

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Sandi Gec

**Razvoj sistema za 3D rekonstrukcijo  
predmetov z uporabo pasivnih metod  
računalniškega vida**

MAGISTRSKO DELO  
ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE  
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: doc. dr. Danijel Skočaj

Ljubljana, 2015



Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljanje ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.





## IZJAVA O AVTORSTVU MAGISTRSKEGA DELA

Spodaj podpisani Sandi Gec sem avtor magistrskega dela z naslovom:

*Razvoj sistema za 3D rekonstrukcijo predmetov z uporabo pasivnih metod računalniškega vida*

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem magistrsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Danijela Skočaja,
- so elektronska oblika magistrskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko magistrskega dela,
- soglašam z javno objavo elektronske oblike magistrskega dela v zbirki "Dela FRI".

V Ljubljani, 24. aprila 2015

Podpis avtorja:



*Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Danijelu Skočaju za vso pomoč in strpnost pri izdelavi dela. Poleg tega se zahvaljujem vsem članom laboratorija ViCoS za prijetno vzdušje v delovnem okolju.*

*Zahvala gre tudi staršem in bratu Janu za vso izkazano podporo in motivacijo v teku študija.*

*Posebna zahvala gre tudi partnerici Lari in njeni ožji družini, da so mi stali ob strani.*



# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
1.1	Motivacija . . . . .	1
1.2	Definicija problema . . . . .	3
1.3	Oris rešitve . . . . .	4
1.4	Zgradba magistrske naloge . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Sorodno delo</b>	<b>7</b>
2.1	Aktivne metode . . . . .	8
2.2	Pasivne metode . . . . .	9
2.2.1	Pasivni stereo . . . . .	10
2.2.2	Oblika iz silhuete . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Izračun lege kamere</b>	<b>13</b>
3.1	Detekcija referenčnega objekta . . . . .	14
3.2	Določitev pozicije in orientacije kamere . . . . .	20
3.2.1	Notranji parametri kamere . . . . .	20
3.2.2	Zunanji parametri kamere . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Stereo vid</b>	<b>27</b>
4.1	Postopek . . . . .	27
4.1.1	Inicializacija parametrov . . . . .	28
4.1.2	Stereo rektifikacija . . . . .	30
4.1.3	Gradnja disparitetne mape . . . . .	32
4.1.4	Gradnja 3D modela iz disparitetne mape . . . . .	36

## KAZALO

4.1.5	Združevanje 3D delnih modelov . . . . .	36
4.2	Slabosti in omejitve . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Prostorsko klesanje</b>	<b>41</b>
5.1	Postopek . . . . .	41
5.1.1	Začetna hipoteza 3D modela . . . . .	42
5.1.2	Določitev parametrov kamere . . . . .	43
5.1.3	Segmentacija . . . . .	44
5.1.4	Klesanje . . . . .	45
5.2	Slabosti in omejitve . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Implementacija rešitve</b>	<b>51</b>
6.1	Kalibracija . . . . .	52
6.2	Mobilna aplikacija . . . . .	54
6.3	Procesna rešitev . . . . .	55
<b>7</b>	<b>Eksperimentalni rezultati</b>	<b>59</b>
7.1	Evalvacija ocene zunanjih parametrov kamere . . . . .	59
7.2	Metodologija evalvacije natančnosti 3D rekonstrukcije . . . . .	67
7.2.1	Utežena PCA . . . . .	67
7.2.2	Iterativna metoda najbližje točke . . . . .	71
7.3	Evalvacija metod . . . . .	75
7.3.1	Kvantitativni rezultati . . . . .	77
7.3.2	Kvalitativni rezultati . . . . .	85
<b>8</b>	<b>Sklepne ugotovitve</b>	<b>89</b>

# Povzetek

Cilj magistrskega dela je bil razvoj sistema za 3-dimenzionalno rekonstrukcijo predmetov iz slik. Osredotočili smo se na pasivne metode računalniškega vida in izbrali metodi *Stereo vid* ter *Prostorsko klesanje*. Pri uporabi obeh metod morajo biti poznane lege kamere iz katerih so bile slike zajete. Za določitev lege kamere smo uporabili informacijo pridobljeno z detekcijo referenčnega objekta – lista formata A4. Razvili smo sistem, ki uporabnika vodi pri zajemanju slik s pametno mobilno napravo osnovano na platformi Android, nato pa iz zajetih slik zgradi 3D model predmeta v procesnem delu implementiranem v razvojnem okolju Matlab. Tako dobljene 3D modele smo primerjali z referenčnimi, pri čemer smo predlagali ter razvili evalvacijsko metodologijo in napake podrobno preučili ter rezultate ovrednotili. Predstavili smo tudi kvalitativne rezultate na katerih smo izpostavili prednosti in omejitve izbranih metod.





# Abstract

The main goal of the master thesis is to develop a system for reconstruction of 3D objects from colour images. The main focus is on passive computer vision methods from which we select two, i.e., *Stereo vision* and *Space carving*. Both methods require information about camera poses. The camera pose for a given image is estimated from the information obtained by detecting a reference object, i.e., a standard A4 paper sheet. We develop an Android based mobile application to guide a user during image capturing process and a Matlab based system for 3D object reconstruction from captured images. The reconstructed 3D models of objects were compared to reference 3D models. Using an evaluation methodology we propose, we evaluated the implemented methods and analysed the results. We also present qualitative results and highlight strengths and shortcomings of the two selected passive computer vision methods for 3D reconstruction.



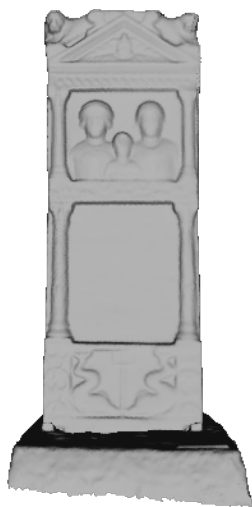
# Poglavje 1

## Uvod

### 1.1 Motivacija

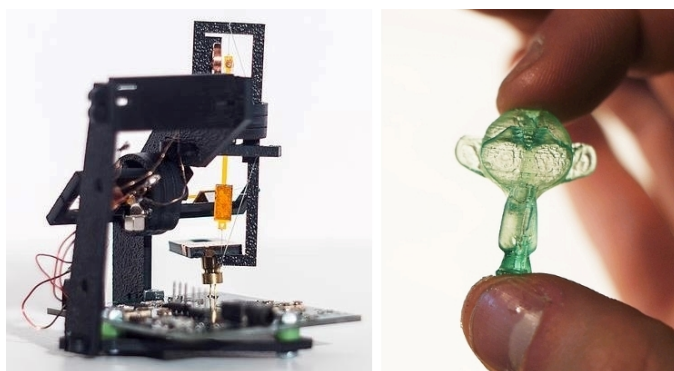
Prisotnost kamer za zajem fotografij je v današnjem času izjemno razširjena. Kamere lahko srečamo kot samostojne enote (t.i. fotoaparati), še pogosteje pa so integrirane v druge elektronske naprave kot so mobilni telefoni, prenosni računalniki, avtomobili, televizorji itd. Zajete fotografije so pri klasičnih kamerah predstavljene v 2-dimenzionalni (2D) obliki. Za neposreden zajem 3-dimenzionalne (3D) informacije iz okolice obstajajo kamere, ki temeljijo na IR, laserskih in drugih tehnologijah. Tovrstne kamere so danes precej dostopne, vendar imajo običajno omejitve kot so velikost, poraba energije, teža, specifičen postopek zajema, skratka niso tako praktične kot klasične kamere.

Uporaba 3D modelov je sicer zelo pogosta v aplikacijah in računalniških igrah. Poleg tega je uporaba 3D rekonstruiranih modelov vedno bolj prisotna tudi v drugih panogah npr. pri spletnem nakupu obutve, dokumentiranju predmetov, simulacijah itd. Slednja je še posebej prisotna v arheologiji, kjer je mogoče digitalizirati najdbe predmetov in te ponuditi širši javnosti v obliki spletnih muzejev ali zgolj v digitalni obliki za nadaljnje analize. Primer 3D rekonstrukcije rimskega nagrobnika z barvno-globinsko kamero Microsoft Kinect je prikazan na Sliki 1.1.



Slika 1.1: 3D rekonstrukcija rimskega nagrobnika z arheološkega najdišča v okolici Zagreba (Hrvaška). Glavni namen rekonstrukcije tega predmeta je analiza napisov s predmeta.

Navsezadnje so 3D modeli čedalje bolj prisotni tudi v kombinaciji 3D s tiskalniki, saj ti tiskajo predmete iz 3D modelov. S takšnimi tiskalniki je preprosto 3D modele natisniti v poljubnih količinah in poljubnih merilih, seveda v skladu z omejitvami velikosti tiskanja posameznega tiskalnika. Primer cenovno dostopnega tiskalnika je prikazan na Sliki 1.2.



Slika 1.2: Primer 3D tiskalnika "Peachy printer" na levi strani slike in natisnjene predmeta na desni strani slike[1].

Poleg neposredne gradnje 3D modelov z namenskimi kamerami, je rekonstrukcija možna tudi posredno iz slik zajetimi s klasičnimi kamerami z uporabo različnih metod 3-dimenzionalne (3D) rekonstrukcije. V našem delu smo izbrali dva postopka (3D) rekonstrukcije in sicer stereo vid ter prostorsko klesanje. Skupno obema postopkoma so vhodni podatki, ki so 2D barvne 3-kanalne (RGB - ang. Red Green Blue) slike zajete s kamero. Uporabljamo lahko torej običajne kamere. Omenjeni metodi 3D rekonstrukcije sta bili izbrani, ker se dopolnjujeta. Vsaka izmed metod bolje deluje na določenih predmetih, pri čemer igra največjo vlogo oblika in tekstura predmeta. Z uporabo ene ali druge metode je mogoče 3D rekonstruirati zelo velik spekter raznolikih predmetov.

Metodi smo izbrali iz več razlogov. Prvi je uporabnostni, saj ima velik del današnjih elektronskih naprav integriran fotoaparati. To pomeni, da je rešitev uprabna za vsakdanjo splošno rabo. Drugi razlog, ki obenem predstavlja tudi cilj dela, je izdelati celovito rešitev za 3D rekonstrukcijo modelov, ki od uporabnika zahtevajo le nabor fotografij in določenih parametrov, ki se izračunajo iz zajete slike. Obe metodi prejemata vhodne podatke enakega tipa in sicer fotografije. To pomeni, da je mogoče z istim naborom fotografij rekonstruirati predmet na dva načina. Rešitev smo prilagodili za potrebe naše domene. Glavna prednost naše rešitve je, da je metoda popolnoma avtomatizirana pri čemer ni potrebno podajati nikakršnih parametrov (podatki o kameri, parametri kamere, parametri segmentacije).

## 1.2 Definicija problema

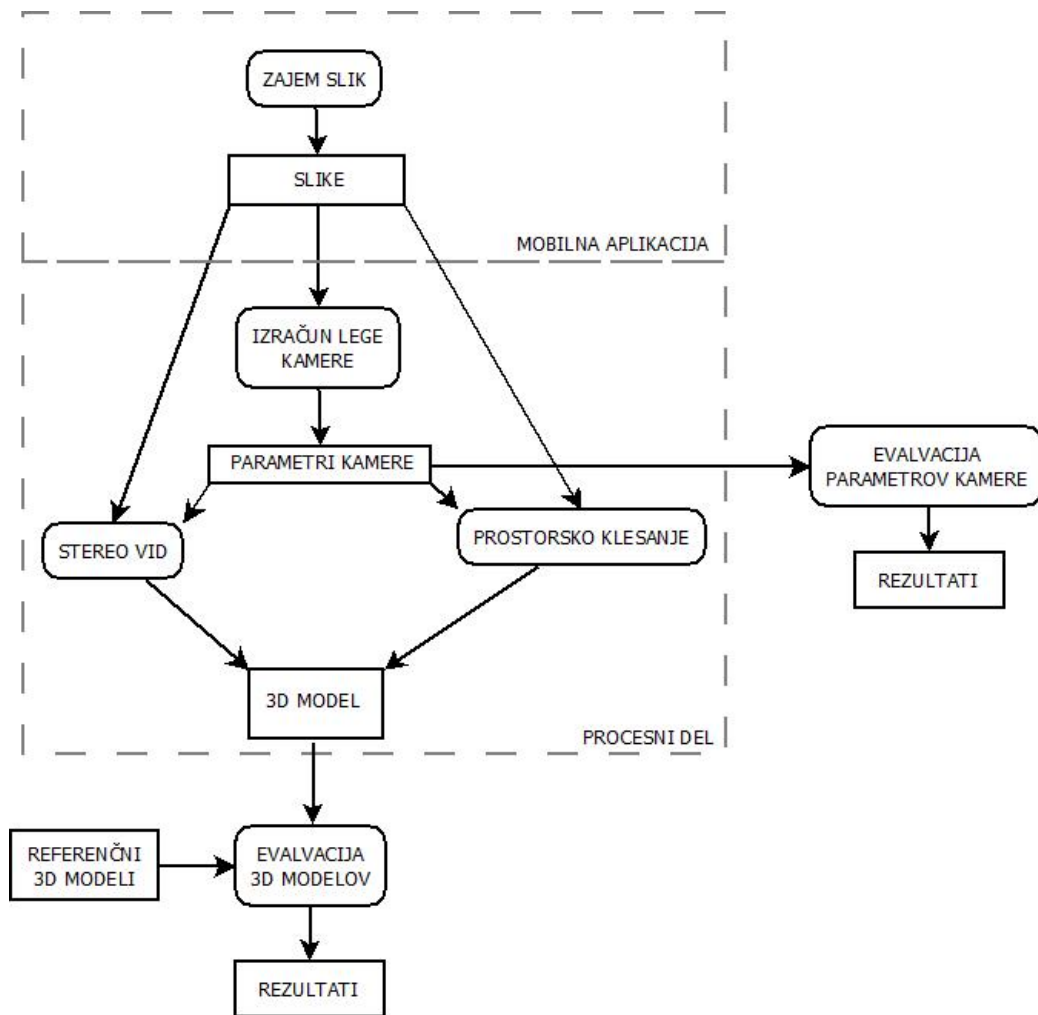
Pri rekonstrukciji predmetov želimo najprej določiti lege kamere, saj izbrani rekonstrukcijski metodi to zahtevata. Z lege kamere je mogoče oceniti absolutno merilo zajetih predmetov na sliki. Za to bi lahko uporabili senzorje gibanja (npr. pospeškometre ali žiroskope), ki so vgrajeni v praktično vsako pametno mobilno napravo. Tovrstna uporaba senzorjev za določitev prostorskih mer je bila preizkušena s postopkom struktura iz gibanja (ang. Structure

from motion) [2]. Rezultati rekonstrukcij so zelo obetavni in dosegajo nekaj milimeterske napake. V našem delu se za uporabo senzorjev nismo odločili, čeprav smo del rešitve implementirali kot mobilno aplikacijo z uporabo kamere. V mobilnih napravah so ti senzori zelo raznoliki in običajno relativno ceneji ter s tem posledično manj natančni. Za določitev absolutnega merila smo izbrali drugačen pristop. Mere je moč določiti z uporabo znanega planarnega predmeta s postopkom homografije, kjer na podlagi detektiranega referenčnega objekta določimo lego kamere s katero je bila slika zajeta. Za referenčni objekt smo izbrali A4 list standardnih mer  $297 \times 210\text{mm}$ , saj je to eden izmed najbolj razširjenih planarnih predmetov, ki je prisoten praktično v vsakem gospodinjstvu. Velikost predmetov, ki jih želimo rekonstruirati smo v naši rešitvi omejili na velikost referenčnega objekta. To pa zato, ker predmet rekonstrukcije postavimo na referenčni objekt. Vse zajete slike morajo imeti poleg predmeta rekonstrukcije vidna tudi ogljišča A4 lista oz. vsaj tri, da metoda uspešno deluje.

Cilj naloge lahko v grobem opišemo kot izdelava rešitve za 3D rekonstrukcijo predmetov z omenjenima metodama in njihovo evalvacijo.

### 1.3 Oris rešitve

Problem smo razdelili na posamezne podprobleme, ki smo jih implementirali z različnimi programskimi jeziki in platformami. Rešitev je zasnovana na dveh platformah: (i) mobilni aplikaciji za operacijski sistem Android in (ii) procesni del v sklopu Matlaba v povezavi z OpenCV ogrodjem. Z mobilno aplikacijo najprej zajamemo vhodne podatke - arhiv slik in njihovih referenčnih okvirjev. S slik izračunamo lego kamere na podlagi detektiranega A4 lista. Vhodne podatke in parametre kamere uporabimo kot vhode obeh rekonstrukcijskih metod. Rezultat rekonstrukcijskih metod je 3D oblak točk. Evalvacija poteka tako za parametre kamere kot za rekonstruirane 3D oblake točk. Oris celotne rešitve s soodvisnostmi posameznih metod je prikazan na Sliki 1.3.



Slika 1.3: Oris rešitve ponazorjen z diagramom.

## 1.4 Zgradba magistrske naloge

V drugem poglavju predstavimo sorodno delo, pri čemer se osredotočimo na 3D rekonstrukcijo s slik. V tretjem poglavju predstavimo parametre kamere. Opišemo postopek detekcije A4 lista, opis notranjih parametrov kamere in postopek določitve zunanjih parametrov kamere z detektiranega lista. V četrtem poglavju predstavimo metodo stereo vid. V postopku opišemo posamezne korake naše rešitve in na koncu poudarimo slabosti ter omejitve metode. V petem poglavju predstavimo metodo prostorsko klesanje. V po-

stopku opišemo posamezne korake naše rešitve in na koncu poudarimo slabosti ter omejitve metode. V šestem poglavju predstavimo implementacijo rešitve. Najprej opišemo kalibracijo kamere s katero izračunamo notranje parametre kamere. Nato opišemo mobilno aplikacijo s katero pripravimo vhodne podatke. Na kratko predstavimo procesno rešitev in uporabljene tehnologije. V sedmem poglavju predstavimo rezultate. Najprej predstavimo evalvacijo zunanjih parametrov kamere. Nato opišemo metodologijo evalvacije 3D modelov pri kateri najprej poravnamo 3D modele z PCA metodo in jih nato evalviramo z različnimi parametri iterativne metode najbližje točke. Rezultate obeh rekonstrukcijskih metod z omenjeno metodologijo vrednotimo in na koncu predstavimo še eksperimentalne rezultate. V osmem poglavju povzamemo celotno delo, navedemo ugotovitve in predstavimo možnosti nadaljnjega dela.



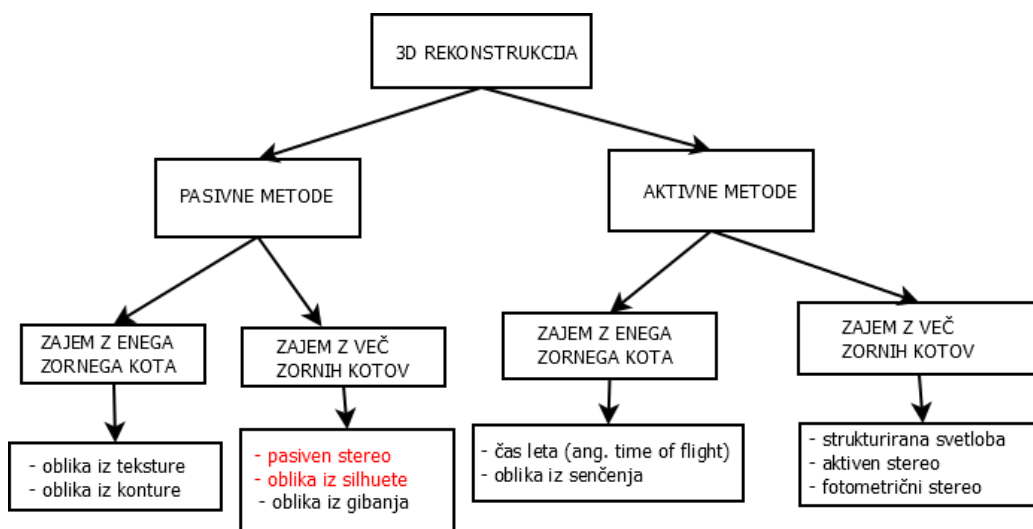
## Poglavje 2

### Sorodno delo

Področje 3D rekonstrukcije objektov je v zadnjem desetletju zelo razširjeno. Strojna oprema za zajem 3D modelov postaja čedalje zmogljivejša, cenejša in preprostejša za uporabo. Predvsem velik interes po 3D rekonstrukciji se je pojavil s pojavom vedno bolj dostopnih 3D tiskalnikov. Zaradi velike raznolikosti predmetov (oblike, materialov, trdnosti itd.) je močna težnja po uporabi brezkontaktnih načinov zajema. Kontaktni načini zajema oz. zajemi z dotikom predmeta so bili v preteklosti razširjeni, vendar so za današnje razmere precej nepriljubljeni, saj so počasnejši, dražji in omejeni na velikost zajema ter zahtevajo kontakt s predmetom zajema. Rekonstrukcijo 3D modelov najenostavneje ločimo na podlagi oblike vhodne informacije v dve osnovni kategoriji in sicer *lasersko-skenirne tehnologije* in *rekonstrukcija na podlagi fotografij*. Torej, v prvem primeru podatki lahko že vsebujejo 3D informacije, v drugem primeru pa 2D informacijo z različnimi postopki pretvorimo v 3D informacijo.

Rekonstrukcija s fotografij je zelo priljubljena. Glavna prednost je preprostost zajema vhodnih podatkov (fotografij), saj je uporaba fotoaparata v današnjem času zelo razširjena. Pri tej kategoriji je bistvena značilnost, da imamo neznane parametre kamere. Torej nimamo na voljo informacije kot so npr. oddaljenost kamere od objekta, rotacija kamere glede na objekt rekonstrukcije itd. Tudi sama fizična struktura kamere je zelo pomembna, saj

igrajo notranji parametri kamere veliko vlogo pri natančnosti rekonstrukcije. O tem je več opisane v Poglavlju 3. Glede na sistematiko zajemanja je moč gradnjo 3D modela razdeliti v dve veji in sicer *aktivne* in *pasivne metode*. Taksonomija vejitve je povzeta po [3]. Ta je prikazana na Sliki 2.1 in vključuje 3D rekonstrukcije na podlagi fotografij ter lasersko-skenirne tehnologije.



Slika 2.1: 3D rekonstrukcijo delimo v aktivne in pasivne metode. Vsaka izmed vej se dodatno deli na način zajema in sicer zajem z enega ali več zornih kotov. Na diagramu so prikazani primeri najbolj razširjenih rekonstrukcijskih metod. Rdeče označeni metodi smo izbrali v našem delu [3].

## 2.1 Aktivne metode

Pri aktivnih metodah je vir svetlobe nadzorovan, saj igra pomembno vlogo pri strategiji 3D rekonstrukcije. Lasersko-skenirne tehnologije so zelo priljubljene zaradi visoke hitrosti zajema, natančnosti in visoke gostote zajema [4]. Eden od tovrstnih primerov naprav za zajem 3D modelov je cenovno zelo ugodna barvno-globinska kamera Microsoft Kinect, ki omogoča zajem tako barvne informacije, kot tudi 3D informacije o predmetu [5]. Po omenjeni taksonomiji Kienct uvrščamo med metode, ki delujejo po principu strukturirane svetlobe.

Sestavljen je iz ene RGB kamere in dveh infrardečih (IR) senzorjev. Slednji se delita v oddajnik ter sprejemnik in v osnovi delujeta tako, da IR oddajnik projicira točke na površino predmeta rekonstrukcije, IR sprejemnik pa te točke zazna in izračuna njihove postavitve v 3D prostoru. Na Sliki 2.2 je prikazan Microsoft Kinect. Poleg prve različice obstaja tudi novejša različica Microsoft Kinect 2, ki deluje po metodi časa letenja (ang. Time Of Flight) [6]. Za razliko od prve različice 3D točke računa s pomočjo laserjev in sicer tako, da se globina izračuna glede na čas odboja laserskega žarka od površine predmeta.



Slika 2.2: Barvno-globinska kamera Microsoft Kinect.

Razširjene so tudi tehnologije kot so linijski laser (ang. line laser) [7], volumetrične tehnologije npr. CT (ang. Computed tomography) [8] itd. Linijski laser deluje tako, da laser s svetlobo projiciramo na predmet rekonstrukcije, s kamero pa spremljamo projicirano črto in tako izvajamo rekonstrukcijo. CT metoda poleg oblike predmeta omogoča rekonstrukcijo vsebine, zato je najbolj razširjen postopek v medicini, saj omogoča relativno neinvaziven vpogled v notranjost človeškega telesa. Primerno tehnologijo je potrebno izbrati glede na predmet zajema, okolico in druge dejavnike kot npr. kopenski ali podvodni zajem. Pri slednjem je priljubljen Microsoft Kinect ne deluje pri neposredni sončni svetlobi in v vodi zaradi omejitev IR senzorja.

