocenitvenega vektorja \mathbf{e} in m je dolžina ocenitvenega vektorja. Če definiramo funkcijo uteži kot:

$$w(x) = \frac{\psi(x)}{x},$$

in jo nadomestimo v enačbi (3.52), potem dobimo:

$$\sum_i w(r_i) r_i \frac{\partial r_i}{\partial e_j} = 0, \quad \text{za } j = 1, \dots, m. \quad (3.53)$$

Dobljena enačba predstavlja sistem enačb, ki je rešljiv iterativno po enačbi:

$$\min \sum_i w(r_i^{(k)}) r_i^2, \quad (3.54)$$

kjer k predstavlja število iteracij. Utež $w(r_i^{(k)})$ je potrebno izračunati po vsaki iteraciji in predstavlja vrednost funkcije uteži v k -ti iteraciji.

Enačbo (3.54) je potrebno rešiti s postopkom minimizacije večdimenzionalne funkcije. Za reševanje tovrstnih problemov obstajajo metode, ki poiščejo minimum funkcije več spremenljivk, kot so metoda Simplex, Powell-ova metoda, konjugirana gradientna metoda, variabilna metrična metoda itd. V naši doktorski disertaciji smo uporabili metodo Simplex, ki je preprosta za implementacijo, hkrati pa dovolj dobra za uspešno reševanje našega problema.

Večdimenzionalno Simplex metodo [117] sta predlagala Nelder in Mead leta 1965. Metoda je preprosta, a počasna. Primerna je za iskanje minimuma funkcij do dvajset spremenljivk in zagotavlja konvergenco ob dobro izbranih začetnih točkah. Posamezna spremenljivka predstavlja vrednost za posamezno dimenzijo. Spremenljivke v prostoru predstavljajo oglišča objekta Simplex, ki ima dimenzijo $N - 1$, pri čemer je N število spremenljivk. V postopku minimizacije

iščemo vrednosti spremenljivk, ki določajo najmanjšo prostornino objekta Simplex.

Ocenitveni vektor \mathbf{e} predstavlja temeljno matriko \mathcal{F} , kjer so zaporedni elementi vektorja hkrati zaporedni elementi matrike v zaporedju $F_{11}, F_{12}, F_{13}, \dots, F_{31}, F_{32}, F_{33}$. Za reševanje N dimenzionalnih problemov potrebujemo $N + 1$ začetnih vektorjev \mathbf{e} . Začetni vektorji močno vplivajo na konvergenco metode. Izračunamo jih lahko na dva načina. V prvem primeru, kot je predlagano v [118] po enačbi:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_0 + \alpha \mathbf{s}_i, \quad (3.55)$$

kjer je $i = 1, \dots, m+1$, \mathbf{r}_0 je prvi začetni vektor, α koeficient in \mathbf{s} vektor dimenzije m . Prvi začetni vektor lahko izračunamo z linearno metodo osmih točk. Začetne vektorje pa lahko izračunamo z metodo najmanjše mediane kvadratov (LMedS) in v večini primerov dobimo bistveno boljše rezultate [116, 119], vendar se podaljša čas računanja.

Funkcija vpliva Vpliv začetnih korespondenčnih točk na vrednosti ocenitvenih parametrov merimo s funkcijo vpliva. Če vzamemo za funkcijo $\rho(x) = x^2/2$, potem je funkcija vpliva $\psi(x) = x$. To pomeni, da vpliv na začetne korespondenčne točke raste linearno z velikostjo napake, kar ne prispeva k robustnosti metode. Posamezna cenilka je robustna, če je vpliv posamezne točke zanemarljiv glede na celotno odstopanje. Robustna metoda M-cenilk ima naslednje omejitve:

- funkcija vpliva mora biti definirana na celotnem območju,
- robustna cenilka mora biti unikatna, kar zahteva, da je individualna funkcija ρ konveksna za ocenitveni vektor \mathbf{e} . Konveksna omejitev ima za posledico, da je drugi odvod $\frac{\partial^2 \rho(\cdot)}{\partial \mathbf{e}^2}$ nenegativen.
- praktična zahteva, da je drugi odvod $\frac{\partial^2 \rho(\cdot)}{\partial \mathbf{e}^2}$ singularen, pomeni, da je gradient $\frac{\partial \rho(\cdot)}{\partial \mathbf{e}} \neq 0$, s čimer odpravimo iskanje po celotnem prostoru parametrov.

Tabela 3.1 prikazuje nekaj skupin funkcij pri uporabi metode M-cenilk [120]. Vsaka izmed navedenih funkcij ima svoje lastnosti, ki jih je smiselno uporabiti odvisno od vhodnih podatkov. V nadaljevanju bomo predstavili bistvene lastnosti posameznih cenilk.

Cenilka L_1 : Cenilka absolutne vrednosti ni stabilna, ker funkcija $\rho = |x|$ ni konveksna za x . Ob tem pa še velja, da drugi odvod $x = 0$ ni definiran na celotnem območju in lahko se zgodi, da rešitev ne obstaja.

Cenilka L_2 : Cenilka najmanjšega kvadrata ni robustna, saj funkcija vpliva ni definirana na celotnem območju.

tip cenilke	$\rho(x)$	$\psi(x)$	$w(x)$
L_1	$ x $	$\text{sgn}(x)$	$\frac{1}{ x }$
L_2	$\frac{x^2}{2}$	x	1
$L_1 - L_2$	$2(\sqrt{\frac{1+x^2}{2}} - 1)$	$\frac{x}{\sqrt{\frac{1+x^2}{2}}}$	$\frac{1}{\sqrt{\frac{1+x^2}{2}}}$
L_p	$\frac{ x ^\nu}{\nu}$	$\text{sgn}(x) x ^{\nu-1}$	$ x ^{\nu-2}$
"Fair"	$c^2 \left[\frac{ x }{c} - \log \left(1 + \frac{ x }{c} \right) \right]$	$\frac{x}{1 + \frac{ x }{c}}$	$\frac{1}{1 + \frac{ x }{c}}$
Huber $\begin{cases} \text{if } x \leq k \\ \text{if } x \geq k \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{x^2}{2} \\ k(x - \frac{k}{2}) \end{cases}$	$\begin{cases} x \\ k \text{sgn}(x) \end{cases}$	$\begin{cases} 1 \\ \frac{k}{ x } \end{cases}$
Cauchy	$\frac{c^2}{2} \log \left(1 + \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right)$	$\frac{x}{1 + \left(\frac{x}{c} \right)^2}$	$\frac{1}{1 + \left(\frac{x}{c} \right)^2}$
Geman-McClure	$\frac{\frac{x^2}{2}}{1+x^2}$	$\frac{x}{(1+x^2)^2}$	$\frac{1}{(1+x^2)^2}$
Welsch	$\frac{c^2}{2} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right) \right]$	$x \exp \left(- \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right)$	$\exp \left(- \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right)$
Tukey $\begin{cases} \text{if } x \leq c \\ \text{if } x \geq c \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{c^2}{6} \left(1 - \left[1 - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right]^3 \right) \\ \frac{c^2}{6} \end{cases}$	$\begin{cases} x \left[1 - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right]^2 \\ 0 \end{cases}$	$\begin{cases} \left[1 - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right]^2 \\ 0 \end{cases}$

Tabela 3.1: Tabela funkcij za določitev M-cenilk.

Cenilka $L_1 - L_2$: Vsebuje prednosti obeh, zgoraj navedenih cenilk: cenilka L_1 zmanjša vpliv velikih odstopanj, medtem ko je cenilka L_2 konveksna.

Cenilka L_p : Cenilka najmanjše moči predstavlja družino funkcij. Če za ν izberemo 2 dobimo cenilko L_2 , $\nu = 1$ pa dobimo L_1 . Manjši kot je ν , manjši je učinek velikih napak na rezultat ocenitvenega vektorja e . Izbira vrednosti ν mora biti optimalno izbrana, da metoda še ostane stabilna za zmerne napake. Izkustvena vrednost za ν je 1,2 [120], kjer lahko pričakujemo optimalno rešitev. Potrebni je veliko poizkusov, da umestimo vrednost ν med $1 < \nu < 2$ in se približamo minimalni napaki.

Cenilka "Fair": Cenilka vsebuje povsod zvezne odvode in omogoča unikatno rešitev. Asimptotična učinkovitost je 95 % in ima standardno normalno porazdelitev pri konstanti $c = 1,3998$.

Cenilka Huber: Huber cenilka je parabola, ki se približa ničli in narašča linearno, če je $|x| > k$. Asimptotična učinkovitost je 95 % in ima standardno normalno porazdelitev, pri konstanti $c = 1,345$. Obravnavana cenilka se dobro obnese in se priporoča skoraj v vseh primerih.

Cenilka Cauchy: Cauchy-jeva cenilka je znana kot Lorentzianova funkcija, ki ne zagotavlja unikatne rešitve. Prvi odvod Cauchy-jeve cenilke lahko vrne napačen rezultat in zato je ni smiselno uporabljati. Asimptotična učinkovitost je 95 % in ima standardno normalno porazdelitev pri konstanti $c = 2,3849$.

Ostale cenilke iz tabele 3.1, kot so Geman-McClure, Welsch in Tukey, niso pogosto v uporabi.

Kot vidimo ima izbira ustrezne cenilke pomembno vlogo, saj močno vpliva na rešitev. V splošnem se najboljše izkažeta cenilki L_p in "Fair". Slednja je modifikacija Huber-ove cenilke. Poudariti je potrebno, da z obravnavanimi cenilkami ne moremo v celoti izločiti vpliva velikih odstopanj v podatkih. Metoda M-cenilk je nerobustna za nepravilno določene relacije med začetnimi korespondenčnimi točkami. Njena robustnost se pokaže predvsem tedaj, ko lokacije nekaterih začetnih korespondenčnih točk nekoliko odstopajo [116].

3.5 Segmentacijska metoda

Segmentacijska metoda avtorjev Felzenszwalb in Huttenlocher [121] razdeli sliko v segmentirane regije na osnovi grafa. Definirajmo strukturo grafa na naslednji način: naj bo neusmerjen graf $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ z vozlišči $v \in \mathcal{V}$, tj. množico elementov, ki predstavljajo posamezni segment, in robovi $(v_i, v_j) \in \mathcal{E}$, ki povezujejo sosednja vozlišča. Vsak rob $(v_i, v_j) \in \mathcal{E}$ ovrednotimo s pripadajočo utežjo $w(v_i, v_j)$, ki predstavlja nenegativno mero različnosti med sosednjima vozliščema v_i in v_j . Če opisano drevesno strukturo preslikamo v postopek segmentacije slik, potem vozlišča iz množice \mathcal{V} predstavljajo slikovne elemente na sliki, uteži robov pa izbrano mero različnosti med dvema slikovnim elementoma, ki sta povezana s tem robom. Mera različnost med dvema slikovnim elementoma je lahko definirana na različne načine, in sicer kot razlika slikovnih elementov v: intenziteti, barvi, gibanju, premiku ipd.

Rezultat segmentacije \mathcal{S} , ki temelji na grafu \mathcal{G} , je razdelitev množice \mathcal{V} v segmentirane regije \mathcal{R} tako, da vsaka regija $\mathcal{R} \in \mathcal{S}$ ustreza grafu $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$. Pri tem se lahko pojavijo različni načini merjenja kvalitete procesa segmentacije. Neodvisno od tega je splošni cilj segmentacije, da podobna vozlišča (tj. slikovni elementi), pripadajo isti segmentirani regiji in da so vozlišča iz različnih segmentiranih regij med seboj karseda različna. V grafu se to manifestira tako, da ima rob med dvema vozliščema znotraj segmentirane regije nizko utež, rob med dvema vozliščema iz različni segmentiranih regij pa visoko utež.

Delovanje segmentacijske metode temelji na predikatu D , ki omogoča določitev meje med dvema regijama v procesu segmentacije. Predikat D tako definira mero različnosti med dvema regijama z naslednjima razdaljama:

- notranja razdalja segmentirane regije $\mathcal{R} \subseteq \mathcal{V}$, tj. razdalja int , je enaka največji uteži v minimalno vpetem drevesu segmentirane regije, $MTS(\mathcal{R}, \mathcal{E})$, kar zapišemo kot:

$$int(\mathcal{R}) = \max_{e \in MTS(\mathcal{R}, \mathcal{E})} w(e), \quad (3.56)$$

- razdalja med dvema segmentiranimi regijama $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2 \subseteq \mathcal{V}$, tj. razdalja dif , je enaka minimalni uteži med tema dvema regijama, kar zapišemo kot:

$$dif(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2) = \min_{v_i \in \mathcal{R}_1, v_j \in \mathcal{R}_2, (v_i, v_j) \in \mathcal{E}} w(v_i, v_j). \quad (3.57)$$

Če med regijama \mathcal{R}_1 in \mathcal{R}_2 ne obstaja povezave, tj. množica robov \mathcal{E} je prazna, tedaj iz enačbe (3.57) izhaja, da je $dif(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2) = \infty$, kar je lahko problematično za delovanje algoritma. V praksi se zato uporabi nekoliko spremenjena definicija razlike $dif(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2)$, ki temelji na mediani

uteži, ali kakšni drugi kvantitativni predpostavki. Na takšen način se lahko izboljša delovanje algoritma, predvsem pa njegova robustnost.

Predikat D z obema razdaljama, tj. $int(\mathcal{R})$ in $dif(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2)$, poda oceno, ali med obravnavanima regijama \mathcal{R}_1 in \mathcal{R}_2 obstaja meja. Če je razdalja med dvema regijama, tj. $dif(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2)$ velika glede na notranjo razdaljo regije, tj. $int(\mathcal{R})$, potem med tema dvema regija očitno obstaja meja. Ocena o tem se oblikuje na osnovi izbranega praga, ki definira minimalno potrebno razliko med razdaljama. Pogoju lahko zapišemo na naslednji način:

$$D(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2) = \begin{cases} \text{pravilno} & \text{if } dif(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2) > Mint(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2) \\ \text{napačno} & \text{sicer} \end{cases}, \quad (3.58)$$

kjer je minimum notranje razdalje, tj. $Mint$, definiran kot:

$$Mint(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2) = \min \left[int(\mathcal{R}_1) + \tau(\mathcal{R}_1), int(\mathcal{R}_2) + \tau(\mathcal{R}_2) \right]. \quad (3.59)$$

Oznaka τ v enačbi (3.59) predstavlja pragovno funkcijo, ki je definirana kot:

$$\tau(\mathcal{R}) = \frac{k}{|\mathcal{R}|}, \quad (3.60)$$

kjer $|\mathcal{R}|$ predstavlja velikost regije \mathcal{R} , k pa je pozitivna konstanta.

3.5.1 Algoritem

Vhod v algoritem predstavlja graf $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ z n vozlišči in m robovi, izhod pa je segmentacija $\mathcal{S} = (\mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_r)$. Koraki segmentacijskega algoritma so naslednji:

1. Sortiranje uteži \mathcal{E} v $\pi = (o_1, \dots, o_m)$ po nepadajočem vrstnem redu.
2. Začetna segmentacija je \mathcal{S}^0 , kjer posamezna vozlišča predstavljajo njihove regije.
3. Ponavljanje koraka 4 za $q = 1, \dots, m$.
4. Sestavljanje segmentacije \mathcal{S}^q glede na segmentacijo \mathcal{S}^{q-1} na naslednji način. Naj bosta vozlišči v_i in v_j povezani z q -tim robom po načelu $o_q = (v_i, v_j)$. Če v_i in v_j ne povezujeta regij segmentacije \mathcal{S}^{q-1} in utež $w(o_q)$ je majhna v primerjavi z notranjo razdaljo obeh regij, potem se izvede združevanje obeh regij, sicer pa ne. Bolj formalno to lahko zapišemo kot: naj bo \mathcal{R}_i^{q-1} regija segmentacije \mathcal{S}^{q-1} , ki vsebuje vozlišče v_i in \mathcal{R}_j^{q-1} je regija, ki vsebuje vozlišče v_j . Če velja $\mathcal{R}_i^{q-1} \neq \mathcal{R}_j^{q-1}$ in $w(o_q) \leq Mint(\mathcal{R}_i^{q-1}, \mathcal{R}_j^{q-1})$, potem segmentacija \mathcal{S}^q

nastane iz segmentacije \mathcal{S}^{q-1} z zlivanjem regij \mathcal{R}_i^{q-1} in \mathcal{R}_j^{q-1} . V nasprotnem primeru velja $\mathcal{S}^q = \mathcal{S}^{q-1}$.

5. Izhod: $\mathcal{S} = \mathcal{S}^m$.

3.6 3D rekonstrukcija

Rekonstrukcija je postopek, kjer iz dveh ali več slik opazovanega objekta rekonstruiramo 3D model objekta. Postopke 3D rekonstrukcije je večkoračni proces, kjer gradnja 3D modela poteka po naslednjih fazah:

1. določanje značilk (detektorji in deskriptorji),
2. vzpostavitev korespondence med značilkami,
3. izračun projekcijskih matrik kamer,
4. projekcijska 3D rekonstrukcija in
5. transformacija iz projekcijskega prostora v afini in nato v metrični prostor.

Postopek 3D rekonstrukcije izračuna točko \mathbf{P} v prostoru s pomočjo projekcijskih matrik kamer $\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2, \dots, \mathcal{M}_m$ iz korespondenčnih točk $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_m$, ki predstavljajo izračunano točko \mathbf{P} na posameznih slikah. Točka \mathbf{P} v prostoru se lahko izračuna iz m kamer. Metode za določanje značilk in metode za vzpostavitev korespondence med značilkami smo pregledno že opisali v poglavju 2, zato bomo v nadaljevanju opisali metode za izračun projekcijske matrike kamere.

3.6.1 Projekcijska matrika kamere

Projekcijsko matriko kamere lahko sestavimo, če poznamo notranje in zunanje parametre kamere. V podpoglavju 3.1.2 smo povzeli Zhangovo kalibracijsko metodo [26], ki iz več slik istega kalibracijskega vzorca izračuna notranje, nato pa še zunanje parametre kamere. Iz izračunanih parametrov kamere lahko sestavimo projekcijsko matriko kamere za posamezni pogled, ki ga definira enačba (3.14). Kadar pa kamere niso kalibrirane, je za uspešno 3D rekonstrukcijo potrebno projekcijske matrike kamer izračunati drugače. V nadaljevanju opisujemo dve metodi. Prva je faktorizacijska metoda, ki omogoča določitev projekcijske matrike iz poljubnega števila pogledov, druga pa je metoda, ki uporablja temeljno matriko \mathcal{F} (glej podpoglavje 3.4). Slednja metoda omogoča določitev projekcijske matrike le za dva kameri.

Faktorizacijska metoda

Faktorizacijska metoda je posplošitev metode Tomasi in Kanade [61], ki sta jo predstavila Mahmud in Hebert [122]. Omogoča izračun projekcijske matrike za m kamer in za n korespondenčnih točk po enačbi:

$$\mathcal{D} = \mathcal{M}\mathcal{P}, \quad (3.61)$$

kjer je

$$\mathcal{D} = \begin{pmatrix} z_{11}\mathbf{p}_{11} & z_{12}\mathbf{p}_{12} & \dots & z_{1n}\mathbf{p}_{1n} \\ z_{21}\mathbf{p}_{21} & z_{22}\mathbf{p}_{22} & \dots & z_{2n}\mathbf{p}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{m1}\mathbf{p}_{m1} & z_{m2}\mathbf{p}_{m2} & \dots & z_{mn}\mathbf{p}_{mn} \end{pmatrix}, \mathcal{M} = \begin{pmatrix} \mathcal{M}_1 \\ \mathcal{M}_2 \\ \dots \\ \mathcal{M}_m \end{pmatrix} \text{ in } \mathcal{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{P}_2 & \dots & \mathbf{P}_n \end{pmatrix}. \quad (3.62)$$

V splošnem je matrika \mathcal{D} razsežnosti $3m \times n$ in ima rank 4. Določitev vrednosti z_{ij} , \mathcal{M} in \mathcal{P} je mogoče zagotoviti z iterativnim postopkom. Minimizarati je potrebno srednjo kvadratno napako razdalje med lokacijami opazovanih točk in predpostavljenimi točkami iz parametrov z_{ij} , \mathcal{M}_i in \mathbf{P}_j , kar lahko zapišemo kot:

$$E = \frac{1}{mn} \sum_{i,j} |\mathbf{p}_{ij} - \frac{1}{z_{ij}} \mathcal{M}_i \mathbf{P}_j|^2. \quad (3.63)$$

Problem optimizacije iz enačbe (3.63) je nelinearen, kadar so parametri z_{ij} , \mathcal{M}_i in \mathbf{P}_j neznani. Namesto tega definiramo vektor $\mathbf{d}_j = (z_{1j}\mathbf{p}_{1j}, \dots, z_{mj}\mathbf{p}_{mj})^T$ ($j = 1, \dots, n$), ki minimizira izraz

$$E = \frac{1}{mn} E_j, \quad \text{kjer je} \quad E_j = \frac{1}{|\mathbf{d}_j|^2} |\mathbf{d}_j - \mathcal{M}\mathbf{P}_j|^2. \quad (3.64)$$

Izpeljavo smo pripeljali do točke, ko je potrebno izvesti postopek minimizacije [61].

Izračun projekcijske matrike kamere iz temeljne matrike \mathcal{F}

Postopek določanja projekcijske matrike kamere avtorjev Hartley in Zisserman [31], je bolj enostaven, a omogoča določitev projekcijske matrike le za dve kameri. Za določitev projekcijske matrike kamer je potrebno poznati lokacijo epipola, ki jo izračunamo iz temeljne matrike \mathcal{F} (glej podpoglavje 3.4) z metodo singularnega razcepa (metoda SVD). Po razcepu temeljne matrike \mathcal{F} dobimo tri matrike:

- matriko \mathcal{U} , ki je ortogonalna in velikosti 3×3 ,
- diagonalno matriko \mathcal{D} , ki na svoji diagonali vsebuje lastne vrednosti in

- matriko \mathcal{V} , katere stolpci so lastni vektorji in je velikosti 3×3 .

Lokacijo epipola predstavlja zadnji (tj. tretji) stolpec matrike \mathcal{U} . Iz epipola izračunamo poševno simetrično (*skew-symmetric*) matriko $[\mathbf{e}]_{\times}$ kot:

$$[\mathbf{e}]_{\times} = \begin{pmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.65)$$

Sedaj lahko zapišemo projekcijsko matriko prve kamere kot

$$\mathcal{M}_1 = [\mathbf{I} | \boldsymbol{\theta}]$$

in projekcijsko matriko druge kamere kot

$$\mathcal{M}_2 = [[\mathbf{e}']_{\times} \mathcal{F} | \mathbf{e}']. \quad (3.66)$$

Natančnost obeh projekcijskih matrik kamer je predvsem odvisna od natančnosti temeljne matrike \mathcal{F} , ki je lahko izračunana z različnimi metodami. Pregledni opis teh metod in primerjava med njimi je podrobno obdelana v [106]. Nekaj najbolj pogosto uporabljenih metod za vzpostavitev temeljne matrike \mathcal{F} pa smo že predstavili v podpoglavju 3.4.

3.6.2 Postopek 3D rekonstrukcije

Izračun točke \mathbf{P} v prostoru, ki jo predstavljajo točke $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_m$ na slikah, izračunamo na naslednji način. Projekcijske matrike kamer $\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2, \dots, \mathcal{M}_m$ združimo v eno samo matriko \mathcal{D} , in sicer kot:

$$\mathcal{D} = \begin{pmatrix} \mathcal{M}_1 \\ \mathcal{M}_2 \\ \dots \\ \mathcal{M}_m \end{pmatrix}, \quad (3.67)$$

kjer je matrika \mathcal{D} razsežnosti $3m \times 4$. V splošnem lahko točko \mathbf{P} v prostoru, ki jo predstavljajo korespondenčne točke \mathbf{p}_i na vseh slikah, zapišemo z enačbo:

$$\mathbf{P} = \mathcal{D}^{-1} \mathbf{q}^T. \quad (3.68)$$

Pri tem je vektor \mathbf{q} sestavljen iz homogenih koordinat korespondenčnih točk na naslednji način:

$$\mathbf{q} = (p_{1x}, p_{1y}, 1, p_{2x}, p_{2y}, 1, \dots, p_{mx}, p_{my}, 1),$$

kjer je m število kamer (pogledov), p_{ix} in p_{iy} sta koordinati točke \mathbf{p}_i na i -ti sliki.

3.7 Metoda RANSAC

Ime algoritma RANSAC je kratica angleške besedne zveze "RANdom SAmple Consensus", ki sta ga predlagala Fischler in Bolles leta 1981 [123]. Osnovna predpostavka algoritma temelji na tem, da je vhodne podatke mogoče opisati z določenim naborom parametrov izbranega matematičnega modela. Algoritem RANSAC predvideva tudi, da ob predstavitvi samo nekaj vhodnih podatkov obstaja postopek, ki oceni parametre matematičnega modela tako, da ta optimalno zajame vse podatke. Prav zato se algoritem uporablja predvsem v metodah za ocenjevanje parametrov izbranega matematičnega modela iz nabora opazovanih podatkov, kjer se pojavlja velik odstotek odstopajočih podatkov (lahko tudi več kot 50 %), ki ne ustrezajo izbranemu modelu. Poleg tega je potrebno upoštevati, da je v vhodnih podatkih prisoten tudi šum. Vzroki za prisotnost bolj ali manj odstopajočih podatkov so različni, kot na primer: i.) ekstremne vrednosti šuma, ii.) napačne meritve ali iii.) napačne hipoteze o interpretaciji podatkov. Velik odstotek odstopajočih podatkov običajno predstavlja praktično omejitev za mnoge druge pogosto uporabljene tehnike za določanje ocene parametrov, kot so:

- tehnike, ki temeljijo na pristopu najmanjše napake kvadratov ali
- robustne tehnike z najmanjšo srednjo vrednostjo kvadratov.

Prednost algoritma RANSAC je v njegovi robustnosti, saj z veliko verjetnostjo oceni parametre modela kljub temu, da so v množici opazovanih točk prisotni odstopajoči podatki. Ena izmed slabosti algoritma pa je, da ne obstaja zgornja časovna meja, ki bi podala maksimalni čas izvajanja za ocenitev optimalnih parametrov. Če uporabimo zgornjo časovno mejo izvajanja, potem ni nujno, da bo dobljena rešitev optimalna.

Algoritem RANSAC ni determinističen, ampak zagotavlja rešitev na osnovi iteracij. Postopek lahko opišemo na naslednji način: imejmo množico \mathcal{D} , ki vsebuje n vhodnih podatkov. Na podlagi p podatkov iz množice \mathcal{D} je moč oceniti parametre matematičnega modela. Posamezna iteracija algoritma RANSAC je tako sestavljena iz dveh osnovnih korakov:

1. **Hipoteza.** Naključno se izbere p podatkov, ki določajo množico vzorcev, zatem pa se izračunajo parametri Θ matematičnega modela. Vsaka množica vzorcev vsebuje le minimalno

število podatkov, ki so potrebni za izračun parametrov izbranega modela.

2. **Test.** V drugem koraku algoritma se na osnovi izbrane metrike preverja prileganje vseh vhodnih podatkov iz množice \mathcal{D} glede na izračunane parametre Θ . Izbira metrike je odvisna od problema, ki ga rešujemo. Nabor teh podatkov se imenuje množica soglasja \mathcal{C} .

Skozi iteracije se množice soglasij \mathcal{C} razvrščajo po dveh kriterijih, in sicer: i.) po številu podatkov v posamezni množici \mathcal{C} in ii.) po povprečnem odstopanju podatkov množice soglasja \mathcal{C} od podatkov množice vzorcev. Algoritem RANSAC se zaključi, ko i.) verjetnost, da bi odkrili boljše uvrščeno množico soglasja \mathcal{C} , pade pod določen prag, ii.) je število vnaprej določenih iteracij algoritma preseženo ali iii.) poteče zgornja časovna meja za izvajanje algoritma. Nabor podatkov iz množice vzorcev, za katere množica soglasja \mathcal{C} zagotavlja najboljšo uvrstitev, tj. najboljše prileganje podatkov izbranemu matematičnemu modelu, je rezultat algoritma.

Število potrebnih iteracij za uspešno določitev parametrov modela je odvisno od vhodnih podatkov oziroma od deleža tistih podatkov, ki ne ustrezajo izbranemu modelu. V idealnem primeru, če bi vsi vhodni podatki ustrezali izbranemu modelu, bi za uspešno vzpostavitev parametrov modela bila potrebna zgolj ena iteracija. Ker v praksi običajno temu ni tako, je zato potrebno izvesti več iteracij (običajno nekaj sto). Koliko? Razlago povzemamo po [124]. Verjetnost Υ dobro izbrane množice vzorcev lahko izračunamo po enačbi:

$$\Upsilon = 1 - \left[1 - (1 - \varepsilon)^p \right]^m, \quad (3.69)$$

kjer je p število podatkov v množici vzorcev, m je število vseh množic vzorcev, ε pa predstavlja delež odstopajočih podatkov. Iz enačbe (3.69) izračunamo število potrebnih množic vzorcev za doseganje želene verjetnosti Υ na osnovi deleža odstopajočih podatkov ε in števila podatkov v posamezni množici vzorcev p po naslednji enačbi:

$$m = \frac{\log(1 - \Upsilon)}{\log[1 - (1 - \varepsilon)^p]}. \quad (3.70)$$

Poglavje 4

Metoda ASIFT-SH

Metoda ASIFT-SH omogoča izračun korespondenčne točke p' na drugi sliki za poljubno izbrano točko p iz prve slike pri velikih odmikih dveh kamer. Delovanje metode predstavljajo štiri osnovni koraki, ki so podrobno opisani v naslednjem podpoglavju. Najbolj kritična točka metode je postopek segmentacije, ki se izvede v drugem koraku našega algoritma. Metodo smo zato v tem segmentu nadgradili z adaptivnim prilagajanjem segmentiranih regij, ki omogoča preoblikovanje le-teh tako, da točke znotraj segmentiranih regij bolje ustrezajo kriteriju koplanarnosti.

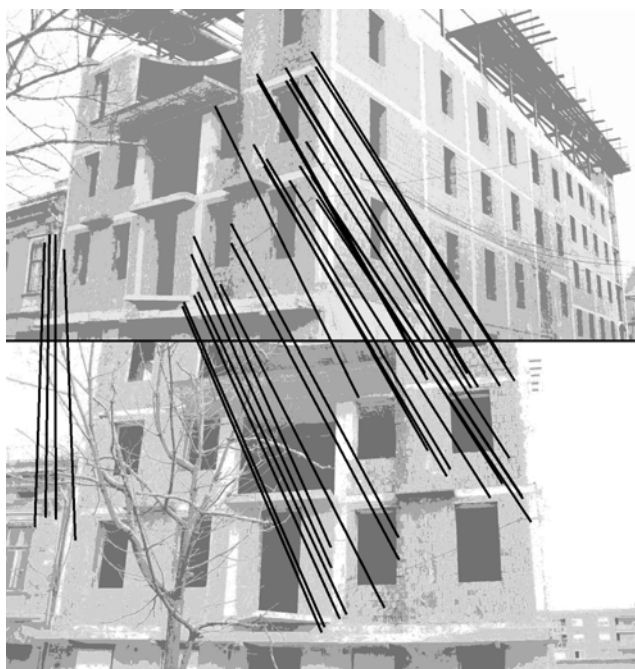
4.1 Postopek določanja korespondence za poljubno izbrano točko pri velikem odkliku dveh kamer

Gradbišče je dinamično okolje, ki se skozi faze gradnje tudi organizacijsko spreminja. Za avtomatsko spremljanje gradnje s fiksno nameščenimi kamerami je potrebno zagotoviti dovolj veliko pokritost med različnimi pogledi kamer. Pri tem je kvaliteta slikovnega materiala ključnega pomena. Postopek zajemanja slik ne sme vplivati na proces gradnje. Če upoštevamo organizacijo gradbišča, zahtevano pokritost pogledov in kvaliteto slik, potem je optimalno vzpostaviti sistem fiksno nameščenih kamer, katerih medsebojna oddaljenost je istega velikostnega razreda kot je oddaljenost kamer od objekta. V uvodu smo opisali, da zagotavljanje dovolj dobre korespondence med točkami slik dveh pogledov in njihovo zadostno število še ne pomeni rešitev našega problema. Tako smo razvili metodo ASIFT-SH (preliminarni rezultati so v [28]), ki je sestavljena iz štirih korakov, in sicer: i.) določanja začetnih korespondenčnih točk, ii.) združevanja tistih korespondenčnih parov točk v podmnožice, katerih rekonstruirane točke v prostoru so koplanarne, iii.) izračuna lokalnih homografij za posamezno podmnožico in iv.) določitve korespondenčne točke z uporabo ustrezne lokalne homografije. Delovanje metode ni omejeno

na iskanje podobnih točk v okolici epipolarne premice, prav tako pa se ne zahteva pogoj koplanarnosti za opazovane regije. Prvi trije koraki metode se izvedejo v fazi predprocesiranja, nato pa sledi izračun korespondence za poljubno izbrano točko. Na takšen način izračun korespondenčne točke zahteva minimalni procesorski čas. Posamezni koraki so podrobneje opisani v nadaljevanju.

4.1.1 Začetne korespondenčne točke

Začetne korespondenčne točke dveh pogledov se vzpostavijo z metodo ASIFT [23]. Te točke so invariantne na zasuk, premik in skaliranje. Slika 4.1 prikazuje primer najdenih povezav med temi točkami, vendar je zaradi preglednosti prikazanih le 5 % vseh najdenih začetnih korespondenčnih točk.



Slika 4.1: Določitev začetnih korespondenčnih točk z uporabo značilk ASIFT na vzorčnem paru slik. Najdenih je bilo 644 korespondenčnih parov točk. Črne črte prikazujejo povezavo med začetnimi korespondenčnimi točkami. Prikazanih je le 5 % vseh najdenih korespondenčnih parov točk.

Poudariti je potrebno, da tudi metoda ASIFT vzpostavi napačne začetne korespondenčne pare točk. Število napačno vzpostavljenih začetnih korespondenčnih točk je mogoče zmanjšati z epipolarno omejitvijo. Zato moramo izračunati temeljno matriko \mathcal{F} iz začetnih korespondenčnih točk (glej podpoglavje 3.4), pri čemer uporabimo kombinacijo metod LMedS in M-cenilk [106, 125]. Prva metoda je robustna za množico začetnih korespondenčnih točk, ki vsebuje malo

število točk z velikim odstopanjem od pravega položaja, medtem ko je druga metoda robustna tedaj, ko večje število točk vsebujejo manjše odstopanje. Uporabljena kombinacija metod sicer poveča čas računanja temeljne matrike, kar pa v našem primeru ne predstavlja oviro, saj opazujemo počasi spreminjajočo se sceno (npr. gradbišče). Eliminacija napačno vzpostavljenih korespondenčnih parov točk temelji na ugotavljanju oddaljenosti korespondenčne točke od epipremice. Če je razdalja točke od premice večja od vnaprej predpisanega kriterija, potem se takšen korespondenčni par izloči. Podrobneje opišimo postopek eliminacije napačno vzpostavljenih začetnih korespondenčnih točk.

Za točko \mathbf{p}_i na prvi sliki se s pomočjo temeljne matrike \mathcal{F} izračuna epipremica \mathbf{l}'_i na drugi sliki po enačbi:

$$\mathbf{l}'_i = \mathcal{F}\mathbf{p}_i. \quad (4.1)$$

Kriterij za eliminacijo napačno vzpostavljenih točk definiramo kot:

$$|d(\mathbf{p}'_i, \mathbf{l}'_i) - \bar{d}'| > \alpha\sigma', \quad (4.2)$$

kjer točki \mathbf{p}_i in \mathbf{p}'_i predstavljata korespondenčni par točk, $d(\mathbf{p}'_i, \mathbf{l}'_i)$ je evklidska razdalja med točko \mathbf{p}'_i in epipremico \mathbf{l}'_i ter \bar{d}' predstavlja povprečno razdaljo vseh začetnih korespondenčnih točk \mathbf{p}'_j , $j = 1 \dots n$ (n je število začetnih korespondenčnih parov točk), od njihovih epipremic \mathbf{l}'_j . Če neenačba (4.2) velja za posamezni par začetnih korespondenčnih točk $(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i)$, potem se takšen par točk odstrani. Spremenljivka σ predstavlja standardni odklon oddaljenosti začetnih korespondenčnih točk \mathbf{p}'_j od njihovih epipremic \mathbf{l}'_j , tj. $d(\mathbf{p}'_j, \mathbf{l}'_j)$. Faktor α pa je pozitivno realno število.

Oddaljenosti začetnih korespondenčnih točk \mathbf{p}'_i od pripadajočih epipremic \mathbf{l}'_i modeliramo z Gaussovo porazdelitvijo. Parameter α v kriteriju za eliminacijo iz neenačbe (4.2) določa delež korespondenčnih parov točk, ki se izločijo. V primeru idealne Gaussove porazdelitve bi pri faktorju $\alpha = 2,5$ ohranili 99,4% vseh korespondenčnih parov, ostale pa bi eliminirali. Tak faktor uporabimo tudi v naši raziskavi, enak faktor α je bil uporabljen tudi v [106].

4.1.2 Združevanje začetnih korespondenčnih točk v podmnožice

Dobljene korespondenčne točke iz prvega koraka (glej sliko 4.1) v splošnem niso koplanarne, zato jih je potrebno razporediti v ustrezne podmnožice tako, da so vse korespondenčne točke, ki so članice posamezne podmnožice, tudi koplanarne. V primeru, da bi vse segmentirane regije na sliki predstavljale tudi koplanarne dele opazovanega objekta, potem bi s pomočjo lokalne homografije za posamezno regijo lahko natančno izračunali korespondenčno točko na drugi sliki

za poljubno izbrano točko iz prve slike.

Združevanje korespondenčnih točk v podmnožice se izvede na osnovi segmentiranih regij. Uporabljena je lahko katerakoli segmentacijska metoda, pri čemer je edina zahteva, da vsi dobljeni segmenti slike predstavljajo koplanarne dele opazovanega objekta. Zahteva je izpolnjena, če je segmentirana regija del ravne površine objekta. Treba je poudariti, da cilj našega doktorskega dela ni razvoj nove segmentacijske metode, zato smo le poiskali najbolj primerno. V ožjem izboru so bile podrobneje testirane tri različne segmentacijske metode, in sicer: segmentacijska metoda temelječa na grafu [121] (glej tudi podpoglavje 3.5), segmentacijska metode s pravilom "k najbližjih sosedov" in segmentacijska metoda globalnega praga z avtomatsko določljivim pragom [126]. Za posamezno metodo so kontrolni parametri bili nastavljeni izkustveno in so veljali za vse testne slike. Vsaka segmentacijska metoda je nato bila vključena v metodo ASIFT-SH. Rezultati meritev metode ASIFT-SH z uporabo različnih segmentacijskih metod so pokazali, da se najbolje obnese segmentacijska metoda, ki temelji na grafu [121].

Zaradi lažje razlage privzemimo, da se na sliki prve kamere izbirajo poljubne točke za katere se nato izračunajo korespondenčne točke na sliki druge kamere. Najprej je nad sliko prve kamere potrebno izvesti postopek segmentacije. Primer rezultata takšnega postopka je prikazan na sliki 4.2. Nato začetne korespondenčne točke, ki se nahajajo v regiji \mathcal{R}_j , $j = 1, \dots, k$ (k je število vseh regij segmentirane slike), določimo kot člane podmnožice \mathcal{S}_j . Posamezna podmnožica \mathcal{S}_j je torej v splošnem definirana kot:

$$\mathcal{S}_j = \{(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i); \forall i \mathbf{p}_i \in \mathcal{R}_j\}, \quad (4.3)$$

kjer točka \mathbf{p}_i pripada segmentirani regiji \mathcal{R}_j na sliki prve kamere. Metoda ASIFT-SH seveda deluje tudi v obratni smeri. Torej, ko poljubno izbrane točke določimo na sliki druge kamere, se lahko uporabi ista interpretacija podmnožice. Tedaj se definicija podmnožice \mathcal{S}_j razširi:

$$\mathcal{S}_j = \{(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i); \forall i \mathbf{p}_i \in \mathcal{R}_j \vee \mathbf{p}'_i \in \mathcal{R}'_j\}, \quad (4.4)$$

kjer pa točka \mathbf{p}'_i pripada segmentirani regiji \mathcal{R}'_j na sliki druge kamere. Nekateri korespondenčni pari točk $(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i)$ so lahko tudi člani več podmnožic, in sicer v primeru, če se točke \mathbf{p}_i nahajajo v dovolj majhni okolici sosednjih segmentiranih regij (v našem primeru pet slikovnih elementov od roba regije). Na tak način se poveča število članov v posamezni podmnožici, kar pripomore k bolj zanesljivemu izračunavanju lokalnih homografij.



Slika 4.2: Rezultat segmentacijske metode, ki temelji na grafu za sliko prve kamere (glej zgornjo sliko 4.1). Izbrana segmentacijska metoda zahteva tri parametre: γ , K in min . Parametri so bili določeni empirično in so bili nespremenjeni za vse eksperimente ($\gamma = 1$, $K = 1000$, $min = 2000$).

4.1.3 Izračun lokalne homografije

Za vsako podmnožico točk \mathcal{S}_j , ki ležijo znotraj segmentirane regije \mathcal{R}_j , se izračuna lokalna homografija, ki je opisana z matriko \mathcal{H}_j . Natančnost izračuna posamezne lokalne homografije \mathcal{H}_j je seveda odvisna od: i.) natančnosti začetnih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j in ii.) koplanarnosti začetnih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j , kar pa je močno odvisno od postopka segmentacije.

Avtor Agarwal s sodelavci [30] je pokazal, da je metoda DLT najbolj primerna za izračun matrike \mathcal{H} (kratek opis metode DLT se nahaja v podpoglavju 3.2). Do podobnih rezultatov smo prišli tudi v eni izmed naših raziskav [29]. Na osnovi rezultatov obeh študij smo se odločili, da bomo v naši metodi ASIFT-SH uporabili metodo DLT za izračun lokalnih homografij (tj. matrik \mathcal{H}_j) za vse podmnožice \mathcal{S}_j .

4.1.4 Določitev korespondenčne točke

Korespondenčno točko na drugi sliki izračunamo za poljubno izbrano točko iz prve slike direktno po enačbi (3.26). Imejmo poljubno izbrano točko \mathbf{p} iz prve slike, ki je članica segmentirane regije \mathcal{R}_j . Kot je opisano v podpoglavju 4.1.2, se v regiji \mathcal{R}_j nahaja množica začetnih korespondenčnih točk \mathcal{S}_j . Lokalna homografija, definirana z matriko \mathcal{H}_j , se izračuna za posamezno regijo \mathcal{R}_j , pri čemer uporabimo začetne korespondenčne točke iz podmnožice \mathcal{S}_j (glej podpoglavje 4.1.3). Korespondenčno točko \mathbf{p}' na drugi sliki za poljubno izbrano točko \mathbf{p} iz prve slike enolično določimo z enačbo (3.26) in lokalno homografijo \mathcal{H}_j .

4.2 Nadgradnja osnovnega postopka za vzpostavitev korespondence z izsledki 3D rekonstrukcije

Metoda ASIFT-SH izračuna korespondenčno točko z ustrežno matriko \mathcal{H}_j po enačbi (3.26). Pred tem je potrebno izračunati posamezno matriko \mathcal{H}_j iz začetnih korespondenčnih točk segmentirane regije \mathcal{R}_j . Vse točke znotraj te regije so združene v podmnožico \mathcal{S}_j . Ker je oblika segmentiranih regij močno odvisna od postopka segmentacije, lahko sklepamo, da le-ta vpliva tudi na natančnost izračuna lokalne homografije \mathcal{H}_j . Metoda ASIFT-SH temelji na predpostavki, da so segmentirane regije slike koplanarne. Koplanarnost pomeni, da vse točke, ki tvorijo posamezno regijo, ležijo v isti ravnini. To je sicer v veliki meri mogoče doseči z izbiro ustrezne segmentacijske metode [121] in nastavitvijo ustreznih parametrov uporabljene metode, vendar v splošnem koplanarnosti ni mogoče zagotoviti. Cilj nadgradnje osnovnega postopka je prav v tem, da bi popravili morebitne nekoplanarne regije, dobljene s segmentacijo, s čimer bi izboljšali natančnost metode ASIFT-SH.

Nadgradnja osnovnega postopka sestoji iz dveh delov. Najprej identificiramo tiste segmentirane regije \mathcal{R}_j , katerih rekonstruirane začetne korespondenčne točke iz podmnožice \mathcal{S}_j niso koplanarne. Zatim pa sledi delitev takšnih segmentiranih regij na manjše regije, ki pa ustrezajo kriteriju koplanarnosti.

4.2.1 Identifikacija nekoplanarnih segmentiranih regij

Za vsako segmentirano regijo \mathcal{R}_j obstaja množica začetnih korespondenčnih točk \mathcal{S}_j ¹. Identifikacijo nekoplanarnosti za posamezno segmentirano regijo \mathcal{R}_j izvedemo z ugotavljanjem odstopanja vseh rekonstruiranih začetnih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j od pripadajoče rekonstruirane ravnine. Če sta povprečno odstopanje in standardni odklon razdalj vseh rekonstruiranih začetnih korespondenčnih točk od te ravnine večja od vnaprej določenega praga, potem se takšna segmentirana regija razglasi kot nekoplanarna. Ravnino, ki je definirana iz rekonstruiranih začetnih korespondenčnih točk, izračunamo z metodo singularnega razcepa (SVD) po naslednjem postopku:

¹Podmnožica \mathcal{S}_j je lahko tudi prazna množica.

1. Rekonstruirane začetne korespondenčne točke iz podmnožice \mathcal{S}_j zapišemo v matriko \mathcal{P} :

$$\mathcal{P} = \begin{pmatrix} P_{1_x}^j & P_{1_y}^j & P_{1_z}^j & 1 \\ P_{2_x}^j & P_{2_y}^j & P_{2_z}^j & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n_x}^j & P_{n_y}^j & P_{n_z}^j & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

kjer so $P_{1_x}^j$, $P_{1_y}^j$ in $P_{1_z}^j$ koordinate x , y in z prve točke iz podmnožice točk \mathcal{S}_j , n pa je število vseh rekonstruiranih začetnih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j .

2. Metoda SVD razcepi matriko \mathcal{P} na produkt treh matrik, in sicer:

$$[\mathcal{U}, \mathcal{D}, \mathcal{V}] = \text{SVD}(\mathcal{P}), \quad (4.6)$$

kjer sta matriki \mathcal{U} in \mathcal{V} ortogonalni, matrika \mathcal{D} pa je diagonalna matrika. Lastni vektor iz matrike \mathcal{V} , ki pripada najmanjši vrednosti iz matrike \mathcal{D} implicitno predstavlja enačbo ravnine Π , za katero velja, da je povprečna razdalja vseh točk podmnožice od te ravnine najmanjša. Ker so lastne vrednosti v matriki \mathcal{D} urejene po velikost, potem je zadnji stolpec v matriki \mathcal{V} kar lastni vektor, ki predstavlja našo rešitev, tj. enačbo ravnine.

Identifikacija nekoplanarne segmentirane regije \mathcal{R}_j temelji na opazovanju povprečne oddaljenosti \bar{d} in standardnega odklona oddaljenosti σ rekonstruiranih začetnih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j od pripadajoče ravnine Π_j , izračunane po enačbah (4.5) in (4.6). Na tej osnovi lahko sklepamo dvojice:

1. če je povprečno odstopanje \bar{d} zmerno veliko in standardni odklon σ velik, potem upravičeno sklepamo, da znotraj podmnožice \mathcal{S}_j obstaja majhen nabor točk, ki niso koplanarne, glede na ostale točke iz te podmnožice, in
2. če sta povprečno odstopanje \bar{d} in standardni odklon σ velika, sklepamo, da znotraj podmnožice \mathcal{S}_j obstaja večji nabor ali več manjših naborov točk, ki niso koplanarni glede na ostale točke iz podmnožice \mathcal{S}_j .

4.2.2 Preoblikovanje nekoplanarnih segmentiranih regij

Če sta povprečno odstopanje in standardni odklon rekonstruiranih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j večja od vnaprej predpisanega praga (korespondenčne točke regije \mathcal{S}_j ne ustrezajo kriteriju koplanarnosti), potem je takšno segmentirano regijo, tj. regija \mathcal{S}_j , potrebno ustrezno preoblikovati. Ob tem se pojavi še dodatna omejitev: vsaka izmed novih ali preoblikovanih

regij \mathcal{R}_j mora vsebovati vsaj štiri začetne korespondenčne točke, če želimo izračunati lokalne homografije \mathcal{H}_j .

Če sta povprečno odstopanje \bar{d} ali standardni odklon σ rekonstruiranih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j večja od vnaprej določenega praga, je za delitev regije \mathcal{R}_j smiselno uporabiti iterativno metodo RANSAC [123] (glej tudi podpoglavje 3.7). Ta metoda v splošnem omogoča združevanje entitet na osnovi izbrane lastnosti. Izbrana lastnost je v našem primeru oddaljenost rekonstruirane korespondenčne točke P_i^j od ravnine Π_j . Za preoblikovanje podmnožice \mathcal{S}_j uporabimo metodo RANSAC na naslednji način:

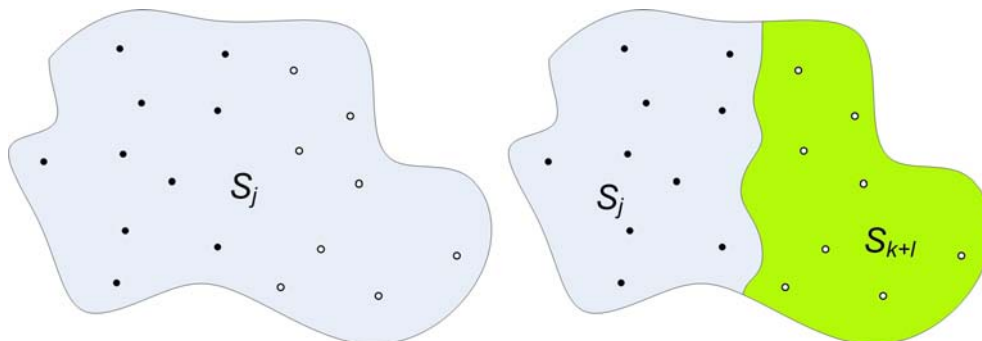
1. S pomočjo vseh n rekonstruiranih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j pripravimo m množic vzorcev $\mathcal{Q}_i^j, i = 1, \dots, m$. Vsaka množica vzorcev \mathcal{Q}_i^j vsebuje p naključno izbranih rekonstruiranih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j , za katere izračunamo ravnino Π_i^j , ki pripada množici vzorcev \mathcal{Q}_i^j .
2. Za vsako ravnino Π_i^j , ki sestoji iz rekonstruiranih korespondenčnih točk množice vzorcev \mathcal{Q}_i^j , se izračuna njeno prileganje glede na vse rekonstruirane korespondenčne točke iz obravnavane podmnožice \mathcal{S}_j . Pri tem upoštevamo dva kriterija:
 - (a) povprečno razdaljo \bar{d}_i^j vseh rekonstruiranih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j in
 - (b) število tistih rekonstruiranih korespondenčnih točk, katerih oddaljenost od ravnine Π_i^j je manjša od določenega praga r . Število takšnih točk značimo z oznako n_i^j .

Iz obeh kriterijev za posamezno množico vzorcev \mathcal{Q}_i^j izračunamo količnik q_i^j kot:

$$q_i^j = \bar{d}_i^j / n_i^j. \quad (4.7)$$

3. Rešitev predstavlja ravnina Π_i^j , ki jo dobimo iz množice vzorcev \mathcal{Q}_i^j z najmanjšim količnikom q_i^j . Ta ravnina se najboljše prilega rekonstruiranim korespondenčnim točkam iz podmnožice \mathcal{S}_j . Rekonstruirane korespondenčne točke, ki jim dobljena rešitev ne ustreza (tj. njihova razdalja od ravnine Π_i^j je večja od predpisanega praga r), prestavimo v novo podmnožico \mathcal{S}_{k+l} , $l = 1, \dots, z$, kjer je z število vseh identificiranih segmentiranih regij \mathcal{R}_j , ki ne ustrezajo kriteriju koplanarnosti.
4. Na koncu iteracije za posamezno podmnožico \mathcal{S}_j , ki je bila identificirana kot nekoplanarna, dobimo dve podmnožici, tj. podmnožico \mathcal{S}_j in \mathcal{S}_{k+l} . Razdelitev rekonstruiranih korespondenčnih točk v ti dve podmnožici se odraža tudi v razdelitvi segmentirane regije \mathcal{R}_j . Pri tem izvedemo segmentacijo rast regij [127] nad segmentirano regijo \mathcal{R}_j , kjer uporabimo

dve začetni jedri. Vsako izmed jeder je sestavljeno iz začetnih korespondenčnih točk podmnožice \mathcal{S}_j oziroma \mathcal{S}_{k+l} . Obe jedri sočasno širimo z enako hitrostjo. Rast posamezne regije omejuje le druga rastoča regija. Rezultat takšnega postopka shematsko prikazuje slika 4.3.



Slika 4.3: Prikaz delitve nekoplanarne regije na dve regiji. Polni krožci predstavljajo korespondenčne točke iz podmnožice \mathcal{S}_j , prazni krožci pa pripadajo podmnožici \mathcal{S}_{k+l} . Leva slika prikazuje še nedeljeno segmentirano regijo \mathcal{R}_j , medtem ko slika na desni prikazuje njeno razdelitev glede na delitev korespondenčnih točk v podmnožicah \mathcal{S}_j in \mathcal{S}_{k+l} .

Po prvi iteraciji zgoraj opisanega postopka dobimo z preoblikovanih segmentiranih regij, ki ustrezajo kriteriju koplanarnosti, in prav tako z novo nastalih, za katere pa je koplanarnost potrebno še preveriti. S preverjanjem kriterija koplanarnosti slednjih pa se prične druga iteracija. Zgornje štiri korake nato iterativno ponavljamo, dokler vse segmentirane regije ne ustrezajo kriteriju koplanarnosti oziroma dokler je $z > 0$.

4.3 Določitev parametrov

Delovanje osnovne in adaptivne različice metode ASIFT-SH je zelo odvisno od parametrov metod v posameznih korakih. Največji vpliv na končni rezultat imajo parametri segmentacijske metode in parametri metode RANSAC. V nadaljevanju je zato podrobneje opisan način določitve parametrov za obe metodi.

4.3.1 Segmentacijska metode

Natančnost delovanja metode ASIFT-SH je seveda odvisna od natančnosti uporabljene mešanice metod. Pri tem ima pomembno vlogo čim optimalnejša izbira parametrov uporabljenih metod. V podpoglavju 4.1.2 smo opisali, da je izbira segmentacijske metode temeljila na primerjavi več metod. Vsako izmed preizkušenih segmentacijskih metod smo uporabili v metodi ASIFT-SH in

ugotavljali, s katero naša metoda dosega najboljše rezultate. Parametre pri vsaki segmentacijski metodi smo nastavljali izkustveno. Na osnovi izkušenj smo v končno različico algoritma ASIFT-SH vgradili segmentacijsko metodo, ki sliko razdeli v segmentirane regije na osnovi grafa [121]. Izbrana segmentacijska metoda zahteva tri parametre, in sicer γ , K in min . Vrednosti teh parametrov med eksperimentiranjem nismo spreminjali (glej poglavje 6). Parametri zavzamejo naslednje vrednosti: $\gamma = 1$, $K = 1000$ in $min = 2000$.

4.3.2 Metoda RANSAC

Pri nadgradnji metode ASIFT-SH z adaptivnim prilagajanjem uporabljamo metodo RANSAC. Le-ta za svoje delovanje potrebuje tri smiselno določene parametre, in sicer: število vzorčnih množic m , število podatkov v posamezni vzorčni množici p in dovoljeni prag odstopanja r . Prag r v našem primeru določa še dovoljeno oddaljenost rekonstruirane točke P_i od pripadajoče ravnine Π . Število množic vzorcev, m , je odvisno od deleža odstopajočih rekonstruiranih korespondenčnih točk iz podmnožice \mathcal{S}_j glede na ravnino Π_j za določen prag odstopanja r . Število podatkov v vzorčnih množicah, p , pa je odvisno predvsem od obravnavanega matematičnega modela. Za izračun ustreznega števila množic vzorcev uporabimo enačbo (3.70), ki jo ponovno zapišemo kot:

$$m = \frac{\log(1 - \Upsilon)}{\log[1 - (1 - \varepsilon)^p]}, \quad (4.8)$$

kjer Υ predstavlja stopnjo verjetnosti, da bodo podatki iz najdene množice vzorcev najboljše določali parametre Θ , s katerimi opišemo izbrani matematični model, spremenljivka ε predstavlja delež tistih rekonstruiranih korespondenčnih točk, ki so od ravnine Π oddaljene več kot določa prag odstopanja r , število podatkov v množici vzorcev pa je predstavljeno s spremenljivko p .

Predpostavimo, da rekonstruirane korespondenčne točke segmentirane regije \mathcal{R}_j ležijo na dveh različnih ravninah Π . Statistično gledano je vrednost spremenljivke ε tedaj enaka 0,5. Ker želimo z zelo veliko verjetnostjo zagotoviti uporabno množico vzorcev, potem vrednost verjetnosti Υ nastavimo blizu 1 (npr. $\Upsilon = 0,99$), število podatkov v množici vzorcev pa je že fiksno nastavljeno na vrednost 3. Z enačbo (4.8) lahko za te predpostavke izračunamo, da potrebujemo 35 množic vzorcev ($m = 35$).

V času testiranja metode ASIFT-SH s postopkom adaptivnega prilagajanja segmentiranih regij smo variirali tudi parametre metode RANSAC. Ugotovili smo, da metoda ASIFT-SH zagotavlja najboljše rezultate pri 300 vzorčnih množicah (tj. spremenljivka $m = 300$) in pri šestih rekonstruiranih korespondenčnih točkah v posamezni vzorčni množici (tj. spremenljivka $p = 6$).

Poglavje 5

Vpliv temperature na kalibriran sistem kamer

Postopek adaptivnega prilagajanja v metodi ASIFT-SH je zaradi 3D rekonstrukcije odvisen tudi od natančnosti določanja notranjih in zunanjih parametrov kamer, ki so na gradbišču izpostavljene različnim vremenskim vplivom, tj. vlagi, soncu, snegu, vetru itd. Za učinkovitejšo analizo teh vplivov bomo v prvem delu tega poglavja dopolnili analitični model kamere s členom, ki modelira vpliv temperaturnih sprememb na delovanje posamezne kamere. Na osnovi tega pa bomo v drugem delu opisali vpliv temperaturnih sprememb na kalibriran sistem kamer.

5.1 Model temperaturnih sprememb

Kamera, s katero spremljamo potek gradnje, je običajno nameščena na jekleno konstrukcijo. V nadaljevanju predpostavimo, da je takšna konstrukcija homogena in da masa kamere ne vpliva na geometrijo konstrukcije po namestitvi kamere. Spremembe zunanje temperature spreminjajo geometrijo konstrukcije (tj. povzročijo raztezanje materiala), kar ima za posledico spremembo zunanjih parametrov kamere. Tudi optični sistem kamere je neposredno izpostavljen temperaturnim spremembam, ki pa lahko imajo vpliv na spremembo notranjih parametrov kamere. V nadaljevanju bomo modelirali vpliv temperaturnih sprememb na spremembo parametrov kamere.

5.1.1 Vpliv temperature na notranje parametre

Predpostavimo, da se temperatura po celotni kameri spreminja enakomerno. Začnimo s koeficientoma f_α in f_β , ki ju določimo po enačbi (3.5). Sprememba temperature neposredno vpliva na optični sistem kamere, s tem pa tudi na spremembo goriščne razdalje.

Linearno raztezanje snovi je podano z enačbo [128]:

$$\frac{\Delta r}{r} = \psi \Delta T, \quad (5.1)$$

kjer je Δr sprememba razdalje, r je razdalja, ΔT je sprememba temperature materiala, ψ pa je koeficient linearnega temperaturnega raztezka snovi [128, 129]. V naši študiji smo uporabili preprost linearni model za opis spremembe notranjih parametrov, kot opisuje enačba (5.1). Takšen linearizirani model kamere je po eni strani preprost za obravnavo, hkrati pa zagotavlja dovolj natančne rezultate za potrditev in verifikacijo naše ideje. Zaradi okoliščin, kjer bi se lahko pojavila potreba po večji natančnosti in eksaktnosti modela, ki opisuje temperaturni raztezek optičnega sistema kamere, se lahko linearni model nadomesti z modelom, ki optični sistem uporabljene kamere natančneje opisuje.

Podobno lahko določimo spremembo goriščne razdalje kot:

$$\Delta f = f \psi_f \Delta T, \quad (5.2)$$

kjer je f goriščna razdalja, ψ_f je koeficient dolžinskega raztezka optičnega sistema in leč v njem, ΔT pa je temperaturna sprememba kamere. Določitev ψ_f zahteva natančno poznavanje fizikalnih lastnosti optike in karakterističnih parametrov kamere. Običajno uporabniki nimamo dostopa do teh podatkov.

Sprememba goriščne razdalje Δf neposredno vpliva tudi na parametra f_α in f_β , in sicer:

$$f_{\alpha T} = k f_T,$$

kjer je $f_{\alpha T}$ parameter kamere po spremembi temperature. Nova goriščna razdalje f_T je tako:

$$f_T = f_{T_0} + \Delta f_{T_r}, \quad (5.3)$$

kjer je f_T goriščna razdalja po spremembi temperature, f_{T_0} je goriščna razdalja kamere pri normalni temperaturi (tj. temperaturi T_0) in Δf_{T_r} je sprememba goriščne razdalje v odvisnosti od spremembe temperature. Parameter $f_{\alpha T}$ lahko sedaj zapišemo v razširjeni obliki kot:

$$f_{\alpha T} = k f (1 + \psi_f \Delta T). \quad (5.4)$$

Podobno lahko naredimo tudi za parameter f_β , kjer velja:

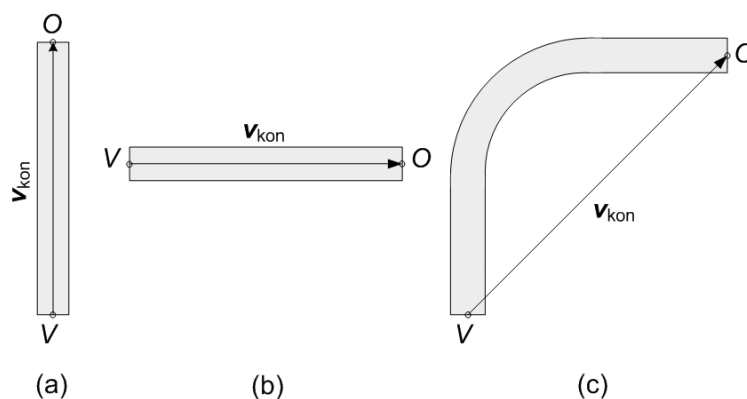
$$f_{\beta T} = l f_T \quad \text{oziroma} \quad f_{\beta T} = l f (1 + \psi_f \Delta T), \quad (5.5)$$

kjer je f_{β_T} parameter kamere po spremembi temperature. Parametra k oziroma l in goriščna razdalja f sta obratno sorazmerna, saj se z večanjem goriščne razdalje zmanjšuje število slikovnih elementov na enoto dolžine (zmanjševanje k in l). Iz enačbe (3.5) vidimo, da je obratno sorazmerje parametrov k oziroma l in f linearno, kar pomeni, da sta parametra kamere f_α in f_β konstantna za nespremenjene nastavitve. Iz tega sledi, da sta notranja parametra kamere f_α in f_β neodvisna od spremembe goriščne razdalje in posledično tudi od spremembe temperature [130, 131, 132].