## 2.2 Pasivne metode

Pri pasivnih metodah se viri svetlobe ne uporabljajo, saj se rekonstrukcija izvaja le s fotografij ali sekvenc fotografij v obliki video posnetka. V našem delu

smo uporabili metodi *oblika iz silhuete* oz. variacijo metode *Prostorsko klesanje* (ang. Space carving) in *pasiven stereo* oz. variacijo metode *Stereo vid*. Sorodna obema metodoma je *oblika iz gibanja*, ki 3D model gradi iz videa na podlagi detektiranih značilnk [9]. Vse tri metode spadajo v podkategorijo zajema z več zornih kotov. To pomeni, da takšne metode rekonstrukcije temeljijo na zajemu z različnih zornih kotov. V nasprotju te obstaja podkategorija zajema z enega zornega kota, ki rekonstrukcijo izvaja iz vhodnih podatkov kamere zajetih z natanko enega pogleda. Primeri takšnih metod so *oblika iz teksture* [10], *oblika s konture* [11] itd. Metoda *oblika iz teksture* deluje tako, da na podlagi teksture gradi 3D model. Pri metodi *oblika iz konture* pa običajno ocenjujemo globino glede na obliko predmeta z uporabo apriornega znanja. V nadaljevanju se bomo osredotočili na metodi *oblika iz silhuete* in *pasivni stereo*.

### 2.2.1 Pasivni stereo

Koncept pasivnega sterea sega v čas Grkov, ko so predstavili koncept stereoskopije. Ugotovili so, da je mogoče na podlagi dveh fotografij oceniti globino. Po pojavitvi fotoaparatorov in računalnikov se je razvoj stereoskopoje nadaljeval. *Stereo vid* kot ga poznamo danes, torej z uporabo dveh kamer, je bila kot 3D rekonstrukcijska metoda predstavljena v prejšnjem stoletju. Eden izmed konceptov rešitve je bil predstavljen s strani Celenka in Bechnaka leta 1990 [12]. Ta se še danes uporablja kot najbolj razširjena rešitev npr. v odprtokodnem ogrodju za računalniški vid OpenCV [13] in drugimi orodji. Delovanje v osnovi predstavlja analogijo človeških oči, ki v paru skrbita za zaznavo globine okolice. Problem sta avtorja razdelila v dva podproblema: problem korespondence in problem rekonstrukcije. V prvem podproblemu gre za določitev delov v levi in desni sliki, ki so projekcija istih elementov scene. Pri drugem podproblemu avtorja pojasnita, kako na podlagi korespondenc določimo 3D lokacijo in strukturo opazovanih objektov. Oba koraka sta podrobno predstavljena v naši rešitvi v poglavju 4. Do danes se je pojavilo veliko variacij ter izboljšav posameznih podproblemov predvsem robustifikacije

in pohitritve (npr. pohitritev koraka rektifikacije [14], izboljšava algoritma gradnje disparitetne mape [15] itd.), vendar osnovna koraka ostajata enaka.

### 2.2.2 Oblika iz silhuete

Metoda *Prostorsko klesanje* je bila pod tovrstnim imenom prvič predstavljena s strani Kutulakosa in Seitzja leta 1999 [16]. Avtorja sta predstavila koncept metode za 3D rekonstrukcijo objektov z uporabo fotografij. Pri tem sta problem poenostavila tako, da sta imela za vsako fotografijo že znane lege kamer s katerih so bile fotografije zajete. Koncept delovanja metode je sledeč:

1. Generiranje začetnega oblaka (kvadra) točk pri čemer je gostota sorazmerna z natančnostjo.
2. Segmentacija posamezne fotografije tako, da izločimo objekt segmentacije.
3. Za vsako fotografijo posebej se izračuna 2D projekcijo vsake 3D točke iz oblaka točk. Če se točka preslika v območje segmentiranega objekta, se točko ohrani, v nasprotnem primeru pa zavrže.
4. Izklesan oblak točk predstavlja rekonstruiran objekt. Po potrebi se mu doda še teksture s fotografij.

Po tem konceptu delovanja je povzeta naša rešitev, ki je podrobneje opisana v Poglavju 5. Njihov postopek sta Hemmayed in Frag leta 2000 preverila in dodala izboljšave pri teksturiranju [17]. Naletela sta na problem osvetlitve objekta fotografiranega z različnih zornih kotov in predlagala rešitev za boljše teksturiranje modeliranega objekta. V istem letu sta se Broadhurst in Cipolla osredotočila na rekonstrukcijo zunanje okolice ter naletela na težavo pri rekonstrukciji s šumi iz okolice (npr. osvetlitev, odboji s površin itd.) [18]. Predlagala sta izboljšano izbirno metodo pri preslikavi med slikovnimi elementi s fotografije, ter točkami iz 3D oblaka točk. Preslikava ne poteka injektivno iz 3D točke v 2D slikovni element, ampak globalno in sicer tako,

da se poleg slikovnega elementa upošteva tudi okolica le tega pri sami rekonstrukciji. Na takšen način sta dosegla bolj goste rekonstrukcije, vendar problem pojavitve lukenj še ni bil odpravljen. Leto kasneje sta ista avtorja to pomanjkljivost odpravila z upeljavo verjetnostne izbire pri klesanju [19]. Zavrgla sta globalne parametre pri postopku in le-te dinamično prilagajala med samim izvajanjem. Dosegla sta celovite rekonstrukcije objektov brez lukenj. Raziskanih in predlaganih je bilo še veliko izboljšav metode za specifične domene. Zanimiv pristop je bil predstavljen s strani Lovi, ki se je osredotočil na aplikativnost algoritma v realnem času [20]. Predlagal je algoritem inkrementalnega klesanja s katerim je metodo moč uporabiti v realnem času.

## Poglavje 3

# Izračun lege kamere

V tem poglavju je opisan postopek izračuna parametrov kamere. Predvsem se bomo osredotočili na problem izračuna zunanjih parametrov kamere. Pri tem bomo uporabili zgolj informacijo pridobljeno s slike in sicer na podlagi detekcije referenčnega predmeta - lista formata A4. Problem bomo razdelili na dva osnovna podproblema: (i) določitev referenčnega objekta (poiskati 4 oglišča z lista formata A4), (ii) opis parametrov kamere (zunanje in notranje) ter določitev le teh z oglišč lista formata A4. Kot že omenjeno v predhodnem poglavju, smo izbrali metodi 3D rekonstrukcije, ki temeljijo na slikah. Torej kot vhodni podatek celotnega procesa 3D rekonstrukcije potrebujemo barvne slike. Sicer bi metodi delali tudi na sivinskih slikah, vendar bi bila kvaliteta rezultatov v določenih korakih nižja. Parametri kamere so ključnega pomena saj so pogoj za uspešno delovanje obeh rekonstrukcijskih metod. Koraki obeh postopkov so povzeti po rešitvi v tehničnem poročilu [21]. V grobem si na koncu tega poglavja odgovorimo ključno vprašanje:

*Kako določiti pozicijo in orientacijo kamere s katero je bila slika zajeta?*

### 3.1 Detekcija referenčnega objekta

Referenčni objekt je predmet znanih dimenzij na podlagi katerega določamo velikost predmetov neznanih dimenzij. Kot analogijo v 2D prostoru lahko podamo primer ravnila z označenimi velikostnimi merami na podlagi katerega se sklicujemo na mere merjenih predmetov. V naši rešitvi uporabljamo enak princip, ki pa je predstavljen v 3D. Torej lahko merimo dolžino, širino in tretjo dimenzijo globino. Izbrali smo planaren referenčni objekt, ki je zelo razširjen v vsakem gospodinjstvu in ima primerne mere za merjenja naših evaluacijskih objektov. To je papirnat list standardne oznake A4, ki ima dolžino  $297mm$  in širino  $210mm$ .

Za zajem slik smo razvili mobilno aplikacijo, ki je podrobneje opisana v Poglavlju 6. Merjenje objekta neznanih dimenzij poteka tako, da ga namestimo na list formata A4 kot je prikazano na Sliki 3.1. Ta deluje kot merilo dimenzij za rekonstrukcijo. Detekcija referenčnega objekta poteka v treh korakih: *detekcija robov*, *gradientno smerno filtriranje* in *detekcija črt*. Za detekcijo referenčnega objekta in minimizacija napak smo upeljali še referenčni okvir. Ta okvir ima razmerje referenčnega objekta (lista formata A4) in je prikazan glede na pričakovano smer ter kot zajema. Smisel okvirja je tudi, da z njim uporabniku nakažemo smer zajema vhodnih slik. Vpeljava je del mobilne rešitve, ki je podrobneje opisana v Poglavlju 6.2.

Za detekcijo robov smo izbrali enega izmed najbolj razširjenih algoritmov in sicer Canny-jev detektor robov [22]. Vhodni podatek algoritma je slika, izhodni pa detektirani robovi na sliki. Algoritem detektira vse robove na sliki  $C_i$ , zato je v našem primeru potrebno šibke robove z detekcije odstraniti oz. filtrirati. Poleg tega je potrebno izrazitejše robove ojačati z uporabo maske  $M$ , ki jo določimo s pragom gradientne magnitude slike  $C_i$ . Maska  $M$  se izračuna po formuli:

$$M = C_i > (\text{mean}(C_i) + \text{std}(C_i)).$$

Primer rezultatov je prikazan na Slikah 3.2. Zadnji dobljen rezultat še ni zadovoljiv, saj vključuje robove vseh črt. Torej tudi črte, ki niso del lista.





Slika 3.1: Primer vhodne slike z označenimi rdečimi točkami referenčnega okvirja. Objekt rekonstrukcije je situiran znotraj lista formata A4.

To težavo najenostavneje rešimo z apliciranjem *gradientnega smernega filtriranja*. Filter deluje tako, da ohranja samo tiste črte, ki spadajo znotraj dovoljene stopnje odstopanja izraženega v stopinjah. Prag odstopanja je izražen s formulo:

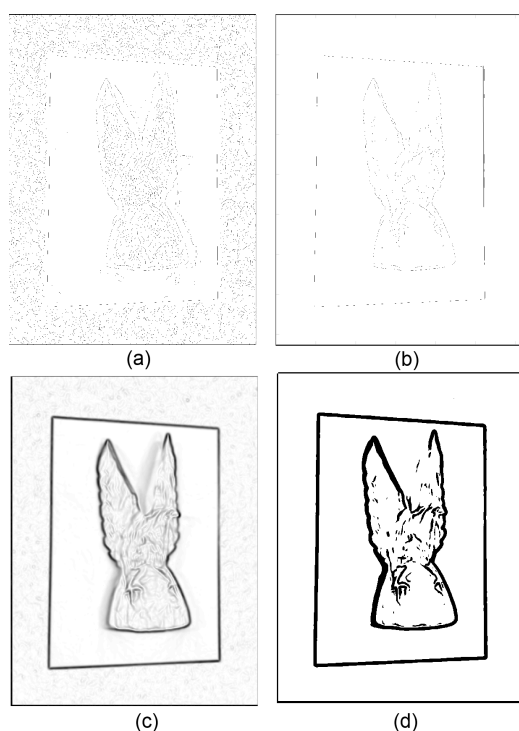
$$\delta = d \cdot \pi / 180,$$

pri čemer  $d$  predstavlja stopnjo deviacije kotov izraženo v stopinjah za horizontalne in vertikalne črte. Ti se glede na referenčni okvir razlikujejo. Ko imamo določene stopnje deviacije stranic posamezne slike, te uporabimo v sledečih formulah mask:

$$M_{left} = |G| > (\pi - \delta)$$

$$M_{right} = |G| < \delta$$

$$M_{down} = G > \left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \wedge G < \left(\frac{\pi}{2} + \delta\right)$$

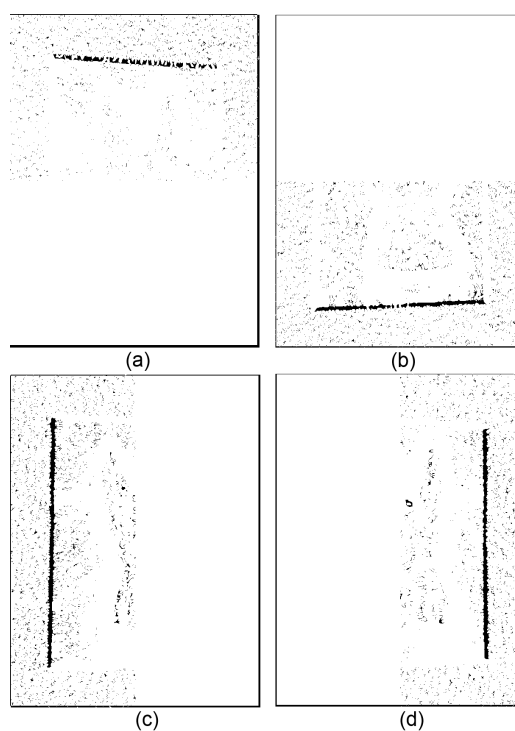


Slika 3.2: Slike prikazujejo sekvenco korakov algoritma in ustreznih filtrov. (a) Osnovni rezultat Canny algoritma. (b) Rezultat z osnovnim filtrom, kjer so šibki robovi odstranjeni s predhodnega rezultata. (c) Rezultat apliciranja gradientne magnitude na predhodni rezultat. (d) Rezultat apliciranja maske  $M$  na predhodni rezultat.

$$M_{up} = G < \left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \wedge G > -\left(\frac{\pi}{2} + \delta\right)$$

Vsaka izmed zgornjih formul predstavlja filtriranje posameznih stranic A4 lista.  $M_{left}$  predstavlja levo,  $M_{right}$  desno,  $M_{down}$  spodnjo in  $M_{up}$  zgornjo masko stranice lista. Primer rezultatov filtriranja mask prikazuje Slika 3.3.

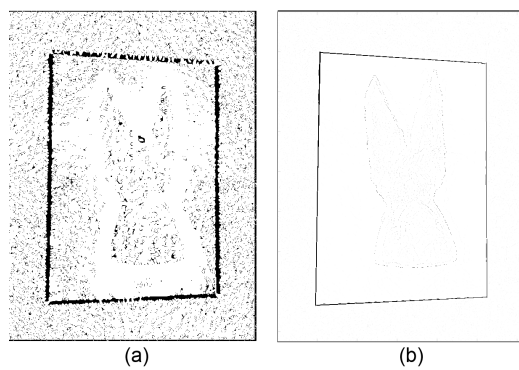
Na voljo imamo delne rezultate posameznih stranic, ki jih je potrebno združiti. Združitev poteka tako, da vsako sliko razdelimo na polovico pri čemer zavržemo tisti del polovice, ki ni relevanten rezultat gradientnega smernega filtriranja. Vse dele združimo v eno sliko, ki običajno vsebuje veliko šuma. Stranice lista izrazimo in obenem odstranimo šum z gradientno magnitudnim filtrom. Primer združene slike s šumom in slike z izraženimi



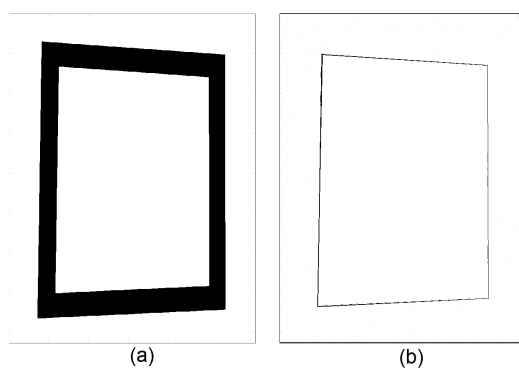
Slika 3.3: Gradientno smerno filtriranje z maskami. (a)  $M_{up}$ , (b)  $M_{down}$ , (c)  $M_{left}$  in (d)  $M_{right}$ .

stranicami lista so prikazani na Sliki 3.4.

Pogosta težava pri omenjenem postopku so detektirane črte, ki niso del lista. Te so lahko posledica oblike predmeta ali vzorca površine na kateri leži list. Glede na to, da imamo na voljo informacijo o referenčnem okvirju, lahko to težavo enostavno rešimo. Stranice referenčnega okvirja odebelimo in tako dobimo območje v katerem se naš referenčni objekt nahaja. Tako izraženo površino referenčnega okvirja uporabimo kot masko. Na rezultat slike z lokaliziranimi stranicami apliciramo masko, ter upoštevamo samo tiste dele črt, ki ležijo na površini referenčnega okvirja, ostale zavržemo. Primer uporabe maske referenčnega okvirja je prikazana na Sliki 3.5.

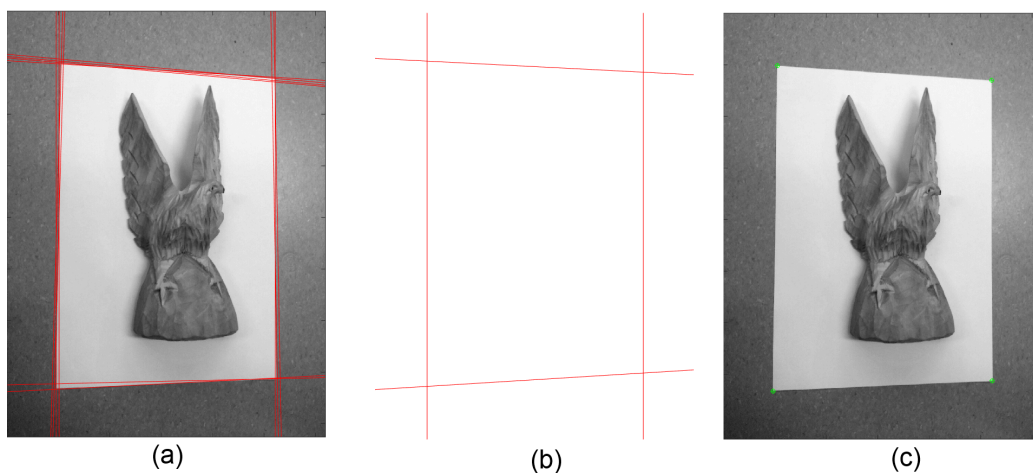


Slika 3.4: (a) Združeni delni rezultati smernih filtriranj. (b) Odstranjen šum z lokaliziranimi stranicami.



Slika 3.5: (a) Površina referenčnega okvirja. (b) Filter uporabljen na sliki z globalno lokaliziranimi stranicami.

V zadnjem koraku nam preostane še detekcija oglišč A4 lista. Kot razvidno s prejšnjih rezultatov se nam lahko zgodi prekrivanje oglišča slike. Slike so lahko zajete z različnih zornih kotov, z različnih višin in predmeti na referenčnem objektu so različnih višin. Vse to lahko privede do prekrivanja oglišč pri zajemu slike. V našem primeru rešitev dopušča prekrivanje enega oglišča. Če je prekrito več kot eno oglišče, naša rešitev ne deluje uspešno. Za lokalizacijo oglišč na podlagi črt ali delov črt A4 lista smo uporabili Houghovo transformacijo za iskanje ravnih črt na sliki [23]. Najprej dobimo nabor večjega števila črt. Večji del dobljenih črt odstranimo s postopkom dušenja ne maksimumov (ang. non-maxima suppression) pri čemer odstranimo tiste črte, ki ne zadostujejo pogoju lokalnega maksimuma. Kandidate presečišč črt (oglišča referenčnega objekta) sortiramo po oddaljenosti od detektiranih Houghovih črt. Ohranimo le tiste štiri črte, ki imajo najmanjšo napako kvadratnega prilaganja (ang. least squares fitting). Na dobljenih črtah izračunamo dobljena presečišča, ki predstavljajo oglišča A4 lista. Primer opisanega postopka je prikazan na Sliki 3.6.



Slika 3.6: (a) Primer detektiranih črt s Hough algoritmom. (b) Filtrirane črte s postopkom dušenja ne maksimumov. (c) Končni rezultat izbranih oglišč A4 lista.

Postopek prikazuje detekcijo izbranega referenčnega objekta. Z doblje-

nimi oglišči A4 lista imamo trenutno na voljo le informacijo o preslikavi točk iste dimenzije, torej  $\mathbb{R}^2 \Rightarrow \mathbb{R}^2$ . V naslednjem podpoglavju bomo pokazali, da imamo dovolj podatkov, če želimo prostor razširiti na dodatno dimenzijo in tako izračunati zunanje parametre kamere.

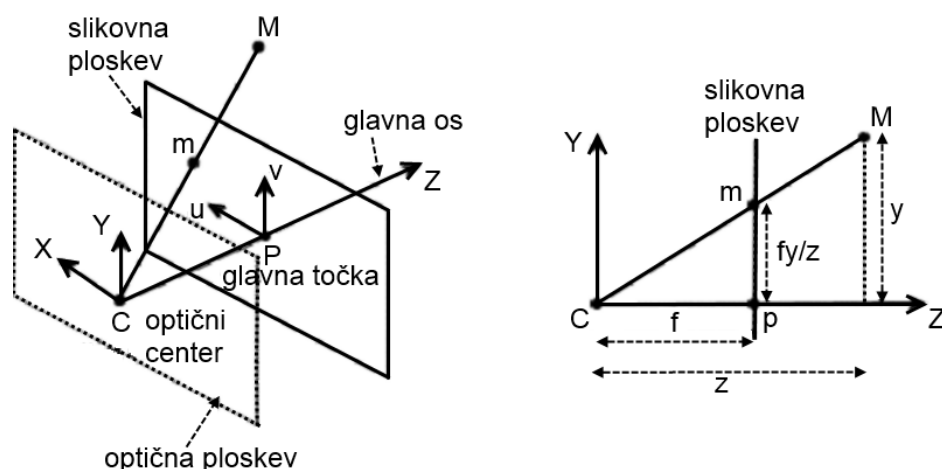
## 3.2 Določitev pozicije in orientacije kamere

V našem delu slike zajemamo s klasično kamero, ki izhaja z luknjičnega modela kamere (ang. pinhole camera) in je prikazan na Sliki 3.7. Kamera je lahko samostojna naprava v obliki fotoaparata ali del elektronske naprave (npr. mobilna naprava, prenosnik, itd.). Ti so lahko različnih cenovnih razredov, različne kvalitete elektronike in tipala ter narejeni za različne namene. Na področju 3D rekonstrukcije osnovne lastnosti kot so velikost slike, način kodiranja slike in podobno niso dovolj. Vsaka model kamere je unikaten in ima posebne tako tehnološke kot fizične lastnosti, zato je prišlo do potrebe po teh opisnikih. Leta 1997 sta Heikkilä in Silvén predstavila metodo kalibracije s štirimi koraki [24]. Ti se še danes uporabljajo kot zelo razširjena metoda kalibracije notranjih parametrov kamere. Poleg notranjih poznamo tudi zunanje parametre kamere.

### 3.2.1 Notranji parametri kamere

Notranji parametri kamere opisujejo lastnosti kamere in se ne spreminjajo. To pomeni, da ostajajo enaki na čisto vseh zajetih fotografijah z isto kamero (ob predpostavki da zoom ostaja enak). Parametre kamere lahko kalibriramo na različne načine. V našem delu smo uporabili orodje za kalibracijo OpenCV Camera Calibration [25]. Kalibracijske lastnosti se izračunajo na podlagi znanega kalibracijskega objekta in sicer plošče velikosti lista formata A4 z vzorci krogov. Rezultat kalibracije so izračunani 4 osnovni notranji parametri kamere in sicer: *goriščna razdalja*, *glavna točka* (ang. *principal point*), *koeficienti nagibanja* in *distorzije*.

**Goriščna razdalja** je razdalja leče kamere od njenega gorišča. To je



Slika 3.7: Prikaz luknjičnega modela kamere v prostoru na levi sliki in stranski pogled na desni sliki z označenimi osnovnimi notranjimi parametri kamere [26].

razdalja na kateri dejansko nastane slika. Geometrijsko goriščno razdaljo opisuje formula:

$$-x = f \cdot \frac{X}{Z},$$

kjer spremenljivka  $f$  predstavlja goriščno razdaljo, spremenljivka  $Z$  razdaljo med kamero ter objektom, spremenljivka  $X$  dolžino objekta in spremenljivka  $x$  dolžino na slikovni ploskvi.

**Glavna točka (ang. principal point)** je točka na presečišču med slikovno ploskvijo in optično osjo.

**Koeficient nagibanja (ang. skew)** je kot med osema  $x$  in  $y$ . Ta je v idealnih pogojih  $90^\circ$ , pri običajnih kamerah pa minimalno odstopa.

**Distorzije** so anomalije fizične strukture objektiva. Ločimo jih v dve obliki: *radialno* in *tangencialno* distorzijo. Predstavljata ukrivljenost posameznih krožnih območij na sliki. Do tangencialne distorzije pride, ko leča ni popolnoma vzporedna s slikovno površino. Pri radialni distorziji pa se upošteva ukrivljenost objekta na zajeti sliki, ki je posledica anomalij na površini leče. Običajno velja, da imajo visoko cenovne kamere majhne distorzijske napake.