Zraven parametrov f_α in f_β , analitični model kamere zajema tudi parametre, kot so: u_0 , v_0 in s . Notranja parametra u_0 in v_0 opisujeta osnovne lastnosti optičnega sistema kamere, saj določata premik koordinatnih sistemov normalizirane in projekcijske ravnine (glej sliko 3.1). Ob enakomernem segrevanju kamere se geometrija optičnega sistema enakomerno spreminja in ne vpliva na delovanje kamere zaradi spremembe zunanje temperature. V modelu kamere smo upoštevali tudi parameter popačenosti s , ki opisuje popačenosti slikovnih elementov zaradi zasuka koordinatnih sistemov normalizirane in projekcijske ravnine, kot je prikazano na sliki 3.2b. Enakomerno segrevanje optičnega sistema ne vpliva na spremembo parametra popačenja s .

5.1.2 Vpliv temperature na zunanje parametre

Zunanji parametri kamere imajo neposredni vpliv na smer gledanja in položaj kamere (matrika zasuka \mathcal{R} in vektor premika t). Sprememba teh parametrov je običajno posledica spremembe nosilne konstrukcije, ki lahko nastane zaradi spremembe temperature. Če je nosilna konstrukcija homogena jo lahko modeliramo z vektorjem konstrukcije \mathbf{v}_{kon} , kot prikazuje slika 5.1.



Slika 5.1: Vektor konstrukcije \mathbf{v}_{kon} poteka od vpetja V nosilne konstrukcije do prijemališča kamere O za različne tipe nosilnih konstrukcij, kot so: steber (a), prečnica (b) in sestavljen nosilec iz stebra in prečnice (c).

Vektor premika \mathbf{t} pri temperaturi T , kar označimo z \mathbf{t}_T , lahko zapišemo kot:

$$\mathbf{t}_T = \mathbf{t}_{T_0} + \Delta\mathbf{t}_{T_r}, \quad (5.6)$$

kjer je \mathbf{t}_{T_0} vektor premika pri normalni temperaturi T_0 in $\Delta\mathbf{t}_{T_r}$ je sprememba vektorja premika, ki ga izračunamo:

$$\Delta\mathbf{t}_{T_r} = \mathbf{v}_{kon}\psi\Delta T, \quad (5.7)$$

pri čemer je \mathbf{v}_{kon} vektor konstrukcije pri temperaturi T_0 , ψ je koeficient linearnega temperaturnega raztezka, enak v vseh smereh in ΔT je sprememba temperature. Linearne temperaturne koeficiente za posamezni material lahko odčitamo iz tabel, npr. [128]. Homogena nosilna konstrukcija se lahko prosto razteza (krči in širi) in tedaj zasuk kamere ni mogoč. Sprememba nosilne konstrukcije je tako odvisna le od vektorja konstrukcije \mathbf{v}_{kon} , kot opisuje enačba (5.7).

5.1.3 Modificiranje analitičnega modela kamere

Ugotovitve iz prejšnjih podpoglavij vključimo v analitični model kamere. Perspektivno projekcijsko matriko \mathcal{M} je mogoče modificirati z vpeljavo sprememb notranjih in zunanjih parametrov v odvisnosti od spremembe temperature. Analitični model kamere iz enačbe (3.10) pri normalni temperaturi teoretično zagotavlja perspektivno projekcijo brez odstopanja. Vpliv napake se pojavi s spremembo temperature nosilne konstrukcije in tedaj se spremenijo tudi njene geometrijske lastnosti.

Zapis perspektivne projekcijske matrike \mathcal{M} iz enačbe (3.10) dopolnimo, pri čemer upoštevamo vpliv temperaturne spremembe za parametre kamere kot:

$$\mathcal{M}_T = \mathcal{K} \left(\begin{array}{cc} \mathcal{R} + \Delta\mathcal{R}_{T_r} & \mathbf{t} + \Delta\mathbf{t}_{T_r} \end{array} \right), \quad (5.8)$$

kjer je \mathcal{R} matrika zasuka, $\Delta\mathcal{R}_{T_r}$ je sprememba matrike zasuka, \mathbf{t} je vektor premika in $\Delta\mathbf{t}_{T_r}$ je sprememba vektorja premika. Enačbo (5.8) lahko razširimo v:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_T &= \mathcal{K} \left(\begin{array}{cc} \mathcal{R} + \Delta\mathcal{R}_{T_r} & \mathbf{t} + \Delta\mathbf{t}_{T_r} \end{array} \right) = \\ &= \mathcal{K} \left(\begin{array}{cc} \mathcal{R} & \mathbf{t} \end{array} \right) + \mathcal{K} \left(\begin{array}{cc} \Delta\mathcal{R}_{T_r} & \Delta\mathbf{t}_{T_r} \end{array} \right). \end{aligned}$$

Na kratko lahko matriko \mathcal{M}_T zapišemo z enačbo:

$$\mathcal{M}_T = \mathcal{M} + \Delta\mathcal{M}, \quad (5.9)$$

kjer je \mathcal{M}_T perspektiva projekcijska matrika pri temperaturi T , \mathcal{M} je normalna perspektivna projekcijska matrika (enačba (3.15)) in $\Delta\mathcal{M}$ je sprememba perspektivne projekcijske matrike pri spremembi temperature ΔT .

V podpoglavju 5.1.1 in 5.1.2 smo ugotovili, da se s spremembo temperature spreminja le parameter \mathbf{t} , zato smo njegovo spremembo vpeljali v analitični model kamere. Tako lahko definiramo spremembo perspektivne projekcijske matrike $\Delta\mathcal{M}$ in jo zapišemo kot:

$$\Delta\mathcal{M} = \mathcal{K} \left(\begin{array}{cc} \mathbf{0}_{3,3} & \Delta\mathbf{t}_{T_r} \end{array} \right), \quad (5.10)$$

kjer je $\mathbf{0}_{3,3}$ ničelna matrika, velikosti 3×3 , in $\Delta\mathbf{t}_{T_r}$ je sprememba vektorja premika \mathbf{t} zaradi spremembe temperature.

Vsota matrik \mathcal{M} in $\Delta\mathcal{M}$ iz enačbe (5.9) vrne perspektivno projekcijsko matriko \mathcal{M}_T za temperaturno spremembo ΔT . Analitični model kamere z upoštevanjem spremembe temperature lahko sedaj zapišemo s perspektivno projekcijsko matriko \mathcal{M}_T širše kot:

$$\mathcal{M}_T = \left(\begin{array}{cc} f_\alpha \mathbf{r}_1^T + s \mathbf{r}_2^T + u_0 \mathbf{r}_3^T & f_\alpha t_{T_x} + s t_{T_y} + u_0 t_{T_z} \\ f_\beta \mathbf{r}_2^T + v_0 \mathbf{r}_3^T & f_\beta t_{T_y} + v_0 t_{T_z} \\ \mathbf{r}_3^T & t_{T_z} \end{array} \right), \quad (5.11)$$

kjer so f_α , f_β , s , u_0 in v_0 notranji parametri kamere, \mathbf{r}_1^T , \mathbf{r}_2^T in \mathbf{r}_3^T so vrstice matrike zasuka \mathcal{R} ter t_{T_x} , t_{T_y} in t_{T_z} so komponente vektorja premika \mathbf{t}_T , izračunanega po enačbi (5.6). Iz enačbe (5.10) je razvidno, da je sprememba perspektivne projekcijske matrike odvisna samo od spremembe vektorja premika \mathbf{t} .

5.2 Določitev velikostnega razreda napake

Kamera na gradbišču je izpostavljena temperaturnim spremembam, ki vplivajo na njene zunanje parametre in posledica je sprememba vektorja premika \mathbf{t} . Za oceno velikostnega razreda odstopanja smo definirali pričakovano delovno območje kamere na gradbišču:

- temperaturno območje delovanja kamer je med 0 in 50°C,
- nosilna konstrukcija kamere je jeklena in homogena,
- jeklena nosilna konstrukcija ne presega dolžine treh metrov in
- opazovani objekti so od kamere oddaljeni več kot deset metrov.

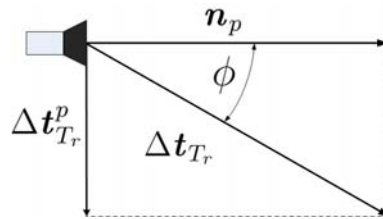
V odvisnosti od spremembe temperature se spremenijo tudi geometrijske lastnosti jeklene nosilne konstrukcije. Le-te se odražajo kot sprememba vektorja premika nosilne konstrukcije $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$, v smeri vektorja konstrukcije \mathbf{v}_{kon} . Za vektor premika $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$, izračunanega po enačbi (5.7), je potrebno določiti komponente na projekcijski ravnini. Nato je potrebno vrednost tretje komponente dobljenega vektorja postaviti na nič, saj ne vpliva na napako, kar smo pokazali v podpoglavju 5.1.1. Za določitev projekcije je potrebno poznati kot ϕ med normalnim vektorjem projekcijske ravnine \mathbf{n}_p in spremembo vektorja premika $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$, ki ga izračunamo po enačbi:

$$\cos \phi = \frac{\mathbf{n}_p \Delta \mathbf{t}_{T_r}}{|\mathbf{n}_p| |\Delta \mathbf{t}_{T_r}|},$$

kjer je ϕ kot med vektorjema \mathbf{n}_p in $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$, $|\mathbf{n}_p|$ je dolžina vektorja \mathbf{n}_p in $|\Delta \mathbf{t}_{T_r}|$ je dolžina vektorja $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$. Projicirano spremembo vektorja premika $\Delta \mathbf{t}_{T_r}^p$ nato izračunamo s sinusno funkcijo (slika 5.2) po enačbi:

$$\Delta \mathbf{t}_{T_r}^p = \sin \phi \Delta \mathbf{t}_{T_r} \text{diag}(1, 1, 0), \quad (5.12)$$

kjer je $\text{diag}(1, 1, 0)$ diagonalna matrika, razsežnosti 3×3 .



Slika 5.2: Projekcija spremembe vektorja premika \mathbf{t}_{T_r} .

Za dejansko odstopanje, ki se odraža na sliki, je potrebno izračunati dolžino projicirane spremembe vektorja premika $\Delta \mathbf{t}_{T_r}^p$ in dobljeno dolžino izraziti v enoti slikovnih elementov, kar storimo na naslednji način:

- določimo parametra k in l tako, da iz dobljenih slik odčitamo število slikovnih elementov na enoto dolžine,
- določimo goriščno razdaljo f , ki se sovpada z razdaljo opazovanega objekta, ki smo ga uporabili za določitev parametra k in l ,
- po enačbi (3.5) izračunamo notranja parametra kamere f_α in f_β .

Iz parametrov kamere f_α in f_β je na osnovi podane oddaljenosti r opazovanega objekta za poljubno dolžino v naravi mogoče izračunati, s kolikšnim številom slikovnih elementov na sliki

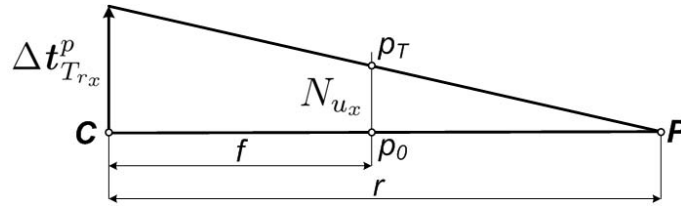
je le-ta predstavljena. Podobno se lahko napaka Δt_T izrazi v enotah slikovnih elementov za vse točke opazovanega objekta. Poudariti je treba, da se napaka Δt_T odraža samo v smeri x in y , tj. $\Delta t_{T_{rx}}$ in $\Delta t_{T_{ry}}$. Napaka, ki je posledica temperaturne spremembe, je tako definirana s podobnimi trikotniki (glej sliko 5.3) na naslednji način:

$$N_{u_x} = \Delta t_{T_{rx}}^p \frac{f}{r} \quad (5.13)$$

po osi x in

$$N_{u_y} = \Delta t_{T_{ry}}^p \frac{f}{r} \quad (5.14)$$

po osi y , kjer sta $\Delta t_{T_{rx}}^p$ in $\Delta t_{T_{ry}}^p$ komponenti spremembe projiciranega vektorja premika Δt_T^p v smeri x oziroma y . Vrednosti N_{u_x} in N_{u_y} predstavljata napaki, izraženi v enotah slikovnih elementov na projekcijski ravnini, kot je prikazano na sliki 5.4.



Slika 5.3: Velikost odstopanja N_{u_x} (za koordinato x) pri spremembi temperature ΔT se lahko izračuna iz podobnih trikotnikov, kjer je: C center kamere, P je opazovana točka, f je goriščna razdalja, r pa oddaljenost centra kamere od opazovane točke. Točka p_0 je projekcija točke P , medtem pa je p_T projekcija točke P , ob premiku kamere za vektor $t_{T_{rx}}^p$ zaradi spremembe temperature.

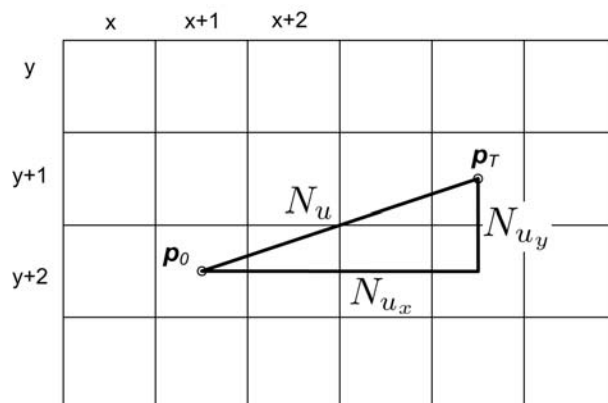
Transformacija napake, izražene v enotah slikovnih elementov, se tako izvede z množenjem goriščne razdalje f s členoma k oziroma l . Goriščna razdalja f se pretvori v goriščno razdaljo, izraženo v enotah slikovnih elementov, tj. f_α in f_β , kot definira enačba (3.5). Napaka na sliki N_{u_x} , izražena v enotah slikovnih elementov za os x , se izračuna kot:

$$N_{u_x} = \Delta t_{T_{rx}}^p \frac{f_\alpha}{r} \quad (5.15)$$

in po osi y kot:

$$N_{u_y} = \Delta t_{T_{ry}}^p \frac{f_\beta}{r}. \quad (5.16)$$

Točka p_0 na sliki 5.4 predstavlja položaj točke pri začetni temperaturi, medtem ko je točka p_T premaknjena zaradi spremembe parametrov kamere.



Slika 5.4: Napaki N_{u_x} in N_{u_y} predstavljata odstopanje na projekcijski ravnini.

Skupno število odstopajočih slikovnih izračunamo kot

$$N_u = \sqrt{N_{u_x}^2 + N_{u_y}^2}. \quad (5.17)$$

Vrednosti N_{u_x} ali N_{u_y} in razdalja opazovanega objekta od kamere, tj. r , sta obratno sorazmerna (enačbi (5.15) in (5.16)).

Iz kombinacije enačb (5.7), (5.12) in (5.15) smo sestavili enačbo, ki za znano napako N_u omogoča izračun potrebne temperaturne spremembe. Izraz

$$\Delta T_x = \frac{N_{u_x} r}{\psi |\mathbf{v}_{kon}| \sin \phi \cdot f_\alpha}, \quad (5.18)$$

omogoča eksplicitni izračun potrebne temperaturne spremembe ΔT_x , če je odstopanje v smeri x enako N_{u_x} in je oddaljenost opazovanega objekta od kamere r metrov [132]. Podobno enačbo lahko zapišemo za spremembo temperature v smeri y :

$$\Delta T_y = \frac{N_{u_y} r}{\psi |\mathbf{v}_{kon}| \sin \phi \cdot f_\beta}. \quad (5.19)$$

5.3 Vpliv temperature na kalibrirani sistem kamer

Problem vpliva temperaturnih sprememb na kalibrirani sistem kamer bomo obravnavali dvofazno, in sicer i.) najprej se bomo osredotočili na vpliv temperaturnih sprememb na postopek kalibracije kamer in ii.) nato še na vpliv temperaturnih sprememb na določanje rekonstruiranih točk.

5.3.1 Vpliv zunanje temperature na kalibracijo kamer

Sprememba temperature vpliva na vsako kamero in njeno nosilno konstrukcijo, neodvisno od sistema kamer. Napako posamezne kamere zaradi vpliva temperaturnih sprememb smo opisali v prejšnjem podpoglavju, v nadaljevanju pa bomo določili skupno napako dveh kalibriranih kamer zaradi spremembe zunanje temperature [119, 133]. Vpliv le-te na kalibrirani kameri opišemo z naslednjima predpostavkama [132]:

- Predpostavka 1: Kameri sta kalibrirani pri poljubni temperaturi. Tedaj pri isti temperaturi povzročita napako pri iskanju korespondenčnih točk, ki je enaka napaki uporabljene numerične metode za kalibracijo.
- Predpostavka 2: Kameri sta kalibrirani pri temperaturi T_c . Slike zajemamo pri temperaturi T_u . Tedaj je napaka kalibriranih kamer enaka, kot če bi kameri kalibrirali pri temperaturi T_u , kjer je napaka začetnih korespondenčnih točk enaka spremembi parametrov obeh kamer (izraženih v enotah slikovnih elementov) zaradi spremembe zunanje temperature ΔT , kjer je $\Delta T = T_u - T_c$.

Predpostavki bomo dokazali eksperimentalno ter na osnovi logičnega sklepanja.

Vpliv spremembe zunanje temperature na kamero smo analizirali v podpoglavju 5.1. Pokazali smo, da na sliko vplivajo predvsem zunanji parametri kamere, in sicer zaradi temperaturnega raztezka nosilne konstrukcije za vektor Δt_{T_r} , v smeri vektorja konstrukcije \mathbf{v}_{kon} (podpoglavje 5.1.2). Predpostavka 2 temelji na dejstvu, da je irelevantno ali premikamo kamero v smeri \mathbf{t} ali pa opazovani objekt v smeri $-\mathbf{t}$. Odstopanje zunanjih parametrov kamere lahko zato obravnavamo kot odstopanje oziroma premik začetnih korespondenčnih točk. Za izračun odstopanja je potrebno poznati oddaljenost opazovanega objekta, tj. r , in temperaturno spremembo glede na temperaturo pri umerjanju kamer, tj. ΔT .

5.3.2 Vpliv zunanje temperature na določanje rekonstruiranih točk

Za izvedbo 3D rekonstrukcije moramo vzpostaviti korespondenčne točke. Pri iskanju korespondenčnih točk moramo določiti razliko med temperaturama, ko je bila kamera umerjena T_c in uporabljena T_u . Ob tem je potrebno izračunati še spremembo vektorja premika Δt_{T_r} za posamezno kamero kot:

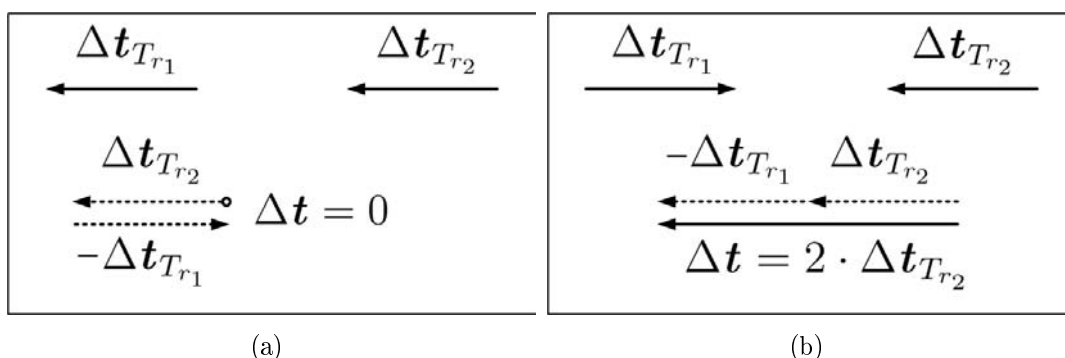
$$\Delta t_{T_r} = t_{T_c} - t_{T_u}, \quad (5.20)$$

kjer je t_{T_c} vektor premika v času umerjanja kamer, tj. pri temperaturi T_c , in t_{T_u} je vektor premika pri iskanju korespondenčnih točk, tj. pri temperaturi T_u .

Napako ocenimo s pomočjo predpostavke 2. Dejansko predpostavljamo, da umerjanje kamer in iskanje korespondenčnih točk poteka pri normalni temperaturi, pri čemer so položaji začetnih korespondenčnih točk napačni za napako, ki je nastala zaradi temperaturne spremembe ΔT . Odstopanje oziroma napaka začetnih korespondenčnih točk ni porazdeljena naključno, ampak sta smer in velikost napake vseh točk posamezne kamere isti in znani. Če začetne korespondenčne točke obeh kamer pri postopku umerjanja vsebujejo napako za enak vektor premika $\Delta \mathbf{t}$, potem se takšna napaka ne odraža. Pomembna je namreč le razlika vektorjev $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_1}}$ in $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_2}}$:

$$\Delta \mathbf{t} = \Delta \mathbf{t}_{T_{r_2}} - \Delta \mathbf{t}_{T_{r_1}}, \quad (5.21)$$

kjer sta $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_1}}$ oziroma $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_2}}$ spremembi vektorja premika prve oziroma druge kamere. Iz slike 5.5b je razvidno: kadar sta vektorja $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_1}}$ in $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_2}}$ enaka, potem je njuna razlika enaka ničelnemu vektorju. Poudariti je potrebno, da slika 5.5 ne zahteva, da sta obe kameri nameščeni na nosilno konstrukcijo z enakimi fizikalnimi lastnostmi. Pomembno je le, da sta oba vektorja premika enaka (slika 5.5a). Drugačno situacijo predstavlja slika 5.5b, kjer sta smeri vektorjev $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_1}}$ in $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_2}}$ nasprotni.



Slika 5.5: Razlika, označena z $\Delta \mathbf{t}$, med spremembo vektorja premika druge kamere, $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_2}}$, in spremembo vektorja premika prve kamere, $\Delta \mathbf{t}_{T_{r_1}}$: a) oba vektorja sta enaka; b) vektorja sta enakih velikosti, a obrnjena v nasprotno smer.

Enačba (5.21) omogoča prenos napak zunanjih parametrov iz dveh kamer na eno samo. Prvo kamero lahko zato obravnavamo kot kamero brez napake zunanjih parametrov, druga kamera pa vsebuje napako zunanjih parametrov za vektor $\Delta \mathbf{t}$. Razliko sprememb vektorja premika $\Delta \mathbf{t}$ je seveda potrebno preslikati iz dolžinskih enot (meter) v enote slikovnih elementov. Izračunano odstopanje prištejemo k napaki, ki nastane pri kalibraciji kamer (tj. numerična napaka metode za kalibracijo in nenatančni položaji začetnih korespondenčnih točk). Skupno napako, označeno

z N , dveh kalibriranih kamer določimo kot:

$$N = N_c + N_u, \quad (5.22)$$

kjer je N_c napaka pri postopku kalibracije kamer in N_u je napaka, ki nastane zaradi spremembe parametrov kamere, kot posledica vpliva temperaturnih sprememb.

Na koncu še definirajmo relativno napako N_{u_r} zaradi spremembe parametrov kamere, glede na skupno napako N . Določimo jo na naslednji način:

$$N_{u_r} = \frac{N_u}{N}. \quad (5.23)$$

Kot smo že povedali, se parametri spreminjajo v odvisnosti od spremembe temperature ΔT , pri čemer začetna temperatura ni pomembna. Velikost opazovanega objekta, merjenega v enotah slikovnih elementov se zmanjšuje, če se oddaljenost kamere od opazovanega objekta povečuje. Vsak slikovni element zato pokriva večjo površino na opazovanem objektu. S povečevanjem velikosti slikovnega elementa se napaka N_u zmanjšuje in posledično je tudi relativna napaka N_{u_r} manjša glede na skupno napako N .

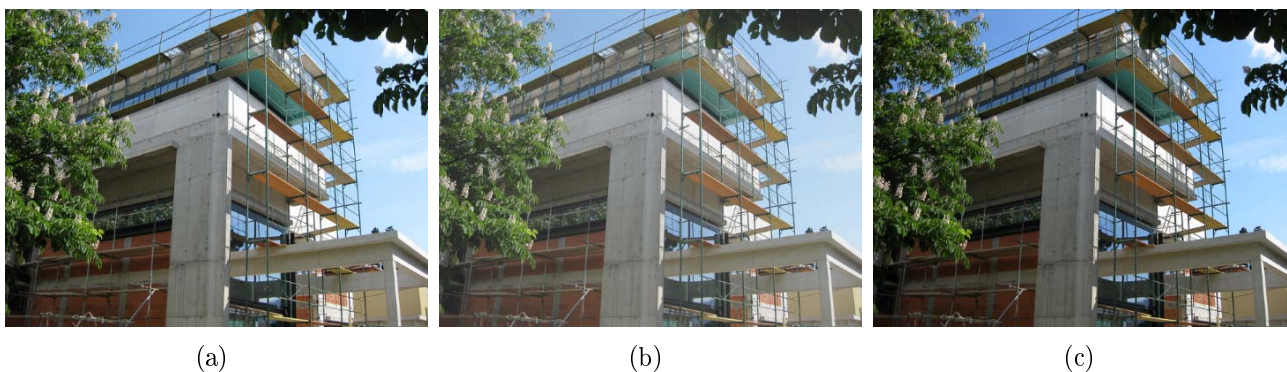
Analiza napake Zhang-ove metode za umerjanje kamer

Za ustrezno analitično oceno napake Zhang-ove kalibracijske metode (glej podpoglavje 3.1.2), bi morali njen matematični model dopolniti na podoben način, kot smo to storili za projekcijsko matriko kamere. Napaka kalibracijske metode, tj. napaka N_c , neposredno vpliva na natančnost izračuna rekonstruiranih korespondenčnih točk. Analitični model kamere, ki ga uporablja kalibracijska metoda, zajema 11 parametrov, tj. 6 zunanjih in 5 notranjih parametrov kamere. Le-ti se neposredno določijo v procesu kalibracije. Po drugi strani pa je rešitev sistema enačb močno odvisna tudi od izbire začetnih korespondenčnih točk, ki se določijo bodisi ročno, bodisi avtomatsko. Iz tega sledi, da numerična stabilnost obravnavanega sistema enačb v splošnem ni zagotovljena. Predeterminirani sistem enačb, ki je lahko tudi numerično nestabilen, v splošnem ne zagotavlja enoličnih rešitev. Analitična določitev numerične napake postopka kalibracije je zato mogoča le v nekaterih posebnih primerih.

Poglavje 6

Rezultati

Za uspešno verifikacijo hipotez in teze smo metode, predstavljene v poglavjih 4 in 5, preizkusili v več eksperimentih. Meritve v eksperimentih na vhodu sprejmejo slike, zato smo v podpoglavju 6.1 naprej preučili, kakšen vpliv ima kvaliteta vhodnih slik na metode, ki smo jih obravnavali v doktorski disertaciji (tj. na metodo ASIFT-SH, opisano v poglavju 4 in na metodo za merjenje vpliva temperaturnih sprememb na kalibrirani sistem kamer, opisano v poglavju 5). V naslednjih podpoglavjih pa bomo predstavili rezultate meritev metode ASIFT-SH in metode za merjenje vpliva temperature na kalibrirano kamero.



Slika 6.1: Zajete slike iz iste pozicije s pomočjo trinožnega stojala z različnimi modeli digitalnih fotoaparatorov: (a) Cannon Ixus 300, (b) Olympus MJU 750 in (c) Canon Digital IXUS 85 IS. Vse slike so velike 1600×1200 slikovnih elementov. Zaradi avtomatskih nastavitvev fotoaparata se slike med seboj nekoliko razlikujejo, vendar le v osnovnih parametrih slike, kot sta osvetljenost in kontrast.

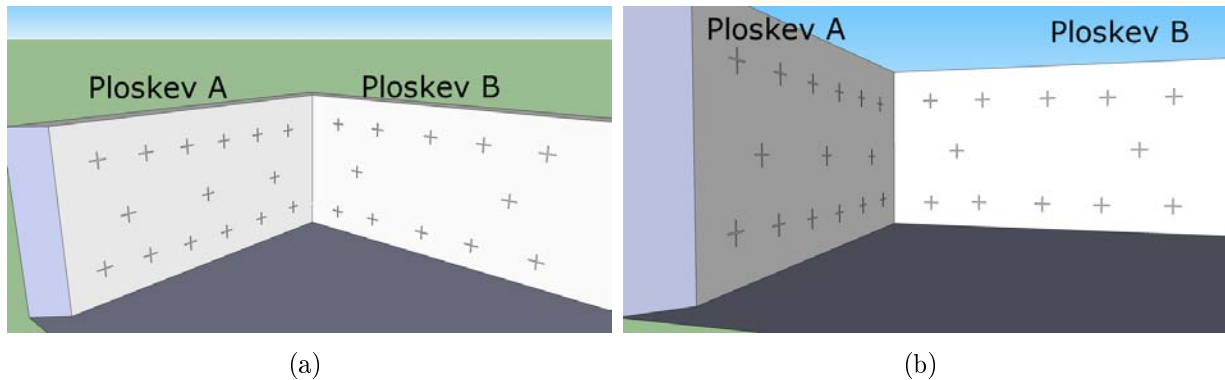
6.1 Ocena kvalitete zajetih slik

Zajemanje slikovnega materiala na terenu je potekalo ročno z različnimi digitalnimi fotoaparati. Uporabili smo fotoaparate več proizvajalcev, in sicer: Cannon PowerShot A85, Cannon Ixus 300, Olympus MJU 750 in Canon Digital IXUS 85 IS. Pred eksperimenti smo vedno izvedli test, ali izbira digitalnega fotoaparata vpliva na rezultate. Pri tem smo uporabili trinožno stojalo in iz iste pozicije zajeli slike z različnimi fotoaparati. Za eksperimente metode ASIFT-SH smo slike zajemali s fotoaparati: Cannon Ixus 300, Olympus MJU 750 in Canon Digital IXUS 85 IS, pri eksperimentih, kjer smo merili vpliv temperaturnih sprememb na parametre kamere, pa smo uporabili fotoaparate Cannon PowerShot A85, Cannon Ixus 300 in Olympus MJU. Uporabljeni modeli digitalnih fotoaparatorov omogočajo različne maksimalne velikosti slik, zato smo vse zajete slike zmanjšali na maksimalno velikost najslabšega modela, tj. 1600×1200 slikovnih elementov za fotoaparatus Cannon Ixus 300 (v eksperimentih kasneje ne uporabimo isto velike slike). Primer treh slik, zajetih s tremi različnimi fotoaparati in iz iste pozicije, prikazuje slika 6.1. Vidimo, da se slike med seboj nekoliko razlikujejo, kar pripisujemo različnim nastavitvam fotoaparatorov, kot sta osvetljenost in kontrast. Avtomatsko nastavljanje goriščne razdalje je edini faktor, ki bi potencialno lahko vplival na natančnost eksperimentov, vendar tega problema nismo zaznali pri izvedenem ocenjevanju zajetih slik.

Slike gradbišča, zajete s tremi različnimi digitalnimi fotoaparati iz iste pozicije, smo nato uporabili kot vhodne slike v obeh sklopih disertacije, tj. v metodi ASIFT-SH in merjenju vpliva temperature na kalibrirani sistem kamer. Rezultati so pričakovano bili identični, s čimer sklepamo, da izbira digitalnega aparata pri enaki velikosti zajetih slik nima opaznega vpliva na rezultate.

6.2 Ocenitev uspešnosti metode ASIFT-SH

Metodo ASIFT-SH, ki je namenjena za vzpostavitev korespondence poljubno izbrane točke pri velikih odmikih dveh kamer, smo testirali na sintetično pripravljene slike in na slikah stavb ter gradbišč. Slika 6.2 prikazuje dva različna pogleda na sintetično pripravljene podatke, tj. digitalni model dveh sten stavbe, medtem ko slika 6.3 prikazuje nekaj primerov testnih slik stavb in gradbišč. Velikost vseh testnih sintetičnih slik je 2670×2003 slikovnih elementov (nekaterne slike so orientirane pokončno, zato je njihova velikost 2003×2670). Pri testiranju smo merili natančnost izračunane korespondenčne točke na drugi sliki za izbrano točko iz prve slike. V eksperimentu smo izvedli 6 meritev s sintetično pripravljenimi slikami in 50 meritev s slikami stavb in gradbišč. Da bi hitreje preverili delovanje metode smo za posamezno meritev



Slika 6.2: Sintetični par testnih slik: (a) pogled prve kamere in (b) pogled druge kamere na digitalni model dveh sten stavbe. Križci na ploskvah omogočajo ročno vzpostavitev korespondenčnih parov točk med dvema pogledoma.

izdelali testno množico korespondenčnih parov točk $(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i)$ in jo poimenovali Zlati standard. Postopek izdelave množice Zlati standard smo izvedli na dva načina, in sicer:

- Za sintetično pripravljene slike in za prvih deset meritev s slikami stavb in gradbišč smo korespondenčne pare točk $(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i)$ določili ročno, in sicer po naslednjem vrstnem redu:
 1. izbrali smo 100 točk (za sintetično pripravljene slike le toliko, kolikor je bilo vidnih križcev) na prvi sliki, ki so hkrati vidne tudi na drugi sliki;
 2. za vsako izbrano točko iz prve slike je testna oseba ročno določila korespondenčno točko na drugi sliki;
 3. drugi korak smo izvedli trikrat s tremi različnimi testnimi osebami;
 4. za izbrano točko \mathbf{p}_i iz prve slike je določena njena korespondenčna točka \mathbf{p}'_i na drugi sliki kot povprečna lokacija ročno določenih korespondenčnih točk od vseh treh testnih oseb.

Za dobljeno množico korespondenčnih parov točk, tj. Zlati standard, smo izračunali spremenljivost (variabilnost) med testnimi osebami pri določanju korespondenčnih točk. Izračunano povprečno odstopanje je za vsako testno osebo 1,34 slikovna elementa s standardnim odklonom 1,03.

- Zgoraj opisan postopek izdelave testne množice se je izkazal kot zelo zamuden. V naslednjih štiridesetih meritvah, kjer smo imeli opravka s slikami stavb in gradbišč, smo zato kot testno množico, tj. Zlati standard, uporabili kar začetne korespondenčne pare točk, ki smo jih vzpostavili v prvem koraku metode ASIFT-SH (glej podpoglavje 4.1.1). V

tem koraku tudi eliminiramo slabo ali napačno vzpostavljene korespondenčne pare točk s pomočjo epipremice. Z veliko verjetnostjo lahko zato trdimo, da so korespondenčni pari točk $(\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i)$ v množici Zlati standard dobro in natančno vzpostavljeni.

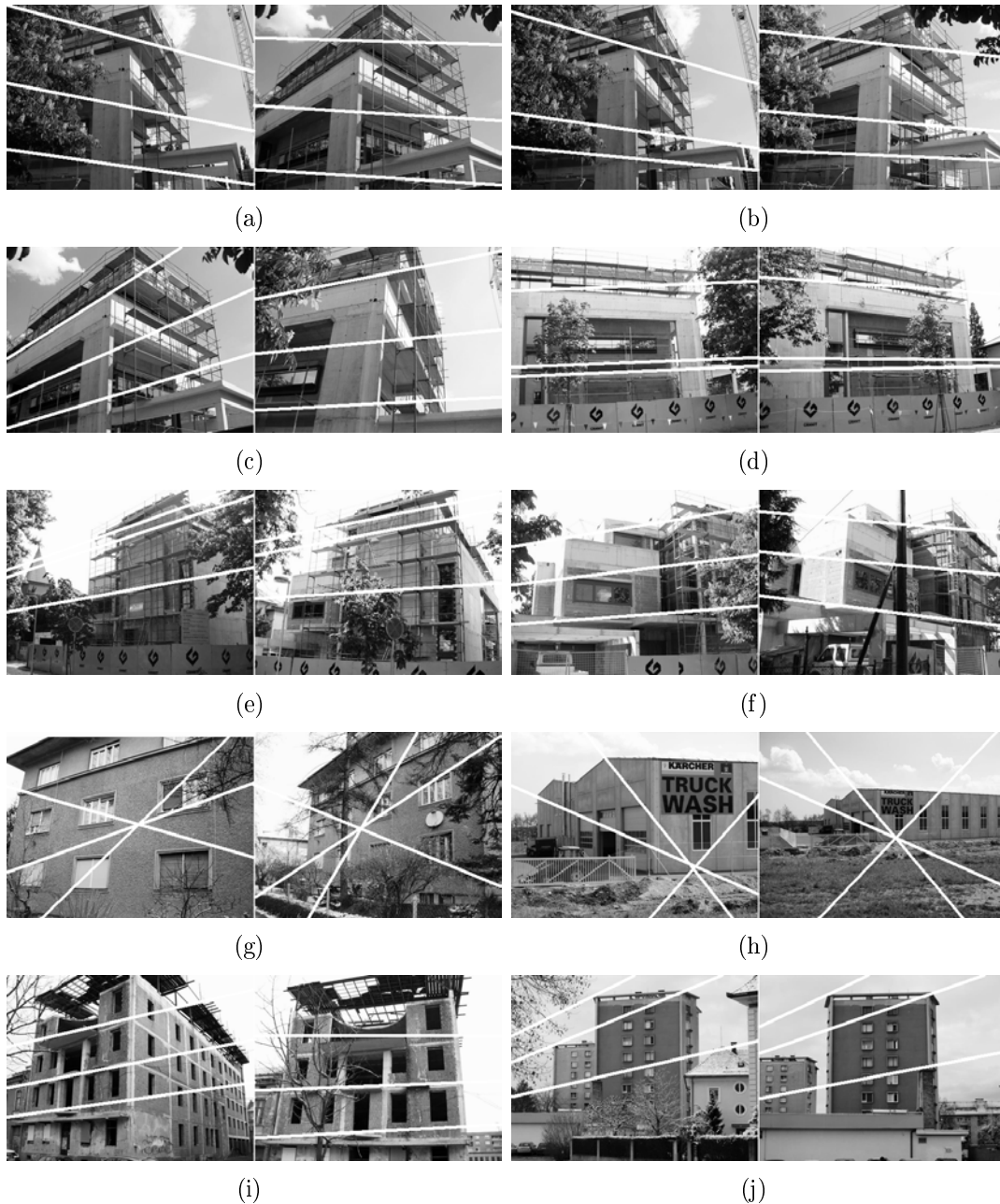
Natančnost metode ASIFT-SH merimo kot odstopanje med točkama \mathbf{p}_i^* in \mathbf{p}'_i , tj. kot evklidsko razdaljo med točkama \mathbf{p}_i^* in \mathbf{p}'_i , zapisano kot $d(\mathbf{p}_i^*, \mathbf{p}'_i)$, kjer je \mathbf{p}_i^* izračunana korespondenčna točka z metodo ASIFT-SH in \mathbf{p}'_i je dejanska korespondenčna točka (Zlati standard) za točko \mathbf{p}_i iz prve slike. Meritve smo izvedli tako s sintetično pripravljenimi slikami (primer prikazuje slika 6.2), kot tudi s slikami stavb in gradbišč (nekaj primerov prikazuje slika 6.3). V drugem eksperimentu smo merili natančnost metode ASIFT-SH pri različno velikih slikah, v zadnjem eksperimentu pa smo rezultate naše metode primerjali z rezultati metode, kjer se korespondenčna točka \mathbf{p}_i^* na drugi sliki določi z iskanjem v okolici epipremice \mathbf{l}'_i , ki pripada točki \mathbf{p}_i iz prve slike. Primerjalno metodo smo poimenovali metoda EPI. Rezultati vseh treh eksperimentov so predstavljeni v naslednjih podpoglavjih.

6.2.1 Rezultati metode ASIFT-SH

Za poljubno izbrano točko \mathbf{p}_i iz množice korespondenčnih parov točk Zlati standard se z metodo ASIFT-SH izračuna korespondenčna točka \mathbf{p}_i^* na drugi sliki. Odstopanje d , tj. $d(\mathbf{p}_i^*, \mathbf{p}'_i)$, izračunane korespondenčne točke \mathbf{p}_i^* od dejanske korespondenčne točke \mathbf{p}'_i (točka iz Zlatega standarda) je merjeno v enotah slikovnih elementov. Rezultati meritev s sintetično pripravljenimi slikami so predstavljeni v tabeli 6.1, rezultati meritev z realnimi slikami stavb in gradbišč pa so podani v tabelah 6.2, 6.3 in 6.4. V vseh treh tabelah stolpci z oznakama \bar{d} in σ predstavljajo povprečno odstopanje in standardni odklon izračunanih točk \mathbf{p}_i^* od dejanskih korespondenčnih točk \mathbf{p}'_i . Oba podatka, tj. \bar{d} in σ , sta izražena v enoti slikovnih elementov. Stolpec z oznako ε predstavlja odstotek korespondenčnih parov točk, za katere korespondence ni bilo mogoče izračunati, saj za segmentirano regijo \mathcal{R}_j , v kateri se izbrana točka \mathbf{p}_i nahaja, matrike \mathcal{H}_j ni bilo mogoče izračunati. Oznaka n prikazuje število korespondenčnih parov točk iz množice Zlati standard.

Rezultati metode ASIFT-SH za sintetično pripravljene slike

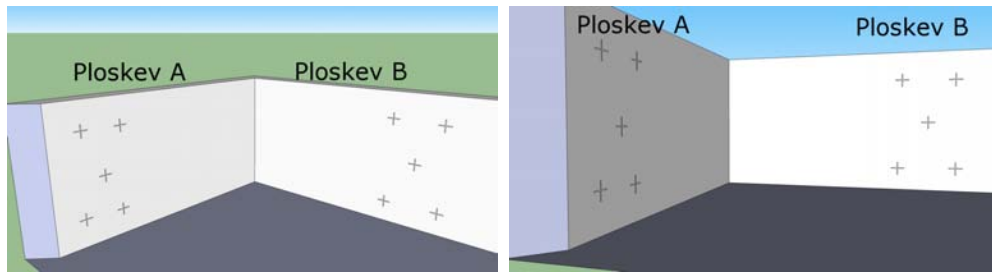
Meritve s sintetično pripravljenimi slikami so nam omogočile, da smo preverili in potrdili dvoje: i.) koncept delovanja metode ASIFT-SH in ii.) pravilnost delovanja metode ASIFT-SH z natančno določenimi robnimi pogoji. Robne pogoje smo pripravili kot šest različnih scenarijev. Ti so naslednji:



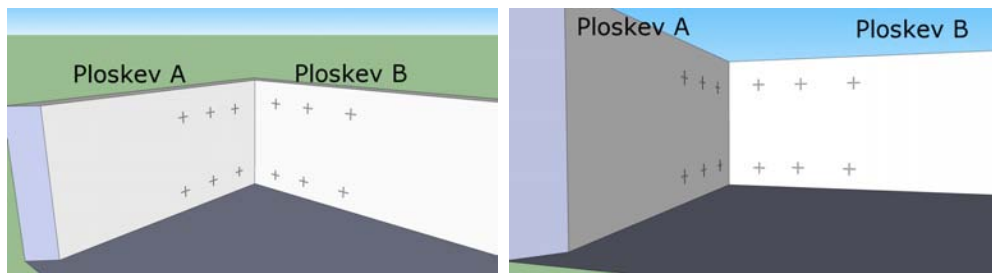
Slika 6.3: Testni pari slik: (a) Meritev 1, (b) Meritev 2, (c) Meritev 3, (d) Meritev 4, (e) Meritev 5, (f) Meritev 6, (g) Meritev 7, (h) Meritev 8, (i) Meritev 9 in (j) Meritev 10. Leva slika prikazuje pogled prve kamere, medtem kot desna slika prikazuje pogled druge kamere za posamezni testnih par slik. Velikost vseh slik je 2670×2003 slikovnih elementov. Bele črte predstavljajo nekaj primerov epipremic, ki pripadajo posameznim točkam.

- Meritev 1: Množica Zlati standard vsebuje korespondenčne točke za vse prikazane križce na sintetičnem paru testnih slika (glej sliko 6.2).
- Meritev 2: Množica Zlati standard vsebuje korespondenčne točke iz obeh ploskev (tj. iz ploskve A in B), pri čemer so izbrane samo tiste točke, ki so čim bolj oddaljene od korespondenčnih točk druge ploskve. Število vseh korespondenčnih točk v množici je deset (iz vsake ploskve pet), kot prikazuje slika 6.4a.
- Meritev 3: Množica Zlati standard vsebuje korespondenčne točke obeh ploskev (tj. iz ploskve A in B), pri čemer so izbrane samo tiste točke, ki so čim bližje korespondenčnim točkam druge ploskve. Število vseh korespondenčnih točk v množici je dvanaest (iz vsake ploskve šest), kot prikazuje slika 6.4b.
- Meritev 4: V množici Zlati standard so naključno izbrane korespondenčne točke iz vsake ploskve (tj. iz ploskve A in B). Število vseh naključno izbranih korespondenčnih točk v množici je deset (iz vsake ploskve pet), kot prikazuje slika 6.4c.
- Meritev 5: Množica Zlati standard vsebuje osem korespondenčnih parov točk, od tega le trije pari pripadajo ploskvi A, ostali pa ploskvi B. Za ploskev A lokalne homografije tremi korespondenčnimi pari točk ni mogoče izračunati, saj metoda za izračun matrike \mathcal{H} zahteva minimalno štiri korespondenčne pare točk. Primer korespondenčnih parov točk prikazuje slika 6.4d.
- Meritev 6: V množici Zlati standard je le šest korespondenčnih parov točk, in sicer iz vsake ploskve (tj. iz ploskve A in B) po trije pari, kar je premalo za izračun lokalne homografije za posamezno ploskev. Primer korespondenčnih parov točk prikazuje slika 6.4e.

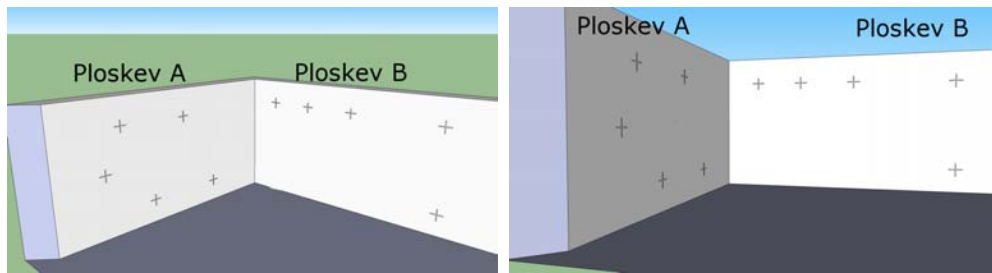
Za vseh šest opisanih scenarijev smo pripravili meritve, ki smo jih nato izvedli pod tremi različnimi pogoji. Ti so: i.) ocenjevanje osnovne različice metode ASIFT-SH z uspešno segmentiranimi vhodnimi sintetičnimi slikami (primer iz slike 6.5a), ii.) ocenjevanje osnovne različice metode ASIFT-SH z neuspešno segmentiranimi vhodnimi sintetičnimi slikami (primer iz slike 6.5b) in iii.) ocenjevanje adaptivne različice metode ASIFT-SH z neuspešno segmentiranimi vhodnimi sintetičnimi slikami (primer iz slike 6.5b). Slika 6.5 prikazuje primer uspešno in neuspešno segmentirane vhodne sintetično pripravljene slike. Segmentacijo smo izvedli ročno, in sicer tako, da smo vsak koplanarni del opazovanega objekta predstavili z eno segmentirano regijo (tj. ploskev A in ploskev B predstavljata lastno segmentirano regijo). Koplanarna dela na sliki 6.5b (tj. obe steni oziroma ploskvi), ki prikazuje neuspešno segmentirano sintetično sliko, pa sta predstavljena z eno samo segmentirano regijo.



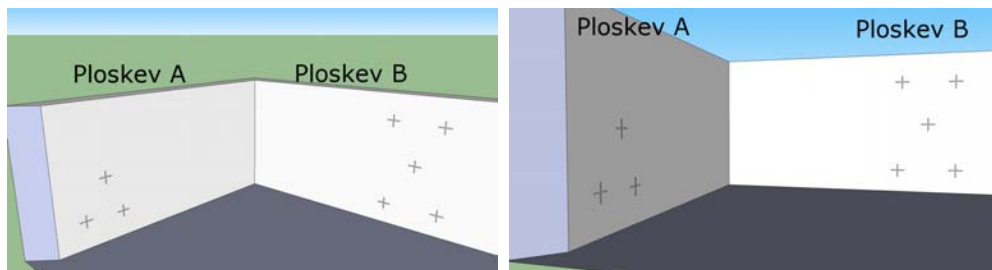
(a)



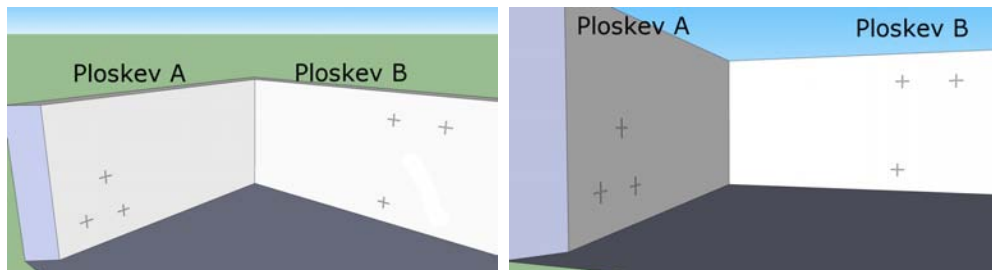
(b)



(c)

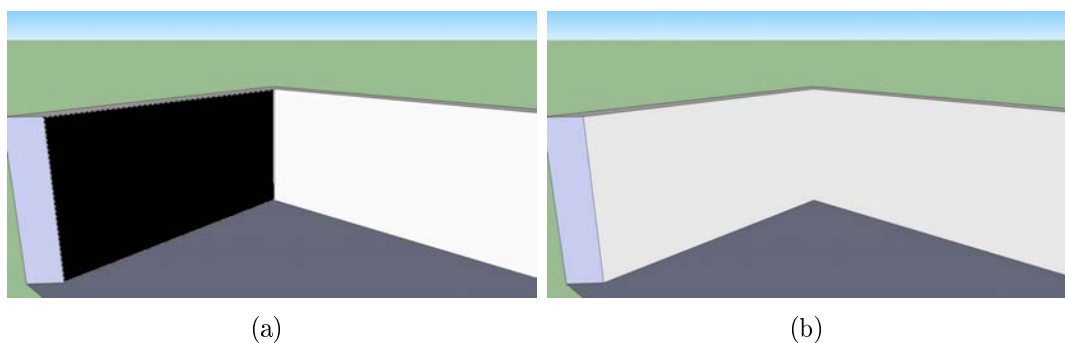


(d)



(e)

Slika 6.4: Sintetični pari testnih slik za različne scenarije: (a) meritev "Meritev 2", (b) meritev "Meritev 3", (c) meritev "Meritev 4", (d) meritev "Meritev 5" in (e) meritev "Meritev 6".



Slika 6.5: Primer (a) uspešno in (b) neuspešno segmentirane sintetično pripravljene slike.

Za opisane scenarije smo izvedli meritve, rezultati pa so prikazani v tabeli 6.1. Tabela je razdeljena v tri sklope. Vsak sklop prikazuje meritev, ki je bila izvedena pod izbranim pogojem (tj. osnovna različica metode ASIFT-SH z uspešno segmentacijo, osnovna različica metode ASIFT-SH z neuspešno segmentacijo in adaptivna različica metode ASIFT-SH, prav tako z neuspešno segmentacijo).

	Uspešna segmentacija			Neuspešna segmentacija						
	ASIFT-SH			ASIFT-SH			Adaptivni ASIFT-SH			
meritev	\bar{d}	σ	ε [%]	\bar{d}	σ	ε [%]	\bar{d}	σ	ε [%]	n
Meritev 1	2,08	1,44	0	193,64	137,99	0	2,08	1,44	0	27
Meritev 2	0,99	0,81	0	89,32	68,61	0	0,99	0,81	0	10
Meritev 3	1,76	1,13	0	76,11	55,01	0	1,76	1,13	0	12
Meritev 4	0,88	0,70	0	194,94	105,98	0	51,17	77,59	0	10
Meritev 5	0,74	0,53	37,5	66,53	44,24	0	0,74	0,53	37,5	8
Meritev 6	-	-	100	61,25	33,35	0	-	-	100	6

Tabela 6.1: Rezultati metode ASIFT-SH za sintetične slike. Vsaka meritev (scenarij) je bila izvedena v treh različnih pogojih, in sicer: i.) ocenjevanje metode ASIFT-SH z uspešno izvedeno segmentacijo vhodnih slik, ii.) ocenjevanje osnovne različice metode ASIFT-SH z neuspešno izvedeno segmentacijo vhodnih slik in iii.) ocenjevanje adaptivne različice metode ASIFT-SH z neuspešno izvedeno segmentacijo vhodnih slik. Za vsako meritev so bili izračunani: i.) povprečno odstopanje (\bar{d}), ii.) standardni odklon (σ) in iii.) odstotek točk iz množice Zlati standard za katere ni bilo mogoče izračunati korespondence (stolpec z oznako ε). Stolpec n predstavlja število korespondenčnih parov točk v množici Zlati standard.

Rezultati metode ASIFT-SH za slike stavb in gradbišč

Delovanje metode ASIFT-SH smo preverili tudi s 50 meritvami, kjer so vhodne slike vsebovale scene stavb in gradbišč (tj. realne slike). Postopek merjenja odstopanja je bil popolnoma enak

meritve	ASIFT-SH			Adaptivni ASIFT-SH			n
	\bar{d}	σ	$\varepsilon[\%]$	\bar{d}	σ	$\varepsilon[\%]$	
Meritev 1	7,53	39,75	1	4,94	15,94	2	100
Meritev 2	10,69	22,68	0	4,93	16,65	0	100
Meritev 3	6,96	14,97	0	3,18	12,34	2	100
Meritev 4	57,85	91,77	0	56,93	121,72	0	100
Meritev 5	33,89	39,44	0	25,55	132,56	1	100
Meritev 6	5,94	17,75	1	5,49	29,81	2	100
Meritev 7	6,63	14,34	0	4,11	11,14	1	100
Meritev 8	1,64	1,55	0	1,62	1,61	0	100
Meritev 9	3,94	7,39	0	2,33	6,5	2	100
Meritev 10	24,69	224,66	0	3,65	36,77	0	100

Tabela 6.2: Povprečno odstopanje (\bar{d}) in standardni odklon (σ) med izračunanimi korespondenčnimi točkami z metodo ASIFT-SH in točkami iz množice korespondenčnih parov točk Zlati standard. Korespondenčne točke iz množice Zlati standard so bile določene ročno. Stolpec n predstavlja število korespondenčnih parov točk, oznaka ε pa prikazuje delež korespondenčnih točk, izražen v odstotkih, za katere ni bilo mogoče izračunati korespondence.

kot pri sintetičnih slikah. Za poljubno izbrano točko \mathbf{p}_i iz množice korespondenčnih parov točk Zlati standard smo z metodo ASIFT-SH najprej izračunali korespondenčno točko \mathbf{p}_i^* na drugi sliki, odstopanje d , tj. $d(\mathbf{p}_i^*, \mathbf{p}_i')$, pa smo določili kot evklidsko razdaljo korespondenčne točke \mathbf{p}_i^* od dejanske korespondenčne točke \mathbf{p}_i' (točka iz Zlatega standarda). V tabelah 6.2, 6.3 in 6.4 so prikazani rezultati za obe različici metode ASIFT-SH, tj. za osnovno različico metode ASIFT-SH in adaptivno različico metode ASIFT-SH. Pri meritvah iz tabele 6.2 so bili korespondenčni pari točk v množici Zlati standard določeni ročno (glej opis na začetku tega podpoglavja).

Rezultati naslednjih 40 meritev pa so prikazani v tabelah 6.3 in 6.4. Pri teh meritvah so začetni korespondenčni pari točk, ki smo jih vzpostavili v prvem koraku metode ASIFT-SH (glej podpoglavje 4.1.1), bili uporabljeni kot korespondenčne točke v množici Zlati standard.

6.2.2 Rezultati metode ASIFT-SH za različno velike slike

Pri tem eksperimentu smo določili relacijo med povprečnim odstopanjem \bar{d} in velikostjo vhodnih slik (originalna velikost vhodnih slik je bila 2967×2225 slikovnih elementov). Eksperiment smo izvedli enako kot tistega v podpoglavju 6.2.1, vendar za različne velikosti vhodnih slik in le za en testni par slik, tj. "Meritev 9". Rezultati so podani za pet različno velikih vhodnih slik z naslednjimi velikostmi: 2967×2225 , 2720×2040 , 2048×1536 , 1024×768 in 512×384 slikovnih elementov. Izračunana povprečna odstopanja \bar{d} in standardni odkloni σ točk \mathbf{p}_i^* glede na točke \mathbf{p}_i' so podana v tabeli 6.5 in grafično predstavljena na sliki 6.6.

meritev	ASIFT-SH			Adaptivni ASIFT-SH			n
	\bar{d}	σ	$\varepsilon[\%]$	\bar{d}	σ	$\varepsilon[\%]$	
Meritev 11	8,09	56,56	0	3,96	25,25	0,13	3007
Meritev 12	13,86	37,62	0,02	3,44	16,2	0,07	6066
Meritev 13	21,06	115,34	0	9,44	39,1	0,17	2999
Meritev 14	51,63	602,97	0,03	25,98	123,13	0	3130
Meritev 15	31,67	59,6	0	21,11	45,59	0,05	2180
Meritev 16	15,75	121,88	0	7,61	13,49	0,14	5090
Meritev 17	4,17	8,62	0	2,61	7,31	0,01	29328
Meritev 18	19,75	28,72	0,06	8,51	25,69	0,09	3359
Meritev 19	2,52	6,48	0	1,82	4,22	0	53281
Meritev 20	27,81	55,19	0	15,63	49,06	0,04	2426
Meritev 21	12,86	25,15	0	8,04	16,75	0,05	8200
Meritev 22	20,51	413,98	0	9,06	35,78	0,01	12409
Meritev 23	207,26	12369,66	0	77,32	2777,31	0,02	9072
Meritev 24	17,36	27,17	0,01	12,09	303,41	0,03	7500
Meritev 25	9,92	11,22	0	3,42	6,38	0,02	13471
Meritev 26	15,23	24,97	0	6,79	13,17	0,05	8529
Meritev 27	24,74	34,3	0	14,97	44,28	0,25	2795
Meritev 28	30,76	68,06	0	28,09	97,4	1,65	846
Meritev 29	17,9	33,23	0	7,11	21,37	0	27965
Meritev 30	18,73	21,85	0	6,97	16,43	0	32838

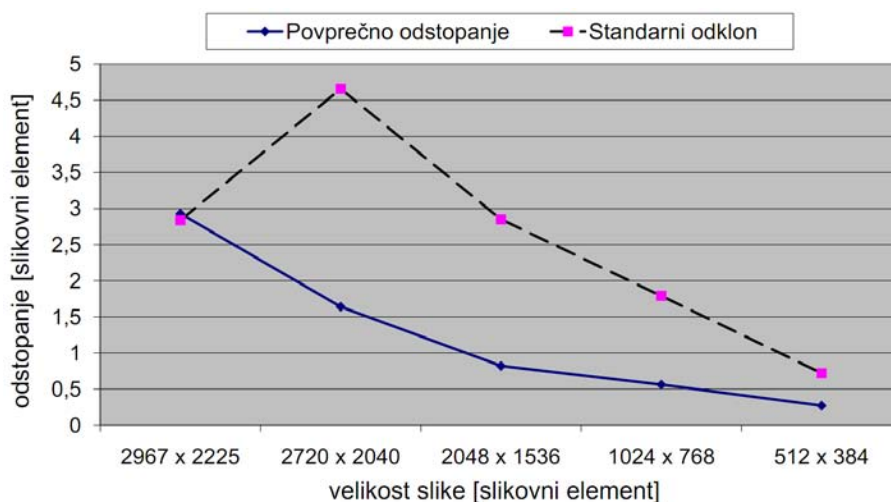
Tabela 6.3: Povprečno odstopanje (\bar{d}) in standardni odklon (σ) med izračunanimi korespondenčnimi točkami z metodo ASIFT-SH in točkami iz množice korespondenčnih parov točk Zlati standard. Množica Zlati standard vsebuje korespondenčne točke, ki smo jih vzpostavili z metodo ASIFT (prvi korak metode ASIFT-SH). Stolpec n predstavlja število korespondenčnih parov točk, oznaka ε pa prikazuje delež korespondenčnih točk, izražen v odstotkih, za katere ni bilo mogoče izračunati korespondence. Prikazanih je prvih 20 meritev od 40.

meritve	ASIFT-SH			Adaptivni ASIFT-SH			n
	\bar{d}	σ	$\varepsilon[\%]$	\bar{d}	σ	$\varepsilon[\%]$	
Meritev 31	25,18	32,62	0	11,69	25,44	0	23816
Meritev 32	6,44	13,58	0	3,02	7,75	0	68283
Meritev 33	52,57	43,98	0	31,21	51,51	0	5395
Meritev 34	29,5	26,02	0	22,46	26,35	0	36257
Meritev 35	48,38	55,31	0	26,09	38,47	0	20273
Meritev 36	10,12	23,66	0,01	3,96	16,2	0	12654
Meritev 37	30,2	51,73	0,01	9,56	21,9	0,03	7330
Meritev 38	11,47	109,8	0	6,84	20,89	0,02	5972
Meritev 39	11,49	18,99	0	5,78	12,41	0,05	6642
Meritev 40	12,3	23,38	0	7,64	21,37	0,03	3156
Meritev 41	10,73	24,55	0	7,08	24,66	0,08	3842
Meritev 42	8,69	18,48	0	6,53	15,77	0	28344
Meritev 43	9,87	19,46	0	4,51	9,5	0,01	29785
Meritev 44	8,29	16,81	0	4,22	9,66	0	35084
Meritev 45	107,69	309,27	1	80,7	366,84	1,06	567
Meritev 46	41,14	532	1,16	33	373,07	1,16	688
Meritev 47	25,97	225,65	0	7,55	68,17	0,66	1362
Meritev 48	10,39	39,47	1	8,7	36,85	1,13	1537
Meritev 49	4,24	33	1,23	3,1	33,07	1,23	6438
Meritev 50	22,47	25,45	0	7,1	28,17	0,56	2342

Tabela 6.4: Povprečno odstopanje (\bar{d}) in standardni odklon (σ) med izračunanimi korespondenčnimi točkami z metodo ASIFT-SH in točkami iz množice korespondenčnih parov točk Zlati standard. Množica Zlati standard vsebuje korespondenčne točke, ki smo jih vzpostavili z metodo ASIFT (prvi korak metode ASIFT-SH). Stolpec n predstavlja število korespondenčnih parov točk, oznaka ε pa prikazuje delež korespondenčnih točk, izražen v odstotkih, za katere ni bilo mogoče izračunati korespondence. Prikazanih je drugih 20 meritev od 40.

Meritev 9	\bar{d}	σ	ε [%]	n
2967 × 2225 slikovnih elementov	2,71	2,23	0	100
2720 × 2040 slikovnih elementov	1,64	4,66	0	100
2048 × 1536 slikovnih elementov	0,82	2,85	0	100
1024 × 768 slikovnih elementov	0,56	1,79	0	100
512 × 384 slikovnih elementov	0,27	0,72	0	100

Tabela 6.5: Povprečno odstopanje (\bar{d}) in standardni odklon (σ) pri vzpostavitvi korespondence z metodo ASIFT-SH glede na korespondenčne točke iz množice Zlati standard. Prikazani rezultati veljajo za testni par slik "Meritev 9" za pet različnih velikosti (glej sliko 6.3i).



Slika 6.6: Relacija med povprečnim odstopanjem \bar{d} oziroma standardnim odklonom σ in velikostjo vhodnih slik. Polna črta predstavlja povprečno odstopanje, prekinjena črta pa prikazuje vrednosti standardnega odklona za različno velike vhodne slike.