### 3.2.2 Zunanji parametri kamere

Zunanji parametri kamere so rotacije in translacije kamere. Ti se na vsaki fotografiji na novo izračunajo, saj slike zajemamo z različnih zornih kotov. Parametre izračunamo glede na koordinate znanega referenčnega objekta. Torej poznamo relacijo med svetovnimi koordinatami A4 lista in koordinatami oglišč na sliki izračunanimi s postopkom prejšnjega podpoglavja. Izračun zunanjih parametrov kamere dosežemo z razumevanjem relacije rotacije ter translacije med svetovnim in slikovnim koordinatnim sistemom. Poleg tega je potrebno upoštevati tudi homografijo na podlagi katere lahko določimo zunanje parametre kamere.

Naj spremenljivka  $R$  predstavlja rotacijsko matriko, spremenljivka  $t$  pa translacijski vektor. Relacija med sistemoma (svetovnim in slikovnim) sta predstavljena s sledečo formulo:

$$X_{camera} = R \cdot X_{world} + t.$$

Na podlagi zgornje formule lahko sklepamo, da če določimo spremenljivki  $X_{camera}$  vrednost 0 lahko izračunamo parameter pozicije kamere (spremenljivka *position*) v svetovnih koordinatah kot je razvidno v formulah [27]:

$$0 = R \cdot position + t$$

$$position = R^{-1} \cdot (-t).$$

Po znani relaciji med rotacijo in translacijo je potrebno upoštevati še preslikavo med slikovnimi ter svetovnimi koordinatami planarnih objektov, ki se imenuje homografija. Točke preslikave so oglišča našega referenčnega objekta oz. lista formata A4. Predpogoj homografije so znani notranji parametri kamere. Čisto vseh notranjih parametrov kamere ni potrebno upoštevati (npr. distorzije, nagibanje), so pa priporočljivi za doseganje bolj natančnih rezultatov pri določitvi zunanjih parametrov kamere. Za izračun homografije potrebujemo kalibracijsko  $3 \times 3$  matriko, ki je sestavljena iz goriščne razdalje



ter glavne točke in je definirana kot:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} .$$

Homografija je predstavljena v obliki  $3 \times 3$  matrike za katero velja:

$$p_{world} = H \cdot p_{image} ,$$

pri čemer sta  $p_{world}$  svetovne koordinate v našem primeru oglišč lista formata A4:

$$p_{world} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 210 & 0 \\ 210 & 297 \\ 0 & 297 \end{bmatrix} ,$$

$p_{image}$  pa slikovne koordinate v našem primeru oglišča detektirana na sliki z metodo detekcije referenčnega objekta. Obe matriki točk morata biti enake oblike. Formulo preoblikujemo tako, da vse matrike prenesemo na isto stran in dobimo  $p_{world} \times H \cdot p_{image} = 0$ . Za tem enačbo poračunamo in dobimo sistem enačb (v našem primeru 4) s katerega lahko izrazimo homografijo H. Po izračunu homografije je potrebno določiti pomožno matriko  $B$ , ki se jo izračuna po formuli:

$$B = K^{-1} \cdot H .$$

Stolpci pomožne matrike B so predstavljeni kot vektor  $B = [r_1, r_2, t_{temp}]$ <sup>1</sup>. V idealnem primeru imata  $r_1$  in  $r_2$  enako dolžino, vendar je v večini primerov nimata. Zato je potrebno uporabiti njihovo povprečno dolžino  $\lambda$ , ki se ga določi na sledeč način:

$$\lambda = \frac{\|r_1\| + \|r_2\|}{2} .$$

<sup>1</sup>Konkatenacija vektorjev ali matrik -  $A = [B, C]$  pri čemer sta  $A \in \mathbb{R}^{m \times n_1}$  ter  $B \in \mathbb{R}^{m \times n_2}$  in dobimo matriko  $C \in \mathbb{R}^{m \times (n_1 + n_2)}$ .

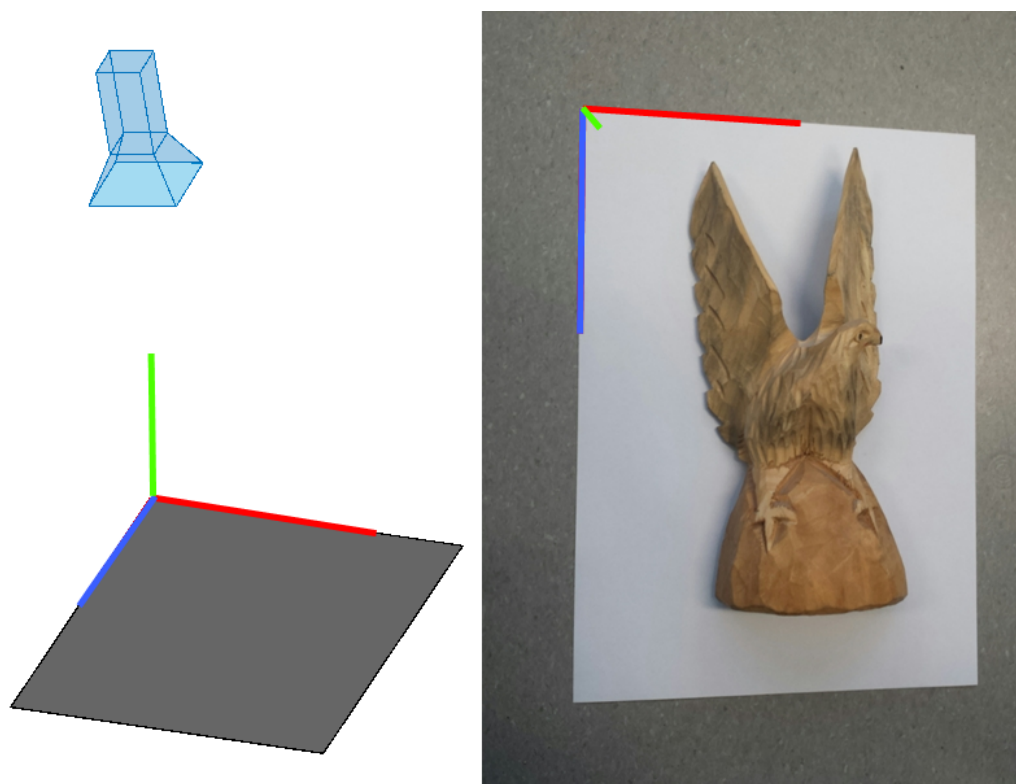
Ko imamo  $\lambda$  določeno, lahko izračunamo translacijo kamere:

$$t = \lambda \cdot t_{temp}.$$

Za izračun rotacije kamere potrebujemo tretjo dimenzijo (globino  $z$ ). To preprosto določimo z izračunom vektorskega produkta prvih dveh dimenzij:  $r_3 = r_1 \times r_2$ . Za konec sestavimo vektor posameznih komponent  $r$  in ga pomnožimo s parametrom  $\lambda$ , da dosežemo ortonormirano obliko. Končen izračun rotacije kamere je definiran kot:

$$R = \lambda \cdot [r_1, r_2, r_3].$$

Na koncu uporabimo parametre kamere s katerimi umestimo kamero v prostor kot prikazuje primer Slike 3.8. Izhodišče svetovnega koordinatnega sistema se nahaja na levem vogalu referenčnega lista formata A4.



Slika 3.8: Primer kamere v prostoru (leva slika) in zajete slike (desna slika). Obe sliki imata označena izhodišča koordinatnega sistema.



# Poglavje 4

## Stereo vid

V tem poglavju je predstavljen postopek *Stereo vida* pri katerem so vhodni podatki slike. Pravzaprav so vhodni podatki pari slik, saj je postopek povzet po analogiji človeških oči. V nadaljevanju bomo podrobno predstavili vse korake postopka in na koncu izpostavili največje slabosti.

### 4.1 Postopek

Pri metodi *Stereo vid* so vhodni podatki slike zajete z različnih zornih kotov. Te se ne obravnavajo individualno ampak se procesirajo v paru, kot pri človeških očeh. Referenčni objekt je list formata A4 standardne velikosti  $297mm$  dolžine in  $210mm$  širine. Referenčni objekt in parametri kamere se izračunajo po postopku opisanem v Poglavju 3. Parametre je potrebno ustrezno inicializirati in prilagoditi obliki podatkov implementirane rešitve. Rešitev je povzeta po odprtokodni rešitvi OpenCV opisani v uradni publikaciji [25]. Obstajajo tudi druge enostavnejše rešitve, kjer delamo z nekalibriranimi podatki oz. neznanimi parametri kamere [28]. Za te rešitve se nismo odločili, saj ne vračajo dovolj podrobne 3D rekonstrukcije. Za inicializacijo parametrov sledi rektifikacija fotografij. Na podlagi rektifikacije se izračuna disparitetno mapo in na koncu še gosto 3D rekonstrukcijo. Celoten postopek je predstavljen v Algoritmu 1.

---

**Algoritem 1:** Stereo vid.

---

**Vhodni podatki:** nabor slik zajete z različnih zornih kotov**Rezultati:** 3D oblak točk**dokler** *iteracija po naboru parov slik* **izvajaj**

| inicializacija - določitev zunanjih parametrov kamere;

| **če** *uspešno določeni poziciji kamer v paru slik* **potem**

| | rektifikacija slikovnih parov;

| | gradnja disparitetne mape;

| | gradnja delnega 3D oblaka točk;

| | transformacija 3D oblaka točk v osnovni koordinatni sistem;

| **sicer**

| | nadaljuj;

| **konec****konec**zduževanje delnih 3D oblakov točk v končni 3D oblak točk;

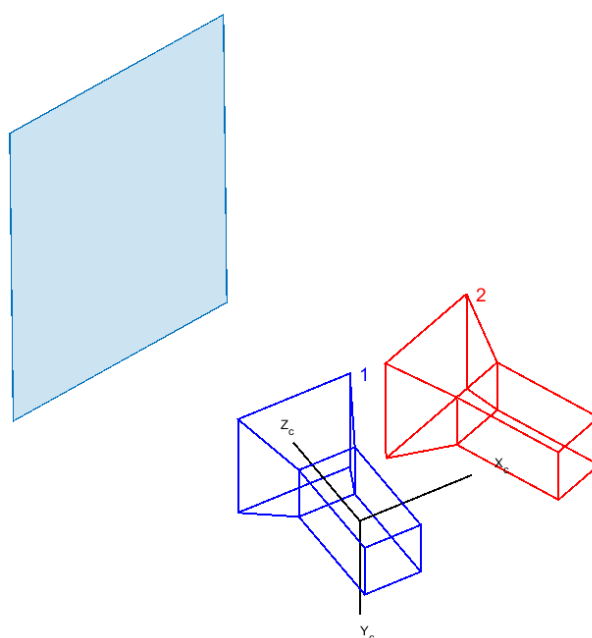
---

### 4.1.1 Inicializacija parametrov

Inicializacija parametrov se vrši za vsako sliko na kateri je bil uspešno detektiran referenčni objekt. Neuspešno detektirane slike se zavrže. Za vsako uspešno sliko uporabimo notranje in zunanje parametre, ki so opisani v Poglavju 3. Priprava parametrov se izvaja v parih, torej z vseh vhodnih podatkov tvorimo smiselne pare kot prikazuje primer na Sliki 4.1. Par je sestavljen z levega in desnega pogleda na referenčni objekt. Rotacije do  $45^\circ$  med paroma so smiselne, pri večjih rotacijah pa je nadaljnji proces 3D rekonstrukcije otežen in poveča se možnost napak ter izguba natančnosti. Če poenostavimo so pari smiselni, kjer je večji del prekrivanja objekta na obeh slikah. Primer smiselne postavitve kamer pri zajemu para prikazuje Slika 4.2.



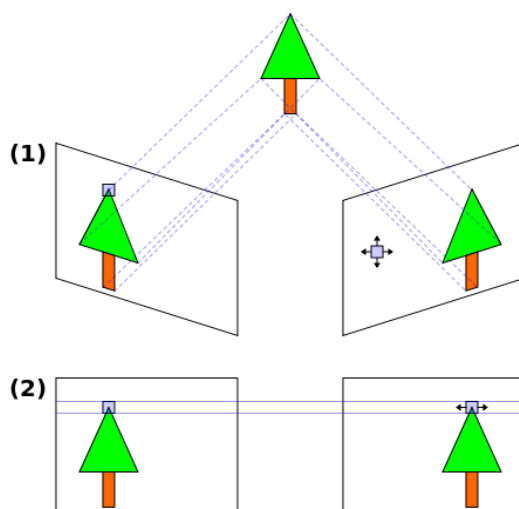
Slika 4.1: Prikaz para slik levega in desnega pogleda.



Slika 4.2: Prikaz postavitve parov kamer v prostoru glede na list formata A4.

### 4.1.2 Stereo rektifikacija

Stereo rektifikacija slik je proces transformacije dveh slik v eno skupno slikovno ploskev. Torej je potrebno problem korespondence z 2D prostora spremeniti v 1D prostor. Rezultat rektificiranega para slik je poravnava korespondenčnih točk po vrsticah, tako da na isti horizontalni premici ležijo enake korespondenčne točke obeh slik kot prikazuje primer na Sliki 4.3.



Slika 4.3: Primer prikaza rektifikacije parov slik [29].

Obstajata dve vrsti rektifikacije in sicer *nekalibrirana stereo rektifikacija* in *kalibrirana stereo rektifikacija*. Za vsako posamezno vrsto rektifikacij obstajajo različne metode.

Prvo metodo je predstavil Hartley [30] in je zasnovana za nekalibrirane slike z neznanimi parametri kamere. Metoda deluje tako, da na vsaki sliki poiščemo značilke z eno izmed metod za predstavitev značilk (npr. SIFT, SURF, GLOG, HOG,...). Pare značilk, ki ustrezajo obema slikama poiščemo z metodo najmanjših kvadratov (ang. SSD - Sum of Square Differences). S pomočjo parov izračunamo fundamentalno matriko, ki je podrobneje opisana v naslednjem odstavku. Ena izmed glavnih prednosti te metode je ta, da je mogoče izračunati notranje parametre kamere kar z metodo samo in



da ni potrebno imeti nikakršnega znanja o parametrih kamere. V našem primeru metoda ni primerna, saj se ne sklicuje na nikakršni referenčni objekt in posledično z rekonstrukcije ni mogoče določiti prostorskih mer 3D rekonstruiranega objekta.

Metoda kalibrirane stereo rektifikacije, ki jo uporabljamo, je bila predstavljena s strani Tsai [31] in Zhang [32]. Pri tej metodi je značilnost ta, da se proces rektifikacije izvaja na podlagi znanih notranjih in zunanjih parametrov kamere. Metoda teži k minimizaciji distorzij in anomalij na slikah pri reprojekciji para slik. Poleg tega metoda poskuša maksimizirati skupno območje pogleda s parov slik, z drugimi besedami doseči največji presek med slikama. Za to je potrebno uporabiti rotacijsko matriko  $R$ . Ta je v tem postopku definirana kot rotacija desne slike proti levi, pri čemer se pri rotaciji površina desne slike poravnava s površino leve slike. Da dosežemo minimalno distorzijo pri reprojekciji je potrebno rotacijsko matriko  $R$  razdeliti na dve rotacijski matriki,  $r_l$  za levo sliko in  $r_r$  za desno. Vsaka rotacijska matrika rotira posamezno sliko za polovico skupne matrike  $R$  proti skupnem pogledu. Na tak način sta sliki poravnani glede na glavno točko vzporedno preko skupnega žarka (ang. principal ray). S tem dosežemo cilj rektifikacije, ki je poravnava obeh slik po vrsticah, ne pa po stolpcih. Da izračunamo skupno rektifikacijsko rotacijo  $R_{rect}$  je potrebno epipol leve kamere usmeriti v neskončnost in poravnati epipolarne premice horizontalno. To dosežemo tako, da najprej ustvarimo rotacijsko matriko s smerjo epipola  $e_1$  samega in vzamemo glavno točko  $(c_x, c_y)$  v izhodišču leve slike, kjer smer epipola poteka vzdolž translacijskih vektorjev  $t$  med centrom projekcije kamer. Izračun epipola  $e_1$  je predstavljen s formulo:

$$e_1 = \frac{t}{\|t\|}.$$

Za tem je potrebno določiti vektor  $e_2$ , ki mora biti ortogonalen vektorju  $e_1$ . Najboljše je izbrati smer  $e_2$  proti glavnemu žarku, kjer ta običajno poteka vzdolž slikovne površine (ang. image plane). To dosežemo z uporabo vektorskega produkta vektorja  $e_1$  s smerjo glavnega žarka in normalizacijo kot

je definirano s formulo:

$$e_2 = \frac{[-t_y, t_x, 0]^T}{\sqrt{t_x^2 + t_y^2}}.$$

Tretji vektor  $e_3$  je ortogonalen na vektorja  $e_1$  in  $e_2$  in se ga preprosto izračuna z uporabo skalarnega produkta kot je prikazano s formulo:

$$e_3 = e_1 \times e_2.$$

Matrika, ki preslika epipol leve kamere v neskončnost je definirana s transponiranimi epipolarnimi vektorji:

$$R_{rect} = \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{bmatrix}.$$

Naloga  $R_{rect}$  matrike je rotacija leve kamere proti centru projekcije. Na takšen način se epipolarni premici popolnoma poravnata horizontalno in epipola sta v neskončnosti. Končno poravnavo parov slik po vrsticah dosežemo z rotacijskima matrikama  $R_l$  za levo sliko in  $R_r$  za desno sliko kot opisujeta formuli:

$$R_l = R_{rect} \cdot r_l$$

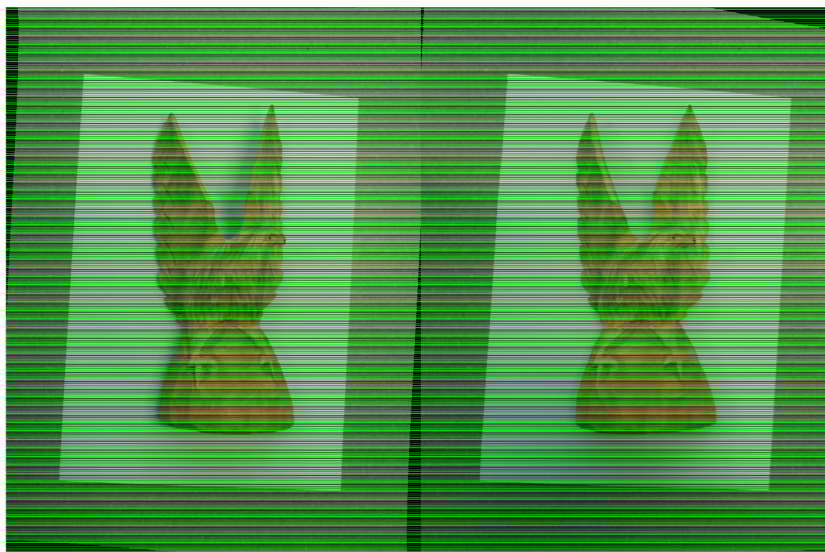
$$R_r = R_{rect} \cdot r_r.$$

Z opisanim postopkom dosežemo cilj rektifikacije, torej poravnavo parov slik po horizontalnih linijah. Primer takšne poravnave je prikazan na Sliki 4.4.

### 4.1.3 Gradnja disparitetne mape

Ko imamo par slik rektificiran, sledi preslikava 2D točk v 3D prostor. Ustrezno 3D preslikavo lahko najdemo le tistim točkam, ki se v rektificiranem rezultatu prekrivajo. Dispariteta oz. ocena globine posameznega slikovnega elementa poteka v treh korakih:

1. Sliki filtriramo s Sobelovim filtrom.



Slika 4.4: Primer prikaza rektificiranega para slik

2. Izračunamo dispariteto za vsak slikoven element v levem paru slike.
3. Preverimo rezultate disparitet in izločimo disparitetne vrednosti, ki niso zanesljive.

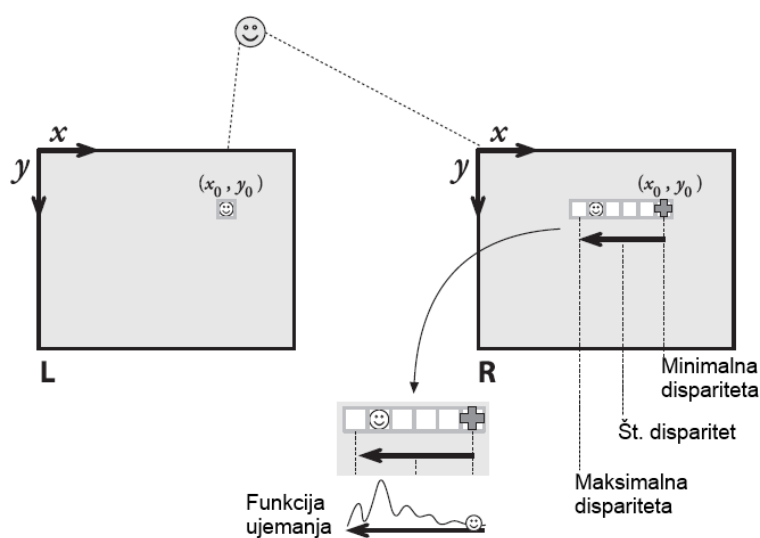
V prvem koraku je potrebno zmanjšati razlike, ki so posledica svetlobnih odsevov na slikah. Poleg tega je koristno tudi izboljšati kontrast na slikah. Zato filtriramo rektificiran par slik s Sobelovim filtrom [33]. Globino 2D točke izračunamo tako, da uporabimo triangulirano disparitetno mero. Ta primerja horizontalni legi med slikama in je predstavljena s preprostima formulama:

$$d = x_l - x_r \quad (4.1)$$

$$d = x_l - x_r - (c_{leftX} - c_{rightX}). \quad (4.2)$$

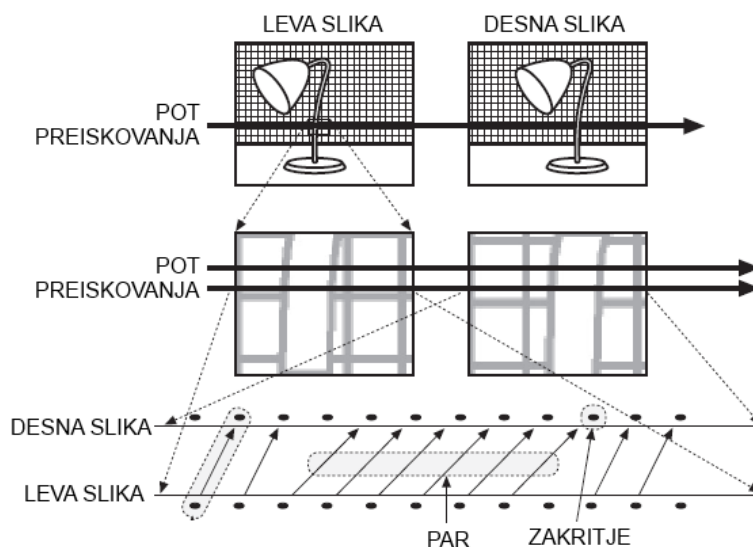
Spremenljivka  $d$  je ocenjena dispariteta,  $x_l$  predstavlja horizontalno pozicijo na levi sliki,  $x_r$  pa horizontalno pozicijo na desni sliki. Horizontalna pozicija glavne točke je predstavljena s  $c_{leftX}$  za levo in  $c_{rightX}$  za desno sliko. Formula (4.1) velja vedno, razen v primerih, ko žarek glavne točke seka na končni oddaljenosti kjer uporabimo formulo (4.2). Dispariteto lahko računamo le na

tistih točkah, ki imajo korespondenco. Torej je potrebno najti ujemanja značilk s para rektificiranih slik. Korespondence iščemo tako, da po horizontalnih epipolarnih premicah drsimo z oknom SAD (ang. Sum of Absolute Differences). SAD okno išče korespondence na podlagi vsote absolutnih razlik oken z leve in desne slike. Primer takšnega iskanja in izračun disparitete prikazuje Slika 4.5.



Slika 4.5: Prikaz preverjanja korespondenc med parom slik in določitev disparitetne vrednosti [25].

V veliko primerih preskočimo iskanje tistih značilk, ki so na levi sliki šumne ali imajo druge slikovne anomalije, zato je kvaliteto disparitete možno izboljšati še z enim pristopom in sicer tako, da vzamemo kot izhodišče značilke z desne slike in iščemo korespondence značilk na levi sliki. Pristop se imenuje *vnašanje* (ang. insertion). Ker že poznamo zaporedje korespondenc z osnovnega izračuna disparitete znamo oceniti območje iskanja korespondenc med samimi značilkami. Z vnašanjem dobimo le kandidate disparitet, ki jih je potrebno v zadnjem koraku metode preveriti. Takšen pristop z vnašanjem je prikazan na Sliki 4.6



Slika 4.6: Primer iskanje ujemanja značilnk med paroma slik s katerimi se gradi disparitetna mapa. Preverjanje poteka v obe smeri, torej z leve proti desni in obratno [25].