6.2.3 Rezultati metode EPI

V zadnjem eksperimentu smo korespondenčne točke \mathbf{p}_i^* na drugi sliki določili s pomočjo iskanja ob epipremici \mathbf{l}'_i , ki pripada točki \mathbf{p}_i iz prve slike. Metodo smo poimenovali metoda EPI in predstavlja alternativo naši metodi ASIFT-SH, s katero jo bomo tudi primerjali. Za poljubno izbrano točko \mathbf{p}_i se epipremica \mathbf{l}'_i na drugi sliki izračuna z uporabo temeljne matrike \mathcal{F} po enačbi (3.48). Temeljno matriko \mathcal{F} smo izračunali z uporabo kombinacije dveh metod, in sicer metode LMedS in M-cenilk [106], saj zagotavljata robustno in natančno rešitev (glej podpoglavje 3.4). Kriteriji pri iskanju korespondenčne točke v okolici epipremice \mathbf{l}'_i je bila najbolj podobna barvna vrednost v barvnem prostoru HSV. Okolica epipremice \mathbf{l}'_i je definirana kot deset slikovnih elementov širok pas. Rezultati takšnega iskanja so predstavljeni v tabeli 6.6. Predstavljeni so rezultati le za prvih deset meritev.

meritve	Metoda EPI		
	\bar{d}	σ	n
Meritev 1	342,31	615,77	100
Meritev 2	399,29	603,74	100
Meritev 3	257,4	463,28	100
Meritev 4	230,19	422,72	100
Meritev 5	544,47	706,29	100
Meritev 6	721,44	1000,13	100
Meritev 7	219,44	420,7	100
Meritev 8	539,77	765,62	100
Meritev 9	295,71	511,89	100
Meritev 10	785,55	1070,13	100

Tabela 6.6: Povprečno odstopanje (\bar{d}) in standardni odklon (σ) pri vzpostavitvi korespondence z metodo EPI glede na korespondenčne točke iz množice Zlati standard. Predstavljeni so rezultati za prvih desetih meritev.

6.3 Ocenitev vpliva temperaturnih sprememb na sistem kalibriranih kamer

V naši raziskavi smo se ukvarjali tudi s študijem fenomena, kako sprememba temperature vpliva na posamezno kamero oziroma na sistem kalibriranih kamer. Pri tem smo uporabili splošno uporabljene nizkocenovne kamere in navadno merilno opremo. Najprej bomo predstavili rezultate za eno kamero in nato še za sistem umerjenih kamer. Vsi opisani eksperimenti so bili izvedeni pri dveh različnih temperaturah, in sicer pri 0°C in pri 50°C . Izbrani temperaturi v veliki meri posnemata temperaturne razmere na gradbišču. Za uspešno verifikacijo naše raziskave je potrebno poznati le temperaturno spremembo, tj. ΔT , in tako poznavanje zgornje in spodnje temperaturne meje ni bistvenega pomena. Temperaturna sprememba $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$ je dovolj reprezentativna za doseganje zanesljivih eksperimentov in verifikacijo naših predpostavk.

6.3.1 Vpliv temperaturnih sprememb za posamezno kamero

Modificirani analitični model kamere (podpoglavji 5.1 in 5.3) smo preverili eksperimentalno, in sicer ločeno za notranje ter zunanje parametre kamere. Pričakovano odstopanje, izračunano z analitičnim modelom, smo primerjali z lokacijami točk, ki smo jih izmerili neposredno iz slik. Pri tem smo simulirali spremembo temperature z ustreznim premikom kamere. Prav tako smo določili pričakovano delovno območje kamere na gradbišču. Vzpostavili smo naslednje razmere:

- temperaturno območje je med 0°C in 50°C ;

- nosilna konstrukcija kamere je jeklena in homogena;
- dolžina nosilne konstrukcije je tri metre;
- oddaljenost kamere od opazovanega objekta je več kot deset metrov.

Eksperiment za zunanje parametre kamere

V tem eksperimentu smo verificirali modificirani analitični model kamere, vendar samo za zunanje parametre kamere.

Z izbrano napravo (digitalna kamera ali fotoaparatus) se zajame slika in se na njej določi opazovana točka \mathbf{p} . Zatem se izvede simulacija temperaturne spremembe z ustreznim premikom kamere za vektor premika $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$. Zaradi bolj reprezentativnih rezultatov so v tem eksperimentu bili izvedeni bistveno večji premiki kamere kot se pojavijo na gradbišču. Nato se ponovno odčita položaj opazovane točke, ki jo sedaj označimo kot \mathbf{p}^* . Razlika položajev obeh točk je definirana kot evklidska razdalja $N^m = d(\mathbf{p}, \mathbf{p}^*)$, izražena v enotah slikovnih elementov. Vzporedno temu pa se odstopanje točke \mathbf{p} tudi izračuna z enačbama (5.15) in (5.16). Skupna napaka N^c se nato določi z enačbo (5.17). Vrednosti izračunane N^c in izmerjene N^m napake za različne vektorje premika $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$ so prikazane v tabeli 6.7. Meritve so bil izvedene iz šestih različnih razdalj, tj. $\frac{1}{2}$, 1, 2, 5 in 50 metrov. Med eksperimentom se notranji parametri kamere niso spreminjali ($f_\alpha = f_\beta = 1643$ slikovnih elementov).

r [m]	N_1^c	N_1^m	N_2^c	N_2^m	N_{10}^c	N_{10}^m	N_{20}^c	N_{20}^m	N_{50}^c	N_{50}^m
0,5	4,65	4	9,29	9	46,47	45	92,94	94	232,36	218
1	2,32	3	4,65	5	23,24	22	46,47	47	116,18	115
2	1,16	1	2,32	2	11,62	12	23,24	22	58,09	58
5	0,46	1	0,93	1	4,65	5	9,29	10	23,24	24
50	0,05	0	0,09	0	0,46	1	0,93	1	2,32	2

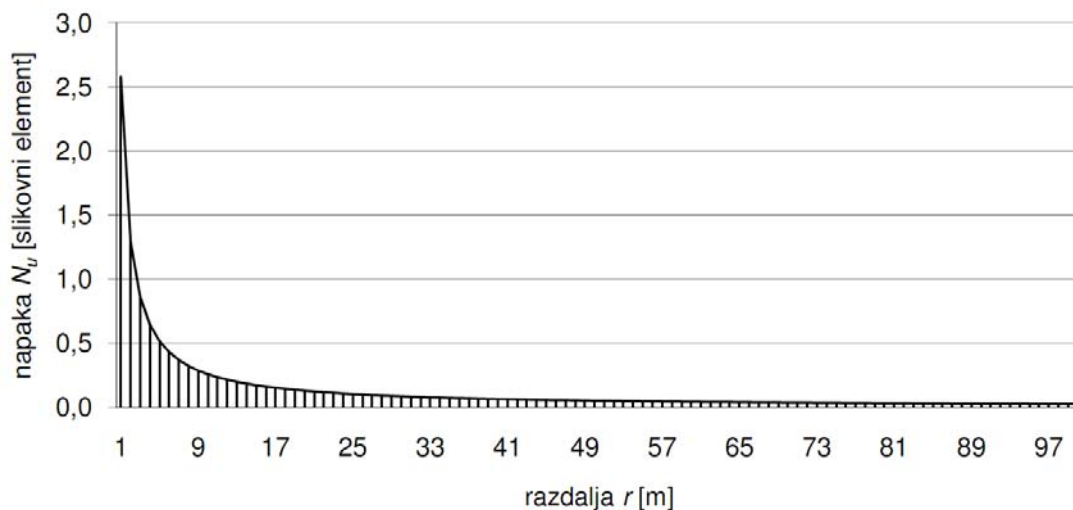
Tabela 6.7: Odstopanje (v enotah slikovnih elementov) opazovane točke \mathbf{p} od izračunane in izmerjene lokacije. Stolpec N_{dev}^c predstavlja z modificiranim analitičnim modelom kamere izračunane rezultate in stolpec N_{dev}^m predstavlja izmerjene vrednosti. Oznaka dev določa velikost vektorja premika $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$ za 1, 2, 10, 20 in 50 mm v obeh smereh hkrati, tj. v smeri x in y , spremenljivka r pa predstavlja oddaljenost kamere od opazovane točke \mathbf{p} .

S prejšnjim eksperimentom (tabela 6.7) smo verificirali naš modificirani analitični model kamere, pri čemer je vektor premika $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$ bistveno večji kot na gradbišču. Nato smo izdelali izračun napake kamere, kjer kamera deluje v pričakovanem območju delovanja. Razdalja kamere od opazovane točke je od 1 do 100 metrov. Kamera je nameščena na tri metre dolgo jekleno nosilno konstrukcijo z linearnim temperaturnim raztežkom $\psi = 13 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Pri temperaturni

spremembi $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ se položaj kamere spremeni za 1,56 mm v smeri vektorja konstrukcije \mathbf{v}_{kon} . Relacijo med vektorjem konstrukcije \mathbf{v}_{kon} in spremembo temperature ΔT opisuje enačba (5.7). Vsaka sprememba vektorja premika $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$ se odraža v napaki N_u , ki jo opisuje enačba (5.17). V našem eksperimentu je sprememba vektorja premik $\Delta \mathbf{t}_{T_r}$ povzročila premik na sliki za 2,56 slikovna elementa pri razdalji enega metra. V tabeli 6.8 so prikazana dejanska odstopanja v enotah slikovnih elementov, ki se pojavijo, ko kamera na gradbišču deluje v pričakovanem delovnem območju. Dejanska odstopanja so prikazana za različne razdalje r , tj. $r = 1, 2, 5, 10, 50$ in 100 metrov pri spremembi temperature $\Delta T = 50^\circ\text{C}$. Rezultati iz tabele 6.8 so na sliki 6.7 prikazani tudi grafično, kjer krivulja opisuje razmerje med napako N_u in razdaljo r od opazovane točke \mathbf{p} .

ΔT	$N_{u(r=1)}$	$N_{u(r=2)}$	$N_{u(r=5)}$	$N_{u(r=10)}$	$N_{u(r=50)}$	$N_{u(r=100)}$
50	2,56	1,28	0,51	0,26	0,05	0,026

Tabela 6.8: Odstopanje (v enotah slikovnih elementov) opazovane točke \mathbf{p} od njenega prvotnega položaja. Oznaka $N_{u(r=.)}$ predstavlja razdaljo r med kamero in opazovano točko \mathbf{p} . Sprememba vektorja premika $\Delta \mathbf{t} = (1.103, 1.103, 0)$ pri spremembi temperature $\Delta T = 50^\circ\text{C}$, kjer je kamera nameščena na tri metre dolgo jekleno nosilno konstrukcijo.

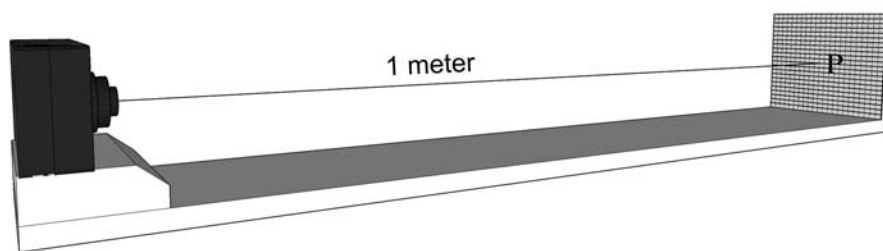


Slika 6.7: Napaka N_u , izražena v enotah slikovnih elementov, zaradi spremembe temperature $\Delta T = 50^\circ\text{C}$. Jeklena nosilna konstrukcija je homogena in dolga tri metre.

Eksperiment za notranje parametre kamere

Za kamere, ki delujejo v pričakovanem delovnem območju, smo preverili vpliv temperaturnih sprememb na notranje parametre kamere. V ta namen je bil izdelan ustrezni eksperimentalni

pripomoček, z nameščeno kamero na enem koncu in milimetrsko mrežo z opazovano točko p na drugem koncu, kot prikazuje slika 6.8. Razdalja med kamero in opazovano točko p je en meter. Eksperimentalni pripomoček je izdelan tako, da ga je možno prestavljati iz zunanjega okolja s temperaturo 0°C v domačo finsko sauno s temperaturo 50°C . Tako smo lahko posneli slike brez spremembe zunanjih parametrov kamere pri različnih temperaturah.



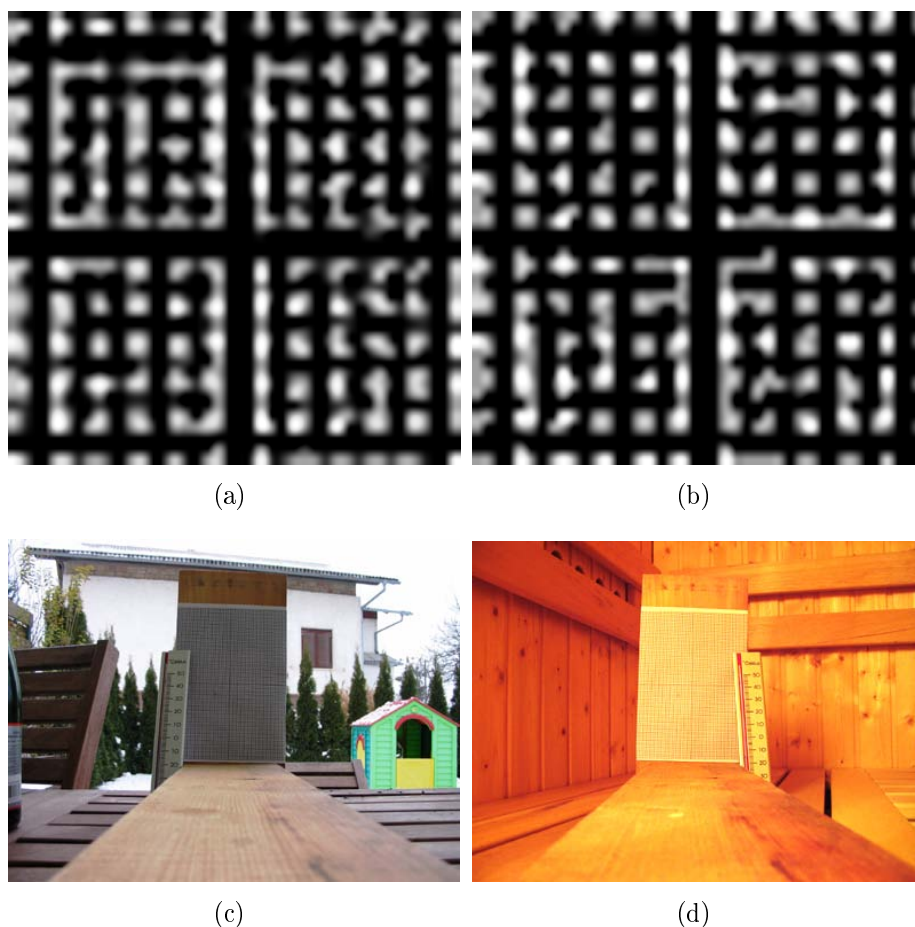
Slika 6.8: Shematski prikaz eksperimentalnega pripomočka. Izdelan je iz lesene osnove, na katero je pritrjena kamera in fiksno določena opazovana točka p . Razdalja med kamero in opazovano točko p je en meter.

Obe zajeti sliki (sliki 6.9c in 6.9d) smo analizirali, pri čemer smo prešteli število slikovnih elementov med črnimi črtami na slikah 6.9a in 6.9b. Na obeh slikah smo prešteli enako število slikovnih elementov med črtami. Eksperiment smo ponovili s tremi različnimi kamerami (Cannon PowerShot A85, Cannon Ixus 300 in Olympus MJU 750) in dobili identične rezultate.

6.3.2 Vpliv temperaturnih sprememb na sistem kalibriranih kamer

Napaki N_u in N_c za sistem kalibriranih kamer smo tudi v tem podpoglavju določili eksperimentalno. Pri tem smo uporabili enak koncept eksperimentov kot za eno kamero, in sicer ločeno smo obravnavali notranje in zunanje parametre kamere. S temi eksperimenti smo poizkušali potrditi naše predpostavke in podati oceno skupne napake N za sistem kalibriranih kamer. Skupna napaka N (glej enačbo (5.22)) zajema po eni strani tako napako N_c , ki je posledica napake metode za kalibracijo kamer in procesa 3D rekonstrukcije, kakor tudi napako N_u , ki je posledica vpliva temperaturnih sprememb na sistem kalibriranih kamer. Ker napake N_c ni mogoče določiti analitično (glej podpoglavje 5.3.2), smo napako ocenili eksperimentalno, pri čemer smo uporabili Zhang-ovo kalibracijsko metodo [26].

Vsi eksperimenti so bili izvedeni v enakih temperaturnih pogojih kot v podpoglavju 6.3.1, tj. pri temperaturi 0°C in 50°C . Za posamezni eksperiment smo izvedli pet meritev. V sklopu



Slika 6.9: Povečan prikaz milimetrskе mreže (velikost 20×20 mm), zajet pri temperaturi a) 0°C in b) 50°C ; c) ter d) pripadajoči izvorni sliki milimetrskе mreže.

teh eksperimentov ena meritev pomeni eno zajemanje kalibracijskega vzorca, tj. šahovnice, iz 15 različnih pogledov z eno samo kamero. Kalibracijski vzorec je sestavljen iz 9×7 črno belih kvadratov, kjer je velikost posameznega kvadrata 28 mm. Množica korespondenčnih točk se iz kalibracijskega vzorca vzpostavi avtomatsko, vendar le za notranje kvadrate. Vsaka množica korespondenčnih točk zato vsebuje $8 \times 6 = 48$ korespondenčnih parov točk. Na sliki 6.10a so prikazane slike kalibracijskega vzorca iz 15 različnih pogledov pri temperaturi 0°C . Isti kalibracijski vzorec, zajet z eno kamero iz več različnih pogledov, se lahko obravnava popolnoma enako, kot sistem z več enakimi kamerami. Slika 6.10b prikazuje identično situacijo, le da so slike bile zajete pri temperaturi 50°C v domači finski sauni.

Eksperiment za zunanje parametre sistema kamer

Zlati standard. Podobno kot v eksperimentih metode ASIFT-SH, smo tudi tukaj vzpostavili ustrezno množico točk Zlati standard, le da so v tem primeru to iz 15 različnih pogledov



Slika 6.10: Kalibracijski vzorec "šahovnica", posnet z eno kamero iz 15 različnih pogledov pri temperaturi a) 0°C in b) 50°C . Velikost slik je 1600×1280 slikovnih elementov. Za doseganje boljše natančnosti je bilo izvedenih pet meritev pri vsaki temperaturi.

rekonstruirane točke v prostoru (sliki 6.10a in 6.10b). Z njimi smo ovrednotili meritve v eksperimentu. Za vse sosednje 3D rekonstruirane točke se nato izračuna standardni odklon njihovih razdalj, in sicer ločeno po osi x in y . V idealnem primeru bi morale biti te razdalje točno 28 mm. Izračun pa je pokazal, da so v povprečju razdalje res 28 mm, je pa njihov standardni odklon 0,02 mm. Dejansko Zlati standard vsebuje napako kalibracijske metode in napako procesa 3D rekonstrukcije, ki sta združeni v napako N_c . V tabeli 6.9 so prikazani rezultati za posamezno meritev \mathbf{X} .

\mathbf{X}	standardni odklon [mm]
1	0,0169
2	0,0293
3	0,0127
4	0,0188
5	0,0215
povprečni odklon	0,0200

Tabela 6.9: Standardni odklon razdalj med rekonstruiranimi 3D točkami za kalibracijski vzorec za posamezno meritev \mathbf{X} . Izračun je potreben za ocenjevanje natančnosti Zlatega standarda.

Eksperimenti. Z opisanim eksperimentom bomo potrdili Predpostavko 2 iz podpoglavja 5.3.1. V prvem delu eksperimenta imamo sistem kalibriranih kamer, pri čemer uporabimo kores-

pondenčne pare točk brez napake (prvi stavek Predpostavke 2). Nato pa v korespondenčne točke iz prve slike vnesemo napako (premik točk), s čimer simuliramo vpliv temperaturnih sprememb. Ti premiki točk dejansko modelirajo premik kamere zaradi temperaturne spremembe.

Med eksperimentom smo modelirali sedem različnih temperaturnih pogojev, kar pomeni, da je bilo potrebno izvesti sedem simuliranih premikov kamere, in sicer za: 1, 2, 5, 10, 20, 50 in 100 mm v smeri vektorja konstrukcije \mathbf{v}_{kon} . V eksperimentu smo izvedli premik korespondenčnih točk na sliki, pri čemer je bilo potrebno dolžinske enote pretvoriti v enote slikovnih elementov, kar smo storili na naslednji način. Prešteli smo število slikovnih elementov, v smeri x , med sosednjima korespondenčnima točkama na sliki. Nato pa smo premik, izražen v enotah slikovnih elementov, izračunali po enačbi:

$$n_s = \frac{n_x}{d} e_m, \quad (6.1)$$

kjer je n_x število slikovnih elementov med sosednjima korespondenčnima točkama v smeri x , d je razdalja korespondenčnih točk na kalibracijskem vzorcu, izražena v dolžinskih enotah in e_m je premik kamere izražen prav tako v dolžinskih enotah. Število slikovnih elementov n_s za posamezno točko odraža ustrezno spremembo vektorja konstrukcije \mathbf{v}_{kon} v smeri x . Enak postopek smo uporabili še za izračun premikov po osi y .

Za vse premaknjene korespondenčne točke smo nato izračunali rekonstruirane 3D točke in določili njihovo odstopanje od dejanske lokacije. Odstopanje smo definirali kot evklidsko razdaljo med točkami Zlatega standarda in rekonstruiranimi točkami, ki jih določajo korespondenčne točke s premikom n_s slikovnih elementov. V tabeli 6.10 so prikazani rezultati, tj. povprečne vrednosti in standardni odkloni razdalj med točkami Zlatega standarda in rekonstruiranimi točkami za posamezno meritev. Za doseganje večje natančnosti je bilo izvedenih pet meritev. Dobljene vrednosti predstavljajo napako N_u za uporabljen kalibracijsko metodo.

Drugi del eksperimenta pa modelira drugi stavek Predpostavke 2. Tako je najprej potrebno izvesti vnos napake (premik korespondenčnih točk) zaradi vpliva temperaturnih sprememb in šele nato se izvede postopek kalibracije kamere. Premik korespondenčnih točk na sliki se izvede po enakem postopku, ki smo ga že opisali v prvem delu tega eksperimenta. Na koncu se izvede postopek 3D rekonstrukcije za korespondenčne točke brez napake (kalibracija kamere je bila izvedena z korespondenčnimi točkami, ki vsebujejo napako) in se ovrednoti natančnost rekonstruiranih točk (evklidska razdalja med rekonstruiranimi točkami in točkami Zlatega standarda). Rezultati so predstavljeni v tabeli 6.11.

Graf na sliki 6.11 prikazuje relativno napako $N_{u,r}$ (glej enačbo (5.23)) v odvisnosti od razdalje r zaradi spremembe temperature. Relativna napaka je izračunana za sedem različnih razdalj, in sicer: 1, 2, 5, 10, 20, 50 in 100 metrov.

e_m [mm]	X=1		X=2		X=3		X=4		X=5		povp	
	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]
1	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03
2	0,17	0,05	0,16	0,05	0,16	0,05	0,18	0,05	0,16	0,05	0,17	0,05
5	0,39	0,15	0,37	0,16	0,41	0,15	0,40	0,14	0,37	0,15	0,39	0,15
10	0,83	0,29	0,86	0,28	0,81	0,30	0,80	0,27	0,81	0,31	0,82	0,29
20	1,59	0,66	1,65	0,70	1,69	0,69	1,49	0,63	1,64	0,62	1,61	0,66
50	4,58	1,48	4,81	1,55	4,31	1,44	4,81	1,39	4,85	1,54	4,67	1,48
100	9,25	2,97	8,70	3,15	9,81	2,85	9,81	3,06	9,81	2,85	9,47	2,98

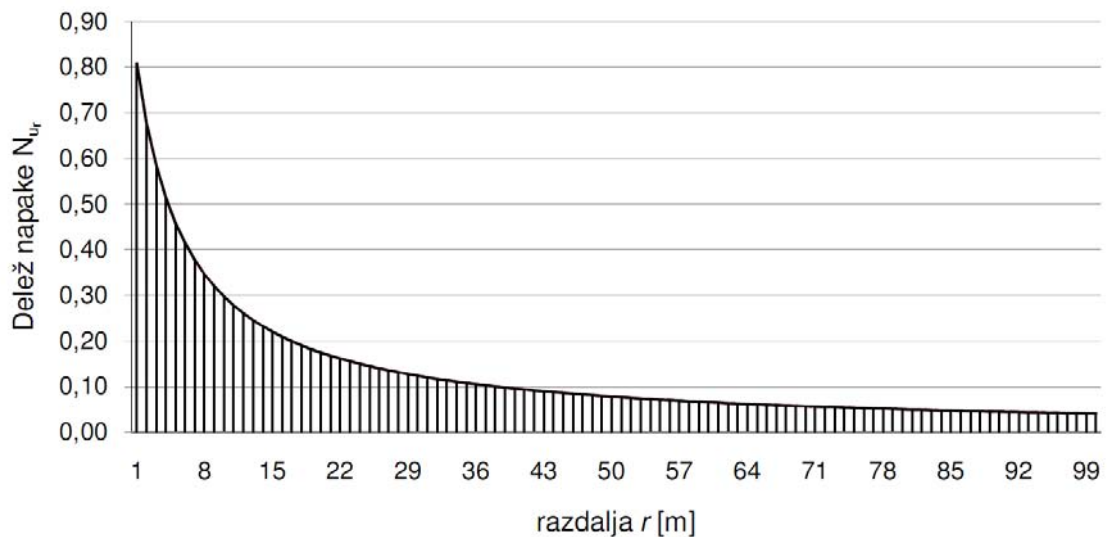
Tabela 6.10: Povprečna vrednost (povp) in standardni odklon (std) evklidskih razdalj med točkami Zlatega standarda in rekonstruiranimi točkami za posamezno meritev \mathbf{X} . Rezultati so izraženih v milimetrih. Kalibracija kamere je bila izvedena s korespondenčnimi točkami brez napake, medtem ko spremenljivka e_m predstavlja spremembo vektorja konstrukcije \mathbf{v}_{kon} zaradi spremembe temperature.

Eksperiment za notranje parametre sistema kamer

V prvih petih meritvah (m_1, \dots, m_5) tega eksperimenta je bila kamera kalibrirana pri 0°C , v drugih petih meritvah (m_6, \dots, m_{10}) pa pri 50°C . Kot smo že opisali, ena meritev pomeni eno zajemanje kalibracijskega vzorca iz 15 različnih pogledov. Vseh 15 slik smo nato uporabili v postopku kalibracije. Rezultat postopka kalibracije je med drugim tudi kalibracijska matrika kamere \mathcal{K} . Za deset meritev torej dobimo deset kalibracijskih matrik, tj. matrike $\mathcal{K}_1, \dots, \mathcal{K}_{10}$. V idealnem primeru bi bile te matrike identične, vendar zaradi napake pri postopku kalibracije, tj. napake N_c , matrike niso povsem enake. Da bi lahko ovrednotili razlike med kalibracijskimi matrikami, smo jih uporabili v procesu 3D rekonstrukcije (glej poglavje 3.6). Za vsako meritev je bilo izvedenih deset postopkov rekonstrukcije, pri čemer smo vsakokrat uporabili drugo kalibracijsko matriko. Napaka izračunanih rekonstruiranih točk se je določila po enakem postopku kot v podpoglavju 6.3.2. Rezultati so prikazani v tabelah 6.12 in 6.13. Vrednost v vrstici \mathcal{K}_Y in stolpcu \mathbf{X} predstavlja odstopanje rekonstruiranih točk, pri čemer je bil proces rekonstrukcije izveden iz korespondenčnih točk meritve \mathbf{X} in kalibracijske matrike \mathcal{K}_Y . Oznaka \mathcal{K}_Y predstavlja kalibracijsko matriko, ki je izračunana iz 15 slik meritve Y . Vrednosti v obeh tabelah so izražene v milimetrih. Tabela 6.12 predstavlja rezultate, kjer so slike bile zajete pri temperaturi 0°C in enako velja tudi za tabelo 6.13, le da so slike bile zajete pri temperaturi 50°C .

e_m [mm]	X=1		X=2		X=3		X=4		X=5		povp	
	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]
1	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03
2	0,17	0,05	0,16	0,05	0,16	0,05	0,18	0,05	0,18	0,05	0,17	0,05
5	0,39	0,15	0,41	0,15	0,40	0,14	0,37	0,16	0,41	0,14	0,40	0,15
10	0,84	0,31	0,89	0,33	0,88	0,32	0,87	0,30	0,79	0,32	0,85	0,31
20	1,60	0,62	1,70	0,64	1,50	0,60	1,65	0,60	1,52	0,66	1,59	0,62
50	4,54	1,45	4,40	1,38	4,40	1,52	4,72	1,51	4,31	1,41	4,48	1,45
100	9,21	2,87	8,66	3,01	8,66	3,01	8,93	2,98	9,49	3,01	8,99	2,98

Tabela 6.11: Povprečna vrednost (povp) in standardni odklon (std) evklidskih razdalj med točkami Zlatega standarda in rekonstruiranimi točkami za posamezno meritev \mathbf{X} . Rezultati so izraženi v milimetrih. Kalibracija kamere je bila izvedena s korespondenčnimi točkami, ki vsebujejo napako, medtem ko spremenljivka e_m predstavlja spremembo vektorja konstrukcije \mathbf{v}_{kon} zaradi spremembe temperature.



Slika 6.11: Relativni delež napake zaradi spremembe parametrov kamere, N_{ur} , v odvisnosti od razdalje r med opazovanim objektom in kamero.

	X = 1		X = 2		X = 3		X = 4		X = 5	
	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]
\mathcal{K}_1	1,27	0,23	1,19	0,24	1,21	0,24	1,19	0,22	1,23	0,22
\mathcal{K}_2	1,32	0,05	1,27	0,05	1,28	0,05	1,24	0,05	1,37	0,05
\mathcal{K}_3	0,71	0,09	0,68	0,09	0,68	0,09	0,75	0,09	0,73	0,09
\mathcal{K}_4	0,97	0,89	1,00	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	1,01	0,86
\mathcal{K}_5	0,60	0,39	0,57	0,38	0,63	0,41	0,58	0,41	0,64	0,37
\mathcal{K}_6	1,20	1,00	1,27	0,95	1,14	0,96	1,15	1,03	1,15	1,06
\mathcal{K}_7	0,66	0,66	0,69	0,64	0,63	0,64	0,69	0,64	0,68	0,62
\mathcal{K}_8	0,31	0,36	0,32	0,35	0,32	0,39	0,32	0,39	0,30	0,38
\mathcal{K}_9	1,16	0,15	1,10	0,16	1,09	0,16	1,11	0,16	1,13	0,16
\mathcal{K}_{10}	0,83	0,20	0,87	0,19	0,81	0,19	0,88	0,19	0,78	0,21
povp _X	0,90		0,90		0,91		0,90		0,90	
std _X	0,32		0,33		0,34		0,33		0,31	

Tabela 6.12: Povprečno odstopanje (povp) in standardni odklon (std) evklidskih razdalj med točkami Zlatega standarda in rekonstruiranimi točkami za posamezno meritev \mathbf{X} . \mathcal{K}_Y predstavlja kalibracijsko matriko, izračunano iz 15 različnih pogledov kamere za meritev Y . Rezultati so izraženi v milimetrih. Slike meritev so bile zajete pri temperaturi 0°C . Oznaki povp_X in std_X pa predstavljata povprečno vrednost in standardni odklon povprečnih vrednosti vseh desetih postopkov rekonstrukcije za posamezno meritev.

	X = 6		X = 7		X = 8		X = 9		X = 10	
	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]	povp [mm]	std [mm]
\mathcal{K}_1	1,28	0,21	1,34	0,20	1,32	0,20	1,23	0,22	1,34	0,22
\mathcal{K}_2	1,31	0,05	1,35	0,05	1,26	0,05	1,38	0,05	1,23	0,05
\mathcal{K}_3	0,71	0,10	0,68	0,11	0,76	0,10	0,67	0,10	0,68	0,10
\mathcal{K}_4	0,97	0,89	0,94	0,86	0,92	0,93	1,03	0,94	1,01	0,94
\mathcal{K}_5	0,58	0,41	0,60	0,43	0,55	0,39	0,56	0,43	0,60	0,42
\mathcal{K}_6	1,23	0,99	1,27	1,02	1,19	0,96	1,28	0,95	1,16	0,94
\mathcal{K}_7	0,70	0,66	0,73	0,69	0,66	0,62	0,74	0,64	0,66	0,70
\mathcal{K}_8	0,28	0,36	0,29	0,35	0,30	0,35	0,29	0,35	0,29	0,38
\mathcal{K}_9	1,16	0,14	1,13	0,14	1,19	0,13	1,22	0,13	1,23	0,14
\mathcal{K}_{10}	0,81	0,19	0,84	0,20	0,77	0,18	0,86	0,20	0,86	0,18
povp _X	0,90		0,91		0,90		0,91		0,92	
std _X	0,33		0,34		0,32		0,34		0,35	

Tabela 6.13: Povprečno odstopanje (povp) in standardni odklon (std) evklidskih razdalj med točkami Zlatega standarda in rekonstruiranimi točkami za posamezno meritev \mathbf{X} . \mathcal{K}_Y predstavlja kalibracijsko matriko, izračunano iz 15 različnih pogledov kamere za meritev Y . Rezultati so izraženi v milimetrih. Slike meritev so bile zajete pri temperaturi 50°C . Oznaki povp_X in std_X pa predstavljata povprečno vrednost in standardni odklon povprečnih vrednosti vseh desetih postopkov rekonstrukcije za posamezno meritev.

Poglavje 7

Diskusija in sklepi

Obe različici metode ASIFT-SH, tj. osnovna in adaptivna, zagotavljata dobre rezultate za izračun korespondenčne točke na drugi sliki za poljubno izbrano točko iz prve slike pri velikih odmikih dveh kamer. Tudi rezultati meritev, s katerimi smo merili vpliv temperaturnih sprememb na delovanje kamere, potrjujejo naš modificirani analitični model kamere, ki smo ga dopolnili s členom za opis vpliva temperaturnih sprememb. Preučili smo tudi vpliv temperaturnih sprememb na sistem kalibriranih kamer. V tem poglavju bomo najprej analizirali dobljene rezultate, na koncu pa bomo ovrednotili še pravilnost zastavljene teze in hipotez.

7.1 Metoda ASIFT-SH

V prvem koraku naše metode ASIFT-SH smo za vzpostavitev začetnih korespondenčnih točk uporabili kar metodo ASIFT, ki v splošnem dobro vzpostavlja korespondenco med dvema slikama. Občasno napačno ali slabo vzpostavljene korespondenčne točke smo izločili z uporabo epipolarne geometrije (glej podpoglavje 4.1.1). V povprečju smo izločili okrog 2 % parov iz množice začetnih korespondenčnih točk. Za verifikacijo metode ASIFT-SH smo izvedli tri različne eksperimente, in sicer: s sintetičnimi slikami, z realnimi slikami stavb in gradbišč ter z realnimi slikami, kjer smo variirali velikost slik.

7.1.1 Meritve s sintetično pripravljenimi slikami

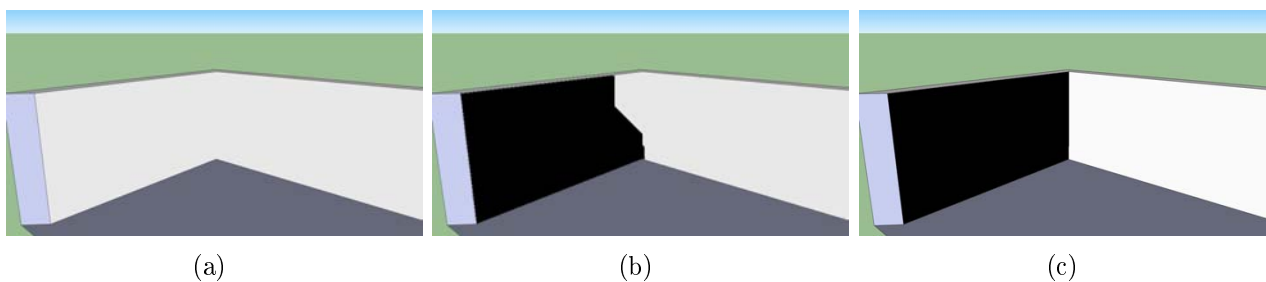
Pri meritvah s sintetično pripravljenimi slikami smo se osredotočili predvsem na preverjanje koncepta metode ASIFT-SH in na pravilnost njenega delovanja. Različne meritve smo izvedli kot scenarije, ki so podrobno opisani v podpoglavju 6.2.1. Rezultati so predstavljeni v tabeli 6.1. Tabela je razdeljena v tri sklope, in sicer v sklop:

- osnovna različica metode ASIFT-SH z uspešno segmentacijo,
- osnovna različica metode ASIFT-SH z neuspešno segmentacijo in
- adaptivna različica metode ASIFT-SH, prav tako z neuspešno segmentacijo.

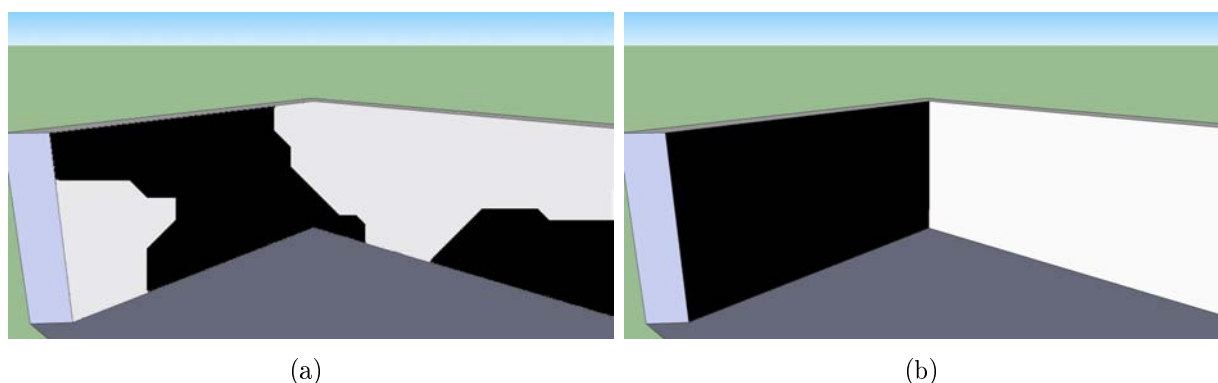
Prvi sklop rezultatov v tabeli 6.1 potrjuje koncept delovanja osnovne različice metode ASIFT. V tem primeru je bil opazovani objekt pravilno segmentiran, kar pomeni, da so vse segmentirane regije na sliki predstavljale koplanarne dele opazovanega objekta. Začetne korespondenčne točke so bile vzpostavljene dobro in pravilno. Povprečna odstopanja in standardni odkloni meritev se gibljejo okoli enega slikovnega elementa. Pri zadnjih dveh meritvah lahko opazimo porast deleža točk, tj. oznaka ε , za katere korespondenčne točke na drugi sliki ni bilo mogoče izračunati. To je izključno posledica nezadostnega števila začetnih korespondenčnih točk v segmentirani regiji. Scenarij v meritvi "Meritev 5" je bil zastavljen tako, da ena segmentirana regija ni vsebovala zadostnega števila korespondenčnih točk, zato zanjo ni bilo mogoče izračunati lokalne homografije. Meritev "Meritev 6" je predvidevala še bolj drastičen scenarij. Nobena segmentirana regija namreč ni vsebovala zadostnega števila začetnih korespondenčnih točk. V tem primeru povprečnega odstopanja in standardnega odklona niti ni bilo mogoče izračunati.

V drugem sklopu tabele 6.1 so prav tako predstavljeni rezultati osnovne različice metode ASIFT-SH. V tem primeru pa je bila segmentacija neustrezna. Vse začetne korespondenčne točke so namreč pripadale eni sami segmentirani regiji (glej sliko 7.1a). Povprečna odstopanja in standardni odkloni meritev so v tem primeru večji za okoli sto krat glede na rezultate prvega sklopa. Ti rezultati dokazujejo, da je natančnost metode ASIFT-SH močno odvisna od natančnosti segmentacije.

Nadgradnja osnovne različice metode ASIFT-SH temelji na preoblikovanju segmentiranih regij, ki predstavljajo nekoplanarne dele opazovanega objekta. Metoda ASIFT-SH s pomočjo 3D rekonstrukcije začetnih korespondenčnih točk iz posamezne segmentirane regije poišče ravnine, ki se najboljše prilegajo rekonstruiranim korespondenčnim točkam. V okviru ene iteracije lahko iz posamezne segmentirane regije nastaneta dve novi, ki bolje ustrezata kriteriju koplanarnosti. Rezultati metode ASIFT-SH z adaptivnim pristopom so predstavljeni v tretjem sklopu tabele 6.1, zgled takšnega preoblikovanja za meritvev "Meritev 1" pa prikazuje slika 7.1b. Pravilen rezultat oziroma Zlati standard je za ta primer prikazan na sliki 7.1c. Na osnovi tega zgleada in rezultatov v tabeli 6.1 (tretji sklop) lahko trdimo, da je proces preoblikovanja neustrezne segmentirane regije (slika 7.1a) bil izveden uspešno, kar potrjuje ustreznost koncepta in pravilnost delovanja adaptivne različice metode ASIFT-SH. Rezultati adaptivne različice metode ASIFT-SH z neustrezno segmentiranimi slikami so praktično identični rezultatom osnovne različice metode ASIFT-SH, kjer je bila segmentacija izvedena pravilno.



Slika 7.1: Slika iz meritve "Meritev 1": (a) neustrezno segmentirana sintetična slika, (b) z adaptivno različico metode ASIFT-SH preoblikovana segmentirana regija in (c) pravilno segmentirana slika (Zlati standard).



Slika 7.2: Primer (a) manj uspešno in (b) pravilno segmentirane sintetično pripravljene slike (Zlati standard).

Razhajanja med rezultati osnovne in adaptivne različice metode ASIFT-SH se pojavijo pri meritvi "Meritev 4", kjer scenarij predvideva za posamezno segmentirano regijo le pet naključno izbranih začetnih korespondenčnih točk. Po procesu 3D rekonstrukcije so bile skoraj vse izbrane rekonstruirane korespondenčne točke koplanarne (z dopustnim odstopanjem). Rezultat segmentacije za meritev "Meritev 4" prikazuje slika 7.2a, njeno pravilno segmentacijo pa slika 7.2b. Opazimo, da se je proces preoblikovanja neustrezno segmentirane regije za meritev "Meritev 4" izvedel manj uspešno.

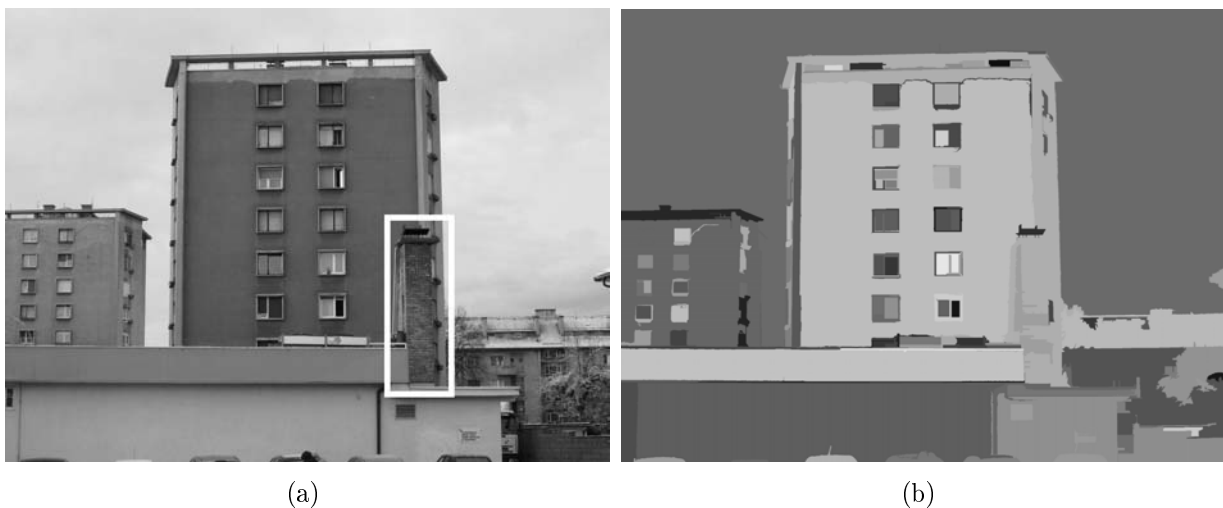
7.1.2 Meritve s slikami stavb in gradbišč

Rezultate meritev na realnih slika stavb in gradbišč prikazujejo tabele 6.2, 6.3 in 6.4. V nadaljevanju bomo podrobneje analizirali rezultate iz tabele 6.2. Trdimo lahko, da so dobljeni rezultati ugodni, le nekoliko višja odstopanja se pojavljajo pri meritvah "Meritev 4", "Meritev 5" in "Meritev 10", ki naslavlja dva tipična problema metode ASIFT-SH. Oba problema

bomo natančneje pojasnili in opisali v nadaljevanju. Pri meritvi "Meritev 10" (slika 6.3j) se pojavi nekoliko povečano povprečno odstopanje in velik standardni odklon (glej tabelo 6.2). Glavni razlog za povečano odstopanje gre pripisati procesu segmentacije. Čeprav je slika še sprejemljivo segmentirana, je ključnega pomena za slabšo natančnost neustrezna segmentacija v okolici dimnika. Iz slike 7.3b je razvidno, da dimnik in del stene objekta v ozadju pripadata isti segmentirani regiji. Napačno segmentirana regija vodi v naslednji neugodni situaciji:

- poljubno izbrana točka p_i iz prve slike se priredi napačni segmentirani regiji \mathcal{R}_j in posledično temu se tudi uporabi napačna matrika \mathcal{H}_j in
- poljubno izbrana točka p_i iz prve slike se priredi ustrezni segmentirani regiji \mathcal{R}_j , ampak je njena lokalna homografija neustrezno izračunana (zaradi nekoplanarnih točk).

Kritičen korak metode ASIFT-SH je torej postopek segmentacije (do takšnega zaključka smo prišli tudi pri meritvah s sintetično pripravljenimi slikami), kjer smo uporabili segmentacijsko metodo temelječo na grafu [121] (osnovni opis metode se nahaja v podpoglavju 3.5). Izbrana segmentacijska metoda se v večini primerov izkaže kot zelo primerna, vendar se pojavijo tudi scene, kjer je slika ali pa le njen del neustrezno segmentiran. V primeru "Meritev 10" metoda ASIFT-SH ne zagotavlja ustreznega izračuna korespondence za poljubno izbrano točko iz področja dimnika. Matrika \mathcal{H}_j se namreč izračuna iz vseh korespondenčnih točk segmentirane regije



Slika 7.3: Slika iz meritve "Meritev 10": (a) originalna slika in (b) segmentirana slika. V okolici dimnika je na originalni sliki z belim okvirjem označena napačno segmentirana regija.

\mathcal{R}_j (v tem primeru iz združene regije bloka in dimnika). To je tudi razlog, da imajo izračunane korespondenčne točke z metodo ASIFT-SH, vsaj v tem delu slike, izjemno veliko odstopanje.



(a)

(b)

Slika 7.4: Slika (a) meritev "Meritev 4" pogled prve kamere in (b) meritev "Meritev 4" pogled druge kamere. Bele točke predstavljajo napačno vzpostavljene korespondenčne točke z metodo ASIFT. Prikazane so le 3 od 12 napačno vzpostavljenih korespondenčnih točk.

Napaka v segmentaciji se močno odraža tako na povečanem povprečnem odstopanju, kot tudi na še večjem standardnem odklonu, kar je razvidno iz tabele 6.2.

Popolnoma drugačen problem pa se pojavi pri meritvah "Meritev 4" in "Meritev 5", kjer je razlika med povprečnim odstopanjem \bar{d} in standardnim odklonom σ veliko manjša. Pri omenjenih meritvah pa postopek segmentacije ni edini problem. Glavni razlog za slabe rezultate so napačno vzpostavljene začetne korespondenčne točke z metodo ASIFT, ki se izvede v prvem koraku metode ASIFT-SH (glej podpoglavje 4.1.1). Posebej problematičen je del slike z gradbeno ograjo, ki vsebuje zelo podobne grafične podobe (glej sliko 7.4). Eliminacija napačno vzpostavljenih začetnih korespondenčnih točk z epipolarno omejitvijo po enačbi (4.2) se ne obnese, saj se napačno vzpostavljene točke nahajajo v okolici pripadajoče epipremice. Povedano drugače, napačno vzpostavljena korespondenčna točka se sicer nahaja v dovolj majhni okolici epipremice, vendar kjerkoli vzdolž nje. Takšna situacija je prikazana na sliki 7.4, kjer je tudi eliminacija napačno vzpostavljenih korespondenčnih točk na osnovi epipolarne omejitve bila neuspešna.

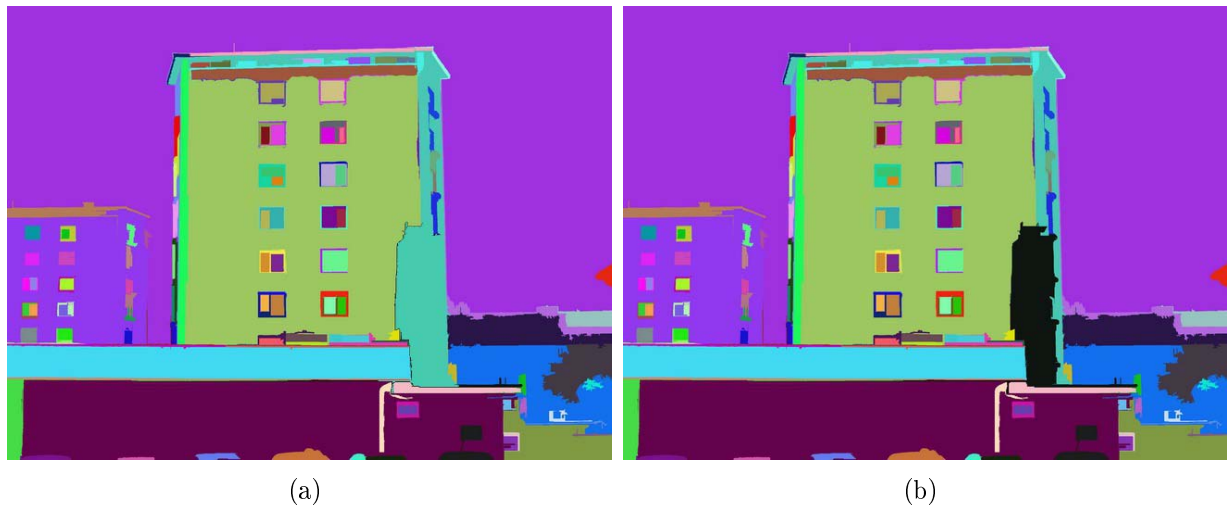
Da bi lažje interpretirali vrednosti povprečnega odstopanja in standardnega odklona iz tabele 6.2, smo le-te izrazili v dolžinskih enotah mm. Iz tabele 6.2 je razvidno, da izračunano povprečno odstopanje za meritve "Meritev 4", "Meritev 5" in "Meritev 10" znaša 57,85, 33,89 in 24,69 slikovnih elementov. Če te vrednosti pretvorimo v dolžinske enote mm, potem ta odstopanja v naravi predstavljajo 115 mm, 68 mm in 49 mm za opazovane objekte na sliki. Poudariti je potrebno, da navedene pretvorbe natančno veljajo le za tiste opazovane dele objekta, ki so enako oddaljeni od kamere kot točka, v kateri smo izmerili velikost slikovnega elementa.

Zraven povprečnega odstopanja \bar{d} in standardnega odklona σ smo merili tudi delež izbranih korespondenčnih točk iz prve slike, za katere korespondenčne točke na drugi sliki ni bilo mogoče izračunati. Rezultate smo predstavili v stolpcu z oznako ε , in sicer v tabelah 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 in 6.5. Za neuspešni izračun korespondenčne točke na drugi sliki z metodo ASIFT-SH obstajata naslednja dva razloga:

1. Segmentirana regija \mathcal{R}_j vsebuje manj kot štiri korespondenčne točke, zato izračun lokalne homografije \mathcal{H}_j ni mogoč. Naj ponovno omenimo, da so parametri segmentacijske metode za vse meritve in eksperimente enaki. Pri izbiri parametrov je potrebno upoštevati relacijo med velikostjo segmentiranih regij, številom korespondenčnih točk znotraj posamezne regije in koplanarnostjo regij. V splošnem velja naslednje: večja kot je segmentirana regija \mathcal{R}_j , večja je podmnožica korespondenčnih točk \mathcal{S}_j , hkrati pa obstaja večja verjetnost, da se z večanjem segmentiranih regij, poveča tudi stopnja nekoplanarnosti podmnožice korespondenčnih točk \mathcal{S}_j . Po drugi strani pa premajhne segmentirane regije ne zagotavljajo zadostnega števila korespondenčnih točk za izračun lokalne homografije. Vrednosti parametrov izbrane segmentacijske metode so tako kompromis med opisanimi relacijami. Rezultati meritev s slikami stavb in gradbišč iz tabele 6.2 kažejo, da v povprečju za 1 % točk iz množice Zlati standard ni bilo mogoče izračunati korespondenčne točke na drugi sliki.
2. Za izbrano točko \mathbf{p}_i iz prve slike ne obstaja korespondenčna točka \mathbf{p}'_i na drugi sliki. V splošnem se je metoda ASIFT izkazala kot zelo zanesljiva pri vzpostavljanju korespondenčnih točk [23]. Poleg tega so te korespondenčne točke razporejene praktično po celotni sliki. Primerjalno gledano, številne uveljavljene metode kot so MSER [77], Hessian-Laplace [70], SIFT [16, 67] z nekaterimi izpeljankami ali razširitvami deskriptorja SIFT (npr. PCA-SIFT [87], GLOH [84] ali SURF [88]) zagotavljajo bistveno manjše število korespondenčnih točk, ki so praviloma slabše porazdeljene po sliki. Če torej matrike \mathcal{H}_j ni mogoče izračunati za segmentirano regijo $\mathcal{R}_j(\mathbf{p}_i \in \mathcal{R}_j)$, potem obstaja velika verjetnost, da korespondenčna regija \mathcal{R}'_j ali pa le njen del na drugi sliki ne obstaja (opazovani objekt iz prve slike se na drugi sliki ne vidi zaradi spremembe pogleda druge kamere).

Uspešnost adaptivne različice metode ASIFT-SH na osnovi 3D rekonstrukcije

Delovanje osnovne različice metode ASIFT-SH smo nadgradili s postopkom adaptivnega prilagajanja segmentiranih regij, kot smo to opisali v podpoglavju 4.2. Rezultati meritev so prikazani v drugem sklopu tabele 6.2. Pri vseh meritvah opazimo zmanjšanje povprečnega odstopanja \bar{d} in standardnega odklona σ v primerjavi z rezultati iz prvega sklopa, kjer so prikazani rezul-



Slika 7.5: Segmentirana prva slika meritve "Meritev 10": (a) osnovna različica metode ASIFT-SH in (b) preoblikovana segmentirana regija s postopkom adaptivnega prilagajanja na osnovi 3D rekonstrukcije.

tati osnovne različice metode ASIFT-SH. Izboljšanje rezultatov meritev je posledica uspešnega preoblikovanja tistih segmentiranih regij, ki so bile identificirane kot nekoplanarne.

Primer preoblikovanja segmentirane regije za meritev "Meritev 10" prikazuje slika 7.5. Na sliki 7.5a je prikazan rezultat segmentacije iz osnovne različice metode ASIFT-SH. Na njej je lepo razvidno, da dimnik v ospredju in stena stavbe v ozadju pripadata isti segmentirani regiji. Ker je razdalja med obema objektoma, tj. dimnikom in steno stavbe, istega velikostnega razreda kot je razdalja do dimnika, je takšna napačna segmentacija še posebej kritična. Prav zaradi tega imajo točke iz te segmentirane regije veliko povprečno odstopanje in še večji standardni odklon. Z adaptivnim prilagajanjem segmentiranih regij s pomočjo 3D rekonstrukcije se je segmentirana regija, ki je bila identificirana kot nekoplanarna, preoblikovala v novi regiji, kot prikazuje slika 7.5b. Vidimo lahko, da sta nastali dve novi segmentirani regiji, ki pa sedaj bolje ustrezata kriteriju koplanarnosti.

Potencialni problem, ki se lahko pojavi pri takšnem preoblikovanju segmentiranih regij, je premajhno število korespondenčnih parov točk, na osnovi katerih izračun lokalne homografije za posamezno segmentirano regijo ni mogoč. V tem primeru seveda ne moremo določiti korespondence za poljubno izbrane točke iz takšne segmentirane regije.

Dodatne meritve, izvedene za potrjevanje osnovne in adaptivne različice metode ASIFT-SH

Po uspešno opravljenih prvih desetih meritvah (rezultati so v tabeli 6.2) smo dodatno opravili še 40 meritev na realnih slikah stavb in gradbišč. Rezultati prvih dvajset meritev so prikazani v tabeli 6.3, drugih dvajset pa v tabeli 6.4. Obe tabeli sta razdeljeni v dva sklopa, in sicer prvi sklop prikazuje rezultate meritev osnovne različice metode ASIFT-SH, drugi sklop pa rezultate adaptivne različice metode ASIFT-SH. Iz rezultatov meritev opazimo, da so v večini primerov povprečna odstopanja \bar{d} in standardni odkloni σ večja kot pri prvih desetih meritvah. To je vsekakor posledica vhodnih slik. Razdalje pri zajemanju slik za prvih desetih meritev so bile bistveno večje kot pa razdalje pri preostalih 40 meritvah. Primer različno oddaljenih opazovanih objektov od kamere prikazuje slika 7.6. V prvem primeru, tj. v sliki 7.6a, je opazovani objekt oddaljen približno 200 metrov, medtem ko pa v drugem primeru, tj. v sliki 7.6b, pa je oddaljenost opazovanega objekta od kamere le okoli 5 metrov. Posledica je seveda velika razlika med velikostmi slikovnih elementov med slikama. Enostavno izračunamo, da je velikost slikovnega elementa v drugem primeru 40 krat manjša kot v prvem. Poudariti je potrebno, da tako velika razlika, tj. 40-kratna, med oddaljenostmi opazovanih objektov in kamero med različnimi meritvami ne velja za celoten eksperiment. V povprečju so razlike med oddaljenostmi, tj. med opazovanim objektom in kamero, zgolj nekaj krat manjše kot v prvih desetih meritvah. Primerno temu je potrebno interpretirati rezultate iz tabel 6.3 in 6.4. Večja odstopanja opazimo le pri dveh meritvah, in sicer "Meritev 23" in "Meritev 45".



Slika 7.6: Zajeta slika iz (a) velike oddaljenosti (pri meritvi "Meritev 10" iz približno 200 m) in (b) manjše oddaljenosti (pri meritvi "Meritev 27" iz približno 5 m).

Ključnega pomena pa so rezultati adaptivne različice metode ASIFT-SH, ki se nahajajo

v drugem sklopu tabel 6.3 in 6.4. Rezultati vseh štiridesetih meritev izkazujejo zmanjšanje povprečne napake. Tudi standardni odklon se je zmanjšal skoraj v vseh meritvah. Na osnovi rezultatov lahko zaključimo, da se je povprečno odstopanje vseh štiridesetih meritve v povprečju zmanjšalo za 1,62 krat, standardni odklon pa za 2,51 krat glede na rezultate, dobljene z osnovno različico metode ASIFT-SH.

Zadnji stolpec posameznega sklopa v tabelah 6.3 in 6.4, tj. stolpec ε , predstavlja odstotek tistih točk iz množice Zlati standard, za katere ni bilo mogoče izračunati korespondenčne točke na drugi sliki. Pri adaptivni različici metode ASIFT-SH je ta odstotek nekoliko višji v primerjavi z osnovno različico metode. Povprečni odstotek za osnovno različico metode ASIFT-SH znaša le 0,14 %, medtem ko je za adaptivno različico le-ta nekoliko višji, in sicer 0,33 %. Vzrok za povečanje odstotka točk, za katere ni bilo mogoče izračunati korespondenčnih točk na drugi sliki, je v preoblikovanju segmentiranih regij. Preoblikovanje segmentiranih regij temelji na ponovnem združevanju korespondenčnih točk v nove segmentirane regije, ki izpolnjujejo predpisan kriterij (tj. kriterij koplanarnosti). Zaradi računske napake v posameznih korakih algoritma se dopuščajo določena odstopanja rekonstruiranih korespondenčnih točk od izračunane ravnine. Tiste rekonstruirane korespondenčne točke, ki ne izpolnjujejo predpisanega kriterija, zato tvorijo novo podmnožico (in nato tudi novo segmentirano regijo znotraj obstoječe), za katero se v naslednji iteraciji ponovno preverja kriterij koplanarnosti. Po nekaj iteracijah lahko še vedno obstaja manjša množica točk (posledično zato tudi preoblikovana segmentirana regija), ki ne izpolnjuje kriterija koplanarnosti. Za segmentirano regijo z manj kot štirimi korespondenčnimi točkami pa vemo, da lokalne homografije ne moremo izračunati. Prav takšne segmentirane regije, tj. regije z manj kot štirimi korespondenčnimi točkami, prispevajo k povečanju odstotka točk iz množice Zlati standard, za katere korespondenčne točke na drugi sliki ni mogoče izračunati.

7.1.3 Natančnost metode ASIFT-SH za različno velike vhodne slike

Delovanje metode ASIFT-SH smo testirali tudi pri različno velikih slikah. Pri tem smo uporabili vhodne slike iz meritve "Meritev 9". Rezultati prikazani v tabeli 6.5 so pričakovani. Z zmanjševanjem velikosti slik se zmanjšujeta tako povprečno odstopanje \bar{d} kot standardni odklon σ . Rezultati so prikazani tudi na grafu 6.6. Nekonsistentno obnašanje lahko opazimo zgolj pri meritvi za sliko velikosti 2720×2040 slikovnih elementov, kjer se standardni odklon σ nepričakovano poveča. Razlog je v eni izmed regij, ki je neustrezno segmentirana, kar v našem primeru povzroči izjemno veliko napako pri eni sami korespondenčni točki. Odstopanje te točke znaša nekaj več ko 160 slikovnih elementov, kar bistveno vpliva na povečanje standardnega odklona, nekoliko manj pa vpliva na povprečno odstopanje.



Slika 7.7: Korespondenčna epipremica (polna črta) za par slik iz meritve "Meritev 4": (a) poljubno izbrane točke p_i in (b) njihove dejanske korespondenčne točke p'_i (Zlati standard) na epipremici in z metodo EPI izračunane korespondenčne točke p_i^* .

7.1.4 Metoda EPI

V zadnjem eksperimentu smo našo metodo ASIFT-SH primerjali z metodo EPI, pri kateri določitev korespondenčne točke p'_i temelji na iskanju v okolici pripadajoče epipremice l'_i . Metoda ASIFT-SH je bila namreč razvita kot alternativa metodi EPI z namenom zagotoviti bolj zanesljivo metodo pri določanju korespondenčnih točk p'_i na drugi sliki za poljubno izbrane točke p_i iz prve slike. Iz tabel 6.2 in 6.6 je razvidno, da je povprečno odstopanje \bar{d} metode ASIFT-SH okoli 35-krat manjše od povprečnega odstopanja \bar{d} metode EPI. Prav to kaže na dejstvo, da je metoda z iskanjem ob epipremici v splošnem manj primerna za določanje korespondenčnih točk na opazovanih objektih z malo spremenljivimi značilnostmi (v našem primeru podobne barve), kot je prikazano na sliki 7.7. Neskladje med dejanskimi korespondenčnimi točkami p'_i in z iskanjem ob epipremici l'_i določenimi točkami p_i^* je več kot očitno. Neodvisno od izbire kriterija za iskanje korespondence ob epipremici je opisan problem pri iskanju zmeraj prisoten. V takšnih primerih je zato metoda z iskanjem ob epipremici zagotovo neprimerna.