Gostoto in kvaliteto disparitete je mogoče uravnavati z mero disparitete. Ta mera določa območje v slikovnih elementih do katerih preverjamo korespondence vzdolž epipolarne premice. Manjša kot je mera disparitet višja je hitrost gradnje disparitete in manj je korespondenc. Torej je mera premo sorazmerna s kvaliteto disparitetne mape. Z mero disparitete tudi smiselno omejimo prostor preiskovanja in je v osnovi uporabljena prevzeta s 64 slikovnih elementov. Za vsako značilko iščemo korespondence po epipolarni premici na desni sliki z izhodiščem v isti poziciji ( $x_l = x_r$ ) v horizontalnem območju 64 slikovnih elementov. Z vseh veljavnih disparitet izračunamo minimalno disparitetno vrednost  $Z_{min}$  po sledeči formuli:

$$Z_{min} = \frac{Z^2}{f \cdot T} \cdot d_{min},$$

pri čemer je  $f$  goriščna razdalja,  $T$  translacija leve slike in  $d_{min}$  najmanjša disparitetna razlika med korespondencami. S to formulo preverimo vse dis-

paritetne vrednosti in izločimo tiste, ki ne ustrezajo minimalni disparitetni vrednosti.

#### 4.1.4 Gradnja 3D modela iz disparitetne mape

Ko imamo zgrajeno disparitetno mapo nam preostane le še pretvorba slikovnih elementov disparitetne mape (2D točk) v globinske 3D točke. Glede na to, da uporabljamo pare slik z znanimi parametri kamere, smo si olajšali delo. Za reprojekcijo točk uporabimo  $4 \times 4$  reprojekcijsko matriko  $Q$ , ki je predstavljena kot:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T_x & (c_x - c'_x)/T_x \end{bmatrix},$$

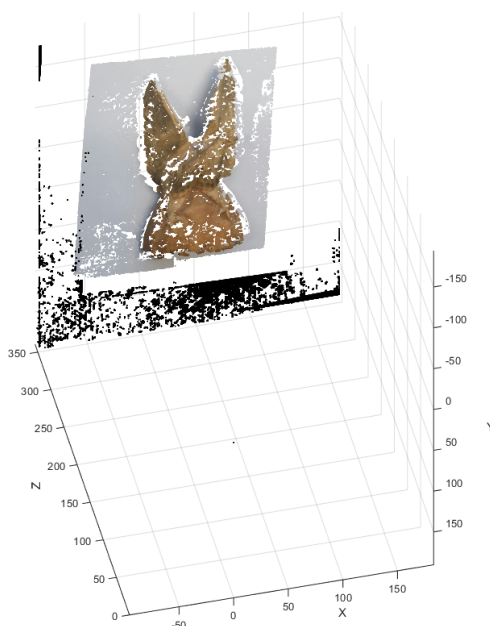
pri čemer so vsi parametri znotraj matrike leve kamere razen  $c'_x$ , ki je glavna točka koordinate  $x$  desne slike. Reprojekcijo vsake 2D točke  $(x, y)$  z disparitetno vrednostjo  $d$  izračunamo po formuli:

$$Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix},$$

pri čemer so koordinate nove 3D točke  $(X/W, Y/W, Z/W)$ . Primer delnega 3D modela zgrajenega z disparitetne mape je prikazan na Sliki 4.7.

#### 4.1.5 Združevanje 3D delnih modelov

Zadnji korak rekonstrukcijske metode je združevanje 3D delnih modelov v enovit 3D model. Bistvo tega postopka je poenotenje koordinatnih sistemov pri vsakem delnem 3D modelu. Torej za vsak delni 3D model je potrebno izvesti korake:

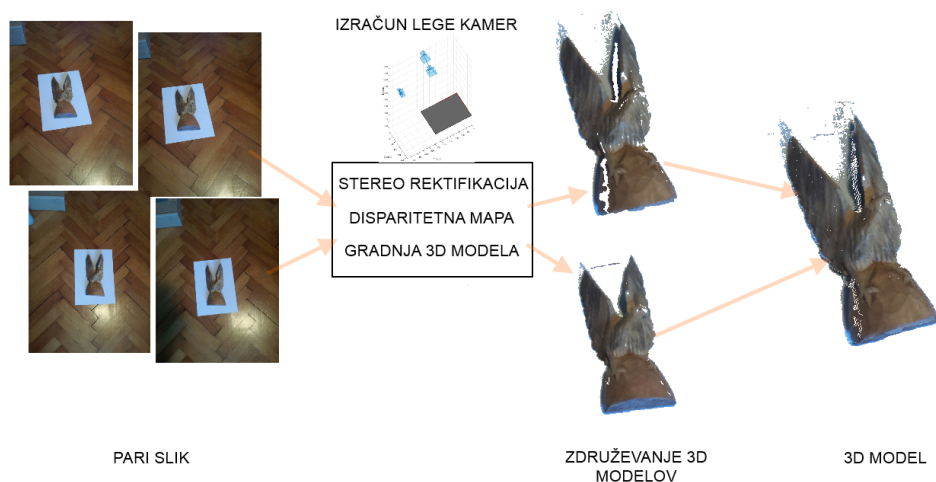


Slika 4.7: Primer zgrajenega delnega 3D modela.

1. Ponovno ocenimo parametre kamere leve rektificirane slike. Parametri kamere se pri rektificiranih slikah vhodnih slik namreč razlikujejo. To najenostavneje naredimo, da na rektificirani sliki detektiramo list formata A4. Pri detekciji lista je potrebno referenčni okvir (ali pa detektirana ogljišča v osnovni sliki) rotirati glede na polovično rotacijo med kamerama, kot je opisano v poglavju rektifikacije.
2. Ko imamo ocenjene zunanje parametre kamere rektificiranih slik, vzamemo parametre leve kamere. Z leve rektificirane slike namreč lepimo teksturo na zgrajen 3D delni model iz disparitetne mape. S parametri leve kamere izvedemo transformacijo 3D delnega modela v koordinatno izhodišče.
3. Na koncu izvedemo še odstranjevanje neveljavnih vozlišč iz 3D oblaka točk tako, da odstranimo vsa vozlišča izven območja lista formata A4. Oblak točk, ki predstavlja list najprej delno odstranimo tako, da ga filtriramo glede na globino (1 do  $2mm$ ). Preostali del lista, ki je po-

sledica šuma v podatkih, pa odstranimo s preprosto segmentacijo bele barve po RGB barvni paleti.

Rezultat postopka so poravnani 3D delni modeli in do določene mere odstranjena okolica. Vse tako poravnane 3D modele na koncu združimo v enega, ki je končni 3D model. Celovit postopek stereo vida je prikazan na Sliki 4.8.



Slika 4.8: Slikovno ponazorjeni koraki postopka *Stereo vida* z leve proti desni.

## 4.2 Slabosti in omejitve

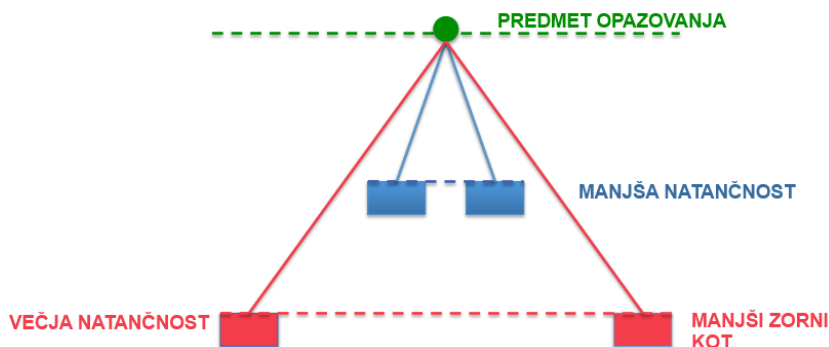
Metoda stereo vida je izjemno razširjena zaradi veliko možnih variacij kot je gradnja iz kalibriranih in nekalibriranih parametrov kamere. Poleg tega je metoda primerna za gradnjo objektov poljubnih velikosti in prostorov. Za razliko od prostorskega klesanja, ki deluje na osnovi segmentacije silhuete objekta, je za stereo vid značilno iskanje ujemanja med paroma slik na osnovi značilnk. Ta pristop poleg dobrih lastnosti prinaša tudi določene omejitve in slabosti.

Najbolj pogoste omejitve metode so:

- Prvo omejitev predstavlja natančnost v povezavi z zornim kotom zajema slik. Parametra sta obratno sorazmerno povezana. V primeru da



želimo doseči čimboljšo natančnost pri rekonstrukciji je potrebno kameri za zajem (levo in desno) postaviti čimbolj narazen, torej povečati razdaljo med optičnima centroma kamere (ang. baseline). Če to storimo se poveča tudi kot med kamerama proti objektu, ki gledata proti objektu na sredini. Posledica večje razdalje med optičnima centroma je zmanjšan zorni kot (ang. FOV - Field Of View), saj je presek slik pri rektifikaciji manjši. Po drugi strani bližje pa kot sta kameri objektu, manjši je kot in povečan je zorni kot, vendar natančnost je manjša. Torej gre pravzaprav za kompromis med natančnostjo in količino zajema (presek slik). Opisana omejitev je ponazorena na Sliki 4.9.



Slika 4.9: Prikaz dveh parov kamer. Prvi par kamer, ki je bližji objektu zajema, ima večji zorni kot a manjšo natančnost. Drugi par kamer, ki je bolj oddaljen od objekta zajema in ima večjo razdaljo med optičnima centroma, ima večjo natančnost a manjši zorni kot.

- Pogosta omejitev v praksi je vpliv svetlobe, ki se odraža kot šum pri rekonstrukciji. Najpogostejši svetlobni šumi so sence zaradi svetil, bliskavica na kameri in direktna sončna svetloba. Šum je posledica slabo ocenjene disparitetne mape na mestih, kjer pride do močnih osvetlitev, saj te umetno ustvarjajo značilke, ki jih sicer ni.
- Največja omejitev se pojavlja pri obliki in teksturi objekta, ki ga želimo rekonstruirati. V primeru, da objekt vsebuje premalo dinamično oz.

homogeno predstavitev teksture, je rekonstrukcija otežena in manj natančna. Homogeno teksuro je moč kompenzirati z obliko in sicer, da je objekt dovolj nehomogen. Veliko prehodov na objektu, kot so ostri robovi, poveča verjetnost pojavitve novih značilk (predvsem s sobelovim filtrom) in posledično izboljša gostoto rekonstrukcije.

# Poglavje 5

## Prostorsko klesanje

V prešnjem poglavju je bil predstavljen postopek 3D rekonstrukcije, ki temelji na gradnji oblaka točk s parov slik. V tem poglavju je opisan postopek 3D rekonstrukcije z uporabo množice slik, ki se imenuje prostorsko klesanje. Metoda omogoča 3D rekonstrukcijo objektov in celotnih prizorov. Različne variacije postopka so omenjene v Poglavju 2. Cilj našega postopka je rekonstrukcija 3D modela pri čemer želimo zgraditi 3D objekt s čimbolj natančnimi prostorskimi merami.

### 5.1 Postopek

Vhodni podatki metode so slike objekta zajete z različnih zornih kotov. Kot referenčni objekt uporabimo list formata A4 velikosti 297mm dolžine in 210mm širine. Za detekcijo referenčnega objekta uporabimo postopek opisan v Poglavju 3 in nato določimo parametre kamere. Na podlagi referenčnega objekta zgradimo začetno hipotezo oblike 3D modela. Predzadnji korak klesanja je segmentacija, ki igra pomembno vlogo, saj kvaliteta segmentacije vpliva na morebitno napako končnega 3D modela. Omenjeni koraki so podrobneje opisani v sledečih podpoglavjih, sam postopek pa je predstavljen v Algoritmu 2.

---

**Algoritem 2:** Prostorsko klesanje.

---

**Vhodni podatki:** slikovna tabela zajemov z različnih zornih kotov,  
začetni oblak točk**Rezultati:** izklesan 3D oblak točk

inicializacija;

**dokler** *iteracija po naboru slik izvaja*

| določitev zunanjih parametrov kamere na sliki;

| **če** *uspešno določena pozicija kamere na izbrani sliki* **potem**

| | segmentacija slike;

| | projekcija 2D slikovnih elementov v 3D začetni oblak točk;

| | klesanje začetnega oblaka točk;

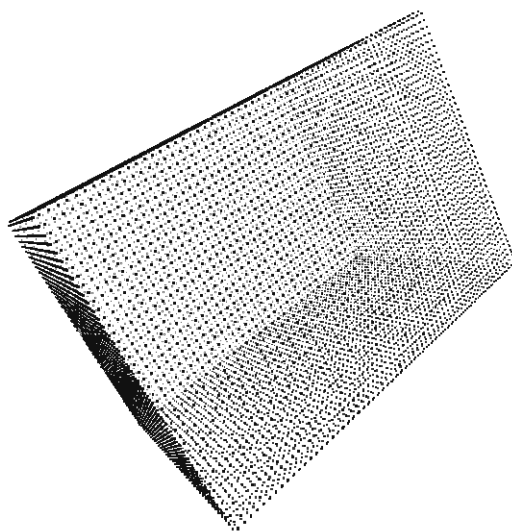
| **konec****konec**

---

### 5.1.1 Začetna hipoteza 3D modela

Postopek prostorskega klesanja poteka tako, da 3D model oblikujemo iz začetnega oblaka točk. Pri vsaki uspešno obdelani sliki (uspešna določitev parametrov kamere in segmentacija) z začetnega oblaka točk odstranimo tiste točke, ki sliki ne ustrezajo in na takšen način iterativno izoblikujemo oblak točk. Obstaja tudi način, da klesanje poteka z grajenjem oblaka točk, vendar v takšnem primeru dodajamo točke in tako izoblikujemo 3D model [20]. V naši rešitvi bomo odstranjevali (klesali) točke z oblaka točk. Začetno hipotezo 3D modela določimo na podlagi referenčnega objekta A4 lista. Dolžina in širina referenčnega objekta predstavljata osi X ter Y, os Z pa določa višino objekta postavljenega na referenčnem objektu. Dolžina, širina in višina začetnega oblaka točk so  $297 \times 210 \times 200$  mm, ki predstavlja obliko kvadra kot je vidno na Sliki 5.1.

Gostoto začetnega oblaka je potrebno določiti tako, da se doseže zelena natančnost. V našem primeru je za potrebe evalvacije natančnost določena na 1 mm, zato mora biti gostota mreže najmanj zmnožek vseh treh dimenzij v milimeterski meri in sicer 12.474.000 točk. V idealnih pogojih je mogoče



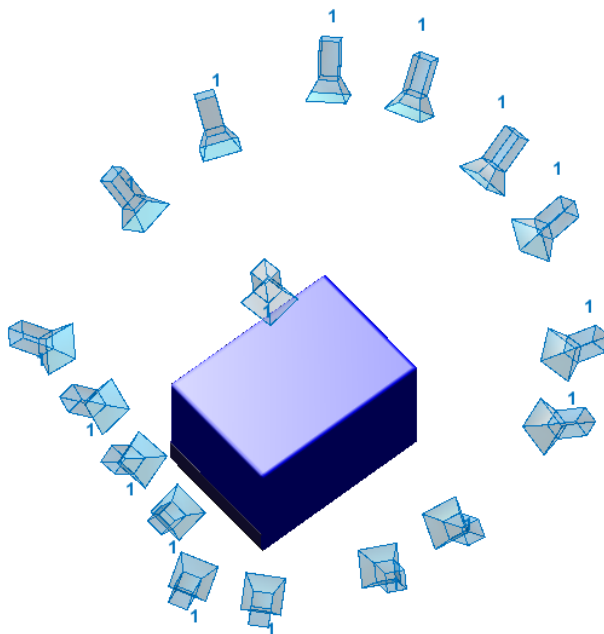
Slika 5.1: Primer začetnega oblaka s  $297 \times 210 \times 200$  točkami.

dosegati tudi večje natančnosti, vendar se v posameznih korakih tvori napaka (npr. pri detekciji lista, ocenjevanju pozicije kamere). Ta se seštevata skozi vse nadaljnje korake in se odraža v končnem 3D modelu. O sami natančnosti, glede na določeno gostoto oblaka točk, je več opisane v Poglavlju 7, ki opisuje celoten proces evalvacije.

### 5.1.2 Določitev parametrov kamere

V drugem koraku določimo zunanje parametre kamere posameznih slik z metodo predstavljeno v Poglavlju 3. Pomembno je, da so slike raznolike, zajete z različnih zornih kotov okoli referenčnega objekta po osi  $X$  in  $Y$ . Višina zajema glede na predmet ne sme biti previsoka ali samo s ptičje perspektive, saj s tem izgubljammo informacije o podrobnosti stranskih ploskev. V bistvu je potrebno v obzir vzeti tudi obliko predmeta in temu primerno prilagoditi višino zajema. Pri zelo nizki višini zajema se pojavljajo težave, ki so podrobneje opisane v naslednjem podpoglavju. Slike kjer algoritem za zaznavo referenčnega objekta ne deluje, preprosto zavržemo in jih ne uporabimo v nadaljnjih korakih. Ocenjene postavitev kamer v prostoru so prikazane na

Sliki 5.2.



Slika 5.2: Lege kamer v prostoru glede na referenčni objekt, ki je prikazan v obliki začetnega oblaka točk.

### 5.1.3 Segmentacija

V tretjem koraku, na slikah z uspešno ocenjenimi parametri kamer, izvedemo segmentacijo objekta. Zahtevnost segmentacije objekta je odvisna od same teksture. Bolj je objekt homogen enostavnejša je segmentacija in obratno. Ker uporabljamo referenčni objekt list formata A4 bele barve, naš objekt ne sme biti takšne barve. V naših testih smo zato uporabljali objekte temnejših barv in kar se da homogeno ozadje kot je prikazano na Sliki 5.3.

Problem segmentacije v našem primeru rešimo, tako da uporabimo apriori znanje homogenosti barv posameznih objektov. Slika ima slikovne elemente zakodirane v 3-kanalni barvni paleti RGB. Omenjene homogenosti najlažje ločimo med seboj in posledično izločimo objekt za 3D rekonstrukcijo tako, da slikovne elemente na sliki z RGB pretvorimo v HSV (ang. Hue-Saturation-



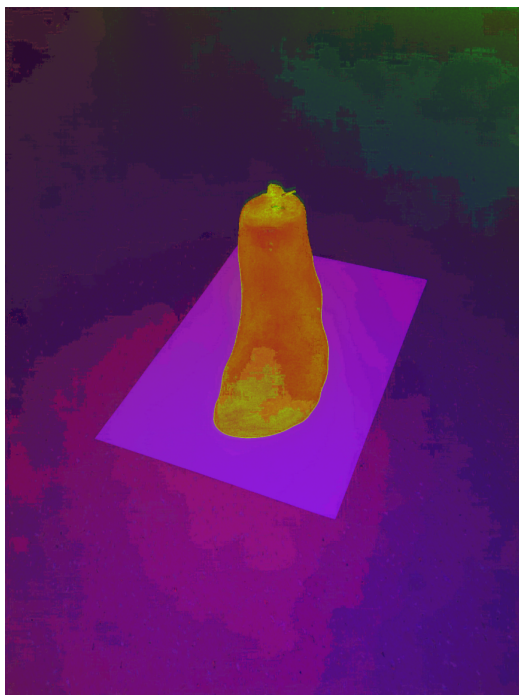
Slika 5.3: Primer vhodne slike.

Value) paleto kot je prikazano na Sliki 5.4.

Na takšen način enostavno nastavimo pragove posameznih kanalov. Tako z binarizacijo ločimo predmet rekonstrukcije kodiran z 0 (bela barva) in območje okolice, ki nas ne zanima kodiran z 1 (črna barva). Takšno preprosto filtriranje povzroča napako na robu med predmetom in ozadjem. Dobljeno napako najprej popravimo s postopkom polnjenja lukenj [?] (ang. hole filling) in nato še z apliciranjem filtra mediane z velikostjo okna  $20 \times 20$ . Rezultat nabora segmentiranih vhodnih slik je prikazan na Sliki 5.5. Čeprav vse napake ne izločimo, so dobljeni rezultati slik segmentacije dovolj dobri, saj ga območja okolice z vseh slik v nadaljnjem postopku izničijo.

#### 5.1.4 Klesanje

V četrtem koraku se izvede klesanje začetnega oblaka točk. Rezultate prejšnjih korakov uporabimo kot vhodne podatke pri klesanju. Za vsako sliko posebej



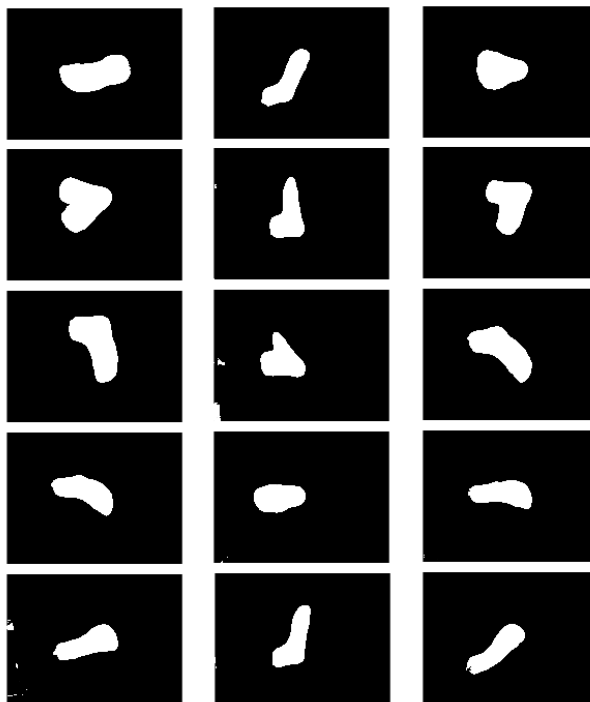
Slika 5.4: HSV slika pretvorjena s Slike 5.3.

imamo sledeče podatke:

- $3 \times 3$  matrika  $R$ , ki predstavlja rotacijo kamere v prostoru glede na referenčni objekt,
- $1 \times 3$  vektor  $t$ , ki predstavlja translacijo kamere v prostoru glede na referenčni objekt,
- $3 \times 3$  matrika  $K$ , ki predstavlja kalibracijsko matriko,
- segmentirana slika, ki je slika binarizirane oblike z označenim predmetom za rekonstrukcijo.

Klesanje poteka za vsako sliko posebej. Cilj klesanja je izločitev tistih točk iz oblaka točk, ki predmetu ne pripadajo. To naredimo tako, da za vsako 3D prostorsko točko z oblaka točk izračunamo projekcijo na sliko v 2D prostoru. Najprej izračunamo projekcijsko matriko  $P$  za vsak slikovni element tako, da





Slika 5.5: Primer segmentiranih slik.

kalibracijsko matriko  $K$  pomnožimo s  $3 \times 4$  matriko (združimo rotacijo in translacijo) po sledeči formuli:

$$P_{i,j} = K \cdot [R_{i,j}, t_{i,j}^T].$$

Nato za vsako točko v prostoru izračunamo projekcijo točke  $P_{i,j}(imgX, imgY)$ :

$$z_{i,j} = P_{3,1} \cdot worldX + P_{3,2} \cdot worldY + P_{3,3} \cdot worldZ + P_{3,4}$$

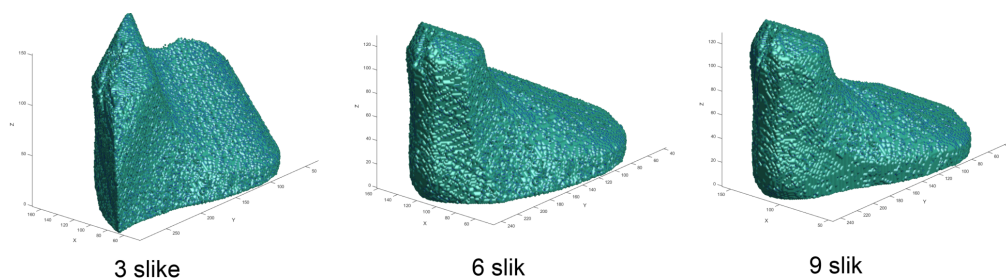
$$imgY = \frac{P_{2,1} \cdot worldX + P_{2,2} \cdot worldY + P_{2,3} \cdot worldZ + P_{2,4}}{z}$$

$$imgX = \frac{P_{1,1} \cdot worldX + P_{1,2} \cdot worldY + P_{1,3} \cdot worldZ + P_{1,4}}{z}.$$

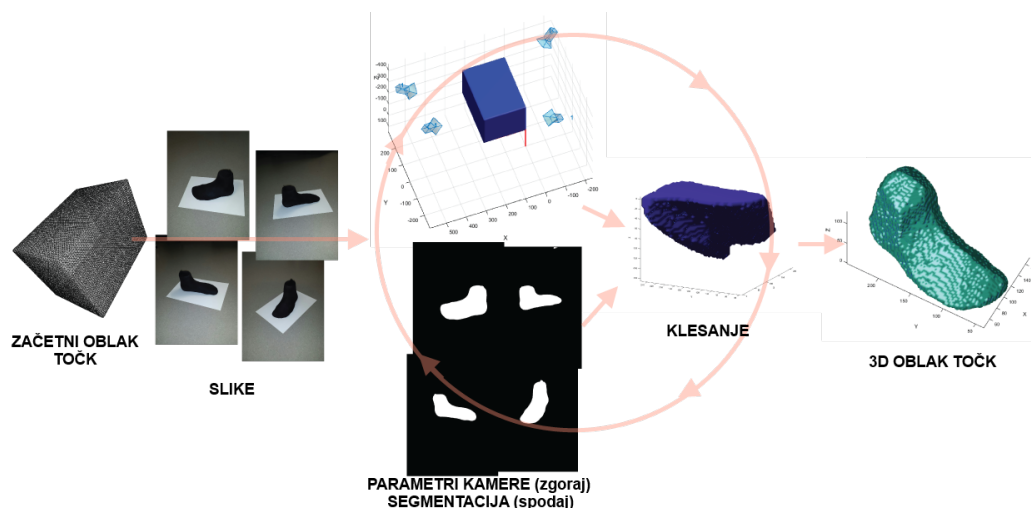
Parametri  $worldX$ ,  $worldY$  in  $worldZ$  so komponente točke  $P(worldX, worldY, worldZ)$  v prostoru, ki pripadajo oblaku točk. Zdaj, ko imamo za vsako točko v 3D prostoru projekcijo v 2D prostoru, zaženemo odločitveno funkcijo, ki preveri, če ta točka sploh leži na sliki. V primeru, da ne leži, jo

preprosto zavržemo. Če pa točka leži na tistem delu segmentirane slike, ki pripada predmetu, jo ohranimo.

Zgoraj opisan proces klesanja izvedemo za vsako sliko posebej in v vsaki iteraciji ima oblak točk običajno manj točk in rekonstruiran predmet več podrobnosti. Primer spremembe oblaka točk s klesanji je prikazan na Sliki 5.6. Celovit postopek klesanja je ponazorjen na Sliki 5.7.



Slika 5.6: Prikaz delnih rezultatov klesanja, ki jasno prikazuje zmanjševanje števila točk.



Slika 5.7: Slikovno ponazorjeni koraki postopka prostorskega klesanja z leve proti desni. Črte ponazarjajo tok izvajanja, krog pa izvajanje v zanki.

## 5.2 Slabosti in omejitve

Metoda prostorskega klesanja je razširjena zaradi svoje preprostosti implementacije in zadostuje pogoje večjemu delu domen rekonstrukcije - manjši objekti, večji objekti, prostori itd. Žal pa ima tudi slabosti in omejitve, zato za določene domene in primere metoda ni primerna.

Najbolj pogoste omejitve metode so:

- Metoda ima težave z določeno obliko objektov. Objekte, ki vsebujejo konkavne dele (npr. vdolbine) zaradi načina delovanja metode ni moč izklesati. Takšne anomalije je moč rešiti z nadgradnjo ali kombinacijo drugih metod rekonstrukcije (npr. stereo vid). (tukaj bo primer slike konkavnega objekta).
- V primerih, ko imamo kamero ob zajemu zelo nizko (npr. 15 cm višine) glede na list formata A4, pogosto naletimo na težavo pri koraku segmentacije. Heterogenost okolice nam lahko otežuje segmentacijo našega predmeta.
- Omejitve pri določitvi parametrov kamere glede na referenčni objekt. V našem delu smo osredotočeni na predmete manjše od referenčnega objekta A4 lista. Če bi želeli izvajati rekonstrukcijo objekta večjih razsežnosti bi morali temu primerno spremeniti velikost referenčnega objekta (npr. list formata A3 velikosti 297x420 mm) ali samo obliko referenčnega objekta. To bi najlažje naredili tako, da bi okoli objekta namestili enobarvne planarne predmete (npr. kroge). Te t.i. binarno velike objekte bi detektirali z ustreznimi algoritmi računalniškega vida in izračunali homografijo. Pri tem je pomembno, da imamo znane mere postavitve krogov in njihove velikosti v prostoru. Omejitev sicer ni neposredna slabost same metode ampak določitve parametrov kamere, je pa z njo zelo povezana.
- Druga omejitev je časovna kompleksnost metode. Algoritem metode ima časovno kompleksnost  $O(n^3)$ , ki je pogojena z gostoto oblaka točk

velikosti  $O(w \cdot l \cdot h)$  (dolžina, širina in višina). Hitrost v praksi izboljšamo z manjšanjem gostote, vendar se tudi natančnost 3D rekonstruiranega objekta z gostoto linearno zmanjšuje. Glede na izbrano domeno je potrebno izbrati kompromis med gostoto oblaka in želeno stopnjo natančnosti. Sicer je mogoče algoritem nekoliko pohitriti s paralelizacijo, vendar pri procesu klesanja je to oteženo, saj bi istočasno dostopali do skupnega vira (oblaka točk). Delni rezultati oblaka točk se uporabijo pri vsaki iteraciji klesanja in jih ni moč izvajati neodvisno. Torej metoda ima največ omejitev pri 3D rekonstrukciji objektov v realnem času kjer so zahteve po visoki natančnosti.

- Velik izziv predstavlja tudi segmentacija. Če so predmeti enobarvno homogeni ali vsebujejo malo barv in te ne sovpadajo z barvo referenčnega objekta, potem ni težav. V primeru da pa želimo segmentirati predmete z veliko značilkami pa moramo temu primerno izbrati ter prilagoditi metodo segmentacije. Kar pri tej metodi heterogenost barv povzroča težave, pri metodi stereo vida v Poglavju 4 pa je to dobrodošla lastnost za lažjo in robustnejšo rekonstrukcijo.

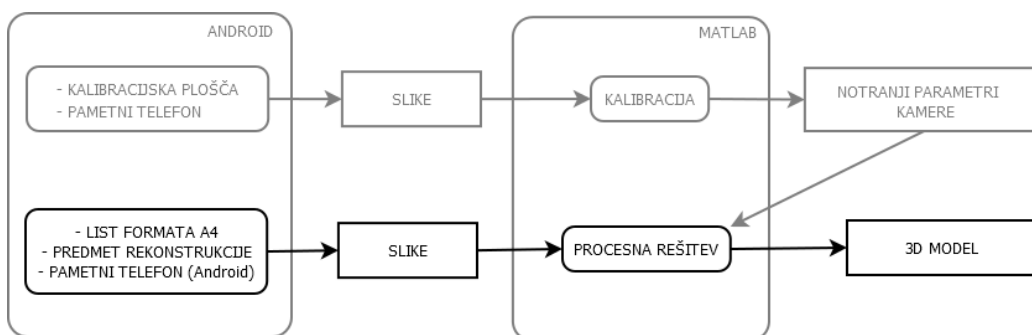
## Poglavje 6

# Implementacija rešitve

V tem poglavju je predstavljena implementacija rešitve. Problematiko 3D rekonstrukcije smo preučili, pregledali obstoječe tehnologije, metode obstoječih rešitev in jih nadgradili za potrebe naše rešitve. Težnja naše naloge je bila pripraviti takšno rešitev, da jo lahko uporablja čisto vsak uporabnik. To je bilo ključno izhodišče pri izdelavi rešitve, zato smo rešitev razdelili na 3 glavne korake: *kalibracijo notranjih parametrov kamere*, *mobilno aplikacijo* in *procesno rešitev*. Čisto vsak korak je pomemben pri doseganju končnega rezultata 3D rekonstrukcije objekta. V delu smo izdelali rešitev za dve vrsti 3D rekonstrukcije z namenom, da omogočimo rekonstrukcijo (skoraj) vseh vrst objektov. Kot navedeno v poglavjih obeh metod rekonstrukcij, je primerna izbira metode odvisna od teksture, oblike objekta in celo zunanjih dejavnikov kot je naprimer osvetlitev.

Metodologija rešitve je podrobneje opisana v spodnjih podpoglavjih. Za bolj jasno razumevanje rešitve, bomo podali praktični primer. Pri rešitvi potrebujemo A4 list, pametni telefon z operacijskim sistemom Android, računalnik in seveda objekt za rekonstrukcijo. Najprej s pametnim telefonom kalibriramo kamero, saj je na tržišču raznolikost kamer izjemno visoka in za doseganje najboljših rezultatov. Korak kalibracije izvedemo le pri prvi uporabi za vsako kamero. Po koraku kalibracije postavimo objekt na A4 list, uporabimo namensko mobilno aplikacijo in zajamemo slike s pametnim telefonom

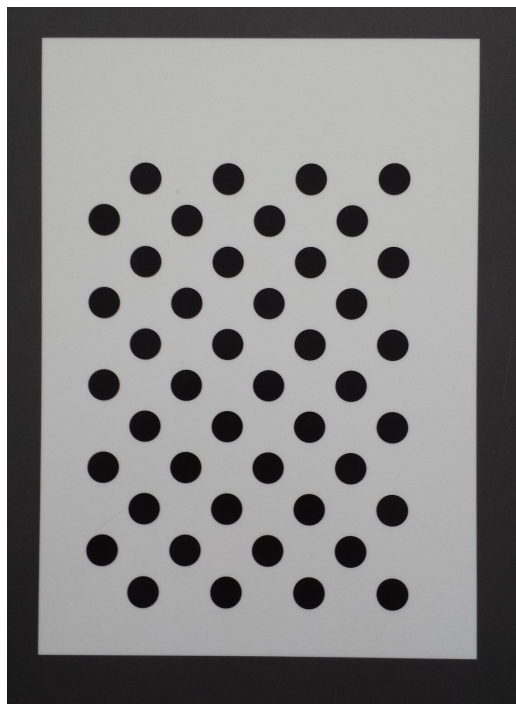
z različnih zornih kotov. Po zaključku zajema mobilna aplikacija pripravi arhivsko datoteko, ki vsebuje vse potrebne vhodne podatke enaki za obe metodi rekonstrukcije. Po pripravi podatkov z mobilno aplikacijo uporabimo arhivsko datoteko kot vhodni podatek izbrane metode in zaženemo procesno rešitev v obliki skripte. Primer metodologije je prikazan na Sliki 6.1.



Slika 6.1: Prikaz metodologije rešitve. Kalibracija se izvede samo enkrat ali pa se je ne izvaja (uporaba generičnih parametrov). Rezultat kalibracije so izračunani notranji parametri kamere. Pri 3D rekonstrukciji so koraki enaki kot pri kalibraciji, rezultat pa je 3D model.

## 6.1 Kalibracija

Kalibracijo izvedemo z OpenCV kalibracijskim orodjem Camera Calibraton. Pri izvedbi kalibracije je potrebno s kamero zajeti slike plošče z vzorci - običajno list formata A4 z natisnjenimi krogi enakih velikosti pri čemer so ti vzorci enakomerno razpršeni po listu kot je prikazano na Sliki 6.2. V naši rešitvi uporabljamo nesimetrično postavitve vzorcev. Z nesimetrično postavitvijo vzorcev sistem lažje detektira izhodiščno točko vzorcev. Ko imamo kalibracijsko ploščo pripravljeno, lahko začnemo s kalibracijo. Zajemamo lahko na dva načina in sicer s fiksno postavitvijo kamere ter premikanjem kalibracijske plošče ali fiksno postavitvijo kalibracijske plošče ter premikanjem kamere. Kalibracijsko ploščo zajamemo s kamero pri čemer zajemamo ob različnih zornih kotih. Paziti je potrebno le, da so pri zajemu vsi vzorci



Slika 6.2: Primer zajete slike kalibracijske plošče.

vidni. Za doseganje boljše kalibracije je priporočljivo zajeti vsaj 10 slik, v teoriji je mogoče kalibracijo izvesti tudi na dveh slikah, vendar so v takšnem primeru parametri kamere manj natančni. Zajete slike in dolžino vzorca uporabimo kot vhodne podatke OpenCV orodja Camera Calibrator preko Matlab vmesnika. Kalibracija parametrov kamere se izvaja po algoritmih opisanih v Poglavlju 3. Pri naši rešitvi potrebujemo le notranje parametre kamere pri čemer so parametri kalibracijske matrike obvezni, distorzije in ostali parametri pa opcijski. Opcijski parametri pripomorejo do natančnejših ocen zunanjih parametrov in posledično celotni 3D rekonstrukciji. V primeru, da ne želimo izvajati kalibracije, je mogoče uporabiti tudi generične parametre kalibracijske matrike. Ti parametri so splošni in nepopolni (npr. brez distorzij) ter vplivajo na slabšo natančnost 3D rekonstrukcije. Generični parametri so parametri predstavljeni v kalibracijski matriki  $K$  kjer glavne točke  $c_x$  in  $c_y$  ter goriščne razdalje izražene v slikovnih pikslih  $f_x$  ter  $f_y$  določimo kar glede

na dolžino  $w$  in višino  $h$  zajete slike po formuli:

$$K = \begin{bmatrix} w & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & h & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} .$$

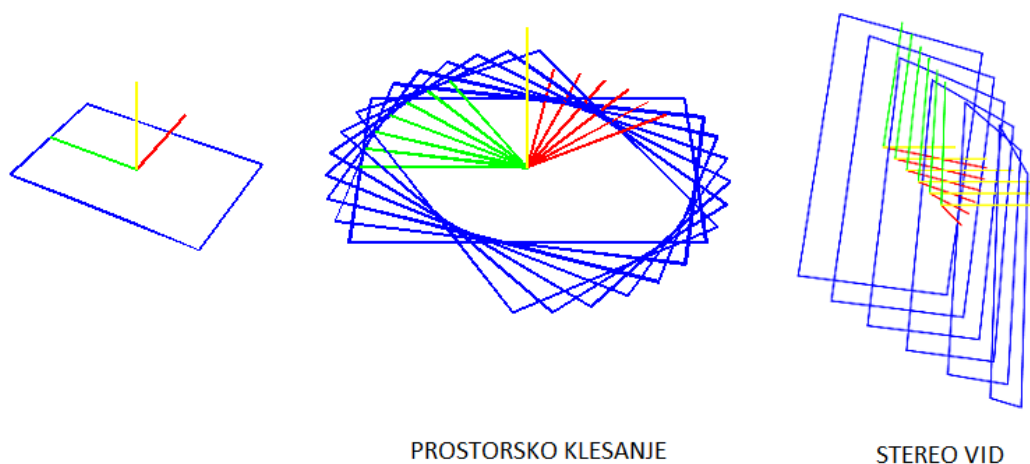
## 6.2 Mobilna aplikacija

Del končne rešitve je tudi izdelava mobilne aplikacije za Android operacijski sistem. Mobilna aplikacija je bila izdelana z namenom enostavnega zajema slik in ostalih podatkov objekta za rekonstrukcijo. Možna rešitev bi bila tudi uporaba že vgrajenih aplikacij za zajem slik, vendar bi morali dodatne podatke kot so referenčni okvirji A4 lista ročno vnesti. Mobilna aplikacija je zasnovana tako, da uporabniku olajša delo s podatki. Referenčni okvir lista formata A4 je zgeneriran z uporabo funkcije, ki jo je razvil T. Svoboda [34]. Funkcija generira perspektivne projekcije A4 lista glede na podane parametre kotov. V naši rešitvi generiramo perspektivne projekcije od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  okoli  $Z$  osi, torej okoli objekta postavljenega na A4 listu. Naklon kota je določen eksperimentalno glede na ravnino  $XY$ . Primer perspektivnih projekcij A4 lista so prikazani na Sliki 6.3. Pomembno je poudariti, da za metodo stereo vida generiramo drugačne perspektivne projekcije. Priporočljivo je namreč, da so zajeti pari slik kar se da vzporedno poravnani z minimalnimi horizontalnimi odstopanji, podobno kot človeške oči.

Aplikacija je implementirana z dvema zaslonskima maskama in sicer pri prvi zaslonski maski je potrebno izbrati metodo zajema ter opsijsko uporabo bliskavice, v drugi zaslonski maski pa uporabnik zajema slike. Izgled zaslonskih mask je prikazuje Slika 6.4.

Uporaba aplikacije je preprosta. Postavimo A4 list in nanj objekt za rekonstrukcijo. Z mobilno aplikacijo kamero čimbolj natančno poravnamo s perspektivno projekcijo referenčnega okvirja in zajamemo sliko. Postopek ponovimo in zajamemo določeno število slik glede na metodo zajema z različnimi perspektivnimi projekcijami, torej različnimi postavitvami kamere



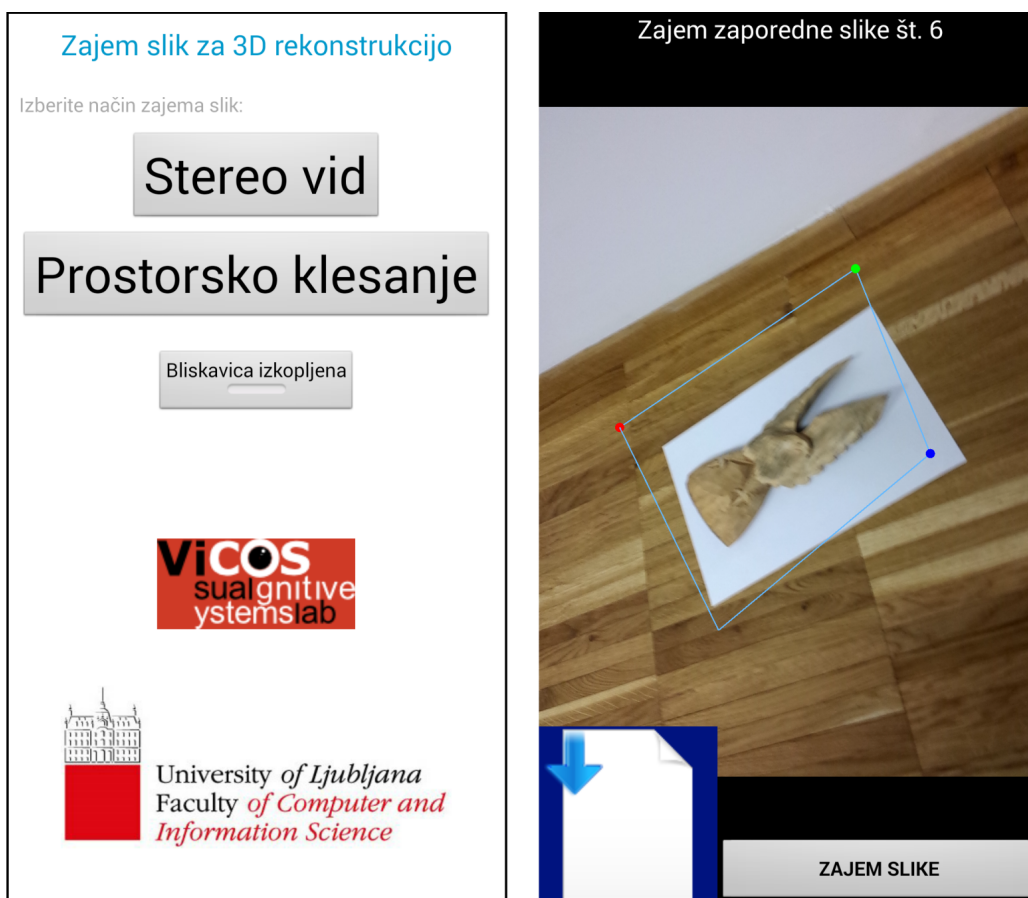


Slika 6.3: Primeri perspektivnih projekcij za prostorsko klesanje in stereo vid. Leva slika prikazuje referenčni okvir lista formata A4 z označenim koordinatnim sistemom.

glede na list formata A4 kot prikazuje primer zajema na Sliki 6.5. Lahko zajamemo tudi manjši nabor slik, minimalno dve sliki za postopek stereo vida in eno sliko za prostorsko klesanje. Manjši nabor slik načeloma pomeni manjšo natančnost končne 3D rekonstrukcije. Po zajemu slik z mobilno aplikacijo imamo na voljo arhivsko datoteko, ki vsebuje slike in lokacije oglišč referenčnih okvirjev na posamezni sliki. Arhivska datoteka je na voljo na pomnilniku mobilne naprave za kasnejšo obdelavo, mogoče pa ga je preko internetne povezave neposredno prenesti na strežnik, ki ima postavljen procesni del rešitve.

### 6.3 Procesna rešitev

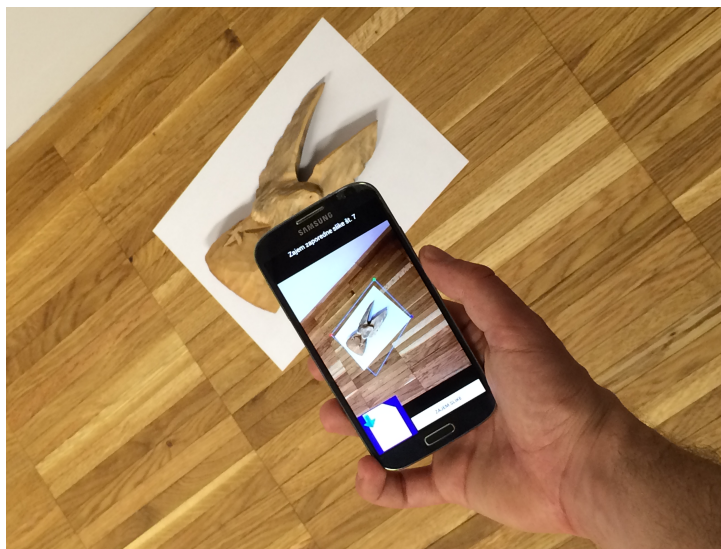
Zadnji korak implementacije je procesna rešitev. Procesna rešitev je bila izdelana z uporabo orodja Matlab. Bolj natančno, izdelana je bila z integracijo obstoječih funkcij in funkcij knjižnice *OpenCV* v obliki razvojnega orodja *mexopencv* [35]. Nekatere obstoječe rešitve [36, 37] so bile bistveno prilagojene ali na novo implementirane, da so zadovoljile potrebe naše rešitve.



Slika 6.4: Zaslonska maska pri zagonu aplikacije levo in zaslonska maska med zajemom. Referenčni okvir ima označeno koordinatno izhodišče z zelenim krogom kot je razvidno na desni sliki.

Z uporabniškega vidika sta na voljo dve skripti za vsako rekonstrukcijsko metodo posebej. Vhodni podatki skript so:

- *arhivska datoteka ali absolutna pot vsebine slik s parametri, tabela indeksov parov slik (leva in desna), prikaz delnih rezultatov, shrani oblak točk v datoteko, pri uporabi metode stereo vid in*
- *arhivska datoteka ali absolutna pot vsebine slik s parametri, prikaz delnih rezultatov, shrani oblak točk v datoteko, indeksi slik (opcijsko), pri uporabi metode prostorsko klesanje.*



Slika 6.5: Prikaz zajema slik z mobilno aplikacijo. Modri (referenčni) okvir poravnamo z A4 listom in sliko zajamemo.

Izhodni podatek skript je 3D oblak točk rekonstruiranega predmeta - prikaz z možnostjo shranjevanja v PLY datotečni format. Poleg osnovnih skript je možno prilagajati posamezne parametre funkcij npr. ročno risanje referenčnega okvirja v primerih, ko list formata A4 ni bil zaznan, prilagoditev območja iskanja lista formata A4 glede na referenčni okvir, gostota začetnega oblaka točk pri prostorskem klesanju in drugi parametri. Poleg omenjene krovne funkcionalnosti procesne rešitve so v procesni rešitvi tudi skripte evalvacijskih testov in kalibracije.



# Poglavje 7

## Eksperimentalni rezultati

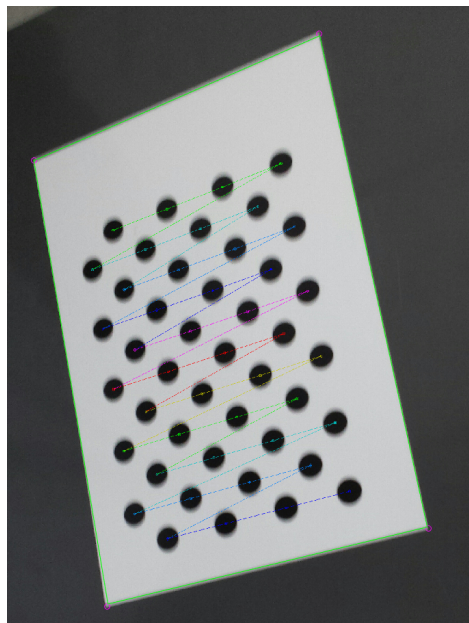
V tem poglavju bomo predstavili evalvacijo rezultatov našega dela. Predstavili bomo tako kvantitativne kot kvalitativne rezultate. Sklop evalvacije smo razdelili na manjše segmente glede na uporabljeno evalvacijsko metodologijo.

Najprej predstavimo evalvacijo zunanjih parametrov kamere. Nato predstavimo kvantitativno evalvacijo 3D modelov zgrajenih z metodama *Stereo vid* in *Prostorsko klesanje*. Na koncu predstavimo še kvalitativne rezultate obeh rekonstrukcijskih metod.

### 7.1 Evalvacija ocene zunanjih parametrov kamere

V poglavju 3 je bil predstavljen postopek izračuna parametrov kamere. Pri notranjih parametrih kamere uporabimo rezultate izdelane z OpenCV kalibracijo. Zunanje parametre določamo na podlagi detektiranih ogljišč našega referenčnega objekta (lista formata A4) in izračuna homografije, zato je smiselno te rezultate vrednotiti. Pri evalvaciji uporabimo referenčno podlago, ki zadošča pogojem naše rešitve, in sicer list formata A4, ter OpenCV kalibracijo. Pri slednji uporabimo A4 list, ki ima na površini enakomerno postavljene kroge enakih dimenzij. Pomembno je, da so krogi na listu postavljeni nesimetrično, saj na tak lahko način določimo izgođišče lista. Takšen referenčni

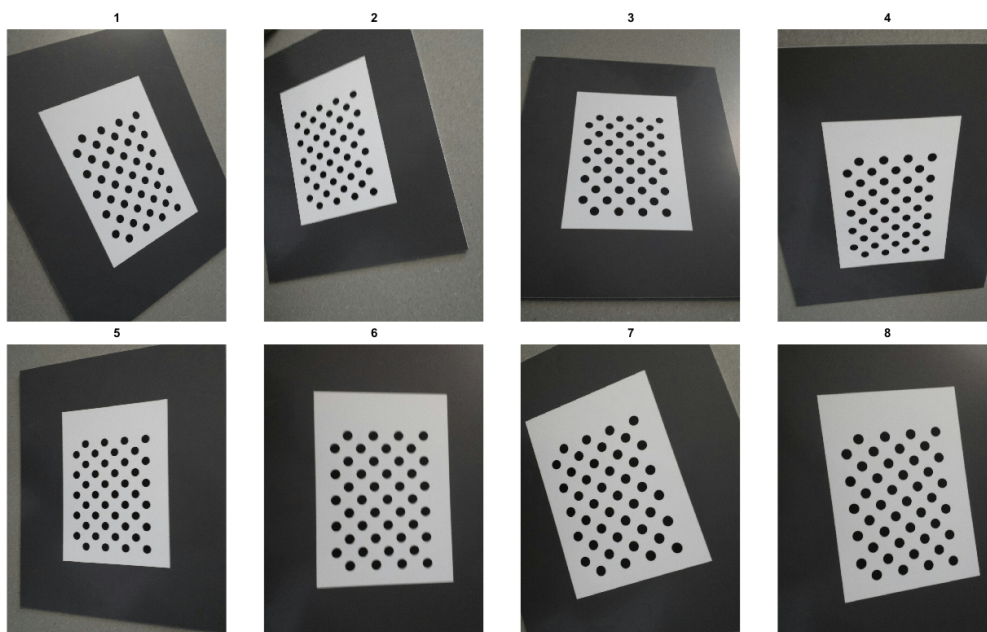
objekt za evalvacijo z detekcijo obeh evalvacijskih metod prikazuje Slika 7.1.



Slika 7.1: Kalibracijska plošča velikosti A4 s črnimi krogi premera  $2\text{cm}$ , kjer je razvidna detekcija krogov z OpenCV kalibracijsko metodo in detekcija ogljišč lista formata A4 z našo metodo.

Evalvacija poteka tako, da najprej poslikamo kalibracijsko ploščo z različnih zornih kotov. Slike kalibriramo z OpenCV kalibracijskim orodjem, kjer dobimo notranje in zunanje parametre kamere. Orodje je bilo izdelano po raziskovalnih delih s področja kalibracije kamer in definiciji njihovih parametrov [24, 38, 39, 40]. Notranje parametre kamere uporabimo kar z obstoječe kalibracije tudi pri detekciji ogljišč lista formata A4 z našo metodo, zato da bodo evalvirani rezultati bolj objektivni. Zunanje parametre določimo na podlagi detektiranega lista formata A4 s katerega na podlagi homografije izračunamo rotacijo in pozicijo kamere. Zunanja parametra rotacije in pozicije kamere primerjamo s parametri OpenCV kalibracije in izračunamo njihove povprečne napake. Slika 7.2 prikazuje zajete kalibracijske plošče uporabljene v evalvaciji. Rezultati kalibracije na 8 slikah z različnih pogledov na

referenčni objekt so prikazani v tabeli 7.1.



Slika 7.2: Prikaz slik uporabljenih pri evalvaciji zunanjih parametrov kamere.

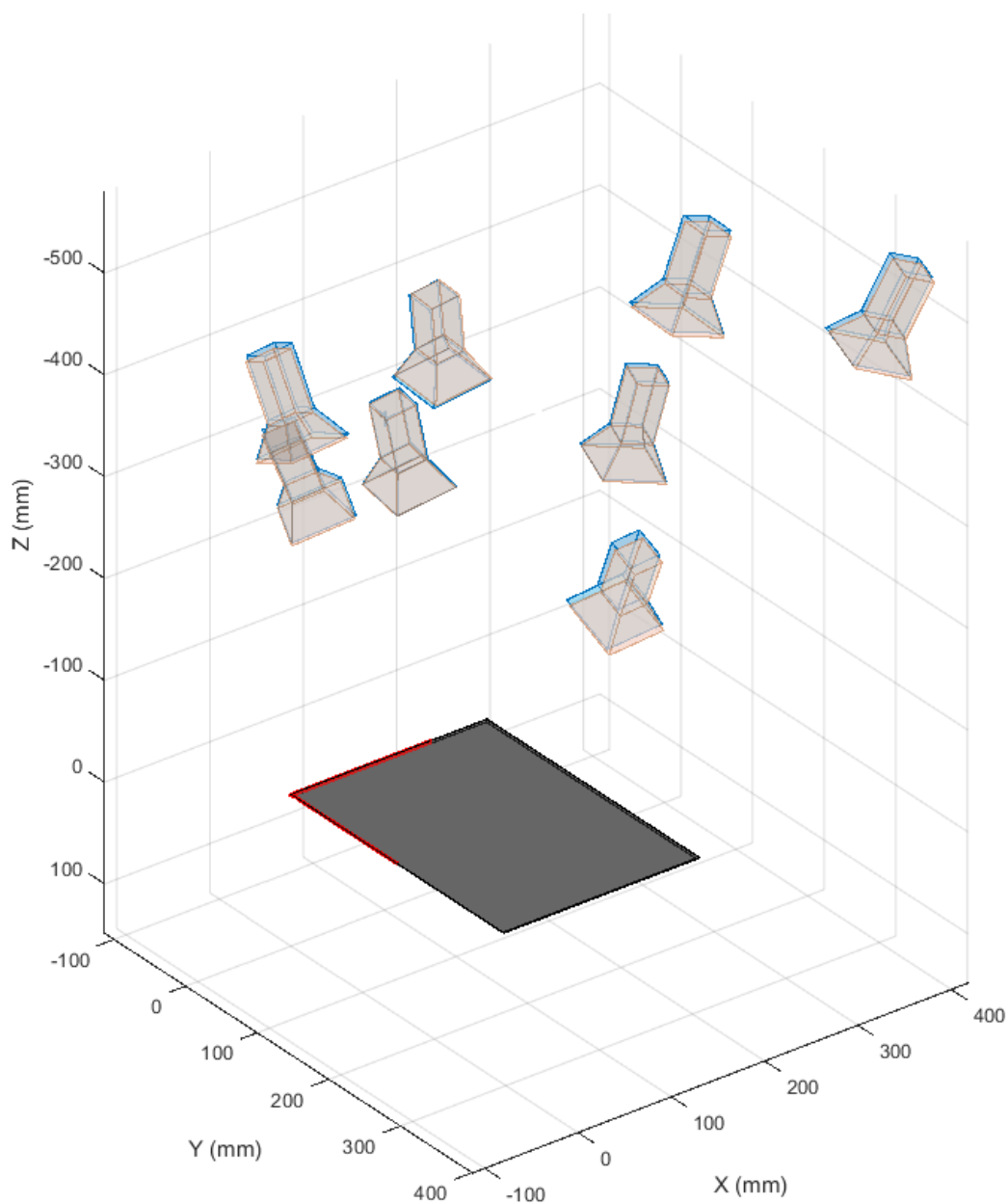
Slika	Napaka orientacije kamere [°]	Napaka pozicije kamere [mm]
1	0,31	5,04
2	0,56	9,52
3	0,86	6,22
4	0,88	5,76
5	0,31	6,31
6	0,37	9,71
7	0,31	5,65
8	0,14	6,33
povprečje	0,46	6,80

Tabela 7.1: Tabela z rezultati evalvacije zunanjih parametrov kamere.

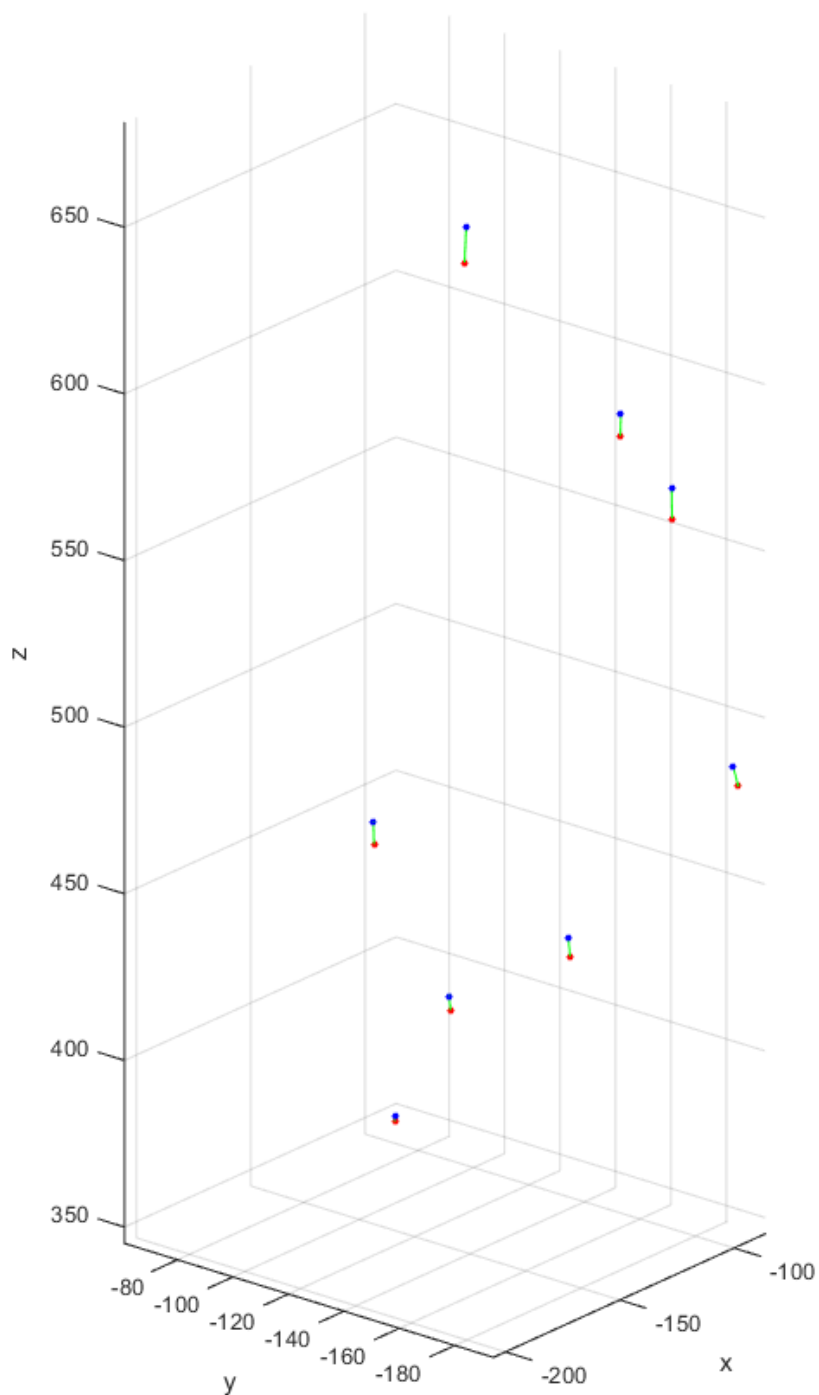


Iz rezultatov lahko povzamemo, da naš sistem dosega minimalne napake v primerjavi z OpenCV rešitvijo. Skupna povprečna napaka orientacije kamere znaša  $0.46^\circ$ , skupna povprečna napaka pozicije kamere pa znaša  $6,8\text{mm}$ . Napake so lahko tudi posledica OpenCV kalibracijske metode, saj ta ni vedno nujno najbolj natančna. Pogostejše napake so običajno posledica neostre slike (šuma) pri zajemu, pomečkan list itd. Robovi lista so v takšnih primerih manj natančno ocenjeni, kar se odraža tudi pri napakah rekonstrukcijskih metod, saj se te namreč seštevajo. Lege kamer v prostoru glede na referenčni objekt obeh metod prikazuje Slika 7.3. Glede na to, da so napake minimalne, so pozicije kamer nazorneje prikazane na Slikah 7.4 in 7.5.

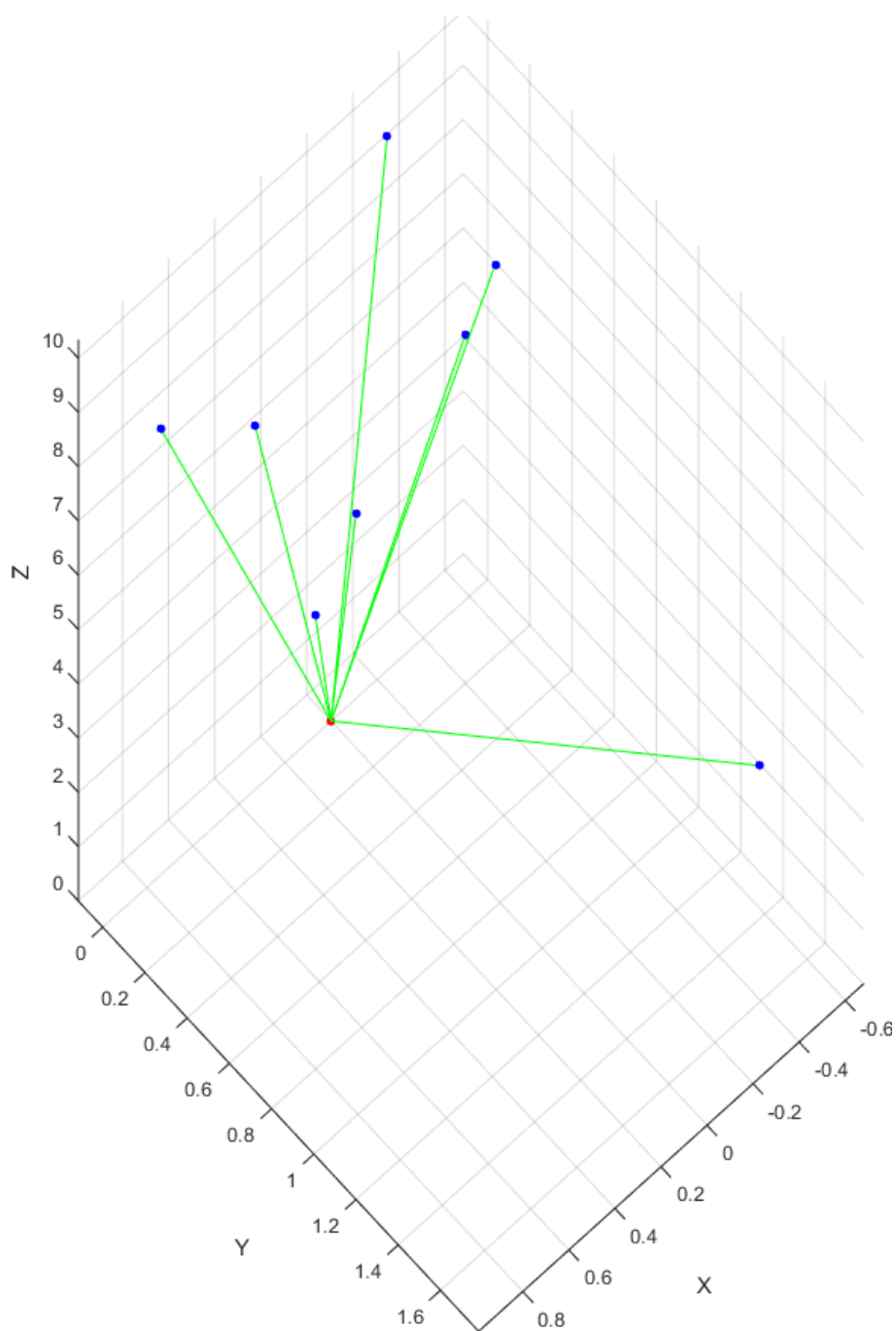
Kljub temu, da naša metoda pozicijo kamere določa na podlagi štirih točk, OpenCV kalibracijska metoda pa na 44 točkah (središčih krogov), so rezultati obeh metod primerljivi. Naša metoda je torej primerna tudi za uporabo pri evalvaciji 3D rekonstrukcijskih metod.



Slika 7.3: Na sliki so prikazane postavitve kamer v prostoru glede na A4 list. Modre kamere prikazuje kalibracijo zunanjih parametrov kamere z OpenCV kalibracijo (iz 44 krogov), oranžne kamere pa kalibracijo izvedeno z našo metodo (iz štirih ogljišč lista formata A4). Odstopanja med posameznimi pari kamer so minimalne.



Slika 7.4: Razdalje med kamerama v prostoru.



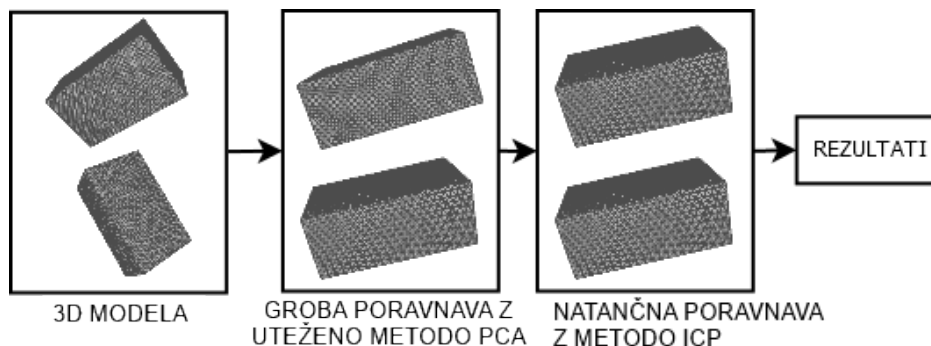
Slika 7.5: Razdalje med kamerama. Rdeča točka je referenčna kamera (OpenCV), modre točke so pa rezultati pozicij kamer naše ocene lege kamer.

## 7.2 Metodologija evalvacije natančnosti 3D rekonstrukcije

Evalvacija 3D objektov poteka po jasno začrtani metodologiji. Kvantitativne rezultate bomo merili z uporabo oblaka točk referenčnega 3D modela (ang. ground truth) in ga primerjali s 3D rekonstrukcijami stereo vida in prostorskega klesanja. V obzir bomo vzeli tudi napako 3D modelov zaradi posledic šuma na podatkih, omejitvah posameznih rekonstrukcijskih metod in napak ocen kamer. Uporabili bomo različne mere opustitev 3D točk v samem modelu in te napake lokalizirali. Izvajali bomo registracijo rekonstruiranega 3D modela nad referenčnim modelom. Registracija je postopek poravnave točk, v našem primeru poravnava oblakov točk. Cilj registracije je transformacija enega izmed oblaka točk (3D rekonstruiranega oblaka točk) z drugim (pravimo oblakom točk) kjer želimo doseči čimboljše prekrivanje obeh oblakov točk. Za doseganje kar se da objektivnih rezultatov bomo uporabili različne metrike iterativne metode najbližje točke (ang. ICP - Iterative Closest Point) [41]. Metoda deluje tako, da iterativno išče najbližje ujemanje med oblakoma točk in zaključi izvajanje, ko je dosežen globalni minimum napake. Z namenom da število iteracij v ICP metodi minimiziramo, modele pred evalvacijo poravnamo z variacijo metode glavnih komponent (ang. PCA - Principal Component Analysis) [42] oz. natančneje utežene PCA (ang. weighted PCA). Oris poteka evalvacije je prikazan na Sliki 7.6. Če omenjeno metodologijo povzamemo, je cilj metodologije poravnava našega modela z referenčnim modelom in vrednotenje napak na našem 3D modelu.

### 7.2.1 Utežena PCA

Splošna metoda glavnih komponent se v osnovi uporablja za redukcijo dimenzij, ko želimo poiskati takšno linearno transformacijo vhodnih podatkov, ki bo naše podatke zapisala v nizkodimenzionalnem ortogonalnem podprostoru [42]. Pri tem je izguba informacije pri predstavitvi podprostora nižje dimenzije minimalna. V našem delu smo uporabili uteženo metodo PCA za



Slika 7.6: Vhodna podatka sta oblaka točk - referenčni in naš 3D model. V drugem koraku 3D modela grobo poravnamo z uteženo metodo PCA. V tretjem koraku izvedemo evalvacijo s postopkom natančne poravnave (ICP) 3D modelov.

poravnavo oblaka točk v 3D koordinatnem sistemu [43]. Cilj utežene PCA je z učnih množic, v našem primeru oblakov točk, le te poravnati v koordinatno izhodišče na osnovne koordinate 3D koordinatnega sistema.

Pri opisu utežene PCA izhajamo z osnovne različice, ki jo opisujejo sledeči koraki:

1. Najprej zgradimo matriko  $X$  velikosti  $m \times N$  pri čemer  $N$  vhodnih podatkov zložimo zaporedno v obliki  $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ .
2. Izračunamo srednjo vrednost podatkov:  $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ .
3. Podatke centriramo:  $X_d = [x_1 - \mu, x_2 - \mu, \dots, x_N - \mu]$ .
4. Izračunamo konvariančno matriko:

$$C = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T = \frac{1}{N-1} X_d X_d^T$$

5. Izračunamo SVD (ang. Singular Value Decomposition) konvariančne matrike  $C = USV^T$ , kjer je matrika  $U$  velikosti  $m \times m$ , njeni stolpci pa predstavljajo lastne vektorje matrike  $C$ . Pripadajoče lastne vrednosti so shranjene v diagonalni matriki  $S$  in so padajoče urejene. Stolpci  $U$  predstavljajo ortogonalno bazo oz. podprostor, lastne vrednosti pa

narekujejo raztros vhodnih podatkov vzdolž posameznega lastnega vektorja.

6. Nov vhodni podatek  $x_q$  projeciramo v PCA podprostor tako, da ga najprej centriramo z  $\mu$ , nato pa pomnožimo z matriko lastnih vektorjev po formuli  $y = U^T(x_q - \mu)$ .
7. Rekonstrukcija točk iz podprostora v ortogonalni prostor se izračuna po obratni enačbi in sicer  $x_q = Uy + \mu$ .

Težnja utežene metode PCA je minimizacija vplivov neenakomernih velikosti podatkov (velikosti povezav), kar bi sicer vplivalo na neenakomerno poravnavo na videz podobnih oblakov točk. Poravnava oblakov točk je manj pristranska pri poravnavi oblaka točk v primerjavi s splošno metodo, saj upošteva neenakomerno razpršitev točk na oblaku točk. Utežena metoda PCA za 3D oblake točk se izvaja na točkah in povezavah, kateri tvorijo trikotnike. Torej podatki za izvedbo utežene metode PCA so vse povezave, ki povezujejo natanko tri točke. V primeru, da so povezave višjih dimenzij, teh ne upoštevamo. Za vsak trikotnik najprej izračunamo centroid po formuli:

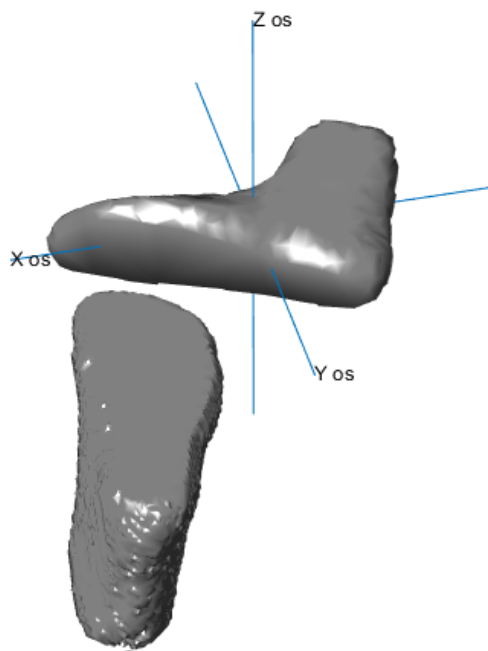
$$F_i = \frac{P_{1,i} + P_{2,i} + P_{3,i}}{3},$$

kjer so  $P_{1,i} = (x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_{2,i} = (x_2, y_2, z_2)$  in  $P_{3,i} = (x_3, y_3, z_3)$ . Za vsak trikotnik izračunamo ploščino  $A_i$ , z vseh ploščin pa še povprečen centroid. Centriranje podatkov se izračuna tako, da centroidom odštejemo povprečno vrednost centroida in dobimo matriko  $M_i$ . Uteženo konvariančno matriko  $C_{weighted}$  velikosti  $3 \times 3$  izračunamo tako, da najprej poravnane podatke pomnožimo s kvadratnim korenem površin  $D_i = M_i \sqrt{A_i}$  in to uporabimo v formuli:

$$C_{weighted} = \frac{D}{m-1} \cdot D^T,$$

kjer je  $m$  število povezav v oblaku točk. Naslednji koraki so enaki kot pri osnovni različici PCA, torej od 5. koraka naprej. V naši rešitvi metoda služi za grobo poravnavo oblakov točk, kar signifikantno zmanjša število iteracij v

ICP metodi. Primer poravnave 3D modela z opisano metodo je prikaza na Sliki 7.7.



Slika 7.7: Slika prikazuje neporavnan oblak točk izven označenih koordinatnih osi in oblak točk poravnan ter premaknjen v koordinatno izhodišče pri uporabi utežene metode PCA.



### 7.2.2 Iterativna metoda najbližje točke

Registracija oblakov točk poteka z ICP. Metoda prejme dva podatka: 3D oblak točk referenčnega modela in 3D rekonstruiran oblak točk. Slednjega na podlagi referenčnega modela evalviramo pri čemer uporabimo različne parametre. Parametri ICP evalvacije so:

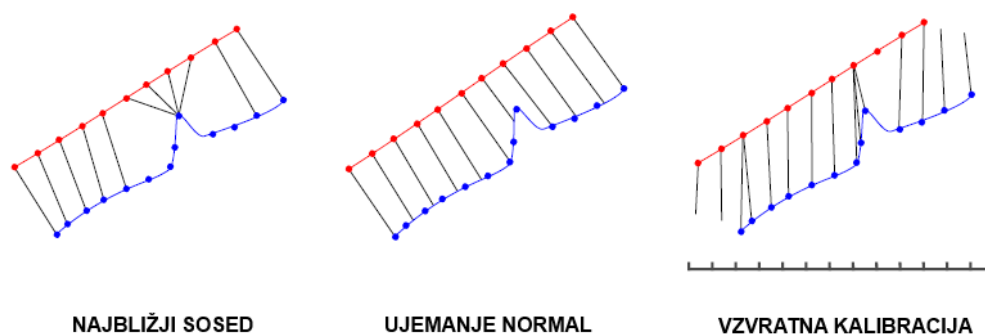
- izbira točk,
- opuščanje 3D točk,
- strategija ujemanja,
- metrike napake in
- poravnava 3D modela.

**Izbira točk** pri evalvaciji je v našem primeru kar celoten 3D model. Vsaka rekonstrukcijska metoda ne zgradi modela z idealno postavitvijo 3D točk. Najpogostejša anomalija je redundanca točk, ki se pojavi pri ravnih ploskvah. Koristno je vsak 3D model pred ICP postopkom poenostaviti. Poenostavitev 3D modela je postopek enakomerne raspršitve oblaka točk pri čemer število točk minimiziramo in odpravimo redundanco [44]. Nov oblak točk je tako manj gost in pohitri izvajanje ICP-ja.

**Opuščanje 3D točk** je pomemben parameter ICP-ja. Pri rekonstrukcijskih metodah pogosto prihaja do šuma zaradi segmentacije, različnih osvetlitev na slikah, slabe ocene fokusa kamere pri zajemu slik in drugih zunanjih vplivov. Kljub pojavitvi napak pri 3D rekonstrukcijskih metodah je moč te napake odstraniti pri ICP- postopku. Za to poskrbi stopnja opuščanja točk, ki je določena v odstotkih, torej se izbran odstotek najslabših ujemanj zavrže.

**Ujemanje** je parameter, ki določa na kakšen način točke s referenčnega oblaka točk primerjamo z našim rekonstruiranim 3D modelom. Obstaja več vrst strategij jemanja: ujemanje na podlagi normal (ang. normals shooting), ujemanje z vzvratno kalibracijo (ang. reverse calibration) in ujemanje najbližjega soseda (ang. nearest neighbors). Slednji je najbolj pristranski,

vendar pa po drugi strani vrača najboljše rezultate. Prikaz ICP strategij ujemanja v 2D prostoru je prikazan na Sliki 7.8.



Slika 7.8: Primer strategij ujemanja. Modre točke predstavljajo točke referenčnega 3D modela, rdeče točke pa točke 3D modela s katerimi preverjamo ujemanje. Izbira najboljšega sosedja vrača najboljše rezultate [41].

**Metrika napake** je ciljna funkcija s katero ocenimo stopnjo napake ujemanja v vsaki iteraciji ICP-ja. Poznamo več metrik: točka s točko (ang. point to point), točka s ploskvijo (ang. point to plane), točka s točko z ekstrapolacijo (ang. point to point with extrapolation), Lovenberg-Marquardt in druge. Prvi dve sta najbolj standardni metriki, zato smo jih v naši evalvaciji uporabili. Metrika točka s točko [46] napako izračuna z vsoto kvadratov razdalje točk referenčnega modela s točkami modelov za evalvacijo. Izračun napake je ponazorjen s formulama:

$$E_{point} = \sum_{i=1}^N ||R \cdot P_i + t - Q_i||^2$$

Točke rekonstruiranega 3D modela  $P$  najprej poravnamo z uporabo rotacijske matrike  $R$  in translacijskega vektorja  $t$  zadnje iteracije metode ICP. Poravnanim točkam 3D modela  $P$  odštejemo točke referenčnega 3D modela  $Q$  in izračunamo kvadrate razdalij. Nato dobljeno povprečimo in na koncu kvadratno korenimo, da dobimo oceno napake  $E_{point}$ . Metrika točka s ploskvijo napako izračuna z vsoto razdalj točk s tangencialno ravnino na referenčnem modelu. Predstavljena je s fomulo

$$E_{plane} = \sum_{i=1}^N [(R \cdot P_i + t - Q_i) \cdot n_i]^2,$$

kjer vektor  $n$  predstavlja tangencialne normale točk referenčnega 3D modela. Takšen način merjenja napake  $E_{plane}$  običajno vrača boljše rezultate, saj ocena napake poteka med točko (rekonstruiranega 3D modela) in ploskvijo referenčnega 3D modela. Pri uporabi te metrike poenostavitve 3D modela ni obvezna za doseganje boljših rezultatov.

**Poravnava 3D modela** opisuje translacijo  $t$  in rotacijo  $R$  našega 3D modela glede na referenčni 3D model. Pri izbiri metrike napake točka s točko, minimizacijo napak dosežemo z metodo SVD (ang. Singular Value Decomposition) ter novo oceno parametrov ( $R$  in  $t$ ). V primeru, da izberemo metriko napake točka s ploskvijo, je potrebno rotacijsko matriko  $R$  linearizirati, kot je predlagal [47].

Delovanje metode ICP ponazarja sledeč algoritem:

---

**Algoritem 3:** Metoda ICP.

---

**Vhodni podatki:** referenčni 3D model, testni 3D model, ICP parametri

**Rezultati:** povprečna napaka

$i = 0$ ; // št. iteracije

razlika\_napak = 0.001;

**dokler**  $napaka(i - 1) - napaka(i) > razlika\_napak$  **izvajaj**

izračun ujemanja med modeloma;

napaka = izračun napake glede na metriko;

**če odstotek opustitve točk > 0 potem**

    napaka = napaka z upoštevanjem opustitve točk;

**konec**

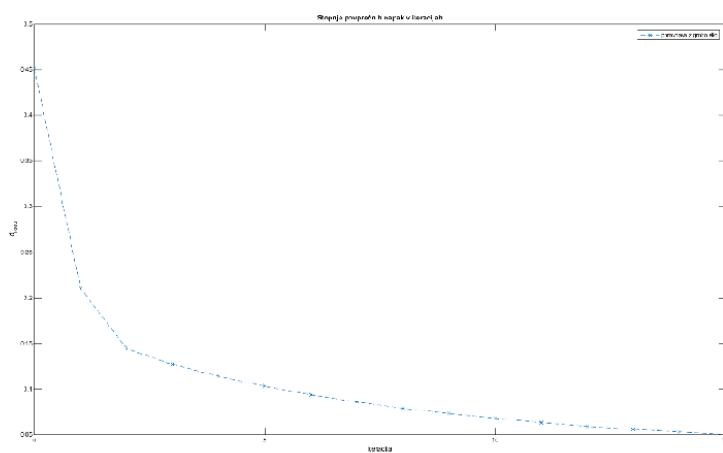
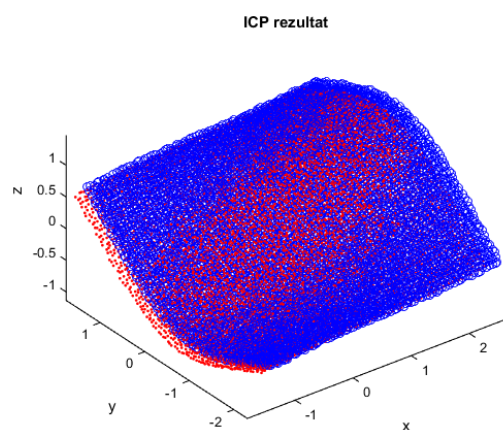
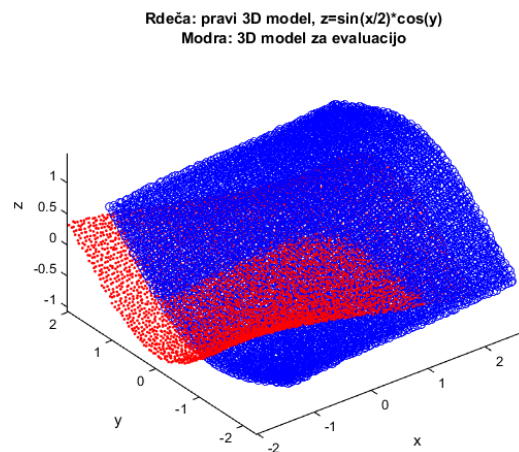
poravnava 3D modela;

$i = i + 1$ ;

**konec**

---

V naslednjem poglavju bomo metodo ICP uporabili za evalvacijo 3D rekonstruiranih modelov z obema rekonstrukcijskima metodoma. Prikaz delovanja metode ICP na preprostih 3D modelih ponazarja Slika 7.9.



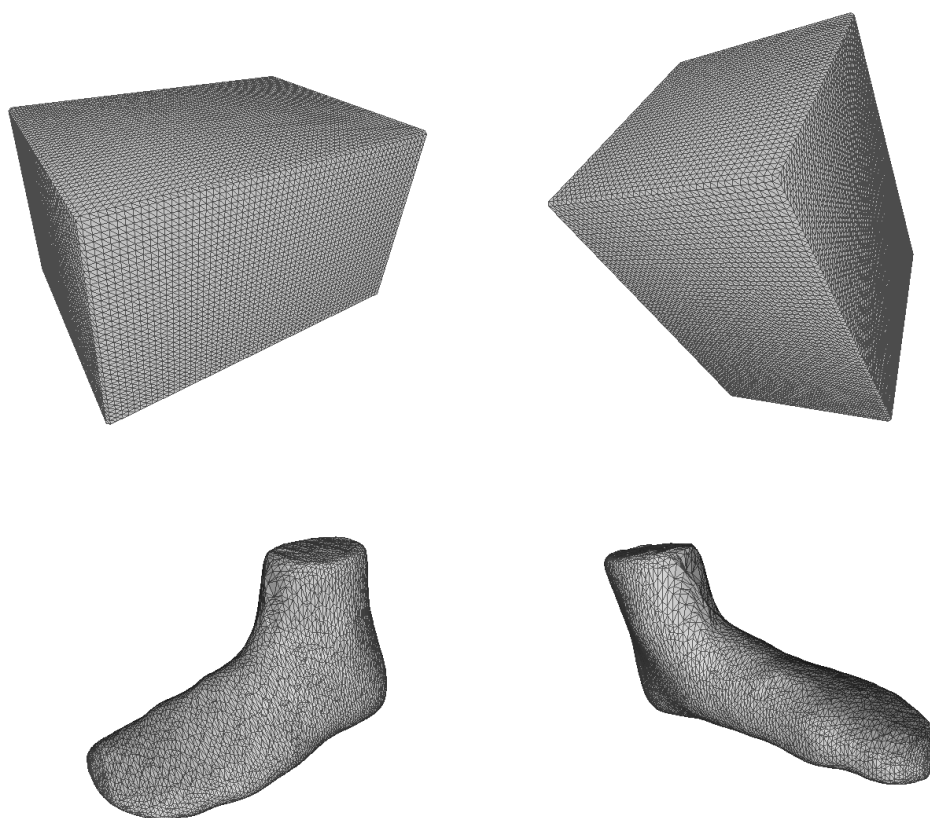
Slika 7.9: Primer delovanja metode ICP t referenčnim 3D modelom funkcije  $z = \sin(\frac{x}{2}) \cdot \cos(y)$  in 3D modelom z umetno dodanim šumom.

## 7.3 Evalvacija metod

V tem poglavju bomo predstavili dve vrsti evalvacije in sicer:

- **kvantitativna evalvacija** izvedena po predstavljeni metodologiji in,
- **kvalitativna evalvacija** izvedena z različnimi predmeti, kjer ponazorimo različne lastnosti rekonstrukcijskih metod.

Kvantitativna evalvacija 3D modelov se izvaja na dveh različnih predmetih: *kvader* dimenzij  $70 \times 100 \times 60 \text{ mm}$  (DxŠxV) in *3D model stopala* dolžine  $209 \text{ mm}$  in širine  $87 \text{ mm}$ . Izbrali smo ta dva predmeta, ker smo imeli na voljo njihune referenčne 3D modele teh predmetov. Referenčni 3D model stopala je bil izdelan z industrijskim 3D merilnikom, referenčni 3D model kocke pa je bil narejen na osnovi poznane 3D CAD modela. Izgled referenčnih 3D modelov je viden na Sliki 7.10. Pri vrednotenju rezultatov se osredotočamo le na obliko 3D modela in ne na barvo. Obema modeloma smo za vsako rekonstrukcijsko metodo prilagodili teksturo objektov z namenom, da se ognemo omejitvam. Za metodo prostorskega klesanja smo objekta zatemnili in se izognili morebitnim težavam pri segmentacijskem koraku metode. Za metodo stereo vida pa smo teksturo prilagodili tako, da je zaznava značilik čimboljša in posledično gostejša in natančnejša rekonstrukcija 3D modela. Cilj kvalitativne evalvacije je vrednotenje napak med referenčnim 3D modelom in našimi 3D rekonstrukcijami - poleg skupne povprečne napake bomo le te še dodatno analizirali glede na velikostni red napake v korelaciji z točkami.



Slika 7.10: Zgornji del slike prikazuje referenčni 3D model kvadra z različnih zornih kotov, spodnji del slike pa referenčni 3D model stopala. Kvader sestavlja 13.512 točk in 27.020 povezav, stopalo pa 5.977 točk in 11.950 povezav.

Kvalitativna evalvacija 3D modelov je bila izvedena na različnih predmetih. Glede na teksturo predmeta se izbere ustrezno rekonstrukcijsko metodo. Cilj te evalvacije je predstavitev delovanja rekonstrukcijskih metod na predmetih in prikaz njihovih omejitev. V nadaljevanju so predstavljeni rezultati evalvacij.

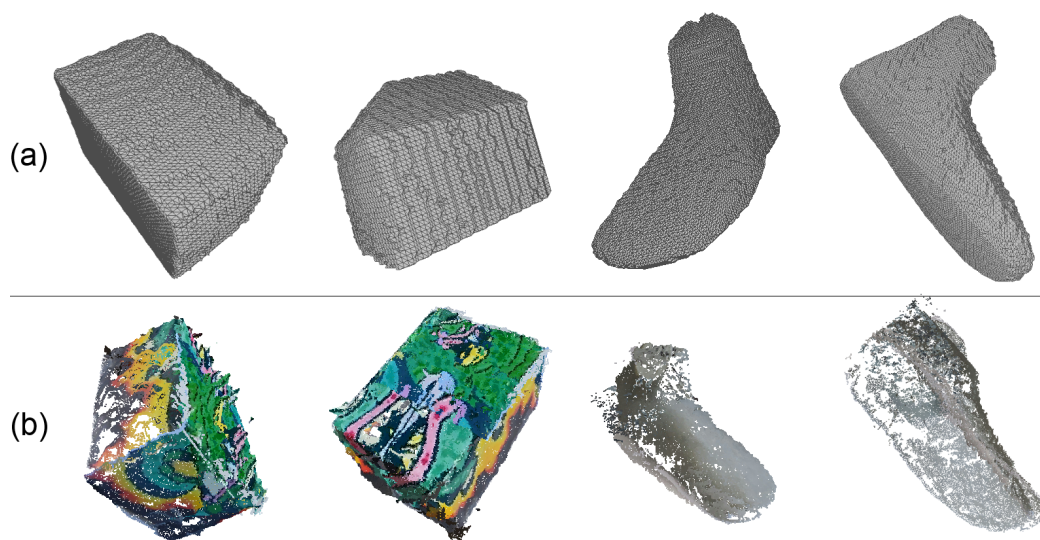
### 7.3.1 Kvantitativni rezultati

Kvantitativni rezultati so dobljeni z uporabo omenjene metodologije, pri kateri smo pri metodi ICP izbrali parametre: *izbira vseh točk, brez opuščanja točk*, metrika napake ter poravnava 3D modela *točka s ploskvijo* in ujemanje *najbližjega soseda*. Pomembno je poudariti, da smo metode izvajali ob uporabi prevzetih parametrov (brez prilagajanja), da so rezultati kar se da objektivni. Prilagodili smo le teksture 3D modelov, da bi se izognili morebitnim težavam (npr. segmentacija pri prostorskem klesanju in iskanje korespondenc pri stereo vidu). Pri metodi *stereo vid* smo prilagodili teksturo za model kvadra tako, da smo ji zalepili barvno sliko okoli vseh ploskev. Na takšen način metodi olajšamo iskanje značilk. Model stopala nismo prilagajali, saj ima že sam model hrapavo površino. Pri dobri osvetlitvi zajema nismo naleteli na težave pri rekonstrukciji tega modela. Pri metodi *prostorsko klesanje* smo obema modeloma teksturo spremenili na črno. Pri modelu stopala smo zaradi tega ustvarili dodatno napako pri rekonstrukciji, ki jo omenimo v nadaljevanju.

Izgled prilagojenih tekstur modelov je prikazan na Sliki 7.11. Izgled rezultatov 3D rekonstrukcij je prikazan na Sliki 7.12. V tabeli 7.2 so prikazani rezultati evalvacije izvedeno po predlagani metodologiji.



Slika 7.11: Črna predmeta na zgornjem delu slike se uporabljata pri metodi prostorskega klesanja, predmeta na spodnjem delu slike pa pri metodi stereo vid.



Slika 7.12: Na sliki so prikazani rezultati 3D modelov in sicer (a) s prostorskim klesanjem ter (b) s stereo vidom. Pri prostorskem klesanju dobimo poleg točk tudi povezave, pri stereo vidu pa samo točke. Evalvacija povezav se v naši evalvacijski metodologiji ne izvaja.



METODA	PREDMET / št. slik	število točk	povprečna napaka [mm]	mediana [mm]	standardna deviacija [mm]	največja napaka [mm]
STEREO VID	stopalo / 6	32.605	8,34	6,43	5,30	37,89
	kvader / 8	42.625	2,53	1,98	1,59	26,04
PROSTORSKO KLESANJE	stopalo / 17	15.372	3,61	3,03	1,97	17,42
	kvader / 16	9.756	6,09	4,37	4,24	22,10

Tabela 7.2: Tabela kvantitativnih rezultatov.

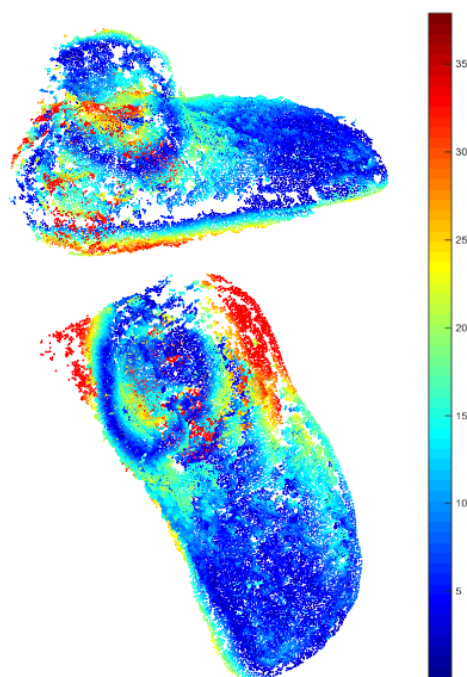
Na Sliki 7.13 je prikazan 3D model stopala s porazdelitvijo napak pri izbiri metode stereo vid. Na Sliki 7.14 je prikazan 3D model stopala s porazdelitvijo napak pri izbiri metode prostorsko klesanje. Na Sliki 7.15 je prikazan 3D model kvadra s porazdelitvijo napak pri izbiri metode stereo vid. Na Sliki 7.16 je prikazan 3D model kvadra s porazdelitvijo napak pri izbiri metode prostorsko klesanje. Na Slikah 7.17, 7.18, 7.19 in 7.20 so prikazani histogrami napak metod na obeh predmetih.

Z rezultati s tabele, slik in histogramov smo dokazali uspešno delovanje rekonstrukcijskih metod. Vsako metodo bomo na podlagi rezultatov vrednotili.

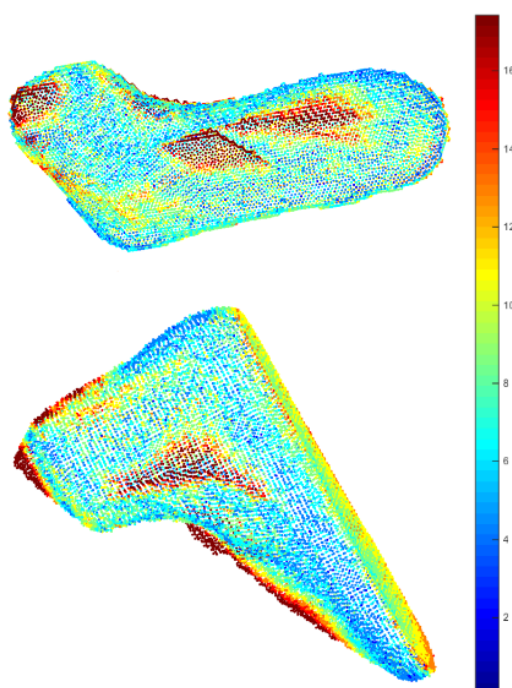
Metoda *Stereo vid* zgradi 3D modele z manjšega nabora slik, št. točk v 3D modelu pa je odvisna od oddaljenosti zajema in od velikosti zajetih slik. Torej, če slike skaliramo v manjše dimenzije, dosežemo manjšo gostoto 3D oblaka točk. Metoda vrača boljše rezultate na predmetu kvadra, saj ni potrebe po nizkem zajemu slik. Pri predmetu stopala pa metoda deluje slabše zaradi relativno visoke homogenosti teksture. Posledica tega je slabša detekcija značilnk in manj natančna gradnja disparitetne mape, kar se odraža

v osamelih točkah (ali gručah točk). Kljub omenjenim težavam povprečna napaka ne presega meje  $1\text{cm}$ , najvišjih napak pa je glede na število vseh točk zelo malo.

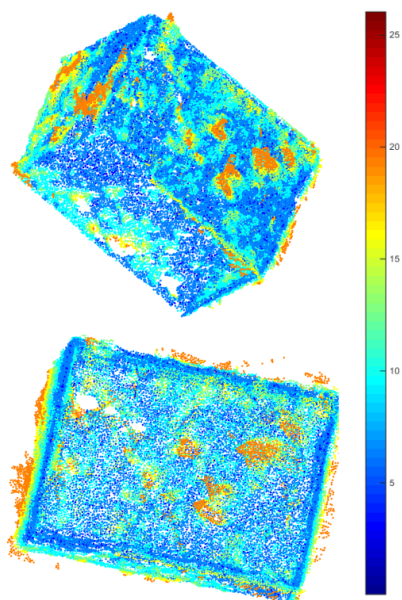
Metoda *Prostorsko klesanje* potrebuje za rekonstrukcijo večji nabor slik. Število točk je odvisno od gostote začetnega oblaka točk. Pri predmetu stopala smo dosegli zelo nizke stopnje napake, največje stopnje napake so vidne na sprednjem delu, kjer so območja konkavnosti. Najvišja napaka pri stopalu je na skrajno najvišjem delu, saj smo pri dodajanju teksture s tanko nogavico to napako ustvarili. Brez tega se povprečna napaka zmanjša na  $2,69\text{mm}$ , najvišja napaka pa se zmanjša na  $6.82\text{mm}$ . Pri predmetu kvadra smo pa naleteli na težavo nizkega zajema. Nizek zajem ni mogoč, saj metoda za detekcijo lista formata A4 v takšnih primerih vrača preveč presečišč med črtami. Čeprav bi lahko detekcijo lista nadgradili, bi naleteli na novo težavo in sicer prekrivanje zadnje stranice lista s predmetom. Kljub težavam povprečne napake ne presegaajo  $0,6\text{cm}$ , največje napake so pa nižje kot pri metodi stereo vid. Pri metodi stereo vid je namreč pogost pojav osamelcev zaradi šuma na slikah, kar je posledica napačno izračunanih korespondenc med paroma slik.



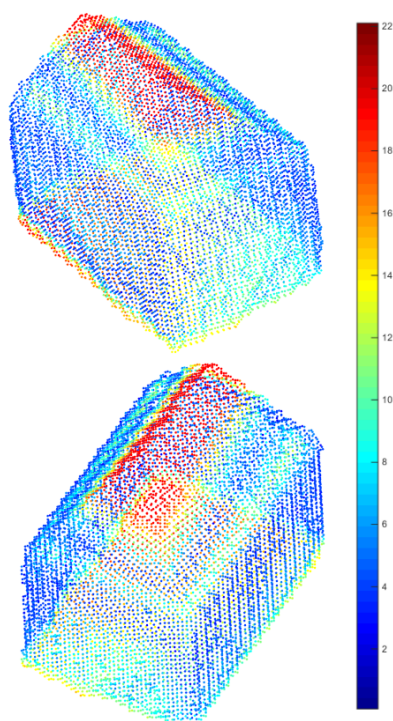
Slika 7.13: Porazdelitve napak 3D rekonstrukcije stopala z metodo stereo vid.



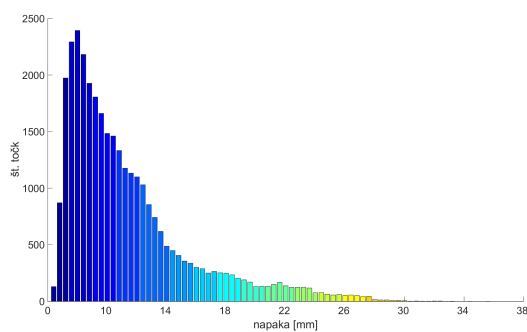
Slika 7.14: Porazdelitve napak 3D rekonstrukcije stopala z metodo prostorsko klesanje.



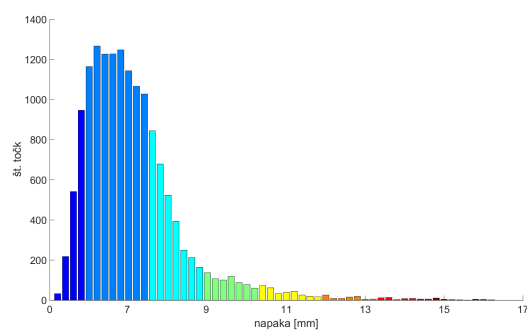
Slika 7.15: Porazdelitve napak 3D rekonstrukcije kvadra z metodo stereo vid.



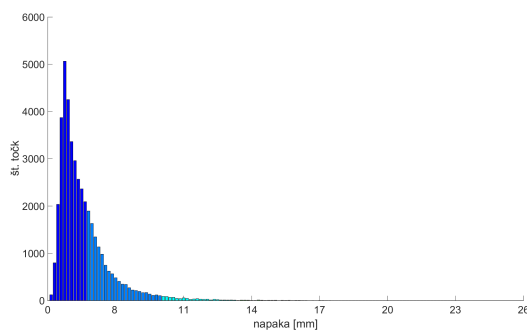
Slika 7.16: Porazdelitve napak 3D rekonstrukcije kvadra z metodo prostorsko klesanje.



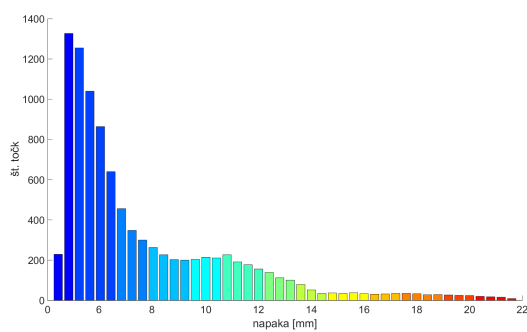
Slika 7.17: Histogram napak 3D modela stopala z metodo stereo vid.



Slika 7.18: Histogram napak 3D modela stopala z metodo prostorsko klesanje.



Slika 7.19: Histogram napak 3D modela kvadra z metodo stereo vid.



Slika 7.20: Histogram napak 3D modela kvadra z metodo prostorsko klesanje.

velikost začetnega oblaka točk [št. točk]	velikost 3D modela [št. točk]	hitrost klesanja [s]	povprečna napaka [mm]
$297 \times 210 \times 250$	472.088	28,63	3,55
$297 \times 210 \times 250 \times 10^{-1}$	78.170	5,37	3,49
$297 \times 210 \times 250 \times 10^{-2}$	15.372	3,3	3,61
$297 \times 210 \times 250 \times 10^{-3}$	676	3,16	4,03

Tabela 7.3: Tabela kvalitativnih rezultatov metode prostorsko klesanje.

V Tabeli 7.3 smo na predmetu stopala evalvirali vpliv gostote začetnega oblaka točk pri metodi prostorskega klesanja na hitrost izvajanja koraka klesanja in povprečna napaka pri metodi ICP.

S tabele je razviden čas izvajanja, ki pri manjših začetnih oblakih točk ostaja nizek, pri največjem oblaku točk pa se ta bistveno poveča. Časovna kompleksnost metode prostorskega klesanja namreč ni linearna. Bolj zanimiv je rezultat povprečne napake pri različnih gostotah 3D modelov, saj so razlike minimalne. Čeprav so razlike minimalne, je potrebno poudariti, da so pri redkejših oblakih točk slabše vidne podrobnosti na predmetu. Kot najboljši kompromis med gostoto in kvaliteto vidnih podrobnosti mora biti oddaljenost med točkami v ravnini do  $2mm$ . Ta rezultat je bil pridobljen eksperimentalno na podlagi vizualizacije 3D modelov v Matlabu.

### 7.3.2 Kvalitativni rezultati

V zadnjem sklopu poglavja bomo predstavili kvalitativne rezultate. Za vsako rekonstrukcijsko metodo bomo izbrali tri predmete in jih rekonstruirali. Na podlagi rezultatov bomo le te vrednotili in izpostavili značilnosti rekonstrukcijskih metod. Zajem slik je bil izveden ob različnih svetlobnih pogojih in na različnih površinah.

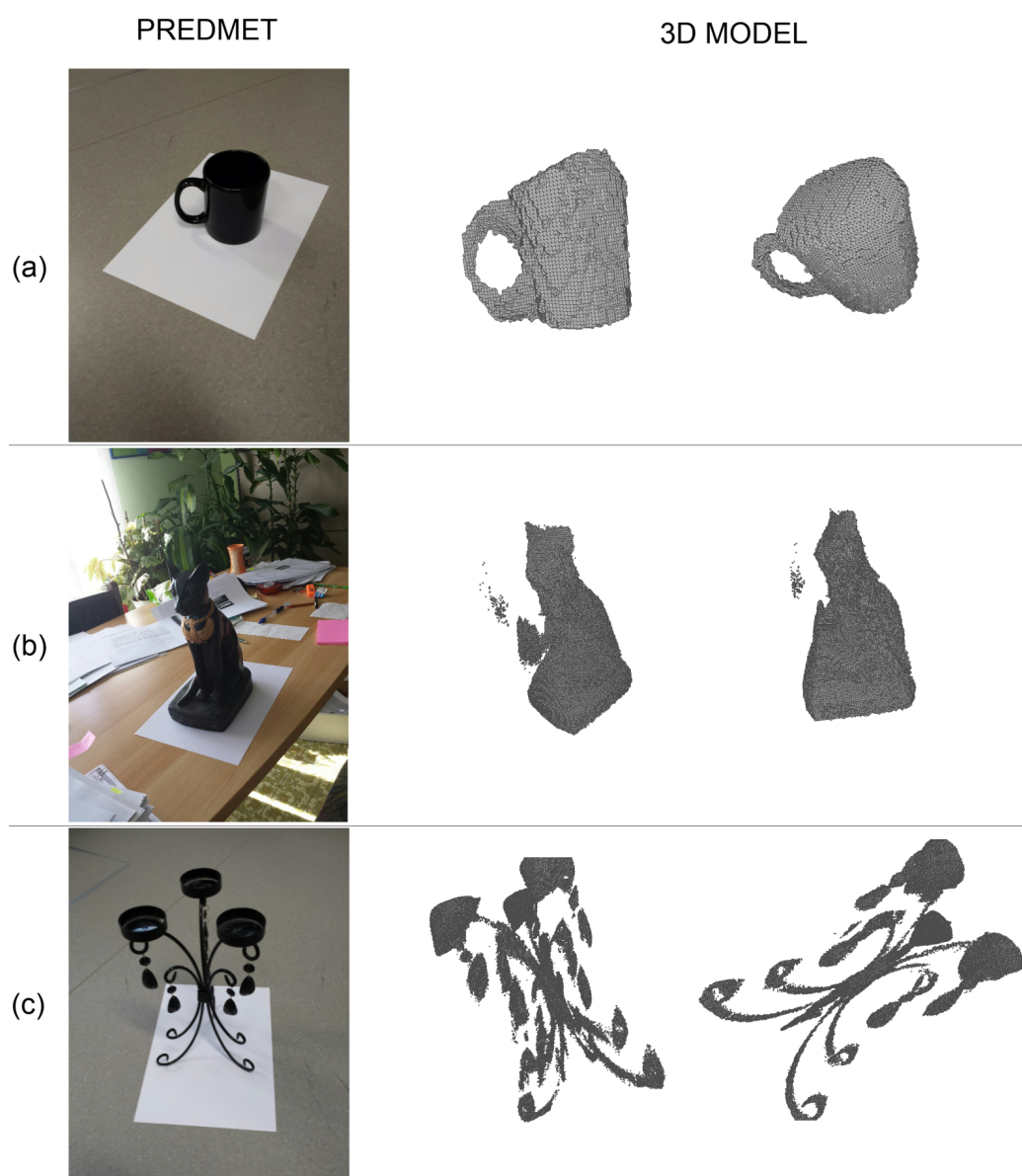
Primeri 3D modelov z metodo *Stereo vid* so prikazani na Sliki 7.21. 3D model orla je bil rekonstruiran iz 6 slik (3 parov) in ima 79.473 točk. 3D model krožnika je bil rekonstruiran iz 4 slik (2 parov) in ima 36.327 točk. 3D model sarkofaga je bil rekonstruiran iz 2 slik (1 par) in ima 51.427 točk. Gostota oblaka točk (št. točk) je pri tej metodi odvisna od oddaljenosti zajema slik. Torej, če predmet zajemamo od daleč bo št. točk na 3D modelu bistveno manj kot pri zajemu od blizu. Metoda ima težave z odbojem svetlobe na predmetih kar je razvidno pri 3D modelu krožnika. Metoda v splošnem že na manjšem naboru slik izvede zadovoljive rekonstrukcije, največ težav pa ima z napačno izračunani korespondencami, kar se odraža v osamelih 3D točkah, ki na 3D modelu izstopajo. Poleg tega porazdelitev točk ni na celotnem 3D modelu enakomerna kar je vidno v obliki lukenj. Te je mogoče do neke mere rešiti z večjim naborom slik.

Primeri 3D modelov z metodo *Prostorsko klesanje* so prikazani na Sliki 7.22. 3D model skodelice je bil rekonstruiran iz 10 slik in ima 16.950 točk. 3D model kipa je bil rekonstruiran iz 12 slik in ima 92.802 točk. 3D model svečnika je bil rekonstruiran iz 8 slik in ima 113.480 točk. Pri modelu skodelice je vidna težava metode s konkavnostjo in nizkima zajemom. Pri predmetu kipa smo korak segmentacije otežili z zelo heterogenim ozadjem, kar se odraža v osamelih točkah. Pri predmetu svečnika smo dosegli relativno dobre rezultate. Metoda zadovoljivo deluje tudi pri heterogenih ozadnjih. Pri tej metodi je poleg segmentacije najbolj pomemben način zajema, saj moramo le tega prilagoditi vsakemu predmetu posebej, da dosežemo najboljše rezultate.



Slika 7.21: Primeri rekonstrukcij z metodo *Stereo vid*. (a) primer rekonstrukcije lesenega orla. (b) primer rekonstrukcije krožnika. (c) primer rekonstrukcije sarkofaga.





Slika 7.22: Primeri rekonstrukcij z metodo *Prostorsko klesanje*. (a) primer rekonstrukcije skodelice. (b) primer rekonstrukcije kipa. (c) primer rekonstrukcije svečnika.



# Poglavje 8

## Sklepne ugotovitve

V tem delu smo predstavili sistem 3D rekonstrukcije predmetov iz slik z uporabo dveh pasivnih metod računalniškega vida. Najprej smo si približali področje s pregledom različnih tehnologij 3D rekonstrukcije. Sistematično smo pokazali postopek določitve lege kamere s slike na podlagi referenčnega objekta, saj obe izbrani rekonstrukcijski metodi potrebujeta ocene lege kamere. Podrobno smo opisali in predstavili delovanje obeh rekonstrukcijskih metod. Predstavili smo arhitekturo implementacije sistema, z uporabo mobilne platforme Android in razvojnega okolja Matlab. Celoten sistem smo na koncu evalvirali in predstavili kvantitativne in kvalitativne rezultate.

Ugotovili smo, da naš sistem relativno natančno določa zunanje parametre kamere v primerjavi s splošno uporabljenim postopkom kalibracije. Pri evalvaciji 3D modelov po načrtani metodologiji smo dosegli pričakovane rezultate. Kljub temu, da so imeli nekateri modeli večja odstopanja napak, smo slabosti ustrezno argumentirali in izpostavili omejitve ter slabosti obeh rekonstrukcijskih metod. Bralcu smo predstavili tudi kvalitativne rešitve. Pri tem smo želeli pokazati vpliv izbire metode glede na različne faktorje rekonstrukcijskih predmetov (npr. tekstura, oblika, itd.).

Sistem je mogoče v bodoče še dodatno izboljšati z različnih vidikov. Z vidika delovanja metod je nekatere korake mogoče nadgraditi in robustificirati – npr. detekcijo referenčnega objekta, segmentacijo pri prostorskem klesa-

nju, postprocesiranje rezultatov za zmanjšanje napak itd. Predvsem slednje bi bilo najbolj primerno pri metodi *Stereo vid*, saj bi se na tak način lahko izognili napakam zaradi osamelih točk. Z vidika uporabnosti pa se nam zdi najbolj primerna nadgradnja v enovit sistem. Bodisi sistem razvijemo v samostojno aplikacijo za pametne telefone, bodisi procesni del integriramo v oblak tako, da bi bila mobilna aplikacija potrebna minimalnih nadgradenj. Pri nadgradnji v enovit sistem bi bilo smiselno delovanje pohitriti s paralelizacijo. Kljub temu, da sistem ni popoln, pa predstavlja dobro osnovo za nadaljnje izboljšave.

# Literatura

- [1] 3D tiskalnik "Peachy Printer". Dostopno na:  
<http://www.peachyprinter.com> (pridobljeno 10.4.2015)
- [2] K. Kolev, P. Tanskanen, P. Speciale, M. Pollefeys, "Turning Mobile Phones into 3D Scanners". v zborniku *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Columbus, Ohio, jun. 2014, str. 3946 - 3953.
- [3] T. Moons, L. V. Gool, M. Vergauwen, *Reconstruction from Multiple Images*, Computer Graphics and Vision, 2008, str. 287–398, pogl. 4.
- [4] G. Kordelas, J. D. Perez-Moneo Agapito, J. M. V. Hernandez, P. Daras, "State-of-the-art Algorithms for Complete 3D Model Reconstruction", v zborniku *Summer School "Engage"*, Zermatt, Switzerland, avg. 2010.
- [5] M. S. Bae and I. K. Park, "Content-based 3D model retrieval using a single depth image from a low-cost 3D camera", v zborniku *The Visual Computer*, št. 29, str. 555-564, 2013.
- [6] Y. Cui<sup>1</sup>, S. Schuon, D. Chan, S. Thrun, C. Theobalt, "3D Shape Scanning with a Time-of-Flight Camera", v zborniku *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, San Francisco, California, jun. 2010, str. 1173-1180.
- [7] H. Kawasaki, R. Furukawa, "Dense 3D Reconstruction method using Coplanarities and Metric Constraints for Line Laser Scanning", v zborniku *Sixth International Conference 3-D Digital Imaging and Modeling*, Montreal, Quebec, avg. 2007, str. 149-158.

- 
- [8] S. Dogan, “3D reconstruction and evaluation of tissues by using CT”, v zborniku *International Society for Photogrammetry and remote sensing (ISPRS)*, Istanbul, Turkey, 2008.
- [9] S. Y. Bao, M. Bagra, S. Savarese, “Semantic Structure from Motion with Points, Regions, and Objects”, v zborniku *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012.
- [10] F. Galasso, J. Lasenby, “Shape from Texture: Fast Estimation of Planar Surface Orientation via Fourier Analysis”, v zborniku *British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2007.
- [11] A. P. Witkin, S. F. Om, A. P. Wtfdifi, “Shape from contour”, v zborniku *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, april 1980, str. 301-312.
- [12] M. Celenk, R. A. Bachnak, “Multiple Stereo Vision system for 3D object reconstruction”, v zborniku *Systems Engineering, IEEE International Conference*, Pittsburgh, PA, avg. 1990, str. 555-558.
- [13] Odprtokodna knjižnica OpenCV. Dostopno na:  
<http://opencv.org/> (pridobljeno 1.10.2014)
- [14] A. Fusiello, E. Trucco, A. Verri, “A compact algorithm for rectification of stereo pairs”, v zborniku *Machine Vision and Applications*, New York, št. 12, julij 2000, str. 16-22.
- [15] Hajer Fradi and and Jean-Luc Dugelay, “Improved depth map estimation in Stereo Vision”, v zborniku *Electronic Imaging Conference on 3D Image Processing and Applications*, San Fransisco, št. 7863, jan. 2011.
- [16] K. N. Kutulakos, S. M. Seitz, “A Theory of Shape by Space Carving”, *International Journal of Computer Vision*, št. 38, zv. 3, str. 199–218, 2000.

- 
- [17] E. E. Hemayed, A. A. Farag, "Object modeling using Space carving", v zborniku *Image Processing*, Vancouver, BC, Canada, sept. 2000, str. 760-763.
- [18] A. Broadhurst, R. Cipolla, "A statistical Consistency Check for the Space Carving Algorithm", v zborniku *11th British Machine vision conference*, Bristol, UK, 2000, str. 282-291.
- [19] A. Broadhurst T.W. Drummond, R. Cipolla, "A probabilistic Framework for Space Carving", v zborniku *Computer Vision, 2001. ICCV 2001. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on Vol. 1*, Vancouver, BC, julij 2001, str. 388-393.
- [20] D. Lovi, N. Birkbeck, D. Cobzas, M. Jägers, "Incremental Free-space Carving for Real-Time 3D reconstruction", v zborniku *3DPVT*, 2010.
- [21] D. Rački, M. Majnik, S. Gec, M. Hegedič, K. Žarn, M. Kristan, J. Perš, D. Omrčen, D. Skočaj, "The study and comparison of advanced computer vision methods for modeling feet in real-world environments", tehnično poročilo, Ljubljana, Slovenija, 2014, Dostopno na: [http://data.vicos.si/projects/CV4foot\\_tehnicno\\_porocilo.pdf](http://data.vicos.si/projects/CV4foot_tehnicno_porocilo.pdf) (pridobljeno 15.11.2014)
- [22] J Canny, "A computational approach to edge detection", v zborniku *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE*, nov. 1986, str. 679-698.
- [23] R. O. Duda, P. E. Hart, "Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures", *Communications of the ACM*, št. 15, zv. 1, str. 11-15, 1972.
- [24] J. Heikkilä, O. Silvén, "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction", v zborniku *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE*, San Juan, junij 1997, str. 1106-1112.

- 
- [25] A. Kaehler, G. Bradski, *Learning OpenCV*, O'Reilly Media, 2013, pogl. 11,12.
- [26] Elements of Geometric Computer Vision, Dostopno na:  
[http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL\\_COPIES/FUSIELLO4/tutorial.html](http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/FUSIELLO4/tutorial.html) (pridobljeno 2.1.2015)
- [27] R. Hartley, A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2004.
- [28] J. Bauer, C. Zach, H. Bischof, K. Karner, "Efficient Sparse 3D Reconstruction by Space Sweeping", v zborniku *3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, Chapel Hill, NC, junij 2006, str. 527-534.
- [29] Primer slike rektifikacije. Dostopno na:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Image\\_rectification](http://en.wikipedia.org/wiki/Image_rectification) (pridobljeno 11.12.2014)
- [30] R. I. Hartley, "Theory and Practice of Projective Rectification", *International Journal of Computer Vision*, št. 35, zv. 2, str. 115-127, 1999.
- [31] R. Y. Tsai, "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* 3, str. 323-344, 1987.
- [32] R. Zhang, P.-S. Tsi, J. E. Cryer, M. Shah, "Shape from shading: A survey", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, št. 21, zv. 8, str. 690-706, 1999.
- [33] G.T. Shrivakshan, C. Chandrasekar, "A Comparison of various Edge Detection Techniques used in Image Processing", *IJCSI International Journal of Computer Science*, št. 9, zv. 5, str. 269-276, 2012.
- [34] T. Svoboda, J. Kybic, V. Hlavac, *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, Cengage Learning, 2007.



- 
- [35] Knjižnica mexopencv. Dostopno na:  
<http://kyamagu.github.io/mexopencv/> (pridobljeno 8.11.2014)
- [36] Matlab implementacija metode prostorskega klesanja avtorja Loren Shure. Dostopno na:  
<http://blogs.mathworks.com/loren/2009/12/16/carving-a-dinosaur/> (pridobljeno 14.3.2014)
- [37] Postopek kalibracije in rekonstrukcije v Matlab okolju z uporabo kalibracijske plošče. Dostopno na:  
<http://www.mathworks.com/help/vision/examples/stereo-calibration-and-scene-reconstruction.html> (pridobljeno 30.9.2014)
- [38] Z. Zhang, "Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations", v zborniku *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference*, Kerkyra, sept. 1999, str. 666-673.
- [39] D. C. Brown, "Close-Range Camera Calibration", *Photogrammetric Engineering*, št. 37, zv. 8, str. 855-866, 1971.
- [40] J.G. Fryer and D.C. Brown, "Lens Distortion for Close-Range Photogrammetry", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, št. 52, str. 51-58, 1986.
- [41] Matlab knjižnica ICP avtorja Jakob Wilm. Dostopno na:  
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27804-iterative-closest-point> (pridobljeno 20.8.2014)
- [42] I.T. Jolliffe, "Principal Component Analysis", New York: Springer, 2002, pogl. 11.
- [43] Z. Fan, E. Liu, B. Xu, "Weighted Principal Component Analysis", *Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, št. 7004, str. 569-574, 2011.

- 
- [44] M. Garland, P. S. Heckbert, “Surface Simplification Using Quadric Error Metrics”, v zborniku *SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, 1997, str. 209-216.
- [45] B.W. Micallef, C.J. Debono, R.A. Farrugia, “Reducing 3D video coding complexity through more efficient disparity estimation”, *Consumer Electronics, IEEE*, št. 60, zv. 1, str. 74-82, 2014.
- [46] P.J. Besl, H.D. McKay, “A method for registration of 3-d shapes”, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE*, št. 14, zv. 2, str. 239-256, 1992.
- [47] Y. Chen, G. Medioni, “Object modeling by registration of multiple range images”, v zborniku *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, april 1991, str. 2724-2729.