Opisani problem je še posebej kritičen, kadar imajo deskriptorji ali značilke slikovnih elementov v okolici epipremice enake vrednosti. Na slikah stavb in gradbišč je to zelo pogost pojav, saj so področja slik z gradbenimi elementi ali njihovimi deli (npr. betonske in jeklene konstrukcije, fasadni elementi ipd.) praviloma nespremenljive barve in zato so tudi vrednosti deskriptorjev ali značilk nespremenljive (to pomeni, da imajo slikovni elementi v določeni okolici praktično iste vrednosti deskriptorjev oziroma značilk). Na takšnih delih slik je zato skoraj nemogoče določiti korespondenčne točke z metodo iskanja ob epipremici, tj. z metodo EPI.

7.1.5 Časovna in prostorska zahtevnost delovanja metode ASIFT-SH

Osnovna različica metode ASIFT-SH je sestavljena iz mešanice različnih metod, kot so: metoda ASIFT, segmentacijska metoda, metodi za vzpostavitev temeljne matrike \mathcal{F} (metoda M-cenilk in metoda LMedS) in metoda DLT za izračun lokalnih homografij. Izbrane metode v splošnem delujejo zanesljivo, saj so posledica evolutivnega razvoja metod na specifičnem problemskem področju. Tako je, na primer, metoda ASIFT nadgradnja metode SIFT, pri čemer se izvede simulacija različnih pogledov za uspešnejšo vzpostavitev korespondence. Če pogledamo še globlje v to metodo, deluje metoda SIFT prav tako kot kombinacija detektorja DoG in deskriptorja, ki temelji na orientiranem gradientu regije itd. Tudi uporabljeni metodi za vzpostavitev temeljne matrike sta sestavljeni iz osnovnejših metod. Metoda M-cenilk za določitev temeljne matrike uporabi vhodne podatke, ki so rezultat metode LMedS, ta pa v osnovi temelji na metodi osmih točk. V končni fazi pa delovanje metode osmih točk temelji na metodi singularnega razcepa (SVD).

Sosledje različnih metod v splošnem seveda ni sporno, vendar se je potrebno zavedati, da lahko posamezni vmesni koraki (uporabljene metode v izbrani mešanici metod) producirajo veliko količino podatkov, ki se nato uporabijo kot vhodni podatki za naslednjo metodo. Težava nastopi, če ima ta, t.i. naslednja metoda, veliko časovno zahtevnost. V tem primeru se lahko zgodi, da uporabljena mešanica metod ne bo vrnila rezultata v doglednem času (oziroma če ga sploh bo). Izpostavimo en možen črni scenarij. Denimo, da z našo metodo ASIFT-SH želimo vzpostaviti korespondenco med dvema enakima slikama (lokacija in orientacija kamer obeh slik sta enaki), pri čemer je velikost obeh slik velika (npr. 10 milijonov slikovnih elementov ali več). Zaradi izjemne velikosti slik in enake vsebine bi metoda ASIFT vzpostavila veliko število korespondenčnih parov točk, zaradi česar bi bilo vprašljivo že samo delovanje metode ASIFT. Naslednji problem bi bil, da bi veliko število korespondenčnih točk povzročilo težave v koraku eliminacije korespondenčnih točk (glej podpoglavje 4.1.1), ki bazira na uporabi temeljne matrike \mathcal{F} . Skoraj vse metode za vzpostavitev temeljne matrike na nek način uporabljajo metodo osmih točk (glej podpoglavje 3.4.1). V slednji metodi se vse korespondenčne točke zapišejo v ustrezno matriko (glej enačbi (3.40) in (3.41)), ki jo je potrebno razcepiti z metodo singularnega razcepa (glej enačbo (3.43)). V primeru zelo velikega števila korespondenčnih točk bi ta matrika bila zelo velika in delovanje metode singularnega razcepa bi bilo vprašljivo. Na podobne probleme bi naleteli tudi pri ostalih korakih naše metode. Na osnovi tega trdimo, da je analitična določitev časovne in prostorske zahtevnosti metode, ki je sestavljena iz mešanice metod, praktično nemogoča in to prav zaradi robnih pogojev (včasih tudi absurdnih situacij), ki jih ne moremo v celoti predvideti.

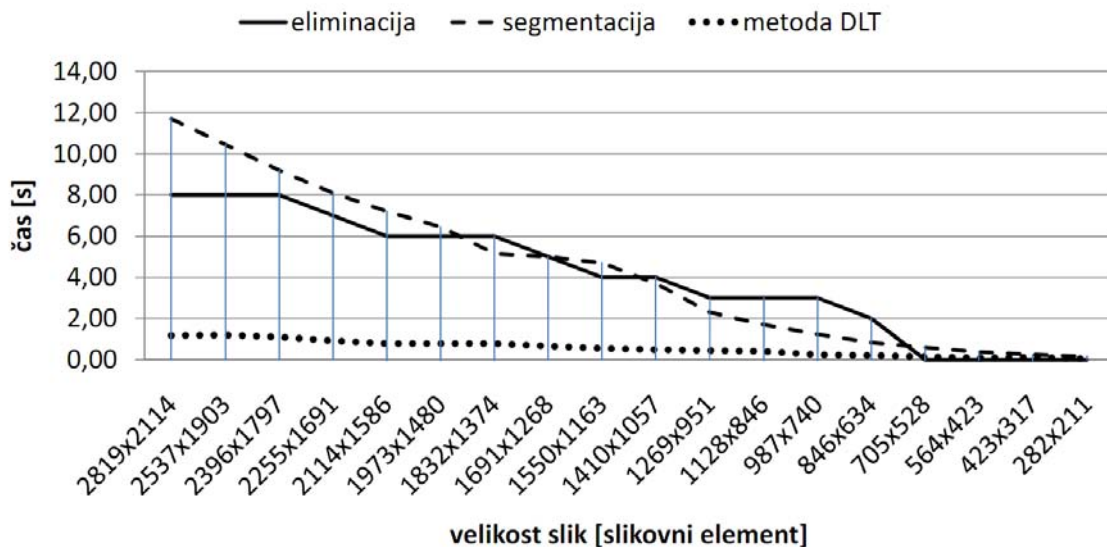
velikost slik	metoda ASIFT [s]	eliminacija [s]	segmentacija [s]	metoda DLT [s]	skupni čas [s]
2819 × 2114	4536,48 ± 174,48	8,32 ± 0,32	12,17 ± 0,47	1,22 ± 0,05	4558,18 ± 175,31
2537 × 1903	3173,04 ± 122,04	8,32 ± 0,32	10,87 ± 0,42	1,25 ± 0,05	3193,48 ± 122,83
2396 × 1797	2877,68 ± 110,68	8,32 ± 0,32	9,57 ± 0,37	1,14 ± 0,04	2896,71 ± 111,41
2255 × 1691	2840,24 ± 109,24	7,28 ± 0,28	8,42 ± 0,32	0,96 ± 0,04	2856,9 ± 109,88
2114 × 1586	2329,6 ± 89,6	6,24 ± 0,24	7,49 ± 0,29	0,81 ± 0,03	2344,14 ± 90,16
1973 × 1480	1729,52 ± 66,52	6,24 ± 0,24	6,71 ± 0,26	0,81 ± 0,03	1743,28 ± 67,05
1832 × 1374	1475,76 ± 56,76	6,24 ± 0,24	5,36 ± 0,21	0,81 ± 0,03	1488,17 ± 57,24
1691 × 1268	1204,32 ± 46,32	5,2 ± 0,2	5,2 ± 0,2	0,68 ± 0,03	1215,4 ± 46,75
1550 × 1163	810,16 ± 31,16	4,16 ± 0,16	4,89 ± 0,19	0,57 ± 0,02	819,78 ± 31,53
1410 × 1057	614,64 ± 23,64	4,16 ± 0,16	3,85 ± 0,15	0,5 ± 0,02	623,15 ± 23,97
1269 × 951	425,36 ± 16,36	3,12 ± 0,12	2,39 ± 0,09	0,45 ± 0,02	431,33 ± 16,59
1128 × 846	290,16 ± 11,16	3,12 ± 0,12	1,77 ± 0,07	0,42 ± 0,02	295,47 ± 11,36
987 × 740	201,76 ± 7,76	3,12 ± 0,12	1,28 ± 0,05	0,24 ± 0,01	206,41 ± 7,94
846 × 634	116,48 ± 4,48	2,08 ± 0,08	0,86 ± 0,03	0,21 ± 0,01	119,63 ± 4,6
705 × 528	67,6 ± 2,6	0 ± 0	0,61 ± 0,02	0,15 ± 0,01	68,35 ± 2,63
564 × 423	34,32 ± 1,32	0 ± 0	0,38 ± 0,01	0,08 ± 0	34,79 ± 1,34
423 × 317	14,56 ± 0,56	0 ± 0	0,25 ± 0,01	0,11 ± 0	14,92 ± 0,57
282 × 211	6,24 ± 0,24	0 ± 0	0,16 ± 0,01	0,03 ± 0	6,43 ± 0,25

Tabela 7.1: Izmerjenih časi za ključne rutine naše metode ASIFT-SH za različno velike vhodne slike (prvi stolpec). Vsi časi so izraženi v sekundah in predstavljajo povprečje petih izmerjenih časov za naključno izbrane pare slik stavb in gradbišč. Pri vseh povprečnih vrednostih so dodatno navedeni še standardni odkloni. Drugi stolpec predstavlja čas, ki je potreben za vzpostavitev korespondenčnih točk z metodo ASIFT. Trajanje postopka za eliminacijo napačno vzpostavljenih korespondenčnih točk je nanizan v tretjem stolpcu, med tem ko so časi, potrebni za izvedbo segmentacije in izračun lokalnih homografij, predstavljeni v četrtem oziroma petem stolpcu. V zadnjem stolpcu pa je naveden skupni čas, potreben za obdelavo slike izbrane velikosti z našo metodo.

Ocena časovne zahtevnosti

Naša metoda ASIFT-SH sestoji iz mešanice številnih metod, zato smo se odločili, da časovno zahtevnost metode ASIFT-SH določimo empirično na osnovi meritev. Merili smo čas, ki je potreben za izračun vseh podatkov nujnih za vzpostavitev korespondence. Postopek smo izvedli za različne velikosti vhodnih slik, tj. od velikosti 2819 × 2114 do 282 × 211 slikovnih elementov. Opisani postopek smo izvedli za pet naključno izbranih parov slik stavb in gradbišč iz nabora meritev, tj. "Meritev 1", ..., "Meritev 50". Povprečne vrednosti in standardne odklone izmerjenih časov za ključne rutine naše metode prikazuje tabela 7.1.

Rezultate iz tabele 7.1 smo predstavili tudi grafično. Slika 7.8 prikazuje izmerjene čase obdelav, potrebne za izračun treh ključnih rutin naše metode, in sicer: i.) neprekinjena črta



Slika 7.8: Čas obdelave, potreben za izračun treh ključnih rutin metode ASIFT-SH pri različno velikih slikah, in sicer: i.) neprekinjena črta – postopek eliminacije napačno vzpostavljenih korespondenčnih točk, ii.) prekinjena črta – postopek segmentacije in iii.) črta s pikicami – izračun lokalnih homografija z metodo DLT.

– postopek eliminacije napačno vzpostavljenih korespondenčnih točk, ii.) prekinjena črta – postopek segmentacije in iii.) črta s pikicami – izračun lokalnih homografij z metodo DLT. Izmerjene čase obdelav smo nato sešteli v skupni čas, ki smo ga za različno velike slike prikazali v grafu z neprekinjeno črto na sliki 7.9.

Iz grafa na sliki 7.8 ocenjujemo, da izkazujejo postopki za eliminacijo napačno vzpostavljenih korespondenčnih točk, segmentacijo in izračun lokalnih homografij z metodo DTL približno linearno odvisnost, glede na velikost vhodnih slik. Opazimo, da glavni delež časa prispeva metoda ASIFT. Trdimo, da časovno zahtevnost v glavnem določa metoda ASIFT. Časovno zahtevnost metode ASIFT-SH lahko ocenimo iz grafa z neprekinjeno črto na sliki 7.9. Vidimo, da ima končna ocena časovne zahtevnosti metode ASIFT-SH eksponentni karakter. Opišemo jo z naslednjo enačbo:

$$t = Ae^{Bx} + C, \quad (7.1)$$

kjer so A , B in C konstante, t in x pa predstavljata skupni čas obdelave in število slikovnih elementov posamezne vhodne slike. Konstanta C predstavlja premik grafa po osi y , zato je njena vrednost enaka asimptotični vrednosti funkcije iz enačbe (7.1). Teoretično bi bil čas obdelave za sliko z nič slikovnimi elementi enak nič časovnih enot. Na osnovi tega trdimo, da je vrednost konstante C enaka nič, tj. $C = 0$. Enačbo (7.1) sedaj preoblikujemo v polinomske oblike po

naslednjih korakih:

$$\frac{t}{A} = e^{Bx}, \quad (7.2)$$

$$Bx = \ln(t) - \ln(A) \quad (7.3)$$

in

$$\ln(t) = Bx + \ln(A). \quad (7.4)$$

Uvedemo novi spremenljivki $t' = \ln(t)$ in $s = \ln(A)$ in ponovno zapišemo zgornjo enačbo:

$$t' = Bx + s. \quad (7.5)$$

Enačba (7.5) predstavlja linearno enačbo premice, kjer je B smerni koeficient premice, s pa je začetna vrednost. Parametra smo izračunali z orodjem MATLAB s pomočjo funkcije `polyfit` ($B = -0,3548$ in $s = 9,41$). Iz spremenljivke s smo nato še izračunali vrednost koeficienta A kot:

$$A = e^s \quad (7.6)$$

in dobili vrednost za A ($A = 12210$). Enačbo (7.1) lahko sedaj zapišemo z vrednostjo koeficientov A in B kot:

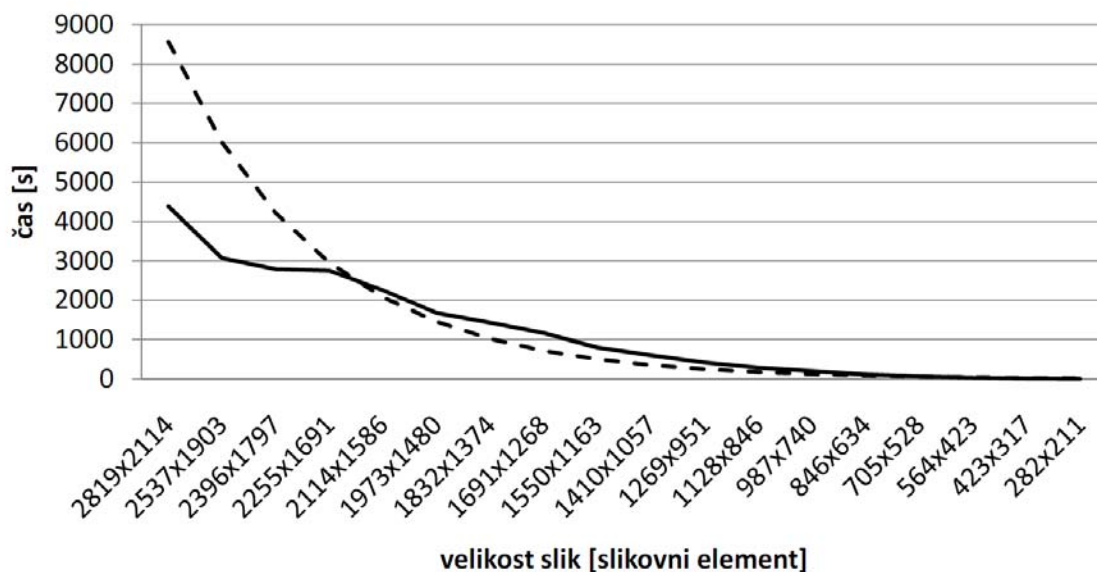
$$t = 12210e^{-0,3548x}. \quad (7.7)$$

Funkcijo iz enačbe (7.7) smo predstavili grafično s prekinjeno črto na sliki 7.9. S primerjavo obeh grafov na sliki 7.9 dokazujemo, da ima časovna zahtevnost naše metode ASIFT-SH eksponentni karakter.

Ocenjevanje časovne zahtevnosti metode ASIFT-SH zaključujemo s trditvijo, da glavni delež pripada uporabljeni metodi ASIFT iz prvega koraka. Karakterja funkcij časovnih zahtevnosti metod ASIFT-SH in ASIFT sta si zelo podobna, zato trdimo, da je časovna zahtevnost naše metode ASIFT-SH domala enaka časovni zahtevnosti metode ASIFT. To dokazuje tudi slika 7.8, kjer vidimo, da je časovna zahtevnost ostalih postopkov, ki so uporabljeni v naši metodi ASIFT-SH, bolj ali manj linearna. Podrobnejša analiza časovne zahtevnosti metode ASIFT je podana v [23] (glej podpoglavje 4.4. ASIFT Complexity v tem delu).

Ocena prostorske zahtevnosti

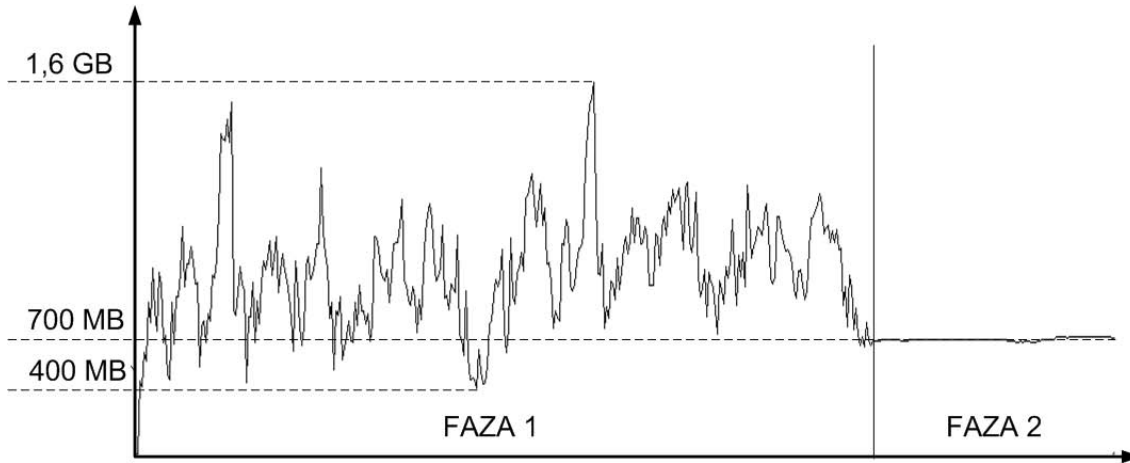
Podobno kot časovna je tudi prostorska zahtevnost metode ASIFT-SH po eni strani odvisna od velikosti slik in pa po drugi strani od različnosti pogledov kamer . Velikost slik neposredno določa število slikovnih elementov, zaradi česar se poveča število najdenih deskriptorjev na posamezni sliki. Podoben vpliv ima tudi različnost pogledov med kamerama, saj majhna razlika



Slika 7.9: Skupni čas obdelave pri različno velikih slikah, potreben za izvedbo metode ASIFT-SH, ki omogoča določitev korespondenčne točke na drugi sliki za poljubno izbrano točko iz prve slike. Neprekinjena črta predstavlja izmerjeni čas obdelave, prekinjena črta pa prikazuje aproksimacijsko funkcijo izmerjenih časov iz enačbe (7.7).

med pogledoma rezultira v velikem številu vzpostavljenih korespondenčnih točk. Prostorsko zahtevnost metode bi bilo zato potrebno analizirati iz različnih vidikov (glede na velikost slik ali glede na različnost pogledov). Določitev prostorske zahtevnosti smo izvedli podobno kot časovno zahtevnost, tj. z merjenjem. Pri tem smo uporabili programsko orodje "Process Explorer". Slika 7.10 prikazuje velikost zahtevanega pomnilniškega prostora za meritev "Meritev 1" ob zagonu metode ASIFT (tj. najzahtevnejši del metode ASIFT-SH). Med eksperimentom smo opazovali potrebno število besed v pomnilniku za izvajanje metode ASIFT (kategorija "Private Bytes").

Metoda ASIFT je v principu sestavljena iz dveh faz, in sicer: i.) iskanja ter izračunavanja vrednosti deskriptorjev in ii.) vzpostavljanja korespondence med najdenimi deskriptorji. Razlika po prostorski zahtevnosti se med obema fazama lepo kaže na grafu (glej sliko 7.10), kjer opazimo zelo velike spremembe porabe pomnilnika za prvo fazo metode in precej ustaljeno porabo pomnilnika za drugo fazo delovanja metode ASIFT. Porabo pomnilnika smo izmerili za prvi deset meritev. Rezultati meritev porabe pomnilnika so bili zelo podobni. Povprečna poraba pomnilnika v prvi fazi se giblje med 500 in 1600 MB, med tem ko je v drugi fazi povprečna poraba pomnilnika precej konstantna, in sicer okoli 700 MB za sliki velikosti 2670×2003 slikovnih elementov, kjer je bilo najdenih 368456 deskriptorjev na prvi in 389534 deskriptorjev na drugi sliki.



Slika 7.10: Poraba pomnilnika za meritev "Meritev 1" ob zagonu metode ASIFT. Vidni sta obe fazi delovanja metode, in sicer: i.) prva faza z zelo spremenljivo porabo pomnilnika, ko se izvaja iskanje in izračunavanje vrednosti deskriptorjev in ii.) druga faza s precej konstantno porabo pomnilnika, ko poteka vzpostavljanje korespondence med deskriptorji. Poraba pomnilnika niha med 400 in 1600 MB.

7.2 Vpliv temperature

Postopek adaptivnega prilagajanja segmentiranih regij je zaradi 3D rekonstrukcije močno odvisen od natančnosti določanja notranjih in zunanjih parametrov posamezne kamere. Le-te so na gradbišču lahko izpostavljene različnim vremenskim vplivom, tj. vlagi, soncu, snegu, vetru ipd. V naši raziskavi smo se podrobno ukvarjali s študijem, kako sprememba temperature vpliva na posamezno kamero oziroma na sistem kalibriranih kamer. Za učinkovitejšo analizo teh vplivov smo dopolnili analitični model kamere s členom, ki modelira vpliv temperaturnih sprememb na delovanje posamezne kamere. Tako definiran model smo preverili s preizkusi in skušali dokazati ustreznost dopoljenega analitičnega modela kamere. Vsi opisani eksperimenti iz podpoglavja 6.3 so bili izvedeni pri dveh različnih temperaturah, in sicer pri 0°C in pri 50°C . Izbrani temperaturi v veliki meri posnemata temperaturne razmere na gradbišču. Za uspešno verifikacijo naše raziskave je potrebno poznati zgolj temperaturno spremembo, tj. ΔT , in zato poznavanje zgornje in spodnje temperaturne meje ni bistvenega pomena. Temperaturna sprememba $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$ je dovolj reprezentativna za doseganje zanesljivih eksperimentov in verifikacijo naših predpostavk. V fazi testiranja smo ocenjevali vpliv temperaturnih sprememb tako na delovanje i.) posamezne kamere, kakor tudi ii.) na delovanje sistema umerjenih kamer. Pri slednjem testiranju smo ocenjevali predvsem natančnost rekonstruiranih točk, ki je ključnega pomena pri adaptivni različici metode ASIFT-SH.

7.2.1 Vpliv temperature eno kamero

Vpliv temperaturnih sprememb na delovanje kamere smo analitično modelirali v podpoglavju 5.1, eksperimentalno pa potrdili v podpoglavju 6.3.1. V nadaljevanju podajamo naše ugotovitve.

Rezultati v tabeli 6.7 predstavljajo izmerjeno in izračunano odstopanje opazovane točke od njene dejanske lokacije. Vidimo, da se izmerjene in izračunane vrednosti ujema. Iz iste tabele lahko tudi opazimo, da se pri razdalji r , ki je manjša od pol metra ($r \leq 0,5$ m), pojavlja neskladje med izmerjenimi N^m in izračunanimi N^c vrednostmi napak. Razlog je v optičnem sistemu kamere, ki ni primeren za tako majhne goriščne razdalje. Rezultati izmerjenih, N^m , in izračunanih, N^c , vrednosti se v celoti ujema še, ko je razdalja med kamero in opazovano točko večja od enega metra. Na osnovi teh rezultatov potrjujemo ustreznost našega modificiranega analitičnega modela kamere, definirane z enačbo (5.11).

Iz rezultatov razberemo, da je vpliv temperature, za pričakovano delovno območje kamere na gradbišču, komaj opazen. Za primer vzemimo, da opazujemo objekt na oddaljenosti 50 metrov. Če je velikost vektorja premika Δt enaka 20 mm (zaradi vpliva temperature), potem se odstopanje na sliki odraža za okoli en slikovni element (glej tabelo 6.7). Rezultate lahko predstavimo tudi na drugačen način. Na sliki 6.7 je grafično prikazano razmerje med odstopanjem N_u in razdaljo r od opazovane točke \mathbf{p} . Jasno je razvidno, da se odstopanje N_u strmo zmanjšuje s povečevanjem razdalje r . V primeru, ko je oddaljenost kamere od opazovanega objekta več kot tri metre, in, če kamera deluje v pričakovanem delovnem območju, potem je odstopanje točke \mathbf{p} na sliki manj kot en slikovni element.

Podobno lahko trdimo za vpliv temperature na notranje parametre kamer. Na osnovi eksperimenta v podpoglavju 6.3.1 trdimo, da sprememba temperature v območju med 0°C in 50°C opazno ne vpliva na notranje parametre kamere. Našo ugotovitev lahko podkrepimo s slikama 6.9a in 6.9b, kjer je razvidno, da je število slikovnih elementov med črtami obeh slik enako.

7.2.2 Vpliv temperature na sistem kalibriranih kamer

V drugem delu raziskave o vplivu temperaturnih sprememb na delovanje kamer pa smo se osredotočili na študij vpliva temperature na sistem kalibriranih kamer. Na osnovni meritev, opravljenih v podpoglavju 6.3.2, smo potrdili obe predpostavki, tj. Predpostavko 1 in Predpostavko 2, definirani v podpoglavju 5.3.1.

Verifikacija Predpostavke 1

Napako kalibracijske metode smo določili eksperimentalno, saj reševanje predeterminiranega sistema enačb pri postopku kalibracije ne omogoča analitične izpeljave napake N_c . To napako

lahko odčitamo iz tabele 6.9. Napaka N_c ne vsebuje odstopanja zaradi vpliva temperaturnih sprememb, saj sta temperaturi, pri kateri je bila kalibracija izvedena, tj. T_c , in, pri kateri je bil izveden proces 3D rekonstrukcije, tj. T_u , enaki (tj. $T_c = T_u$).

Podrobneje analizirajmo dogajanje, če sta temperaturi T_c in T_u enaki, tj. $\Delta T = T_u - T_c = 0$. Napaka N_u tedaj ni prisotna v skupni napaki N , saj brez spremembe temperature (če $\Delta T = 0$) sprememba vektorja premika $\Delta \mathbf{t}$ ni mogoča. Povedano potrjuje Predpostavko 1, da sta numerična napaka kalibracijske metode in napaka procesa 3D rekonstrukcije edini napaki. Napaki predstavimo z oznako N_c , rezultati meritev pa so predstavljeni v tabeli 6.9.

Verifikacija Predpostavke 2

V naslednjem eksperimentu temperaturni pogoji v času kalibracije in 3D rekonstrukcije niso bili enaki (tj. $T_c \neq T_u$). V prvem delu tega eksperimenta je bila kamera kalibrirana s popolnoma natančnimi korespondenčnimi točkami. V podpoglavju 5.3.2 smo opisali, da sprememba temperature povzroči spremembo vektorja premika $\Delta \mathbf{t}$. S pomočjo enačbe (5.17) lahko določimo napako N_u na sliki za opazovane objekte na znani razdalji r od kamere. Z ustreznim premikom korespondenčnih točk na sliki za napako N_u smo simulirali spremembo zunanjih parametrov kamere, ki bi nastala zaradi spremembe temperature. Rezultate smo predstavili v tabeli 6.10.

V drugem delu tega eksperimenta pa smo ponovno izvedli kalibracijo kamere, vendar s korespondenčnimi točkami, ki so vsebovale napako, ekvivalentno napaki N_u , določeno z vektorjem premika $\Delta \mathbf{t}$ zaradi vpliva temperaturnih sprememb. Tudi v tem primeru z ustreznim premikom korespondenčnih točk simuliramo spremembo zunanjih parametrov kamere. Odstopanja, ki se pri tem pojavijo, so predstavljena v tabeli 6.11. Na osnovi primerjave tabel 6.10 in 6.11 ugotavljamo, da je med njima zanemarljivo majhna razlika. Vrednosti v tabelah predstavljajo napako N_u . Ta ugotovitev potrjuje našo Predpostavko 2. Dokazuje, da je povsem vseeno, ali so korespondenčne točke premaknjene za vektor premika \mathbf{t} pred procesom kalibracije, ali pa se njihov premik izvede po kalibraciji, vendar za vektor premika $-\mathbf{t}$ (kalibracija se izvede s korespondenčnimi točkami, ki ne vsebujejo napake N_u). Eksperimentalna potrditev Predpostavke 2 razkriva, da so odstopanja rekonstruiranih točk praktično enaka.

Vpliv temperature

Sprememba zunanjih parametrov posamezne kamere v sistemu kalibriranih kamer vpliva na delovanje celotnega sistema. Napaka N_u se zaradi spremembe zunanjih parametrov kamere povečuje z zmanjševanjem razdalje opazovanega objekta od kamere (glej sliko 6.7 za napako N_u). Podobna relacija velja tudi za relativni delež napake $N_{u,r}$, kjer se napaka $N_{u,r}$ prav tako povečuje z zmanjševanjem razdalje opazovanega objekta od kamere (glej sliko 6.11). Pri velikih razdaljah

opazovanega objekta od kamere postane napaka N_u minornega pomena, saj pretežni delež v skupni napaki N predstavlja napaka kalibracijske metode in postopek 3D rekonstrukcije, tj. napaka N_c . Sistem kamer na gradbišču je običajno nameščen tudi do sto metrov od opazovanih objektov. Na takšni razdalji je napaka N_u majhna in le malenkostno vpliva na natančnost rekonstruiranih točk. Iz grafa na sliki 6.11 je mogoče odčitati, da za opazovane objekte, ki so oddaljeni več kot 40 metrov od kamere, znaša relativni delež napake $N_{u,r}$ v skupni napaki N manj kot 10 %.

Z eksperimenti smo v podpoglavjih 6.3.1 in 6.3.2 potrdili, da sprememba temperature v pričakovanem delovnem območju kamere na gradbišču ne vpliva na notranje parametre kamere. Iz rezultatov v tabelah 6.12 in 6.13, ki predstavljajo povprečne vrednosti in standardne odklone rekonstruiranih točk za različne kalibracijske matrike \mathcal{K} vidimo, da so odstopanja praktično identična. Po drugi strani pa majhen standardni odklon lahko interpretiramo kot skoraj konstantno evklidsko razdaljo med rekonstruiranimi točkami in točkami Zlatega standarda. Na tej osnovi trdimo, da je povsem vseeno katero kalibracijska matrika je uporabljena ($\mathcal{K}_1, \dots, \mathcal{K}_{10}$) za posamezno meritev, na osnovi česar sklepamo, da sprememba temperature ne vpliva na notranje parametre kamere.

7.2.3 Aplikativna vrednost raziskave

Vidimo naslednjo aplikativno vrednost naše raziskave. Eksperimentalni dokaz obeh predpostavk omogoča izvedbo postopka za kompenzacijo nastale napake, ki je posledica vpliva temperaturnih sprememb. Če je kamera kalibrirana s korespondenčnimi točkami brez napake N_u in je nato takšen sistem kamer podvržen vplivu temperaturnih sprememb, potem v splošnem ni mogoče izvesti premika korespondenčnih točk na sliki v nasprotni smeri delovanja napake N_u , saj je razdalja med kamero in opazovanim objektom neznana. Po drugi strani pa, če upoštevamo rezultate iz tabel 6.10 in 6.11, lahko kompenziramo nastalo napako N_u . Ker je kalibracijski vzorec običajno vnaprej znan (v našem primeru črno beli kvadrati), se za korespondenčne točke lahko izvede premik že pred postopkom kalibracije, kot je opisano v podpoglavju 6.3.2. Na ta način je mogoče kompenzirati napako N_u . S tem napako N_u sicer eliminiramo, medtem ko napaka N_c ostaja.

7.3 Obravnava hipotez in zastavljene teze

V uvodu smo postavili tezo, ki je razširjena v štiri sklope hipotez. Prvi dve hipotezi se nanašata na metodo ASIFT-SH, drugi dve hipotezi pa opisujeta vpliv temperaturnih sprememb na delovanje ene kamere oziroma sistema kalibriranih kamer. V nadaljevanju bomo potrdili ali ovrgli

postavljene hipoteze, ob tem pa bomo podali ustrezno razlago.

Hipoteza 1:

V poglavju 4.1 smo predstavili metodo za vzpostavitev korespondence poljubno izbrane točke pri velikem odmiku dveh kamer. Metoda je mešanica metode ASIFT, segmentacijske metode, temelječe na grafu, in lokalne homografije. Rezultati iz podpoglavja 6.2.1, tj. rezultati iz tabel 6.1, 6.2, 6.3 in 6.4, kažejo, da je uporabljena mešanica metod uspešna pri vzpostavljanju korespondence za obravnavane slike. Nekatere meritve so bile sicer manj uspešne, kar pa je posledica bodisi neustrezne segmentacije, bodisi slabo vzpostavljenih korespondenčnih točk z metodo ASIFT. Prvo hipotezo kljub temu potrjujemo, saj je bilo takšnih primerov zgolj peščica.

Hipoteza 2:

V rezultatih iz tabele 6.2 smo identificirali tudi nadpovprečno velike vrednosti odstopanja oziroma napake, kar je posledica bodisi slabo vzpostavljene korespondence med dvema slikama z metodo ASIFT ali pa neuspešnega procesa segmentacije. Slednji problem smo rešili z nadgradnjo osnovne metode ASIFT-SH. Uporabili smo pristop adaptivnega prilagajanja segmentiranih regij s pomočjo 3D rekonstrukcije, ki je opisan v podpoglavju 4.2. Primerjalni rezultati v tabelah 6.1, 6.2, 6.3 in 6.4 kažejo na bistveno izboljšanje rezultatov napram osnovni različici metode, seveda le pri slikah, kjer so se odstopanja pojavila zaradi neustrezne segmentacije. Tudi to hipotezo potrjujemo.

Hipoteza 3:

V podpoglavju 5.1 smo modelirali vpliv temperaturnih sprememb na parametre kamere. Na tej osnovi smo v podpoglavju 5.1.3 definirali modificiran analitični model kamere. Z eksperimentom iz podpoglavja 6.3.1 smo ta model kamere tudi uspešno verificirali. Verifikacija je temeljila na primerjavi izmerjenih in izračunanih vrednosti odstopanj, ki so v našem eksperimentu bila domala identična. Neskladje med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi se je pojavilo le pri meritvah, ko je bila razdalja med kamero in opazovanim objektom manj kot pol metra. Takšen pojav je posledica delovanja optičnega sistema kamere, ki ni predviden za zajem scen na tako kratkih oddaljenostih od kamere. To hipotezo kljub temu potrjujemo.

Hipoteza 4:

V podpoglavju 5.3 smo opisali vpliv temperature na sistem kalibriranih kamer s pomočjo dveh predpostavk. Obe predpostavki smo tudi potrdili. Z rezultati iz tabel 6.10 in 6.11 smo pokazali, da je povsem irelevantno, ali se zunanji parametri kamere spremenijo v smeri vektorja premika t ali pa se opazovani objekt premakne v nasprotno smer za enak vektor, tj. za vektor $-t$. Na osnovi tega lahko predpišemo postopek kompenzacije, ki omogoča prenos vpliva temperaturnih sprememb na zunanje parametre kamere. Iz povedanega sledi, da je tudi četrta hipoteza potrjena.

Teza:

Z eksperimenti smo nedvomno pokazali, da zastavljena teza v celoti drži. Naša metoda ASIFT-SH sicer v nekaterih primerih ne deluje optimalno. To se zgodi predvsem tedaj, ko posamezni koraki ne delujejo pravilno, npr. zaradi napačno vzpostavljenih korespondenčnih točk z metodo ASIFT ali pa neuspešno izvedenim postopkom segmentacije. Slednji problem smo uspešno odpravili s pristopom adaptivnega prilagajanja segmentiranih regij na osnovi 3D rekonstrukcije. Navedena dejstva smo potrdili s prvima dvema hipotezama. V drugem delu doktorske raziskave smo proučevali natančnost delovanja metode ASIFT-SH z adaptivnim prilagajanjem segmentiranih regij na osnovi 3D rekonstrukcije. Osredotočili smo se na vpliv temperaturnih sprememb tako na eno kamero, kot tudi na sistem kalibriranih kamer. S potrditvijo tretje in četrte hipoteze smo pokazali, da je vpliv temperaturnih sprememb na kamero mogoče analitično modelirati in da lahko ta vpliv tudi ustrezno kompenziramo v sistemu kalibriranih kamer.

Iz navedenih dejstev, predvsem pa tudi iz potrjenih hipotez izhaja, da se je postavljena teza za doktorsko raziskavo pokazala kot smiselna in pravila. Njeno veljavnost smo potrdili eksperimentalno s sintetičnimi slikami ter z realnimi slikami stavb in gradbišč.

Literatura

- [1] Podbreznik, P. in Rebolj, D. *Automatic comparison of site images and the 4D model of the building*. V R. J. Scherer, P. Katranuschkov in S.-E. Schapke, Uredniki, *CIB W78 22nd conference on information technology in construction*, str. 235–239. Institute for Construction Informatics and Technische Universität Dresden, Dresden, Germany, 2005.
- [2] Podbreznik, P. in Rebolj, D. *Building elements recognition using site images and 4D model*. V H. R. E. Miresco in H. Melhem, Uredniki, *Joint international conference on computing and decision making in civil and building engineering*, str. 87. Montreal, Canada, 2006.
- [3] Podbreznik, P. in Rebolj, D. *Modeling conditions required for recognition of building elements from site images*. V M. Martinez in R. Scherer, Uredniki, *e-Business and e-work in architecture and engineering and construction*, str. 109–113. Valencia, Spain, 2006.
- [4] Kähkönen, K. in Leinonen, J. *Virtual reality applications for building construction*. <http://cic.vtt.fi/4D/4d.htm>, zadnji dostop: november 2010.
- [5] Lu, T., Tai, C.-L., Su, F. in Cai, S. *A new recognition model for electronic architectural drawings*. *Computer-Aided Design*, 37 (10):1053–1069, 2004.
- [6] Rebolj, D., Čuš Babič, N., Magdič, A., Podbreznik, P. in Pšunder, M. *Automated construction activity monitoring system*. *Advanced Engineering Informatics*, 22 (4):493–503, 2008.
- [7] Podbreznik, P. in Rebolj, D. *Real-time activity tracking system - the development process*. V D. Rebolj, Urednik, *CIB 24th W78 Conference Maribor 2007 & 14th EG-ICE Workshop & 5th ITC@EDU Workshop; Bringing ITC knowledge to work*, str. 67–71. Faculty of Civil Engineering, Maribor, Slovenia, 2007.
- [8] Čuš Babič, N., Podbreznik, P. in Rebolj, D. *Integrating resource production and construction using BIM*. *Automation in Construction*, 19 (5):539–543, 2010.

- [9] Magdič, A., Rebolj, D. in Šuman, N. *Effective control of unanticipated on-site events: A pragmatic, human-oriented problem solving approach*. ITcon, 9:409–418, 2004.
- [10] Chau, K., Anson, M. in Saram, D. D. *4D dynamic construction management and visualization software: 2. site trial*. Automation in Construction, 14 (4):525–536, 2005.
- [11] Chau, K., Anson, M. in Zhang, J. *4D dynamic construction management and visualization software: 1. development*. Automation in Construction, 14 (4):512–524, 2005.
- [12] Ma, Z., Shen, Q. in Zhang, J. *Application of 4D for dynamic site layout and management of construction projects*. Automation in Construction, 14 (3):369–381, 2005.
- [13] SPIRE. *Project 4D tools*. <http://www.spireconsultinggroup.com/project-4d.html>, zadnji dostop: april 2011.
- [14] Synchro. *Synchro project constructor*. http://www.synchrold.com/shop/project-constructor_procons.htm, zadnji dostop: april 2011.
- [15] VICO. *Vico software*. <http://www.vicosoftware.com/>, zadnji dostop: april 2011.
- [16] Lowe, D. G. *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*. International Journal of Computer Vision, 60 (2):91–110, 2004.
- [17] Baumberg, A. *Reliable feature matching across widely separated views*. V *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, zvezek 1, str. 774–781. 2000.
- [18] Delponte, E., Isgrò, F., Odone, F. in Verri, A. *SVD-matching using SIFT features*. Graphical Models, 68 (5):415–431, 2006.
- [19] Pritchett, P. in Zisserman, A. *Matching and reconstruction from widely separated views*. V *3D Structure from Multiple Images of Large-Scale Environments, LNCS 1506*, str. 78–92. Springer-Verlag, 1998.
- [20] Pritchett, P. in Zisserman, A. *Wide baseline stereo matching*. V *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV)*, str. 754–760. 1998.
- [21] Schmid, C. in Mohr, R. *Local greyvalue invariants for image retrieval*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19 (5):872–877, 1997.

- [22] Torr, P. H. in Davidson, C. *IMPSAC: Synthesis of importance sampling and random sample consensus*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 23 (3):354–364, 2003.
- [23] Morel, J.-M. in Yu, G. *ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison*. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2 (2):438–469, 2009.
- [24] Pollefeys, M. *Self-calibration and metric 3D reconstruction from uncalibrated image sequences*. Doktorsko delo, Katholieke universiteit Leuven, 1999.
- [25] Tsai, R. J. *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*. IEEE Journal of robotics and automation, RA-3 (4):323–344, 1987.
- [26] Zhang, Z. *A flexible new technique for camera calibration*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22 (11):1330–1334, 2000.
- [27] Podbreznik, P. in Potočnik, B. *Določanje korespondence poljubno izbrane točke za velike odmike dveh kamer*. V B. Zajc in A. Trost, Uredniki, *ERK 2009 - mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca*, zvezek B, str. 287–290. 2009.
- [28] Podbreznik, P. in Potočnik, B. *Estimating correspondence between arbitrarily selected points in two widely-separated views*. Advanced Engineering Informatics, 24 (3):367–376, 2010.
- [29] Podbreznik, P. in Zazula, D. *Določanje uporabnosti homografij*. V B. Potočnik, Urednik, *Zbornik strokovne konference ROSUS 2009 – Računalniška obdelava slik in njena uporaba v Sloveniji 2009*, zvezek 4, str. 57–62. 2009.
- [30] Agarwal, A., Jawahar, C. V. in Narayanan, P. J. *A survey of planar homography estimation techniques*. Tehnično poročilo, Centre for Visual Information Technology, International Institute of Information Technology, 2005.
- [31] Hartley, R. in Zisserman, A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2. izdaja, 2004.
- [32] Kannala, J., Salo, M. in Heikkilä, J. *Algorithms for computing a planar homography from conics in correspondence*. V *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*. 2006.

- [33] Podbreznik, P. in Potočnik, B. *Identifikacija in korekcija napačno vzpostavljenih korespondenčnih točk za velike odmike dveh kamer*. V B. Potočnik, Urednik, *Zbornik strokovne konference ROSUS 2010 – Računalniška obdelava slik in njena uporaba v Sloveniji 2010*, zvezek 5, str. 47–52. 2010.
- [34] Ko, C.-H. *RFID-based building maintenance system*. *Automation in Construction*, 18 (3):275–284, 2009.
- [35] Ko, C.-H. *RFID 3D location sensing algorithms*. *Automation in Construction*, 19 (5):588–595, 2010.
- [36] Bosche, F. in Haas, C. *Automated retrieval of 3D CAD model objects in construction range images*. *Automation in Construction*, 17 (4):499–512, 2008.
- [37] Bosche, F. N. in Haas, C. T. *Automated retrieval of project three-dimensional CAD objects in range point clouds to support automated dimensional QA/QC*. *ITcon*, 13:71–85, 2008.
- [38] El-Omari, S. in Moselhi, O. *Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work*. *Automation in Construction*, 18 (1):1–9, 2008.
- [39] Tanga, P., Huberb, D., Akincic, B., Lipmand, R. in Lytle, A. *Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques*. *Automation in Construction*, 19 (7):829–843, 2010.
- [40] Son, H. in Kim, C. *3D structural component recognition and modeling method using color and 3D data for construction progress monitoring*. *Automation in Construction*, 19 (7):844–854, 2010.
- [41] Trucco, E. in Kaka, A. P. *A framework for automatic progress assessment on construction sites using computer vision*. *International Journal of IT in Architecture, Engineering and Construction*, 2 (2):147–164, 2004.
- [42] Brilakis, I. K., Soibelman, L. in Shinagawa, Y. *Construction site image retrieval based on material cluster recognition*. *Advanced Engineering Informatics*, 20 (4):443–452, 2006.
- [43] Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F. in Savarese, S. *D4AR – A 4-dimensional augmented reality model for automating construction progress monitoring data collection, processing and communication*. *ITcon*, 14:129–153, 2009.
- [44] Peng, J., Zhang, D. in Liu, Y. *An improved snake model for building detection from urban aerial images*. *Pattern Recognition Letters*, 26 (5):587–595, 2005.

- [45] Kim, Z. in Nevatia, R. *Automatic description of complex buildings from multiple images*. Computer Vision and Image Understanding, 96 (1):60–95, 2004.
- [46] Jaynes, C., Riseman, E. in Hanson, A. *Recognition and reconstruction of buildings from multiple aerial images*. Computer Vision and Image Understanding, 90 (1):68–98, 2003.
- [47] Fradkin, M., Maitre, H. in Roux, M. *Building detection from multiple aerial images in dense urban areas*. Computer Vision and Image Understanding, 82 (3):181–207, 2001.
- [48] Cord, M. in Declercq, D. *Three-dimensional building detection and modeling using a statistical approach*. IEEE Transactions on Image Processing, 10 (5):715–723, 2001.
- [49] Paparoditis, N., Cord, M., Jordan, M. in Cocquerez, J. P. *Building detection and reconstruction from mid- and high-resolution aerial imagery*. Computer Vision and Image Understanding, 72 (2):122–142, 1998.
- [50] Lin, C. in Nevatia, R. *Building detection and description from a single intensity image*. Computer Vision and Image Understanding, 72 (7):101–121, 1998.
- [51] Weyrich, N. in Warhola, G. *Wavelet shrinkage and generalized cross validation for image denoising*. IEEE Transactions Image Processing, 7 (1):82–90, 1998.
- [52] Moravec, H. *Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover*. Tehnično poročilo, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1980.
- [53] Harris, C. in Stephens, M. *A combined corner and edge detector*. V *Proceedings of The Fourth Alvey Vision Conference*, str. 147–151. Manchester, 1988.
- [54] Deriche, R. in Giraudon, G. *A computational approach for corner and vertex detection*. International Journal of Computer Vision, 10 (2):101–124, 1993.
- [55] Schmid, C., Mohrand, R. in Bauckhage, C. *Comparing and evaluating interest points*. V *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV)*, str. 230. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 1998.
- [56] Derpanis, K. G. *The Harris corner detector*. http://www.cse.yorku.ca/kosta/CompVis_Notes, zadnji dostop: april 2011.
- [57] Hough, P. *Machine analysis of bubble chamber pictures*. V *International Conference on High Energy Accelerators and Instrumentation*. CERN, 1959.

- [58] Marr, D. in Hildreth, E. *Theory of edge detection*. V *Proceedings of the Royal Society of London*, zvezek 207, str. 187–217. 1980.
- [59] Canny, J. *A computational approach to edge detection*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8 (6):679–698, 1986.
- [60] Bovik, A. C., Huang, T. S. in David C. Munson, J. S. *The effect of median filtering on edge estimation and detection*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9 (2):181–194, 1987.
- [61] Forsyth, D. A. in Ponce, J. *Computer Vision - A Modern Approach*. Prentice Hall, 2002.
- [62] Faugeras, O. *Three-Dimensional Computer Vision*. The MIT Press, 1993.
- [63] Moravec, H. P. *Rover visual obstacle avoidance*. V *The International Joint Conferences on Artificial Intelligence*, str. 785–790. 1981.
- [64] Harris, C. *Geometry from visual motion*. MIT Press Cambridge, 1992.
- [65] Zhang, Z., Deriche, R., Faugeras, O. in Luong, Q.-T. *A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry*. Tehnično poročilo 2273, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, 1994.
- [66] Torr, P. *Motion segmentation and outlier detection*. Doktorsko delo, Department of Engineering Science, University of Oxford, 1995.
- [67] Lowe, D. G. *Object recognition from local scale-invariant features*. V *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV)*, str. 1150–1157. 1999.
- [68] Crowley, J. I. in Parker, A. C. *A representation for shape based on peaks and ridges in the difference of low-pass transform*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6 (2):156–170, 1983.
- [69] Shokoufandeh, A., Marsic, I. in Dickinson, S. J. *View-based object recognition using saliency maps*. Image and Vision Computing, 17:445–460, 1999.
- [70] Mikolajczyk, K. in Schmid, C. *Scale & affine invariant interest point detectors*. International Journal of Computer Vision, 60 (1):63–86, 2004.
- [71] Mikolajczyk, K. in Schmid, C. *An affine invariant interest point detector*. V *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, str. 128–142. 2002.

- [72] Lindeberg, T. in Garding, J. *Shape-adapted smoothing in estimation of 3-D depth cues from affine distortions of local 2-D brightness structure*. V *Image and Vision Computing*, zvezek 1, str. 389–400. Springer-Verlag, 1994.
- [73] Tuytelaars, T. in Gool, L. V. *Content-based image retrieval based on local affinely invariant regions*. V *International Conference series on Visual Information Systems*, str. 493–500. 1999.
- [74] Tuytelaars, T. in Gool, L. V. *Matching widely separated views based on affine invariant regions*. *International Journal of Computer Vision*, 59 (1):61–85, 2004.
- [75] Tuytelaars, T. in Gool, L. V. *Wide baseline stereo matching based on local, affinely invariant regions*. V *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, str. 412–425. 2000.
- [76] Kadir, T., Zisserman, A. in Brady, M. *An affine invariant salient region detector*. V *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, str. 228–241. 2004.
- [77] Matas, J., Chum, O., Urban, M. in Pajdla, T. *Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions*. V *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, str. 384–393. 2002.
- [78] Muse, P. in Sur, F. a. Y., F. andCao. *Unsupervised thresholds for shape matching*. V *International Conference on Image Processing*, zvezek 3, str. 647–650. 2003.
- [79] Musé, P., Sur, F., Cao, F., Gousseau, Y. in Morel, J.-M. *An a contrario decision method for shape element recognition*. *International Journal of Computer Vision*, 69 (3):295–315, 2006.
- [80] Cao, F., Lisani, J.-L., Morel, J.-M., Musé, P. in Sur, F. *A Theory of Shape Identification*. Springer Verlag, 2008.
- [81] Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid, C., Zisserman, A., Matas, J., Schaffalitzky, F., Kadir, T. in Gool, L. *A comparison of affine region detectors*. *International Journal of Computer Vision*, 65 (1-2):43–72, 2005.
- [82] Morel, J.-M. in Yu, G. *On the consistency of the sift method*. Tehnično poročilo, CMLA, 2008.
- [83] Mikolajczyk, K. in Schmid, C. *Indexing based on scale invariant interest points*. V *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV)*, str. 525–531. 2001.

- [84] Mikolajczyk, K. in Schmid, C. *A performance evaluation of local descriptors*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 27 (10):1615–1630, 2005.
- [85] Ashbrook, A. P., Thacker, N. A., Rockett, P. I. in Brown, C. I. *Robust recognition of scaled shapes using pairwise geometric histograms*. V *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, str. 503–512. 1995.
- [86] Gool, L. J. V., Moons, T. in Ungureanu, D. *Affine/ photometric invariants for planar intensity patterns*. V *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, zvezek 1, str. 642–651. 1996.
- [87] Ke, Y. in Sukthankar, R. *PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors*. V *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, str. 506–513. 2004.
- [88] Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T. in Gool, L. V. *Speeded-up robust features (SURF)*. Computer Vision and Image Understanding, 110 (3):346–359, 2008.
- [89] Herwig, L., Ásmundsson Fridrik H., Jónsson, B. T. in Laurent, A. *Scalability of local image descriptors: A comparative study*. V *MULTIMEDIA '06: Proceedings of the 14th annual ACM international conference on Multimedia*, str. 589–598. 2006.
- [90] Foo, J. J. in Sinha, R. *Pruning SIFT for scalable near-duplicate image matching*. V *Proceedings of the Conference on Australasian Database (ADC)*, str. 63–71. 2007.
- [91] Quanfu, F., Kobus, B., Arnon, A., Alon, E. in Ming, L. *Matching slides to presentation videos using sift and scene background matching*. V *MIR '06: Proceedings of the 8th ACM international workshop on Multimedia information retrieval*, str. 239–248. 2006.
- [92] Gordon, I. in Lowe, D. G. *What and where: 3D object recognition with accurate pose*. V *Lecture Notes in Computer Science*, zvezek 4170/2006, str. 67–82. 2006.
- [93] Moreels, P. in Perona, P. *Evaluation of features detectors and descriptors based on 3D objects*. International Journal of Computer Vision, 73 (3):263–284, 2007.
- [94] Bennewitz, M., Stachniss, C., Burgard, W. in Behnke, S. *Metric localization with scale-invariant visual features using a single perspective camera*. V *Proceedings of European Robotics Symposium (EUROS)*, str. 143–157. 2006.

- [95] Joseph, A. M., Modayil, J. in Kuipers, B. *Building local safety maps for a wheelchair robot using vision and lasers*. V *Proceedings of the The 3rd Canadian Conference on Computer and Robot Vision*. 2006.
- [96] Yang, G., Stewart, C. V., Sofka, M. in ling Tsai, C. *Alignment of challenging image pairs: Refinement and region growing*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1, 2007.
- [97] Vacchetti, L., Lepetit, V. in Fua, P. *Stable real-time 3D tracking using online and offline information*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26:1385–1391, 2004.
- [98] Kim, J., Seitz, S. M. in Agrawala, M. *Video-based document tracking: Unifying your physical and electronic desktops*. V *in Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, str. 99–107. 2004.
- [99] Vergauwen, M. in Gool, L. V. *Web-based 3D reconstruction service*. *Machine Vision and Applications*, 17 (6):411–426, 2006.
- [100] Yu, G. in Morel, J.-M. *A fully affine invariant image comparison method*. V *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2009.
- [101] Morel, J.-M. in Yu, G. *SIFT and ASIFT — online demo*. <http://www.cmap.polytechnique.fr/~yu/research/ASIFT/demo.html>, zadnji dostop: november 2010.
- [102] Cozzani, A., Appolloni, M., Roure, S., Beauvivre, S., Casarosa, G. in Tavares, A. *Measurement and calibration of a prototype miniaturised videogrammetry system in thermal-vacuum*. V Fletcher, Urednik, *Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes Noordwijk*, str. 331–340. 2004.
- [103] Kahlmann, T., Remondino, F. in Ingensand, H. *Calibration for increased accuracy of the range imaging camera swissrangerTM*. V *SPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology*, zvezek XXXVI, str. 136–141. Dresden, 2006.
- [104] Sentenac, T., Maoultt, Y. L., Rolland, G. in Devy, M. *Temperature correction of radiometric and geometric models for an uncooled CCD camera in the near infrared*. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52 (1):46–60, 2003.

- [105] Kruth, J.-P., Zhou, L. in Vanherck, P. *Thermal error analysis and compensation of an LED-CMOS camera 3D measuring system*. V *Journal of the Institute of Measurement Science*, zvezek 3. 2003.
- [106] Zhang, Z. *Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review*. *International Journal of Computer Vision*, 27 (2):161–198, 1998.
- [107] Faugeras, O., Luong, Q.-T. in Papadopoulos, T. *The Geometry of Multiple Images*. The MIT Press, 2001.
- [108] Salvi, J., Armangué, X. in Batlle, J. *A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation*. *Pattern Recognition*, 35 (7):1617–1635, 2002.
- [109] González, J. I., Gámez, J. C., Artal, C. G. in Cabrera, A. M. N. *Stability study of camera calibration methods*. V *VI Workshop en Agentes Físicos, WAF'2005, I Congreso Español de Informática (CEDI 2005)*. 2005.
- [110] Guerchouche, R. in Coldefy, F. *Camera calibration methods evaluation procedure for images rectification and 3D reconstruction*. V S. Cunningham in V. Skala, Uredniki, *International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG)*, zvezek 16, str. 205–210. 2008.
- [111] Bouguet, J.-Y. *Camera calibration toolbox for matlab*. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, zadnji dostop: april 2011.
- [112] Bradski, G. in Kaehler, A. *Learning OpenCV*. O'Reilly Media, 2008.
- [113] Levenberg, K. *A method for the solution of certain non-linear problems in least squares*. *The Quarterly of Applied Mathematics*, 2:164–168, 1944.
- [114] Marquardt, D. *An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters*. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11:431–441, 1963.
- [115] Mikolajczyk, K. <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/affine>, zadnji dostop: april 2011.
- [116] Armangué, X. in Salvi, J. *Overall view regarding fundamental matrix estimation*. *Image and Vision Computing*, 21 (2):205–220, 2003.
- [117] Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H. in Wright, P. E. *Convergence properties of the Nelder Mead simplex method in low dimensions*. *SIAM Journal of Optimization*, 9 (1):112–147, 1998.

- [118] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. in Flannery, B. P. *Numerical Recipes in C*. Cambridge university press, 2 izdaja, 1992.
- [119] Podbreznik, P. in Potočnik, B. *Influence of temperature variations on calibrated cameras*. International Journal of Computer and Information Engineering, 2:546–551, 2008.
- [120] Zhang, Z. *Parameter estimation techniques: A tutorial with application to conic fitting*. Tehnično poročilo 2676, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, 1995.
- [121] Felzenszwalb, P. F. in Huttenlocher, D. P. *Efficient graph-based image segmentation*. International Journal of Computer Vision, 59 (2):109–131, 2004.
- [122] Mahamud, S. in Hebert, M. *Iterative projective reconstruction from multiple views*. V *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, zvezek 2, str. 430–437. 2000.
- [123] Fischler, M. A. in Bolles, R. C. *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. Communications of the ACM, 24 (6):381–395, 1981.
- [124] Torr, P. H. S. in Zisserman, A. *MLE-SAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry*. Computer Vision and Image Understanding, 78:138–156, 2000.
- [125] Hartley, R. I. *In defense of the eight-point algorithm*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19 (6):580–593, 1997.
- [126] Chen, Y. B. in Chen, O. T.-C. *Image segmentation method using thresholds automatically determined from picture contents*. Journal on Image and Video Processing, 2009 (1), 2009.
- [127] Potočnik, B. in Zazula, D. *Automated analysis of a sequence of ovarian ultrasound images. Part 1: segmentation of single 2D image*. Image and Vision Computing, 20 (3):217–225, 2002.
- [128] Kladnik, R. *Fizika za slušatelje tehniških fakultet*. Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1965.
- [129] Wikipedia. *Coefficient of thermal expansion*. http://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_thermal_expansion, 2008.

- [130] Podbreznik, P. in Potočnik, B. *Vpliv temperature na model kamere, 1. del - ena kamera*. V Z. Baldomir, Urednik, *ERK 2008 - mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca*, str. 253–256. Portorož, Slovenija, 2008.
- [131] Podbreznik, P. in Potočnik, B. *Analytical camera model supplemented with influence of temperature variations*. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 2:552–557, 2008.
- [132] Podbreznik, P. in Potočnik, B. *Assessing the influence of temperature variations on the geometrical properties of a low-cost calibrated camera system by using computer vision procedures*. *Machine Vision and Applications*, 2011.
- [133] Podbreznik, P. in Potočnik, B. *Vpliv temperature na model kamere, 2. del - umerjeni kameri*. V Z. Baldomir, Urednik, *ERK 2008 - mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca*, str. 257–260. Portorož, Slovenija, 2008.

Življenjepis

Peter Podbreznik se je rodil 28. maja 1979 v Mariboru.

- V letih 1986 do 1992 je obiskoval Osnovno šolo v Limbušu in jo v letih od 1992 do 1994 nadaljeval v Račah.
- Od leta 1994 do 1998 je obiskoval Srednjo elektro-računalniško šolo v Mariboru.
- Leta 1998 se je vpisal na Fakulteto za elektrotehniko, računalništvo in informatiko na Univerzi v Mariboru ter diplomiral 1. septembra 2004.
- Leta 2004 se je vpisal na enovit doktorski študij na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko na Univerzi v Mariboru.
- Od leta 2005 je zaposlen kot asistent na Fakulteti za gradbeništvo na Univerzi v Mariboru.
- V letu 2011 je 20-odstotno dopolnilno zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko na Univerzi v Mariboru.



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA DOKTORSKEGA KANDIDATA

Podpisani **Peter Podbreznik**,
vpisna številka **95028708**

i z j a v l j a m,

da je doktorska disertacija z naslovom **Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih dveh kamer za poljubno izbrano točko kot prispevek k izboljšanju razpoznavanja slik**

- rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- da predložena disertacija v celoti ali v delih ni bila predložena za pridobitev kakršnekoli izobrazbe po študijskem programu druge fakultete ali univerze,
- da so rezultati korektno navedeni in
- da nisem kršil avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih.

Podpis doktorskega kandidata:



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA O OBJAVI ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKE DISERTACIJE IN OSEBNIH PODATKOV, VEZANIH NA ZAKLJUČEK ŠTUDIJA

Ime in priimek doktoranda: **Peter Podbreznik**

Vpisna številka: **95028708**

Študijski program: **Računalništvo in informatika**

Naslov doktorskega dela: **Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih dveh kamer za poljubno izbrano točko kot prispevek k izboljšanju razpoznavanja slik**

Mentor: **izr. prof. dr. Božidar Potočnik**

Somentor: **red. prof. dr. Danijel Rebolj**

Podpisani soglašam z objavo doktorske disertacije v Digitalni knjižnici Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija doktorske disertacije je istovetna elektronski verziji, ki sem jo oddal-a v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

Podpisani-a hkrati izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov, vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum diplomiranja, naslov diplomskega dela) na spletnih straneh in v publikacijah Univerze v Mariboru.

Datum in kraj:

Maribor, 28.6.2011

Podpis doktoranda:



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA KANDIDATOVEGA MENTORJA O USTREZNOSTI DOKTORSKE DISERTACIJE

Podpisani **izr. prof. dr. Božidar Počočnik**, mentor doktorskemu kandidatu, izjavljam, da je doktorska disertacija z naslovom:

Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih dveh kamer za poljubno izbrano točko kot prispevek k izboljšanju razpoznavanja slik,

ki jo je izdelal doktorski kandidat **Peter Podbreznik**, v skladu z odobreno temo, Pravilnikom o pripravi in zagovoru doktorske disertacije ter mojimi navodili in predstavlja izviren prispevek k razvoju znanstvene discipline.

Datum in kraj:

Maribor, 28.6.2011

Podpis mentorja:



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA KANDIDATOVEGA SOMENTORJA O USTREZNOSTI DOKTORSKE DISERTACIJE

Podpisani **red. prof. dr. Danijel Rebolj**, somentor doktorskemu kandidatu, izjavljam, da je doktorska disertacija z naslovom:

Vzpostavitev korespondence pri velikih odmikih dveh kamer za poljubno izbrano točko kot prispevek k izboljšanju razpoznavanja slik,

ki jo je izdelal doktorski kandidat **Peter Podbreznik**, v skladu z odobreno temo, Pravilnikom o pripravi in zagovoru doktorske disertacije ter mojimi navodili in predstavlja izviren prispevek k razvoju znanstvene discipline.

Datum in kraj:

Maribor, 28.6.2011

Podpis somentorja: