

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Vidmar, B., 20014. Analiza uporabnosti fotogrametrično določenega oblaka točk za izdelavo 3D modela objekta kulturne dediščine. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M., somentor Koutsoudis, A.): 54 str.

Datum arhiviranja:07-01-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Vidmar, B., 20014. Analiza uporabnosti fotogrametrično določenega oblaka točk za izdelavo 3D modela objekta kulturne dediščine. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M., co-supervisor Koutsoudis, A.): 54 pp.

Archiving Date: 07-01-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GEODEZIJA
SMER GEODEZIJA

Kandidat:

BLAŽ VIDMAR

**ANALIZA UPORABNOSTI FOTOGRAMETRIČNO
DOLOČENEGA OBLAKA TOČK ZA IZDELAVO 3D
MODELA OBJEKTA KULTURNE DEDIŠČINE**

Diplomska naloga št.: 971/G

**SUITABILITY ANALYSIS OF A MULTI-IMAGE
METHOD FOR 3D MODEL RECONSTRUCTION IN
CULTURAL HERITAGE DOMAIN**

Graduation thesis No.: 971/G

Mentorica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Predsednik komisije:

prof. dr. Bojan Stopar

Somentor:

dr. Anestis Kousoudis

Član komisije:

doc. dr. Božo Koler

Ljubljana, 17. 12. 2014

ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Blaž Vidmar izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: **”Analiza uporabnosti fotogrametrično določenega oblaka točk za izdelavo 3D modela objekta kulturne dediščine”**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, december 2014

Blaž Vidmar

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.715:727(4-13)(043.2)
Avtor:	Blaž Vidmar
Mentor:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Somentor:	dr. Anestis Koutsoudis
Naslov:	Analiza uporabnosti fotogrametrično določenega oblaka točk za izdelavo 3D modela objekta kulturne dediščine
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	54 str., 13 preg., 26 sl., 7 en.
Ključne besede:	Lasersko skeniranje, večslikovno ujemanje, bližnjelikovna fotogrametrija, računalniški vid, kulturna dediščina, arheologija

Izvleček

V diplomski nalogi obravnavamo večslikovno ujemanje in njegovo primernost za izdelavo 3D modelov objektov kulturne dediščine. Osredotočimo se na dva konkretna primera iz območja današnje Grčije. Določimo metodologijo za zajem in obdelavo podatkov s programskim orodjem PhotoScan. Izdelane 3D modele opišemo z vizualnimi, geometričnimi in topološkimi značilnostmi. Osnovo za geometrično primerjavo predstavljajo oblaki točk laserskega skeniranja.

Iz rezultatov primerjav razberemo, da je omenjen postopek primeren za vizualizacijo, osnovne meritve in izdelavo enostavnih načrtov. Postopek slikovnega ujemanja je v primerjavi z metodo laserskega skeniranja cenovno ugodnejši in hitrejši, hkrati pa pridobimo geometrijsko in vizualno primerljive rezultate. Zaradi zgladitev značilnih krivin postopek ni primeren za natančnejše opise obravnavane površine in za določevanje deformacij na objektih. Rezultati kažejo na smotrnost predhodne izvedbe kalibracije fotoaparata.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 528.715:727(4-13)(043.2)
Author: Blaž Vidmar
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.
Co-advisor: Anestis Koutsoudis, Ph.D.
Title: Suitability analysis of a multi-image method for 3D model reconstruction
in cultural heritage domain
Document Type: Graduate thesis – university studies
Notes: 54 p., 13 tab., 26 fig., 7eq.
Key words: Laser scanning, multi-view stereo, close-range photogrammetry,
computer vision, cultural heritage, archeology

Abstract

The graduation thesis evaluates the suitability of multi-image 3D reconstruction method and its applicability in the cultural heritage domain. Case study of two objects from the area of modern Greece is carried out. The optimal workflow for data acquisition and its processing in commercial software PhotoScan is determined. 3D meshes are described with visual, geometrical and topological characteristics. The data produced with laser scanning is the ground truth for geometrical evaluations.

Data evaluation results show the suitability of multi-image 3D reconstruction method for visualisation, simple measurements and for production of simple plans. In comparison with laser scanning the proposed method is cheaper and faster while produces geometrically and visually comparable results. Misreconstructed curvatures are detected on produced 3D meshes which are therefore not suitable for precise surface modelling and for deformation analysis. The results suggest the use of precalibrated camera.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Hvala mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras za sodelovanje pri diplomski nalogi in somentorju dr. Anestisu Koutsoudisu za razlage, ideje, zaupanje in dobro voljo.

Hvala tudi Fotisu, Jorgosu in vsem, ki ste mi polepšali bivanje v Grčiji.

Zahvaljujem se svoji družini za podporo med študijem.

Velika zahvala gre Boštjanu. Hvala za čudovita študijska leta.

Ajda, hvala za potrpežljivost.

Ta stran je namenoma prazna.

Kazalo

Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček	V
Bibilographic – documentalistic information and abstract	VII
Zahvala	IX
1 UVOD	1
1.1 Motivacija in raziskovalni cilji	2
1.2 Pregled literature in raziskav	2
1.3 Struktura naloge	4
2 TEORETIČNO OZADJE	6
2.1 Postopek slikovnega ujemanja	6
2.1.1 Postopek slikovnega ujemanja SIFT	6
2.1.1.1 Iskanje značilnih točk	6
2.1.1.2 Prepoznavanje in umestitev značilnih točk	7
2.1.1.3 Določitev usmerjenosti značilnih točk	7
2.1.1.4 Deskriptor značilnih točk	8
2.1.1.5 Primerjava značilnih točk	8
2.1.2 Ostali postopki slikovnega ujemanja	9
2.2 Določanje položaja točk v prostoru iz fotografij	9
2.3 Izračun razdalj med oblakom točk in trikotniškim modelom	10
2.4 Triangulacijski laserski skener	12
3 ZAJEM PODATKOV	14
3.1 Zahteve naročnika	14
3.2 Kratek opis obravnavanih objektov	15
3.2.1 Kikladski kipec ženske figure	15
3.2.2 Cerkev Kioutouklou Baba Bektashic Tekke	16
3.3 Uporabljena oprema in programska orodja	18

3.3.1	Fotografski aparati	18
3.3.2	Laserski skenerji	19
3.3.3	Programsko orodje PhotoScan	21
3.3.4	Ostala programska orodja	21
3.4	Izvedba meritev	22
3.4.1	Kikladski kipec ženske figure	23
3.4.2	Cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke	25
4	OBDELAVA PODATKOV	27
4.1	Metodologija	27
4.2	Izdelava modelov v programskem orodju PhotoScan	28
4.2.1	Pregled in priprava podatkov	28
4.2.2	Slikovno ujemanje	28
4.2.3	Izgradnja 3D modela	30
4.3	Priprava podatkov za primerjavo	31
4.4	Izvedba geometričnih primerjav	32
4.5	Določitev topoloških lastnosti v 3D modelu	33
5	REZULTATI OBDELAVE IN IZVEDENIH PRIMERJAV	34
5.1	Rezultati obdelave	34
5.1.1	Cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke	34
5.1.2	Kikladski kipec ženske figure	36
5.2	Rezultati primerjav	38
5.2.1	Geometrične primerjave	38
5.2.1.1	Cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke	39
5.2.1.2	Kikladski kipec ženske figure	42
5.2.2	Topološke primerjave	46
6	RAZPRAVA	48
	VIRI	50

Preglednice

3.1	Tehnične lastnosti fotoaparata Canon PowerShot A630 (Canon A630, 2006).	19
3.2	Tehnične lastnosti fotoaparata Nikon D40 in Canon EOS350d (Nikon, 2014; Canon EOS350d, 2014).	19
3.3	Tehnične lastnosti laserskega skenerja Arius3D Foundation Model 100 (Arius, 2009).	20
3.4	Tehnične lastnosti laserskega skenerja ILRIS 3 ₆ D (specifikacije ILRIS, 2004).	20
3.5	Funkcije programske opreme PhotoScan (AgiSoft, 2014).	21
3.6	Podatki o zajemu Kikladskega kipca ženske figure z laserskim skenerjem Arius 3D Foundation 100.	24
4.1	Trajanje izgradnje fotogrametrično določenega 3D modela Kikladskega kipca ženske figure.	31
5.1	Lastnosti 3D modela pri različnih ravneh podrobnosti (cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke).	34
5.2	Število vozlišč in ploskev 3D modelov Kikladskega kipca ženske figure določenih iz različnega števila fotografij v različnih ravneh podrobnosti in načinih modeliranja ploskve ($\times 10^6$).	36
5.3	Število uporabljenih posnetkov, kotna razlika med posnetki na isti krožnici in rezultati procesa slikovnega ujemanja za Kikladski kipec ženske figure.	36
5.4	Rezultati izračuna razdalj med delnimi oblaki točk laserskega skeniranja in fotogrametrično določenimi 3D modeli za cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke (v cm).	40
5.5	Rezultati izračuna razdalj med oblakom točk laserskega skeniranja in fotogrametrično določenimi 3D modelov Kikladskega kipca ženske figure.	43
5.6	Prikaz števila topoloških napak fotogrametrično določenih 3D modeli Kikladskega kipca ženske figure pri uporabi različnega števila fotografij in različnega načina modeliranja ploskve.	47

Slike

2.1	Tvorba deskriptorja iz slikovnih gradientov v okolici značilne točke (Lowe, 2004: str 15).	8
2.2	Razdalja med točko in trikotnikom (Schneider in Eberly, 2002: str 376).	11
2.3	Shematičen prikaz delovanja triangluacijskega laserskega skenerja.	12
3.1	Replika kipca ženske figure (Kikladsko otočje, otok Sifnos, 2800 - 2300 pr.n.š).	16
3.2	Zemljevid današnje Grčije z označeno lokacijo oziroma izvorom obravnavanih objektov.	17
3.3	Objekt Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke (Avtor: Anestis Koutsoudis).	18
3.4	Napotki za zajem fotografij (navodila PhotoScan v0.8.5, 2012: str 4).	22
3.5	Shematični prikaz postavitve fotoaparata in objekta med zajemom fotografij.	23
3.6	Prikaz razporeditve zajetih fotografij Kikladskega kipca ženske figure. Zaradi boljše preglednosti je na sliki prikazana le četrtina zajetih fotografij.	24
3.7	Prikaz razporeditve zajetih fotografij cerkve Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke.	26
4.1	Shematični prikaz obdelave podatkov in izvedenih primerjav.	27
4.2	Prikaz prepoznanih značilnih točk pri Kikladskem kipcu ženske figure na dveh posnetkih.	29
4.3	Prikaz izseka različnih ravni podrobnosti 3D modela, izgrajenega iz fotogrametrično določenega oblaka točk (cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke). V zgornji vrstici je prikazana trikotniška mreža. V spodnji vrstici je trikotniška mreža obarvana glede na barvo vozlišč.	30
4.4	Določanje istoležnih točk na oblaku točk laserskega skeniranja (levo) in fotogrametrično določenem 3D modelu cerkve Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke (desno) za potrebe izračuna transformacijskih parametrov.	31
4.5	Primeri topoloških napak ploskev.	33
5.1	Pogled na izdelan 3D model cerkve Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke v srednji ravni podrobnosti iz različnih zornih kotov.	35
5.2	Izdelani 3D modeli Kikladskega kipca ženske figure.	37
5.3	Napačna določitev zunanjih parametrov posnetov za niz 18 fotografij.	37
5.4	Grafični prikaz odstopanj na območju visoke raznolikosti (streha).	40

5.5	Grafični prikaz odstopanj na območju nizke raznolikosti (zid).	41
5.6	Grafični prikaz odstopanj na območju mešane raznolikosti (celoten delni sken). . .	41
5.7	Prikaz poteka ploskve fotogrametrično določenega 3D modela in podatkov laserskega skeniranja (siva barva).	42
5.8	Prikaz razlik med 3D modelom izdelanim iz fotogrametrično določenega oblaka točk (črna barva) in podatki laserskega skeniranja (barvne točke).	43
5.9	Prikaz rezultatov geometričnih primerjav med oblakom točk laserskega skeniranja in fotogrametrično določenimi 3D modeli Kikladskega kipca ženske figure (visoka raven podrobnosti, glajen način modeliranja ploskve).	44
5.10	Vizualna primerjava fotogrametrično ustvarjenega 3D modela (71 fotografij, najvišja raven podrobnosti) in oblaka točk laserskega skeniranja.	46
5.11	Prikaz vozlišč (obarvane točke), ki predstavljajo stičišče dveh ploskev brez skupnih robov za fotogrametrično določen 3D model kipca ženske figure (36 fotografij, neinterpoliran model, najvišja raven podrobnosti).	47

Okrajšave

3D	Tridimenzionalni prostor
CMM	Coordinate measuring machine, sl. naprava za merjenje koordinat
DMR	Digitalni model reliefa
DMVR	Dense multi-view 3D reconstruction, sl. izgradnja oblaka točk z večslikovnim ujemanjem
DSLR	Digital single-lens reflex, sl. digitalni zrcalnorefleksni fotoaparatus
EXIF	Exchangeable image file format, sl. format za shranjevanje metapodatkov fotografij
GPS	Global positioning system, sl. globalni sistem pozicioniranja
ICP	Iterative closest point, sl. algoritem za medsebojno registracijo oblakov točk
NRC	National research council of Canada, sl. kanadski državni raziskovalni svet
RP	Raven podrobnosti
RTK	Real time kinematic, sl. kinematična metoda GNSS-izmere v realnem času
SFM	Structure from motion, sl. določevanje oblik iz fotografij
SGM	Semi global matching, sl. postopek ploskovnega ujemanja na fotografijah
SIFT	Scale-invariant feature transform, sl. postopek točkovnega ujemanja na fotografijah
SURF	Speeded-up robust features, sl. postopek točkovnega ujemanja na fotografijah
UAV	Unmanned aerial vehicle, sl. brezpilotna zračna plovila, letalnik

Slovar izrazov

Brezpilotno plovilo, letalnik *Unmanned aerial vehicle* je zračno plovilo (npr. letalo, helikopter) brez pilota na krovu, ki leti samostojno oziroma je daljinsko vodeno (Department, 2005).

Določitev oblik iz gibanja senzorja *Structure from motion* je področje računalniškega vida in fotogrametrije, ki se ukvarja z rekonstrukcijo 3D oblik objektov iz kalibriranih ali nekalibriranih podob. Postopek je v grobem sestavljen iz določevanja notranjih in zunanjih parametrov fotoaparata, izračuna položaja pridobljenih identičnih točk in rekonstrukcije 3D oblaka točk (Szeliski, 2010).

Fotogrametrija *Photogrammetry* je veda, znanost in tehnologija pridobivanja zanesljivih informacij iz brezkontaktnih fotografij/podob in medijev drugih senzorskih sistemov o Zemlji, njenem okolju ter drugih fizičnih objektih in procesih z beleženjem, merjenjem, analiziranjem in predstavljanjem (Statut ISPRS, 2012).

Ploskev *Face* je dvorazsežni prostorski objekt, ki ima lasten identifikator in dodatne opisne lastnosti. Ploskev določa zaprto območje v ravnini ali pa je del lupine telesa v prostoru. Geometrija ploskve je podana z enim ali več robovi, ki jo omejujejo. Pri določitvi poteka mejne ploskve trirazsežnega objekta lahko pomaga vsako dodatno vozlišče znotraj ploskve. Kakor je oblika roba ploskve podana z vozliščema in dodatnimi detajlnimi točkami, lahko ploskev vsebuje dodatne prostorsko podane detajlne točke. Te pomagajo pri opredelitvi poteka in izgleda prostorske ploskve (Šumrada, 2005).

Računalniški vid *Computer vision* je področje umetne inteligence, ki preko računalniških postopkov s pomočjo prepoznavanja, vrednotenja in analize informacij iz podob ustvarja tridimenzionalno okolje (Morris, 2004).

Raven podrobnosti *Level of detail* V 3D modeliranju predstavlja geometrično kompleksnost objekta. Isti objekt lahko predstavimo v različnih ravneh podrobnosti, pri čemer ima model z večjo geometrično raznolikostjo višjo raven podrobnosti (Luebke, 2003).

SIFT *Scale-invariant feature transform* je točkovni postopek slikovnega ujemanja. Omogoča zaznavnje značilnih točk neodvisno od spremembe merila, zasukov in premikov fotografije. V grobem ga sestavljajo postopki iskanja, prepoznavanja, umestitve in določitve usmerjenosti značilnih točk. Vsaki značilni točki pripiše edinstven deskriptor, ki ga uporabimo pri medsebojni primerjavi značilnih točk. (Lowe, 1999).

Slikovni element *Pixel* je najmanjši gradnik digitalne fotografije. Podaja značilnosti posamezne točke, kot na primer barvo in intenziteto.

Slikovno ujemanje *Image matching* je postopek iskanja predhodno prepoznanih značilnih točk ali vzorcev na dveh ali več posnetkih. Poznamo točkovne in ploskovne postopke slikovnega ujemanja.

Topološke lastnosti *Topology* podajajo relativne logične odnose (zaporednost, povezljivost in sosedstvo) med nič-, eno- ali dvorazsežnimi geometrijskimi liki. Topološke lastnosti gradnikov so neodvisne od (absolutne) njihove lokacije v prostoru. (Šumrada, 2005).

Vozlišče *Vertex* je ničrazsežni prostorski objektni tip, ki je topološko stičišče. Izveden je iz s koordinatami podane točke, ki določa položaj vozlišča v ravnini ali prostoru. Poleg s pomočjo točkovnih koordinat opredeljene lege ima vsako vozlišče tudi enolični identifikator in dodatne opisane lastnosti (Šumrada, 2005).

1 UVOD

V diplomski nalogi je predstavljena tematika dokumentiranja kulturne dediščine z večslikovnim ujemanjem. Namen je ugotoviti, do kakšne mere je postopek uporaben v praksi, kakšne so njegove omejitve, prednosti in slabosti. V ta namen smo izdelali 3D modela cerkve Kioutouklou Baba Bectashic Tekke (Grčija) in kipca ženske figure iz otočja Kikladi (Grčija). Za ugotavljanje geometrične natančnosti modelov sta oba objekta zajeta fotogrametrično in z metodo laserskega skeniranja, pri čemer smo meritve z laserskim skenerjem vzeli kot osnovo za primerjavo točnosti oblike zmodelirane ploskve.

Dejstvo, da se objekta med seboj razlikujeta v velikosti in lastnostih materiala, nam da vpogled v dva različna primera iz prakse. Pri cerkvi Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke smo se tako soočili z večjim objektom in posledično veliko količino zajetih podatkov. Potreben je bil dober plan zajema, ki je vključeval terestrično fotografiranje in fotografiranje s pomočjo UAV (unmanned aerial vehicle) letalnika. Velika količina zajetih podatkov nas je spremljala tudi med njihovo obdelavo, saj smo morali potek obdelave in raven podrobnosti prilagoditi zmožnostim uporabljene računalniške strojne opreme.

Kikladski kipec ženske figure odraža laboratorijski primer zajema, pri katerem smo kontrolirali večino parametrov, ki vplivajo na rezultate. Zajem je potekal sistematično in z vnaprej določenimi kotnimi zamiki med posnetki. Kipec zaradi lastnosti površine, monotonosti barv in neizrazitosti potez na prvi pogled predstavlja neprimerne kandidata za slikovno ujemanje in je zato predstavljal skrajni primer uporabnosti postopka v praksi. Pri obdelavi smo se osredotočili na izgradnjo večih modelov iz različnega števila fotografij ter uporabljenih različnih načinov modeliranja ploskve in različnih ravni podrobnosti.

Posebnost naloge je v tem, da imamo za geometrično primerjavo na voljo oblake točk laserskega skeniranja. Običajno imamo za preverjanje točnosti postopka na voljo le posamezne merjene in kontrolirane točke (npr. oslonilne točke). Primerjava z oblakom točk nam bo dala boljši in celovitejši vpogled v uspešnost postopka po celotnem območju zmodeliranega objekta.

Večji del naloge temelji na raziskavah, ki so bile izvedene med študijsko prakso na grškem inštitutu za kulturo in izobraževanje CETI v mestu Xanthi. Osebno sem sodeloval pri fotogrametričnem zajemu, obdelavi podatkov ter pri izvedbi primerjav in izračunov. Omeniti velja, da pri zajemu podatkov z laserskimi skenerji nismo sodelovali in smo jih prevzeli v obliki, primerni za nadaljnjo obravnavo. Poleg izdelanih 3D modelov obravnavnih objektov, rezultate odražata tudi strokovna članka Koutsoudis, Vidmar in Arnaoutoglou (2013) in Koutsoudis in sod. (2014), ki hkrati predstavljata osnovo za to diplomsko nalogo.

1.1 Motivacija in raziskovalni cilji

Cilj diplomske naloge je ugotoviti primernost 3D modela zmodeliranega iz gostega fotogrametrično določenega oblaka točk za potrebe dokumentiranja objektov kulturne dediščine. Uporabili bomo komercialno programsko orodje PhotoScan (proizvajalec). Poudarili bomo dele procesa, ki kljub svoji navidezni samodejnosti zahtevajo posebno previdnost in obravnavo tako med zajemom kot tudi pri obdelavi podatkov.

Med glavne raziskovalne cilje štejemo:

- določitev najprimernejšega postopka terenskega zajema podatkov,
- izgradnja 3D modelov iz fotogrametrično zajetih podatkov,
- izvedba geometričnih primerjav med fotogrametričnim modelom in podatki laserskega skeniranja,
- ugotovitev topoloških lastnosti ustvarjenih modelov,
- določitev najprimernejšega poteka obdelave in
- ocena primernosti dobljenih 3D modelov za dokumentiranje kulturne dediščine.

1.2 Pregled literature in raziskav

V zadnjih nekaj letih smo priča hitremu razvoju programskih orodij, ki omogočajo pridobivanje prostorskih podatkov iz fotografij. Večina tuje stokovne literature obravnava določevanje gostega oblaka točk iz fotografij pod izrazi SFM (Structure from motion), MVS (Multi-view stereo) in DMVR (Dense multi-view 3D reconstruction).

Določitev gostega oblaka točk iz fotografij je dokaj nov pristop, ki vse bolj pridobiva na veljavi zaradi nenehnega povečevanja procesorskih sposobnosti računalnikov ter hitrega razvoja in povečane dostopnosti digitalne fotografije. Iz velikega števila fotografij, ki so zajete iz različnih zornih kotov določimo oblak točk objekta ali okolice. Dejstvo, da določitev medsebojnega položaja posnetkov poteka samodejno in brez uporabe ročno pokazanih veznih točk, predstavlja velik napredek za fotogrametrično skupnost (Remondino in sod., 2012). Postopek za izračun zunanjih in notranjih parametrov posnetka uporablja samodejno določene položaje značilnih točk na različnih fotografijah. Obstajajo tudi raziskave, kjer so omenjene parametre določili brez ujemanja značilnih točk (Dellaert in sod., 2000). Ker postopek ne uporablja veznih in oslonilnih točk, je uspeh postopka v celoti odvisen od njegove sposobnosti prepoznavanja značilnih točk na fotografijah. V ta namen sta največkrat uporabljena algoritma SIFT (Scale-invariant feature transform) in SURF (Speeded-up robust features), ki značilne točke prepoznata neodvisno od spremembe merila, zasukov in osvetlitve fotografij (Lowe, 1999; Bay in sod., 2008). Zaradi

ogromnega števila istih značilnih točk na različnih fotografijah postopek pri izračunu notranjih in zunanjih parametrov temelji na izravnavi. S tem se izboljša natančnost določitve položajev posnetkov in se predpostavijo kalibracijski parametri fotoaparata (Engels, Stewénus in Nistér, 2006). Izravnavna večinoma temelji na nelinearni metodi najmanjših kvadratov (Remondino in sod., 2012).

Izboljšana metoda izravnavne uporablja možnost izračuna z večjedrnim procesorjem ali grafično kartico, ki se izkaže s hitrim izračunom velikih podatkovnih nizov (Wu in sod., 2011). Poleg tega je Wu (2011) za svoj odprtokodni program, ki temelji na principih večslikovnega ujemanja, izdelal grafični vmesnik. Program v vseh procesih, ki potrebujejo veliko računalniške moči (npr. prepoznavanje značilnih točk, ujemanje, izravnavna, . . .), deluje s pomočjo večjedrnega izračuna. Njihovo delo je še dodatno nadgrajeno z algoritmom, ki sta ga razvila Furukawa in Ponce (2010) in omogoča samodejno izločanje nestabilnih elementov in premikajočih se objektov v fotografiranem okolju (npr. pešci).

Snavely, Seitz in Szeliski (2006) so s pomočjo odprtokodnega programa Bundler omogočili samodejno razporejanje fotografij v prostoru. Bundler je osnova tudi za Microsoftov program PhotoSynth, ki deluje kot spletni vmesnik in naloženim fotografijam določi medsebojne položaje (Photosynth, 2014).

S projektom 3D-COFORM se je trendu spletnih vmesnikov pridružila še Evropska unija. Pod njenim pokroviteljstvom sta Vergauwen in Gool (2006) predstavila ARC-3D (Automatic reconstruction conduit). Ta uporabnikom omogoča, da preko spletnega vmesnika naložijo fotografije na spletni strežnik. Po samodejnih izračunih v oblaku jim sistem vrne rezultat v obliki zmodeliranega okolja, ki je upodobljen na fotografijah. Dobljeni rezultati so nato primerni za nadaljnje delo v odprtokodnem programu MeshLab, ki je namenjen urejanju, pregledovanju in analiziranju 3D modelov (Cignoni in sod., 2008).

Podoben sistem je razvilo tudi podjetje Autodesk. Njihova storitev se imenuje 123D Catch in je eno od brezplačnih orodij, ki jih podjetje ponuja z namenom izgradnje preprostih 3D modelov, primernih za objavo na svetovnem spletu (123D Catch, 2014). Podjetje Viztu Technologies je ponujalo program Hypr3D, ki za razliko od ostalih programov, ki temeljijo na prenosu fotografij na spletni strežnik, ni potrebovalo nikakršne namestitve programske opreme na osebni računalnik, ampak se je celoten proces izvedel preko njihove spletne strani. Omenjeno podjetje se je nato združilo s podjetjem Cubify, ki poleg izdelave 3D modelov iz fotografij ponuja še rešitve na področju 3D tiskanja (Cubify, 2014). Odprtokodna programska oprema Insight3D poleg razvrstitve posnetkov v prostoru in izgradnje zmodeliranega 3D modela omogoča tudi projiciranje delov fotografij na ploskev, t.i. teksturiranje (Mach, 2009).

Poleg spletnih storitev obstaja več programskih orodij, ki delujejo kot samostojne enote, nameščene na osebnih računalnikih. Kot prvo tako komercialno orodje se je na tržišču pojavil PhotoModeler, ki ga izdeluje podjetje Eos Systems Inc (PhotoModeler, 2014). Program

omogoča določitev gostega oblaka točk in njegovo ploskovno modeliranje. Podjetje Modri planet s svojo programsko opremo 3Dsurvey poleg določitve gostega oblaka točk in modeliranega ploskovnega modela omogoča tudi izdelavo ortofoto posnetkov zajetega območja (Modri planet, 2014). Podjetje Agisoft ponuja PhotoScan, ki je podoben prej omenjenima programskima orodjema, hkrati pa omogoča tudi obdelavo multispektralnih fotografij (AgiSoft, 2014). Poleg zgoraj omenjenih sta na trgu tudi primerljivi programski orodji Pix4D in Dronemapper (Pix4D, 2014; Dronemapper, 2014).

Ker je postopek slikovnega ujemanja začel prodirati v vsakdanjo uporabo, so se kmalu pojavile tudi raziskave, ki poskušajo ovrednotiti dobljene rezultate tega postopka z že ustaljenimi postopki. Westoby in sod. (2012) primerjajo uporabnost fotogrametrično določenega 3D modela za opisovanje in izdelavo 3D modelov reliefa (DMR). Primerjavo so izvedli z oblakom točk laserskega skeniranja. Na podoben način so Quédrago in sod. (2014) primerjali natančnost zmodelirane kmetijske površine. To so naredili tako, da so površino zmodelirali iz fotogrametrično določenega oblaka točk in oblaka točk laserskega skeniranja ter dobljene DMR-je nato primerjali s podatki RTK-GPS metode.

Izvedene so bile tudi primerjave različnih postopkov slikovnega ujemanja, v katerih so rezultate, pridobljene z različnimi postopki, primerjali med seboj in s podatki laserskega skeniranja (Ahmadabadian in sod., 2013; Remondino in sod., 2014). Doneus in sod. (2011) ter De Reu in sod. (2012) so preverjali primernost fotogrametrično določenih 3D modelov s programsko opremo PhotoScan za namene dokumentiranja arheoloških najdbišč. Dobljene rezultate so primerjali s podatki, dobljenimi s tahimetrično izmero in RTK-GPS metodo. McCarthy (2014) je preko konkretnih primerov obravnaval primernost uporabljene večslikovnega ujemanja za izdelavo 3D modelov kulturne dediščine. Hkrati je poudaril nujnost dobrih tehničnih navodil ter določitve optimalnega poteka dela pri izbiri metod in programskih orodij za dokumentiranje objektov kulturne dediščine.

1.3 Struktura naloge

Diplomska naloga se začne z uvodnim poglavjem, v katerem so poleg osnovnih podatkov o nalogi predstavljeni še namen in raziskovalni cilji naloge. Poglavje se zaključi s pregledom literature in raziskav, ki bile narejene na obravnavanem področju.

V drugem poglavju je podrobneje razloženo teoretično ozadje in postopki, kar nam bo omogočilo lažje razumeti obravnavano tematiko.

Tretje poglavje opisuje zajem podatkov. Podani so tudi osnovni podatki o obravnavanih objektih, na podlagi katerih smo izbrali najprimernejšo opremo in programska orodja za delo. Podrobno je opisano tudi terensko delo.

V četrtem poglavju so opisani postopki obdelave podakov. Podrobneje je razložen potek izgra-

dnje fotogrametrično določenega 3D modela in obdelava rezultatov.

Peto poglavje se začne s predstavitvijo končnih rezultatov obdelave. Sledijo rezultati geometričnih in topoloških analiz dobljenih 3D modelov.

V zadnjem poglavju so zbrane vse najpomembnejše ugotovitve, hkrati pa so podane tudi možnosti za nadaljnje delo. Na koncu diplomske naloge so navedeni viri.

2 TEORETIČNO OZADJE

2.1 Postopek slikovnega ujemanja

Ker se postopek izgradnje fotogrametrično določenega oblaka točk začne s prepoznavanjem značilnih točk na fotografijah, bomo v nadaljevanju na kratko predstavili osnovne principe delovanja metod, ki so povezane s procesom slikovnega ujemanja.

Na tem mestu velja poudariti, da točni algoritmi in metode, na podlagi katerih deluje uporabljena programska oprema, niso znani, saj so varovani kot poslovna skrivnost. Vseeno pa je za razumevanje rezultatov te naloge bistvenega pomena, da poznamo osnovne principe delovanja procesov slikovnega ujemanja.

2.1.1 Postopek slikovnega ujemanja SIFT

SIFT (Scale-invariant feature transform) je postopek, ki ga je prvič objavil Lowe (1999) in nato še dodatno razvil Lowe (2004).

Postopek omogoča zaznavanje značilnih točk na različnih fotografijah neodvisno od spremembe merila, zasukov in premikov. Delno je neodvisen tudi od spremembe osvetlitve fotografije, šuma in afinih transformacij.

Na postopku SIFT temelji tudi programska oprema Bundler (Snavely, Seitz in Szeliski, 2006).

2.1.1.1 Iskanje značilnih točk

Za prepoznavanje značilnih točk moramo najprej določiti njihov položaj in merilo. V ta namen definiramo funkcijo, s katero bomo določili položaje značilnih točk pri različnih merilih.

V prostoru meril (ang. *scale space*) fotografije definiramo funkcijo $L(x, y, \sigma)$, ki jo dobimo s konvolucijo funkcij $G(x, y, \sigma)$ in obravnavane fotografije $I(x, y)$:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$$

V praksi se izkaže, da ekstremi funkcije $D(x, y, \sigma)$ dobro prikažejo položaj značilnih točk na fotografiji. Funkcija $D(x, y, \sigma)$ je definirana kot razlika funkcij $L(x, y, k\sigma)$ za različne vrednosti σ :

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned}$$

2.1.1.2 Prepoznavanje in umestitev značilnih točk

V naslednji fazi prepoznamim značilnim točkam bolj natančno določimo položaj, merilo in velikost glavnih ukrivljenosti.

Okolico ekstrema opišemo z razvojem funkcije $D(x, y, \sigma)$ v Taylorjevo vrsto do drugega reda:

$$D(\mathbf{x}) = D + \frac{\partial D}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \frac{\partial^2 D}{\partial \mathbf{x}^2} \mathbf{x}$$

kjer so funkcija D in njeni odvodi iz vrednoteni v obravnavanem ekstremu in vektor $\mathbf{x} = (x, y, \sigma)^T$ predstavlja oddaljenost od ekstrema.

S pomočjo linearnih členov v razvoju lahko natančneje določimo položaj ekstrema. Če so vrednosti linearnih členov enake nič, potem položaja ne moremo izboljšati, saj se že nahajamo v ekstremu. V nasprotnem primeru vrednost spreminjamo, da se čimbolj približamo vrednosti nič.

Iz koeficientov kvadratnega člena razvoja funkcije lahko določimo obliko značilne točke. To lahko uporabimo kot enega od kriterijev za določitev primernosti točke. Poda nam ukrivljenost funkcije.

Glede na razmerje med ukrivljenostmi v glavnih smereh lahko sklepamo na obliko točke. Razmerje med največjo in najmanjšo ukrivljenostjo ne sme biti preveliko (večje od 10). V primerih, ko je to razmerje približno 1, lahko govorimo o točki, z večanjem razmerja pa se oblika vse bolj približuje liniji.

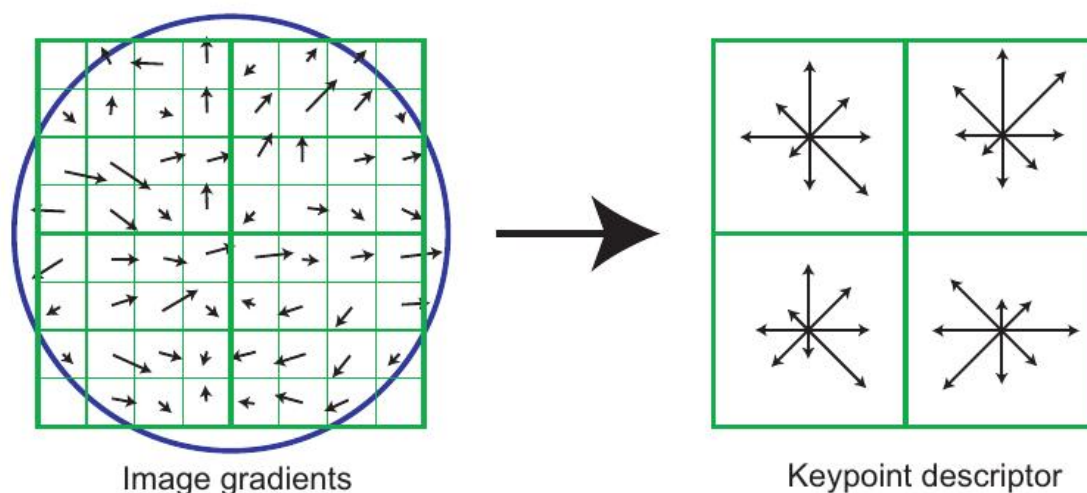
2.1.1.3 Določitev usmerjenosti značilnih točk

Cilj je določiti usmerjenost značilne točke neodvisno od usmerjenosti celotne fotografije.

Pri izračunih operiramo z zglajeno sliko L , s čimer dosežemo, da so rezultati izračunani za točno določeno merilo. V določenem merilu prostora in na podlagi sprememb slikovnih elementov izbranega območja na fotografiji $L(x, y)$ izračunamo velikost gradienta $m(x, y)$ in usmerjenost $\Theta(x, y)$.

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2}$$
$$\Theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}$$

V okolici značilne točke iz usmerjenosti gradientov v okoliških točkah določimo histogram usmerjenosti. Histogram usmerjenosti opiše smer, v kateri se seštevki vseh gradientov točk v okolici značilne točke najhitreje spreminjajo. V primeru, ko obstaja več prevladajočih smeri, ustvarimo več značilnih točk na istem položaju in merilu, ki jim pripišemo različno orientacijo.



Slika 2.1: Tvorba deskriptorja iz slikovnih gradientov v okolici značilne točke (Lowe, 2004: str 15).

2.1.1.4 Deskriptor značilnih točk

Okolico značilne točke zasukamo za kot Θ in na ta način zagotovimo, da deskriptor ni odvisen od usmerjenosti fotografije.

Na sliki 2.1 je prikazan način opisa značilne točke. Okolico najprej razdelimo na podobmočja. Za okolico točke določimo relativno usmerjene gradiente, ki jih nato s pomočjo matrike Gaussovega okna dodelimo v histograme za vsako podobmočje. V vsakem histogramu zberemo smeri v predhodno določenem številu razredov.

Rezultat je deskriptor značilne točke, ki je na sliki 2.1 prikazan kot vektor s 32 elementi (4 podobmočja s po osmimi vrednostmi histograma oziroma smermi).

Dobljen vektor nato še normaliziramo in na ta način zagotovimo neodvisnost od sprememb kontrasta. Neodvisnost od spremembe osvetlitve je zagotovljena že z dejstvom, da ga določimo z gradienti, ki poenostavljeno predstavljajo razlike intenzitete med posameznimi slikovnimi elementi.

2.1.1.5 Primerjava značilnih točk

S procesom iskanja in opisovanja ustvarimo bazo določenih značilnih točk za vsako fotografijo. Cilj primerjave značilnih točk je določiti ujemanje deskriptorjev istih značilnih točk na različnih fotografijah.

Za vsako značilno točko določimo najprimernejšega kandidata z iskanjem najbližjega soseda v ustvarjeni bazi. Ta se določi na podlagi izračuna minimalne evklidske razdalje v prostoru, ki

ima dimenzijo enako dimenziji deskriptorja.

Ni nujno, da je vektor, ki ima najmanjšo razdaljo pravi zadetek, saj se lahko zaradi šuma in različne osvetlitve pojavijo napake. Zato pregledamo še razmerje vrednosti med prvo in drugo najboljšo rešitvijo. V primeru ko je razmerje med njima približno 0,8 ne izberemo nobene, saj bi lahko na ta način naredili grobo napako.

Algoritem uporablja še nekatere druge postopke za izločitev grobo pogrešenih zadetkov, ki so opisani v (Lowe, 2004).

2.1.2 Ostali postopki slikovnega ujemanja

Postopek slikovnega ujemanja SURF (Speeded-up robust features) je prvi predstavil Herbert Bay in sod. (2008). Položaji značilnih točk so določeni in opisani na podoben način kot pri postopku SIFT.

Glavna prednost postopka SURF je hitrost pri izračunih. Postopek SURF namesto razlike dveh konvolucij slike z Gaussovo funkcijo uporablja determinanto Hessejeve matrike. Elementov Hessejeve matrike ne pridobimo direktno z odvajanje intenzitete na fotografiji ampak s konvolucijo ustreznega odvoda Gaussove funkcije s fotografijo.

Največje izboljšanje v hitrosti izračuna dosežemo s tem, da uporabljamo krajše deskriptorje značilnih točk. Deskriptorje značilne točke namreč pridobimo tako, da aproksimiramo okolico značilne točke s Haarovimi valčki. Podrobnosti o definiciji in lastnostih Haarovih valčkov je mogoče prebrati v Chui (1992).

Poleg postopkov, ki temeljijo na prepoznavanju značilnih točk (SIFT in SURF) poznamo tudi t.i. ploskovne postopke slikovnega ujemanja. Njihova največja razlika je v načinu določevanja ujemanja med posameznimi fotografijami. Ploskovni postopki namesto primerjave vsakega slikovnega elementa fotografije z metodo najmanjših kvadratov primerjajo celotno fotografijo z predhodno izbranim vzorcem. V primerjavi s točkovnimi postopki slikovnega ujemanja je ploskovni postopek bolj občutljiv na delno zakritje vzorca ter zahteva dobro poznane zunanje in notranje parametre posnetkov. V literaturi zasledimo ploskovni postopek slikovnega ujemanja SGM (Semi Global Matching), ki paru posnetkov na podlagi poznanih položajev posnetkov določi globinsko informacijo (Hirschmüller, 2005).

2.2 Določanje položaja točk v prostoru iz fotografij

Potem ko določimo ogromno število značilnih točk na fotografijah in prepoznamo njihove kopije na drugih fotografijah, se vprašamo, kaj sedaj narediti z ustvarjeno bazo točk? Za cilj si lahko postavimo nalogo, da prepoznanim značilnim točkam določimo še koordinate v 3D prostoru.

Poenostavljeno lahko rečemo, da na podlagi poznanih slikovnih koordinat iste značilne točke na različnih fotografijah in poznanih notranjih parametrih fotoaparata, določimo zunanje parametre posnetkov in presečišča žarkov v prostoru. V presečiščih žarkov ležijo prepoznane točke.

Postopek je na prvi pogled podoben že uveljavljeni tehniki, pri kateri položaje točk določamo iz stereopara. Glavna razlika obravnavanega postopka je v tem, da medsebojne položaje fotoaparata in položaje točk določi na podlagi večjega števila fotografij samodejno. Tako za določevanje parametrov ni potrebno določevati položajev oslonilnih in veznih točk na fotografijah.

Vhodni podatki za izračun so slikovne koordinate značilnih točk in približni notranji parametri fotoaparata. Slikovne koordinate značilnih točk smo pridobili s postopkom slikovnega ujemanja (npr. SIFT), medtem ko lahko osnovne notranje parametre fotoaparata dobimo iz metapodatkov posnetkov. Metapodatki so shranjeni v t.i. EXIF datoteki (Exchangeable image file format), ki med drugim vsebuje podatke o približni goriščni razdalji fotoaparata in velikosti posnetkov (število slikovnih elementov).

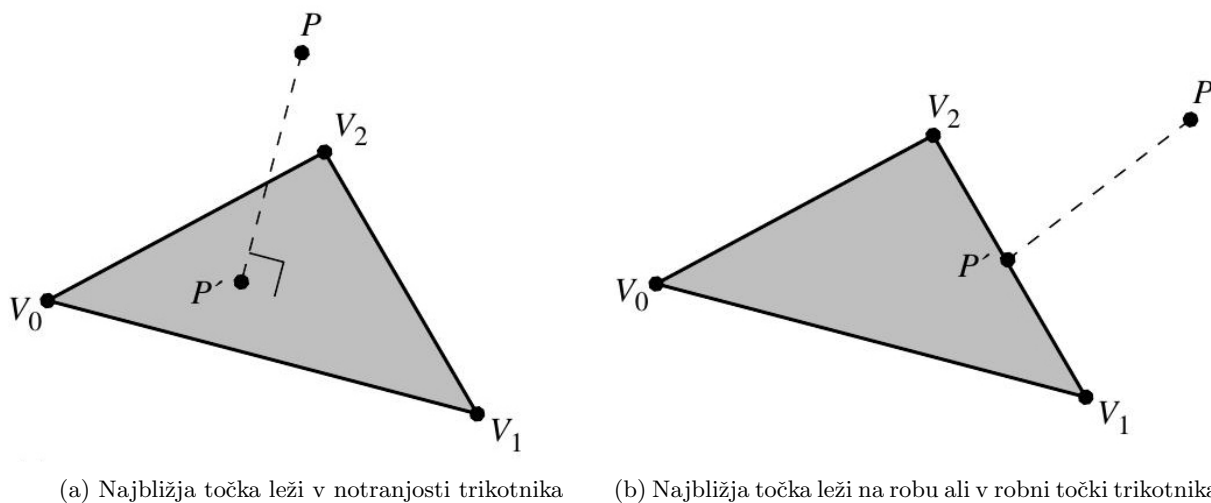
Iz znanih vhodnih podatkov lahko opišemo preslikavo točke iz prostora na ravnino sensorja. Če na ta način v prostoru R^3 določimo več točk, lahko izračunamo matriko, v kateri so podani relativni premiki in rotacije posameznega posnetka. Problem določitve parametrov izrazimo s pomočjo projekcijske matrike K s položaji značilnih točk na fotografijah. Tako preslikan sistem je poddeterminiran, zato ga rešimo z metodo najmanjših kvadratov. Na ta način lahko poleg položaja značilnih točk določimo tudi preostale parametre notranje orientacije (distorzije, ...).

Položaje prepoznanih značilnih točk oštevilčimo z indeksom i , fotografije pa z indeksom j . Določimo lahko predvidene projekcije i -te točke na j -ti fotografiji, ki predstavljajo začetne parametre pri izvedbi skupnega uravnavanja - izravnave. Začetne približke optimiziramo tako, da minimiziramo vsoto kvadratov razdalj med začetno projekcijo i -te točke na j -ti fotografiji in predvideno projekcijo iste točke na tej fotografiji. To naredimo za vse točke na vseh fotografijah.

Rezultat izračuna predstavljajo določeni položaji značilnih točk v prostoru, zunanji parametri posnetkov in delno spremenjena projekcijska matrika. Rezultati so podani v relativnem koordinatnem sistemu in ne vsebujejo pravega merila. Ker točke določamo iz barvnih fotografij, dobimo poleg položaja točke tudi njeno barvo, ki jo izračunamo kot povprečje vrednosti na vseh fotografijah.

2.3 Izračun razdalj med oblakom točk in trikotniškim modelom

Obstaja več študij, ki opisujejo načine izračuna razdalj med različnimi 3D modeli in oblaki točk. Cignoni (1996) je razvil programsko orodje *Metro*, ki omogoča izračun razlik nastalih pri poenostavljanju in glajenju 3D modelov. Na podobnem principu deluje tudi programska oprema *Mesh* (Aspert, Santa-Cruz in Ebrahimi, 2002), ki razdalje med ploskvami v različnih modelih določa na podlagi izračuna Hausdorffovih razdalj.



Slika 2.2: Razdalja med točko in trikotnikom (Schneider in Eberly, 2002: str 376).

V nadaljevanju bomo za potrebe boljšega razumevanja diplomske naloge na kratko razložili osnovne pojme in korake pri določitvi razdalj med ploskovnim 3D modelom in oblakom točk. Osredotočili se bomo na način izračuna, ki je uporabljen v programski opremi CloudCompare (Schneider in Eberly, 2002).

Osnovna enota ploskovnega 3D modela je trikotnik τ s robovi $\{V_0, V_1, V_2\}$, ki je za potrebe razlage definiran kot

$$\tau(s, t) = B + s\vec{e}_0 + t\vec{e}_1,$$

pri čemer velja $(s, t) \in D = \{(s, t); s \in [0, 1], t \in [0, 1], s + t \leq 1\}$, $B = V_0$, $\vec{e}_0 = V_1 - V_0$ in $\vec{e}_1 = V_2 - V_0$.

Razdaljo med točko in trikotnikom definiramo kot najkrajšo razdaljo med točko P in $P' \in D$ na trikotniku (glej sliko 2.2).

Zaradi lažjega izračuna razdalje položaj točke P' določimo z minimiziranjem kvadrata razdalje $Q(s, t)$

$$Q(s, t) = \|\tau(s, t) - P\|^2.$$

Možne so tri rešitve:

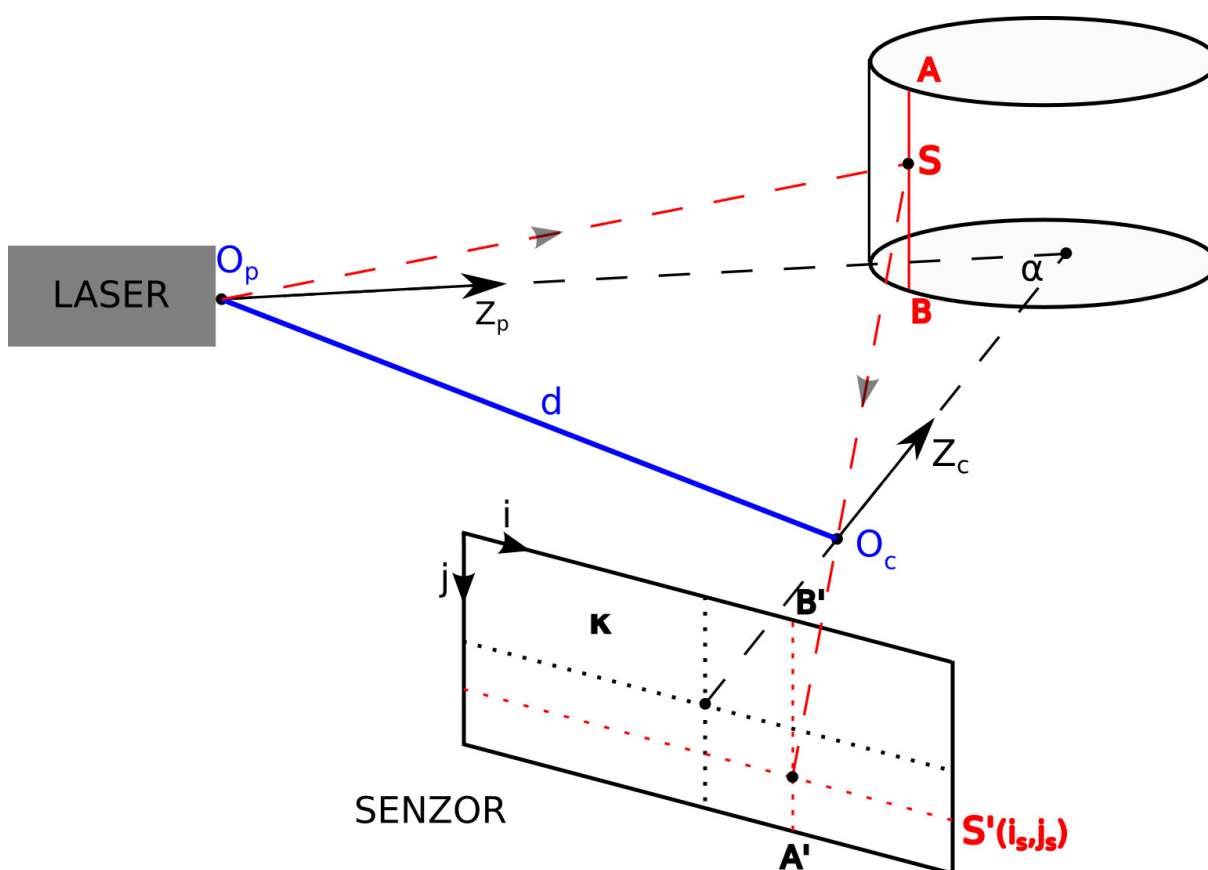
- točka P' se nahaja znotraj trikotnika,
- točka P' je na robovih trikotnika,
- točka P' je robna točka trikotnika.

Predznak izračunane razdalje je odvisen od smeri normale. Prostor lahko razdelimo na dva polprostora, ki se med seboj razlikujeta glede na usmerjenost normale. V polprostoru, kamor je usmerjena normala, imajo vrednosti pozitiven v drugem pa negativen predznak.

2.4 Triangulacijski laserski skener

Ker se triangulacijski skenerji zaradi svojega kratkega dosega le malokrat pojavijo v nalogah geodetske stroke, bomo na kratko predstavili njihov način delovanja.

Osnovni način delovanja teh skenerjev temelji na principu triangulacije pri čemer navidezni trikotnik tvorijo laserska glava (oddajnik), žarek in optični senzor (glej sliko 2.3).



Slika 2.3: Shematičen prikaz delovanja triangulacijskega laserskega skenerja.

Glavna sestavna dela triangulacijskega skenerja sta laserska glava, ki oddaja laserski žarek, in optični sistem, ki je namenjen zaznavanju žarka na površju predmeta (Dorsch in sod., 1994).

Na sliki 2.3 vidimo, da točki O_p in O_c predstavljata izhodno točko žarka in center projekcije optičnega sistema. Razdalja med njima je predhodno določena in predstavlja bazo d . Optični osi z_p in z_c se sekata pod kotom α . Oddajnik ustvari ozek laserski žarek, ki ga na površju objekta

zaznamo kot točko S , ta pa se na slikovno ravnino senzorja κ preslika kot točka $S' (i_S, j_S)$. Z določitvijo položaja projekcije žarka na slikovni ravnini κ definiramo potek žarka $\overline{SO_c}$ preko katerega lahko izračunamo položaj točke S .

Točka S se pomika po vrsticah, pri čemer ločni kot med vrsticami določa resolucijo sistema. Obstajajo tudi izvedbe trianglacijskih laserskih skenerjev, ki hkrati berejo celotno vrsto in so zato nekoliko hitrejši.

3 ZAJEM PODATKOV

3.1 Zahteve naročnika

Cilj projekta, raziskave ali tržnega naročila je končni izdelek, ki mora ustrezati predhodno podanim zahtevam naročnika. Najpogosteje so te zahteve tehnične narave in opredeljujejo končni izdelek z zahtevano natančnostjo, skladnostjo s standardi ali z zahtevanim obsegom dela. V našem primeru je naročnika predstavljala Evropska komisija, preko projekta 3D-ICONS.

3D-ICONS (2014) je pilotni projekt, podprt s strani evropske komisije (ICT Policy Support Programme). Izvedba načrta se je začela 1. februarja 2012 in bo predvidoma potekala tri leta. V projekt so vključene raziskovalne ustanove iz različnih delov Evrope z ustreznim znanjem in izkušnjami pri obravnavi objektov kulturne dediščine. Projekt je namenjen:

- določitvi celovitega postopka izdelave 3D replik arheoloških najdbišč in zgodovinskih stavb s poudarkom na tehničnih rešitvah, pripravi in pregledu zakonske podlage ter organizaciji projekta,
- izdelavi 3D modelov ter drugih predstavitev spomenikov in stavb (publikacije, slikovni in video material), ki so pomembni na mednarodni ravni,
- prispevanju vsebin za projekt Europeana¹ s pomočjo spletnega vmesnika CARARE².

Iz zgornjega povzetka programa projekta razberemo, da nam naročnik ne postavlja konkretnih zahtev glede kakovosti končnih izdelkov. Tako nam na primer ne podaja zahtev glede porekla podatkov, položajne natančnosti in atributne natančnosti (Guptill, 1995). Nasprotno, spodbuja nas k uporabi raznovrstnih uveljavljenih in novih postopkov za dokumentiranje objektov kulturne dediščine. Na ta način želi pridobiti povratno informacijo o primernosti uporabljene metodologije za obravnavane primere.

Pred obravnavo objektov kulturne dediščine je potrebno narediti njihovo temeljito analizo, jih umestiti v zgodovinski kontekst ter določiti njihove osnovne konstrukcijske lastnosti, ki nam omogočajo smotrno izvedbo zajema. Pri tem opredelimo njihovo velikost, saj se za zajem večjih (spomeniki, cerkve, . . .) uporabljajo drugačne tehnike kot pri manjših objektih (nakit, kipci, . . .). Prav tako preučimo materiale, iz katerih so izgrajeni, in tako prepoznamo predele, ki so za nekatere metode neprimerni (npr. steklo).

Pri izbiri najprimernejše tehnike za zajem lahko uporabimo naslednje kriterije (Pavlidis in sod., 2007):

¹Spletni arhiv, ki vsebuje knjige, slike, filme, 3D objekte in ostale objekte s področja Evrope.

²Spletni vmesnik, ki omogoča dostop do 3D objektov na spletni stani projekta Europeana.

- stroški, povezani z zajemom in obdelavo,
- snov iz katere je narejen objekt,
- velikost objekta,
- prenosljivost opreme,
- natančnost zajema,
- pridobivanje teksture,
- hitrost zajema,
- zahtevano predznanje,
- skladnost s standardi.

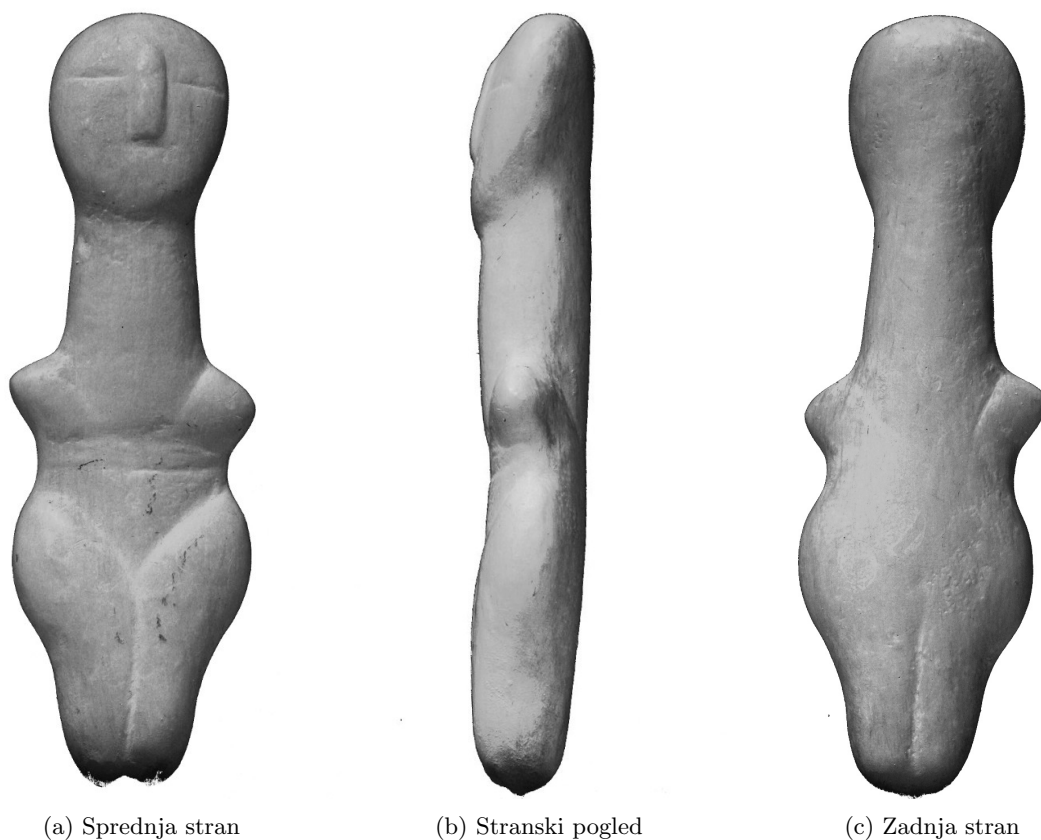
Z namenom upoštevanja čimvečjega števila različnih kriterijev smo si izbrali dva različna objekta in dva različna način zajema. Uporabili smo metodo laserskega skeniranja in večslikovno ujemanje, ki se med seboj razlikujeta v stroških zajema (cena opreme), prenosljivosti, načinu zajema (natančnost in hitrost) in zahtevanem predznanju. Objekta sta različnih velikosti, hkrati pa sta sestavljena iz različnih gradnikov (npr. opeka, kamen in mavec).

3.2 Kratak opis obravnavanih objektov

3.2.1 Kikladski kipec ženske figure

Kikladski kipec ženske figure so izkopali v Grčiji, na otoku Sifnos, ki je del Kikladskega otočja v Egejskem morju (glej sliko 3.2). Kipec pripada t.i. zgodnjemu obdobju kikladske umetnosti in naj bi bil narejen med leti 2800 in 2000 pr.n.št (Higgins, 1972).

Večina kipcev tistega časa, med katere sodi tudi obravnavani kipec, predstavlja gole ženske figure, znanih pa je tudi nekaj moških figur. Kipci so po obliki simetrični in ploščati ter imajo poudarjene le najpomembnejše dele človeškega telesa, kot so nos, roke, boki in noge (glej sliko 3.1). Poleg tega je za njih značilna tudi postavitev rok in nog, saj so imeli kipci praviloma prekržane roke preko trebuha, pri čemer je bila desna roka vedno pred levo, noge pa so bile vedno iztegnjene. Oblika kipcev je onemogočala, da bi bile figure prosto stoječe, lahko pa so bile položene na hrbet po celotni dolžini, ali pa so bile narejene za nošnjo. Kipci so imeli za tamkajšnje ljudstvo velik pomen, saj so jih izdelovali iz marmorja in ne iz kakšnega materiala, ki se lažje obdeluje (Fitton, 1999).



Slika 3.1: Replika kipca ženske figure (Kikladsko otočje, otok Sifnos, 2800 - 2300 pr.n.š).

Obstaja več razlag glede samega pomena kipcev. Po nekaterih razlagah naj bi imeli kipci ritualen značaj, saj jih je bilo veliko odkritih v grobovih (Fitton, 1999). Ker pa so imeli kipci poudarjeno oprsje, boke in trebuh, bi bili lahko tudi predmet, s katerimi so tamkajšnja ljudstva častila rodnost (Renfrew in Fitton, 1984).

Obravnavana je mavčna kopija kipca, ki je visoka 14,5 cm in široka 4,3 cm.

3.2.2 Cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke

Cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke se nahaja v grški pokrajini Trahija, ob vzhodni obali jezera Vistonida, v občini Xanthi (glej sliko 3.2) in predstavlja enega najpomembnejših primerov otomanske arhitekture tega območja. Današnja cerkev naj bi bila zgrajena v 15. stoletju na ruševinah pravoslavne cerkve, ki je bil posvečen svetemu Juriju Kalamitziotisu. Tekke pomeni zbirališče dervišev³, vendar naj bi bil izraz po besedah H. W. Lowry (2009) nepravilen, saj naj bi bil objekt grobnica (*türbe*).

³Derviš imenujemo pripadnika sufistične muslimanske veroizpovedi, ki se s svojim preprostim življenjem prizadeva za visoko spoznanje Boga (Hanks, 2003).



Slika 3.2: Zemljevid današnje Grčije z označeno lokacijo oziroma izvorom obravnavanih objektov.



Slika 3.3: Objekt Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke (Avtor: Anestis Koutsoudis).

Ker so se na tem območju skozi zgodovino prepletala različna verstva in narodi, ima objekt za vsakega izmed njih svoj pomen. Tako je za muslimane predstavljal grobišče derviša Kioutouklou Baba, medtem ko ga je pravoslavna cerkev posvetila svetemu Juriju (Lowry, 2009).

Cerkev spada med manjše arhitekturne objekte iz obdobja otomanskega cesarstva. Dolga je približno 13 m, široka 8 m in visoka 12 m. Je kamnita in sestavljena iz dveh glavnih delov, ki ju predstavljata osemkotni mavzolej in obokan predprostor. Mavzolej ima dve okni, ki gledata proti vzhodu in jugu, pokrit pa je s kupolasto opečnato streho (glej sliko 3.3). Objekt je delno obnovljen. Popravljeni so bili zidovi in v celoti zamenjana opečnata strešna kritina.

3.3 Uporabljena oprema in programska orodja

3.3.1 Fotografski aparati

Da smo se čimbolj približali situaciji, ko za potrebe dokumentiranja nimamo na voljo veliko sredstev, smo fotografije zajeli z nemerskimi fotoaparati. V preglednici 3.1 in 3.2 so podane tehnične lastnosti uporabljenih fotoaparatorov. Podane so pomembne lastnosti in nastavitve, ki smo jih med zajemom spreminjali.

Preglednica 3.1: Tehnične lastnosti fotoaparata Canon PowerShot A630 (Canon A630, 2006).

Lastnost	Vrednost
Ločljivost	3264 × 2448 (8 MP)
Razmerje	4:3
Tipalo	CCD
Velikost tipala	7,2 mm × 5,3 mm
Zaslonka	f/2,8 - f/8,0
Ročno ostrenje	Da
Popravek osvetlitve	± 2,0 EV

Preglednica 3.2: Tehnične lastnosti fotoaparata Nikon D40 in Canon EOS350d (Nikon, 2014; Canon EOS350d, 2014).

Lastnost	Nikon D40	Canon EOS350d
Ločljivost	3000 × 2000 (6 MP)	3456 × 2304 (8 MP)
Razmerje	3:2	3:2
Tipalo	CCD	CMOS
Velikost tipala	23,7 mm × 15,6 mm	22,2 mm × 14,8 mm
Objektiv	Nikkor 18-55 mm f/3,5-5,6G II	Canon EF-S 18-55 mm III Lens
Ročno ostrenje	Da	Da

3.3.2 Laserski skenerji

Za obravnavno kipca ženske figure smo uporabili triangulacijski skener Arius 3D foundation scanner 100, ki ga je razvilo kanadsko podjetje Arius 3D v sodelovanju z NRC (National Research Council of Canada). Podrobnosti o delovanju triangulacijskih laserskih skenerjev so opisane v poglavju 2.4.

Laserski skener z uporabo laserskega žarka treh valovnih dolžin omogoča tudi skalibriran zajem barv. Kalibracija se izvede preko določenega belega vzorca, ki ga laser posname pred začetkom zajema vsake vrstice. Na ta način se izloči vpliv okoliške svetlobe. Direktno določanje barv sicer ni v domeni laserskih skenerjev, saj se pri večini skenerjev barve določi iz sočasno zajetih fotografij. Lastnosti omenjenega laserskega skenerja so podane v preglednici 3.3.

Preglednica 3.3: Tehnične lastnosti laserskega skenerja Arius3D Foundation Model 100 (Arius, 2009).

Lastnost	Vrednost
Princip delovanja	Triangulacijski
Valovna dolžina laserskega žarka λ	73 nm, 532 nm, 638 nm
Varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	Razred 2R
Hitrost skeniranja	Max. 3.000 točk/s
Najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost mreže (Hz, V)	0,1 mm
Natančnost posamezne točke	$\sigma = \pm 25 \mu\text{m}$
Natančnost merjenja dolžine	$\sigma = \pm 6 - 10 \mu\text{m}$
Največja velikost objekta	64 cm \times 50,8 cm ($\text{\AA} \times \text{v}$)

Terestrično lasersko skeniranje cerkve Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke je bilo izvedeno z impulznim laserskim skenerjem ILRIS 3₆D (glej preglednico 3.4).

Preglednica 3.4: Tehnične lastnosti laserskega skenerja ILRIS 3₆D (specifikacije ILRIS, 2004).

Lastnost	Vrednost
Princip delovanja	Impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ	1500 nm (infrardeča)
Varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	Razred 1R
Kotno merilno območje (Hz \times V)	360° \times 110°
Doseg	Od 3 m do 1.500 m za površine reflektivnosti 80° Od 3 m do 800 m za površine reflektivnosti 20° Od 3 m do 350 m za površine reflektivnosti 4°
Hitrost skeniranja	Max. 2.500 točk/s
Najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost mreže (Hz, V)	4,1" ali 1 mm pri d = 50 m
Divergenca žarka	35,1" ali povečanje premera žarka za 17 mm na 100 m
Natančnost posamezne točke	$\sigma = \pm 8 \text{ mm}$ pri d=100 m
Natančnost merjenja dolžine	$\sigma = \pm 7 \text{ mm}$ pri d=100 m

3.3.3 Programsko orodje PhotoScan

Agisoft LLC je rusko razvojno podjetje, ki razvija programsko opremo PhotoScan, s katero so izdelani fotogrametrično določeni 3D modeli v diplomski nalogi. Na tržišču obstaja t.i. osnovna in profesionalna različica programa (glej preglednico 3.5).

Preglednica 3.5: Funkcije programske opreme PhotoScan (AgiSoft, 2014).

Funkcije	Osnovna različica	Profesionalna različica
Aerotriangulacija	✓	✓
Izdelava oblaka točk	✓	✓
Izdelava 3D modela	✓	✓
Izdelava tekstur	✓	✓
Nastavitev koordinatnega sistema	×	✓
Izdelava DMV	×	✓
Izdelava ortofoto posnetka	×	✓
Georeferenciranje	×	✓
4D rekonstrukcija objektov	×	✓
Obdelava multispektralnih fotografij	×	✓
Vnos Python kode	×	✓

Za nemoten potek zahtevnih izračunov algoritmov računalniškega vida PhotoScan potrebuje zmogljivo računalniško podporo, zato je v našem primeru osnova različica programa 0.8.5 nameščena na namizni računalnik z naslednjo strojno opremo:

- procesor Intel i7 (3.50 GHz, 8-jedrni),
- pomnilnik (RAM) 32 GB in
- grafična kartica NVidia Geforce GTX580 3GB delovnega pomnilnika.

3.3.4 Ostala programska orodja

Pri delu smo uporabili tudi odprtokodni programski orodji MeshLab in CloudCompare.

Program MeshLab smo uporabili za določitev transformacijskih parametrov Helmertove transformacije in prepoznavanje topoloških napak fotogrametrično določenih 3D modelov. V MeshLab-u transformirane 3D modele smo nato uvozili v program CloudCompare. V omenjenem programu smo izvedli registracijo fotogrametrično določenega 3D modela in oblaka točk laserskega skeniranja in na ta način še dodatno izboljšali njuno ujemanje. V programu CloudCompare smo izvedli tudi geometrične primerjave.

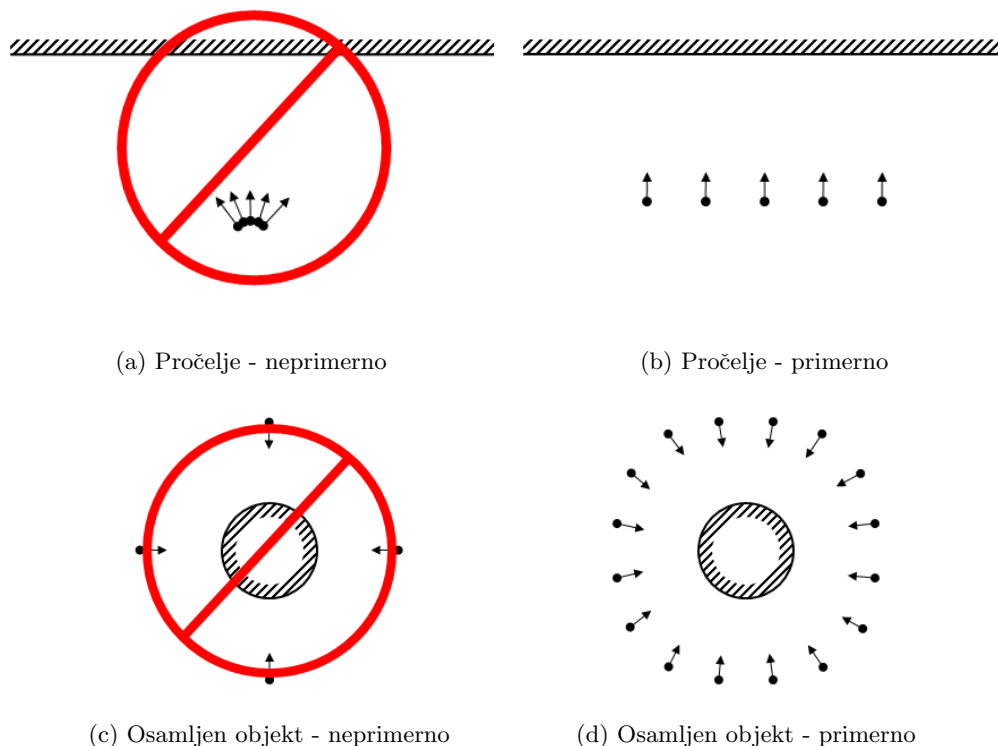
3.4 Izvedba meritev

Pred samim začetkom mora strokovnjak, ki je zadolžen za zajem, narediti načrt snemanja, pri katerem upošteva morfološke posebnosti in geometrično kompleksnost objekta. Na podlagi tega se odloči za potek zajema, velikost prekrivanja in število fotografij oziroma delnih skenov.

V diplomski nalogi smo primerjali podatke, zajete na dva načina, in sicer z laserskim skeniranjem in s fotogrametričnim zajemom. Podatkov laserskega skeniranja nismo pridobili sami, ampak smo jih prevzeli od predhodnih študijskih skupin. Podrobnosti o prevzetih podatkih in izvedbi meritev so za vsak primer podane v nadaljevanju.

Ker je cilj raziskave opisati postopek za zanesljivo izgradnjo 3D modelov iz fotografij, smo veliko pozornosti namenili načinu zajema fotografij, s katerim pridobimo primerne podatke. Priporočila za zajem podatkov najdemo v navodilih za programsko opremo PhotoScan in so ilustrirana na sliki 3.4.

V poglavju 2.2 smo omenili, da za določitev položaja točke v prostoru potrebujemo najmanj dva posnetka, na katerih je vidna ista točka. Na ilustracijah vidimo, da primeri, kjer so fotografije posnete iz istega stojišča, niso primerni za obdelavo. Tako pridobljene fotografije imajo namreč le neznatne spremembe zunanjih parametrov in zato niso primerne za določanje prostorskih presekov. Iz navodil vidimo, da morajo biti fotografije posnete iz različnih stojišč, ki zagotovijo primerno razliko v projekcijah.



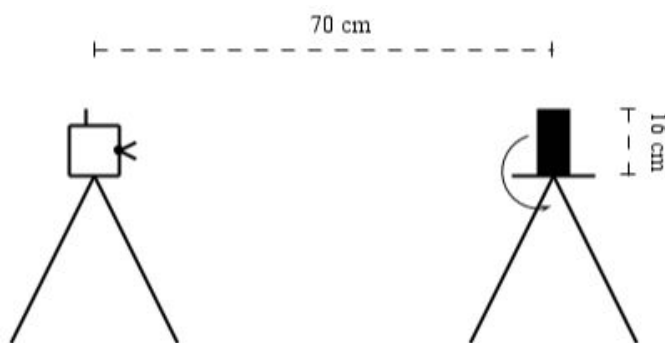
Slika 3.4: Napotki za zajem fotografij (navodila PhotoScan v0.8.5, 2012: str 4).

3.4.1 Kikladski kipec ženske figure

Kipec smo fotografirali z nemerskim digitalnim fotoaparatom Canon PowerShot A630 (glej preglednico 3.1) z ločljivostjo 8 milijonov slikovnih točk.

Med zajemom smo fotoaparat pritrdili na stativ, medtem ko smo kipec namestili na stojalo s kotno razdelbo, ki omogoča enakomerne ročne zasuke objekta. Namenoma nismo uporabili računalniško vodene rotirajoče mizice za zasuk objekta med zajemom ter s tem še znižali stroške zajema.

Razdalja med objektom in fotoaparatom je približno 70 cm (glej sliko 3.5), pri čemer smo za doseg zadostne ostrine maksimalno zaprli zaslonko in s tem dosegli, da je na vsakem posnetku celotna zajeta površina ostra in tako primerna za nadaljnjo uporabo.



Slika 3.5: Shematični prikaz postavitve fotoaparata in objekta med zajemom fotografij.

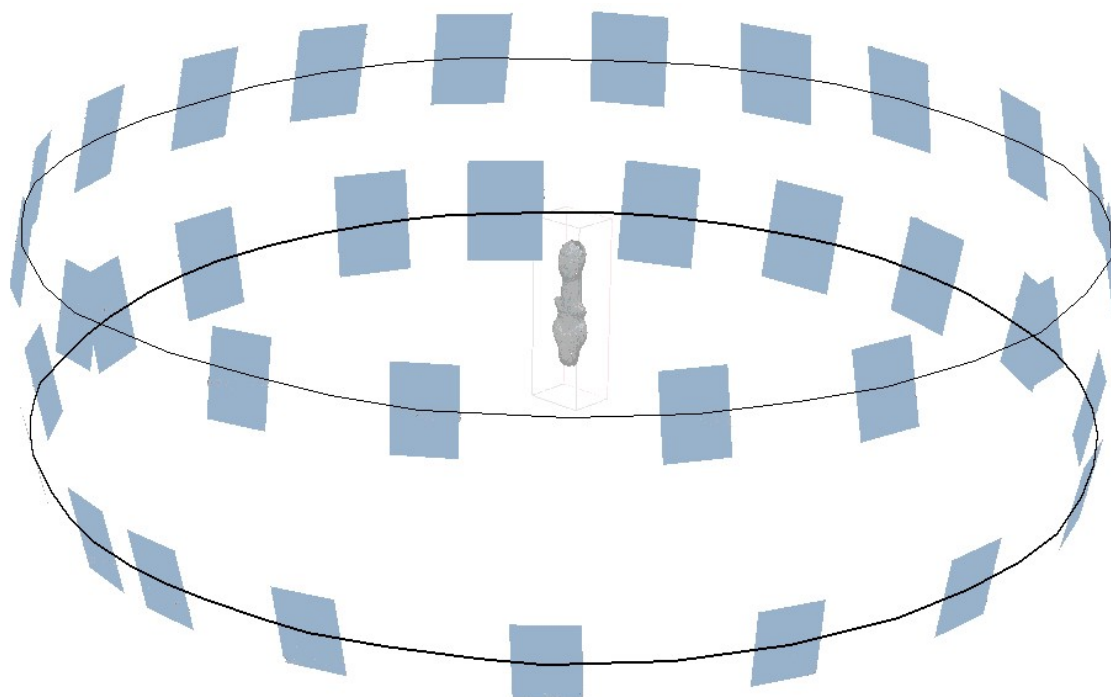
Za lažjo nadaljnjo obdelavo fotografij (maskiranje) smo za objekt namestili enobarvno temno ozadje, ki je močno kontrastno odstopalo od kipca svetlejših barv. Zaradi neizrazitih potez in majhnih razlik med barvnimi odtenki smo spremenili nastavitve osvetlitve na fotoaparatu in se s tem izognili podosvetljenim oziroma preosvetljenim delom, ki so neprimerni za proces slikovnega ujemanja.

Razen že vgrajenih luči v prostoru nismo uporabili dodatnih virov osvetlitve, saj so že te oddajale primerno in dovolj razpršeno osvetlitev.

Skupno smo posneli 142 fotografij objekta v dveh navideznih krogih (glej sliko 3.6). Celoten čas zajema fotografij je ocenjen na eno uro.

Kipec je bil zajet tudi z triangulacijskim laserskim skenerjem Aruis3D Foundation 100 (glej preglednico 3.3). V našem primeru smo za zajem celotne površine kipca posneli 11 ločenih delnih skenov (glej preglednico 3.6) z medsebojnim prekrivanjem med 20% in 40%. Povprečno je v posameznemu skenu zajetih 226.622 točk.

Celoten čas zajema je ocenjen na 5 - 6 ur, pri čemer velja opozoriti, da je za rokovanje s tovrstno opremo potrebno imeti za to usposobljene strokovnjake.



Slika 3.6: Prikaz razporeditve zajetih fotografij Kikladskega kipca ženske figure. Zaradi boljše preglednosti je na sliki prikazana le četrtina zajetih fotografij.

Preglednica 3.6: Podatki o zajemu Kikladskega kipca ženske figure z laserskim skenerjem Arius 3D Foundation 100.

Št. delnega skena	Število linij	Število točk
1	1.669	254.568
2	1.632	186.329
3	1.888	183.711
4	1.663	248.407
5	1.528	235.901
6	1.908	290.399
7	1.674	189.886
8	1.562	246.221
9	1.594	251.477
10	2.300	369.827
11	294	36.123

3.4.2 Cerkev Kioutouklou Baba Bekdashic Tekke

Fotografiranje objekta smo izvedli v dveh fazah. Najprej smo objekt fotografirali iz okolice, nato pa s pomočjo daljinsko vodenega helikopterja še iz zraka.

Zajem smo planirali na oblačen dan in s tem preprečili neenakomerno osvetlitev objekta in ostre sence.

Uporabljen UAV ima razpon propelerjev 1,85 m in je sposoben dvigniti največ 4,5 kg težak tovor. Fotografiranje iz zraka smo izvedli s DSLR kamero Canon EOS350d (glej preglednico 3.2), ki skupaj z uporabljenim objektivom in baterijami ne presega teže 750 g.

Poleg grobega premikanja s helikopterjem smo lahko fotoaparatusmerjali tudi s pomočjo vrtljivega nosilca, ki je bil pritrjen na UAV. Nosilec omogoča zasuke fotoaparata za 360° v horizontalni, 220° v vertikalni smeri in 60° poševnega nagiba. UAV in nosilec za fotoaparatusmerjalnik je preko kontrolne enote upravljal za to usposobljen letalski tehnik. Proženje fotoaparata je potekalo samodejno, s predhodno določenim intervalom. Ker se UAV med zajemom premika, smo temu prilagodili tudi nastavitve na fotoaparatusmerjalnik. Zamegljenost fotografij smo preprečili z uporabo nastavitve, kjer se vsi parametri prilagajajo kratkemu času osvetlitve (ang. shutter priority).

Terestrično fotografiranje smo izvedli s fotoaparatusmerjalnikom Nikon D40 (glej preglednico 3.2). Skupno smo posneli 800 fotografij (od tega 300 s pomočjo UAV), ki so bile od objekta povprečno oddaljene 5 m (glej sliko 3.7).

Terestrično skeniranje je bilo izvedeno s laserskim skenerjem Optec Ilris-3₆D (glej preglednico 3.4). Skupno smo zajeli 24 delnih skenov objekta. Povprečna razdalja do objekta je znašala 16,55 m.

Pri terenskem delu ni bil skeniran celoten objekt, saj bi za zajem vrha, torej strehe, potrebovali dodatno nosilno konstrukcijo, s katere bi lahko izvedli meritve. Kljub temu, da ni bil zajet ves objekt, so končni terenski podatki vsebovali tako močno razgibane površine (stešniki), kot tudi ravne ploskve (stene), kar je bilo za namen naše raziskave dovolj.

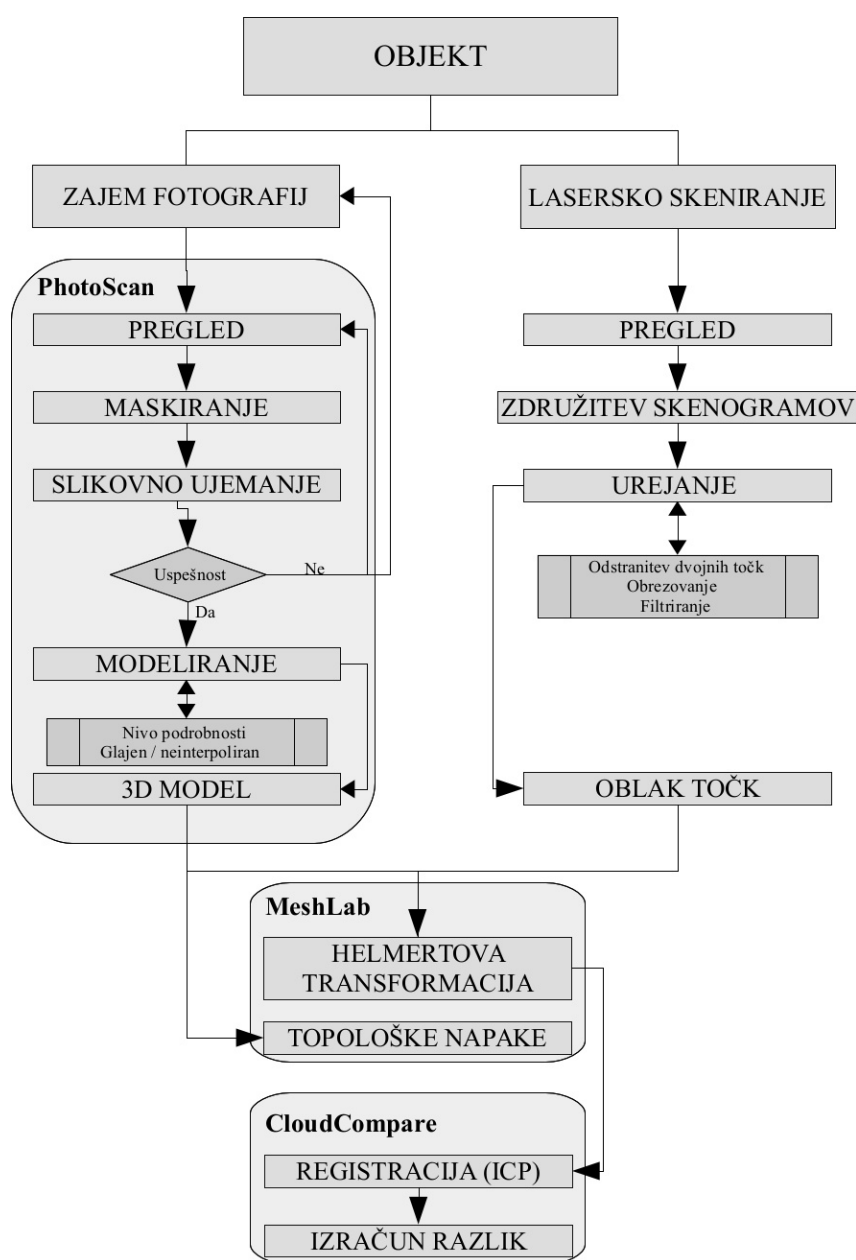


Slika 3.7: Prikaz razporeditve zajetih fotografij cerkve Kioutouklou Baba Bektashic Tekke.

4 OBDELAVA PODATKOV

4.1 Metodologija

Na sliki 4.1 je prikazana shema postopka obdelave podatkov v uporabljenih programskih orodjih. V levi veji je ilustriran postopek, ki smo ga uporabili za izdelavo fotogrametričnega 3D modela. Desna veja prikazuje standarden postopek urejanja surovih podatkov laserskega skeniranja. Zadnji del sheme prikazuje postopek priprave podatkov za izračune in izvedene primerjave.



Slika 4.1: Shematični prikaz obdelave podatkov in izvedenih primerjav.

4.2 Izdelava modelov v programskem orodju PhotoScan

V nadaljevanju naloge bodo predstavljeni nekateri od zgoraj navedenih postopkov, ki smo jim med samim delom posvetili največ časa ali pa pomembno vplivajo na končne rezultate. Ker gre za komercialno programsko orodje, lahko v literaturi zasledimo le nekatere bežne namige o tem, kakšne algoritme uporablja program. Pri razlagah se bomo deloma oprli na navodila za uporabo programa (navodila PhotoScan v0.8.5, 2012; navodila PhotoScan v1.0, 2014) in tehnično pomoč na spletnem portalu omenjenega proizvajalca (AgiSoft, 2014). Podrobneje bomo predstavili pripravo fotografij na obdelavo, slikovno ujemanje fotografij in izdelavo 3D modela objekta.

4.2.1 Pregled in priprava podatkov

Pred obdelavo moramo vsako fotografijo pregledati ali je primerna za postopek slikovnega ujemanja. Kot primerne štejemo fotografije, na katerih je ustrezno zajet obravnavam objekt. Fotografije morajo biti ostre in pravilno osvetljene.

Fotografije praviloma vsebujejo EXIF metapodatke, ki jih program uporabi za izračun vidnega polja fotografije. V primeru, ko metapodatki ne vsebujejo informacije o približni goriščni razdalji in velikosti senzorja, bo program predpostavil, da je gorišna razdalja 50 mm (35 mm pri klasičnem formatu). Če se dejanska goriščna razdalja močno razlikuje od predpostavljene, je zelo verjetno, da izvrednotenje fotografij ne bo uspešno. Takrat je bistveno, da programu ročno podamo potrebne parametre, ki jih pridobimo od proizvajalca ali s postopkom kalibracije.

Med obdelavo smo opazili, da je za kakovostne rezultate fotografijam potrebno določiti območja, ki jih želimo uporabiti za izvrednotenje. Ta proces imenujemo maskiranje in ga uporabljamo, ko želimo izločiti območja, ki so za obdelavo neprimerna (neostri deli posnetkov, neustrezna osvetlitev) oziroma jih ne želimo vključiti v izvrednotenje (ozadje, premikajoči se objekti na fotografijah). Tako smo na primer pri obdelavi Kikladskega kipca ženske figure maskirali ozadje, saj je dejstvo, da se objekt premika glede na nepremično okolico predstavljal problem za določitev relativnega položaja fotografij. Poleg tega se na ta način izognemo dodatnemu šumu, ki nastane ob robovih fotogrametrično določenega oblaka točk, saj na slikovni element natančno določimo zunanji rob objekta na posamezni fotografiji, program pa izven tega območja ne določa novih točk. Ker z maskiranjem izvzamemo nekatera območja na fotografijah, se zato posledično zmanjša tudi čas obdelave.

4.2.2 Slikovno ujemanje

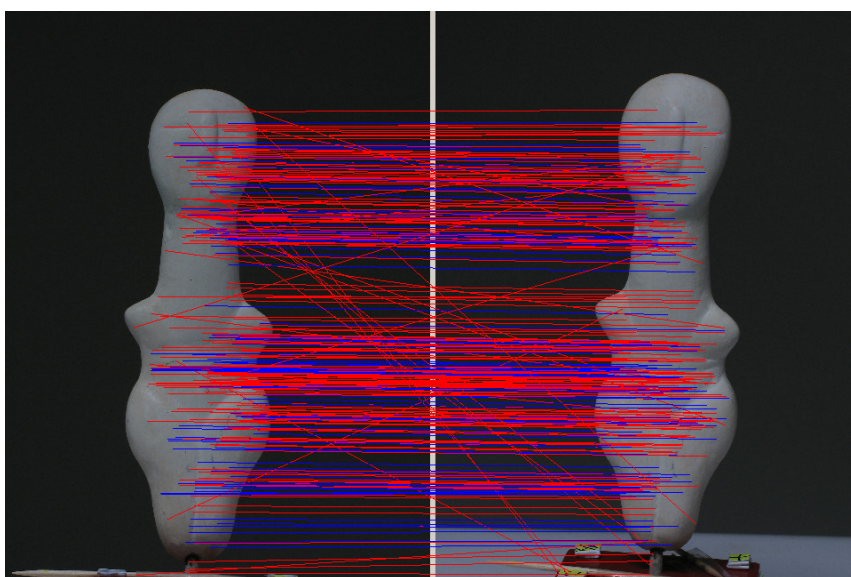
Ko končamo z urejanjem in maskiranjem fotografij, sledi proces slikovnega ujemanja fotografij. V tej fazi program na podlagi določitve položaja istih značilnih točk na več fotografijah določi grob položaj fotoaparata, orientacijo posnetka in ustvari prvi približek fotogrametrično določenega

oblaka točk. Podrobnosti postopka so opisane v poglavju 2.1.

Nastavimo lahko različne stopnje natančnosti določitve zunanjih parametrov posnetka in sicer visoko, srednjo in nizko natančnost. Razlikujejo se v tem, da pri visoki natančnosti program upošteva polno fotografijo (vse slikovne elemente) medtem, ko jo pri srednji pomanjša za štirikrat oziroma še za štirikrat pri nizki.

Po končanem procesu slikovnega ujemanja pregledamo ali so vsi posnetki pravilno razporejeni v prostoru. Posnetke, ki imajo napačno določene zunanje parametre, poizkušamo pravilno razporediti z ročnim izbiranjem značilnih točk. Te točke določimo na pravilno in napačno orientiranih fotografijah. Na ta način določimo približne transformacijske parametre, ki jih program upošteva pri ponovnem določanju zunanjih parametrov posnetkov. Če so posnetki napačno razvrščeni tudi po ročni določitvi točk, potem le-te odstranimo iz nadaljnje obdelave.

Slika 4.2 prikazuje prepoznane značilne točke na objektu. Z modrimi linijami so povezane iste značilne točke, ki so pravilno prepoznane na paru fotografij. Opazimo tudi večje število rdečih povezav, ki prikazujejo značilne točke s podobnimi deskriptorji, ki so se med procesom izravnave izkazale za napačne.



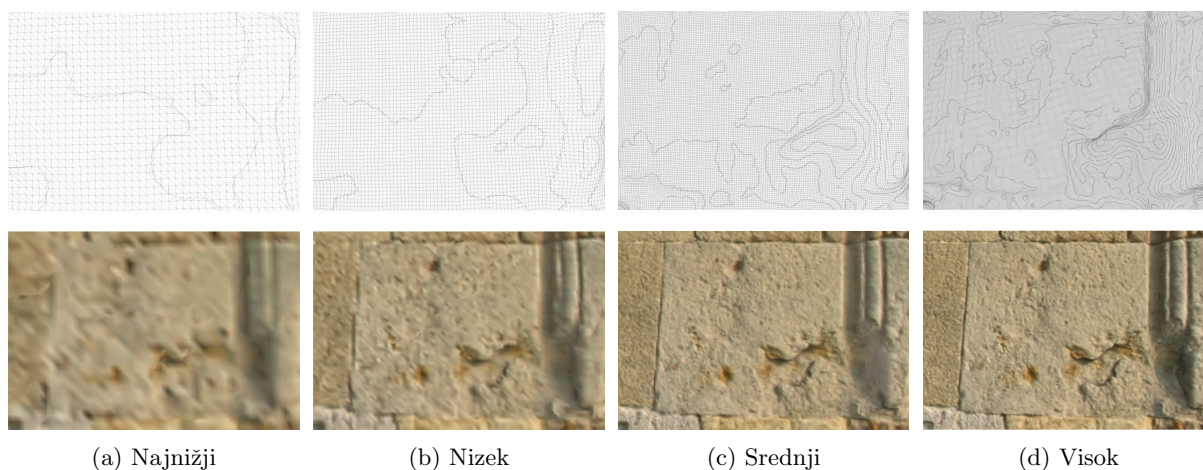
Slika 4.2: Prikaz prepoznanih značilnih točk pri Kikladskem kipcu ženske figure na dveh posnetkih.

Opozoriti velja tudi na dejstvo, da v primeru, ko programu ne podamo pravih položajev projekcijskih centrov posnetkov, le-ta ne more določiti pravilne velikosti obravnavanega objekta. Takrat je nujno, da preko dodatnih meritev programu podamo nekaj karakterističnih razdalj in na ta način zagotovimo pravilno merilo objekta. Če želimo točkam zagotoviti tudi pravilen absoluten položaj pa to storimo preko točk, katerih položaje v izbranem koordinatnem sistemu poznamo.

4.2.3 Izgradnja 3D modela

Eden od ciljev projekta 3D ICONS je tudi ta, da projektni partnerji ustvarijo ploskovni 3D model objekta obravnavanega objekta.

Programska oprema PhotoScan omogoča izgradnjo ploskovnega modela iz fotogrametrično določenega oblaka točk. Na voljo imamo različne nastavitve, ki se razlikujejo predvsem v ravnih podrobnosti končnega 3D modela. V celoti obstaja 5 različnih ravni podrobnosti in sicer najnižja (lowest), nizka (low), srednja (medium), visoka (high) in najvišja (ultra-high). Vizualne razlike med posameznimi ravni podrobnosti razen najvišje so prikazane na sliki 4.3. Z večanjem ravni podrobnosti se zmanjšuje razdalja med upoštevanimi točkami pri izgradnji, medtem ko se povečuje čas obdelave, število vozlišč in ploskev ter velikost izhodne datoteke (glej preglednico 4.1 in preglednico 5.1).



Slika 4.3: Prikaz izseka različnih ravni podrobnosti 3D modela, izgrajenega iz fotogrametrično določenega oblaka točk (cerkev Kioutouklou Baba Bekdashic Tekke). V zgornji vrstici je prikazana trikotniška mreža. V spodnji vrstici je trikotniška mreža obarvana glede na barvo vozlišč.

Tudi za izgradnjo 3D modela objekta iz fotogrametrično določenega oblaka točk proizvajalci ne podajo metod na podlagi katerih je modelirana ploskev. V navodilih za uporabo programske opreme (navodila PhotoScan v1.0, 2014) sta omenjena dva načina izgradnje 3D modela in sicer:

- neinterpoliran (sharp) in
- glajen (smooth).

V primeru, ko izberemo možnost neinterpolirane izgradnje 3D modela, so pri izgradnji le-tega upoštevane vse točke v predhodno ustvarjenem oblaku točk. Pri glajeni izgradnji pa program določi neko gladko neprekinjeno ploskev, ki se najbolj prilagaja glavnini točk. Pri glajenju

program območja brez podatkov interpolira na podlagi okoliških točk. Tako dobimo 3D model, ki je v celoti povezan in nima lukenj.

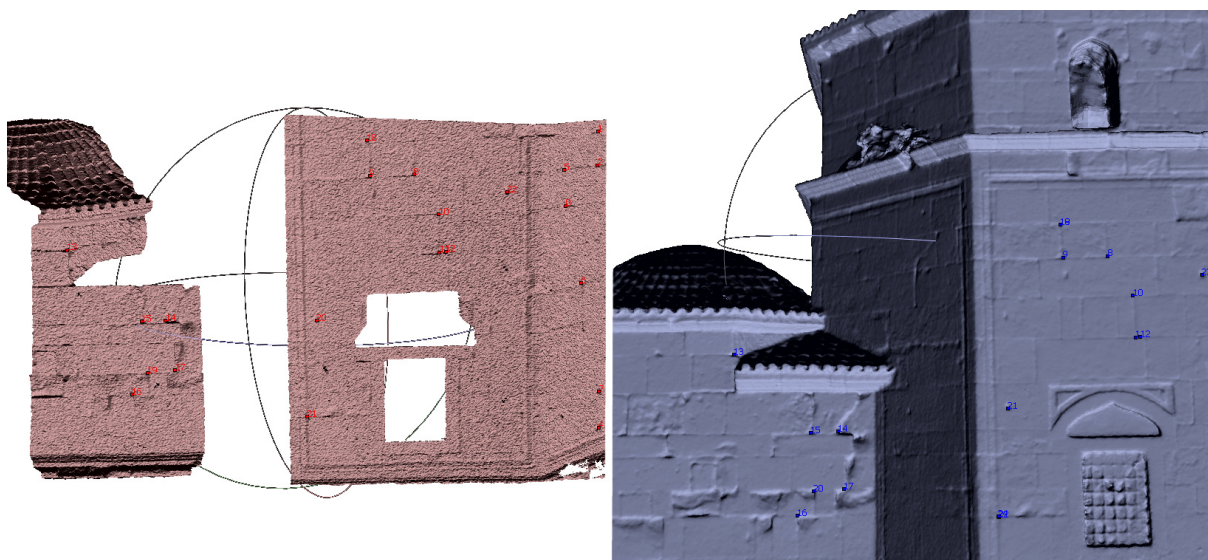
Preglednica 4.1: Trajanje izgradnje fotogrametrično določenega 3D modela Kikladskega kipca ženske figure.

Raven podr.	Modeliranje	Št. posn.		
		36	71	142
Visoka	Neinterpolirano	1 min 57,9 s	14 min 49,2 s	36 min 44,4 s
	Glajeno	6 min 52,6 s	22 min 39,2 s	46 min 59,2 s
Najvišja	Neinterpolirano	9 min 1,9 s	1 h 9 min 31,2 s	2 h 46 min 48,3 s
	Glajeno	32 min 26,8 s	1 h 51 min 43,1 s	3 h 42 min 32,2 s

4.3 Priprava podatkov za primerjavo

Uporabljena osnovna verzija programa PhotoScan (0.8.5) ne omogoča določitve relativne velikosti objekta, zato je bilo potrebno pred izvedbo primerjav izdelanim 3D modelom določiti pravilno velikost in usmerjenost.

Spremembo velikosti in orientacije 3D modelov smo naredili v odprtokodnem programu MeshLab. V njem smo določili istoležne točke na obeh tipih podatkov (glej sliko 4.4).



Slika 4.4: Določanje istoležnih točk na oblaku točk laserskega skeniranja (levo) in fotogrametrično določenem 3D modelu cerkve Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke (desno) za potrebe izračuna transformacijskih parametrov.

Te točke smo nato uporabili pri izračunih transformacijskih parametrov fotogrametrično določenih 3D modelov. Ker je merilo podatkov, pridobljenih z laserskim skeniranjem, pravilno, smo le-te privzeli kot osnovo, glede na katero smo transformirali ostale 3D modele.

Fotogrametrično določen 3D model smo transformirali z Helmertovo transformacijo pri kateri je dovoljen premik, zasuk in sprememba merila. Glede na dejstvo, da so bile istoležne točke določene naknadno z ročnim izbiranjem, je natančnost njihove določitve omejena. Pričakujemo, da ta rezultat ni vplival na končen izid in predstavlja samo grobo določitev parametrov, ki jih bomo izboljšali v nadaljnjih postopkih.

Nekatera območja smo pri pripravi podatkov za primerjavo odstranili. To smo naredili zato, da smo izločili vpliv nekaterih dejavnikov, ki bi lahko vplivali na končne rezultate primerjav. V primeru Kikladskega kipca ženske figure smo zaradi slabe rekonstrukcije, ki je bila posledica postavitve fotoaparata med zajemom, izvzeli skrajni zgornji in spodnji dela kipca. Pri cerkvi Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke smo v oblaku točk laserskega skeniranja ohranili le območja, kjer je bila razdalja senzor-objekt minimalna, hkrati pa je bil vpadni kot žarka čimbolj pravokoten na objekt. Na tej točki velja tudi omeniti, da smo za primerjavo modelov cerkve Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke uporabili samo oblake točk terestričnega laserskega skeniranja pridobljenih iz posameznega stojišča. S tem smo se izognili napaki, ki bi lahko sicer nastala pri združevanju oblakov točk laserskega skeniranja. Ravno nasprotno pa smo v primeru Kikladskega kipca ženske figure delne laserske skene združili v celoto. To smo lahko naredili zaradi zadostnega medsebojnega prekrivanja med posameznimi oblaki točk in dejstva, da so točke v posameznih delnih skenih zajete pod podobnimi pogoji in so tako podobne natančnosti.

4.4 Izvedba geometričnih primerjav

CloudCompare je programsko orodje, prilagojeno izvajanju primerjav med oblaki točk in ploskovnimi modeli. V nadaljevanju bodo predstavljeni osnovni koraki, ki smo jih uporabili pri izdelavi naloge.

Fotogrametrične modele, ki smo jim predhodno grobo določili velikost in orientacijo, smo uvozili v CloudCompare. Da smo se izognili napakam, ki bi nastale kot posledica slabega ujemanja obeh podatkovnih nizov, smo grobo določene velikosti in orientacije še dodatno izboljšali.

To smo naredili s funkcijo, ki na podlagi algoritma ICP (Iterative Closest Point) določi najboljše ujemanje med podatkovnimi nizi. Cilj omenjenega postopka je preprečiti sistematične napake, ki bi nastale zaradi slabo določenega ujemanja različnih vhodnih podatkov.

Algoritem ICP (Besl in McKay, 1992) privzame en niz podatkov kot osnovo, na podlagi katere določi najboljše ujemanje drugega niza. Algoritem postopoma spreminja transformacijske parametre (premiki in rotacije) primerjalnega niza podatkov in določa razlike med obema nizoma na podlagi cenilne funkcije, ki je enaka obteženi vsoti najmanjših kvadratov. Ko relativna razlika

med vrednostima cenilne funkcije v dveh zaporednih ponovitvah postane manjša od določene meje, se izračun konča. V našem primeru smo za mejo izbrali vrednost 10^{-8} , ki predstavlja mejo izračunov pri številih s plavajočo vejico v dvojni natančnosti (ang. double float).

Da lahko uporabimo izbrano metodo, morajo naši vhodni podatki ustrežati naslednjim zahtevam:

- predhodna groba določitev pravilne velikosti in orientacije vhodnih podatkov,
- medsebojna podobnost vhodnih podatkov (isti objekt),
- zagotovljeno mora biti zadostno prekrivanje.

Ker so naši vhodni podatki ustrezali omenjenim zahtevam, smo izvedli t.i. registracijo vhodnih podatkov. Osnovo za določitev transformacijskih parametrov fotogrametrično določenega 3D modela je predstavljal oblak točk laserskega skeniranja.

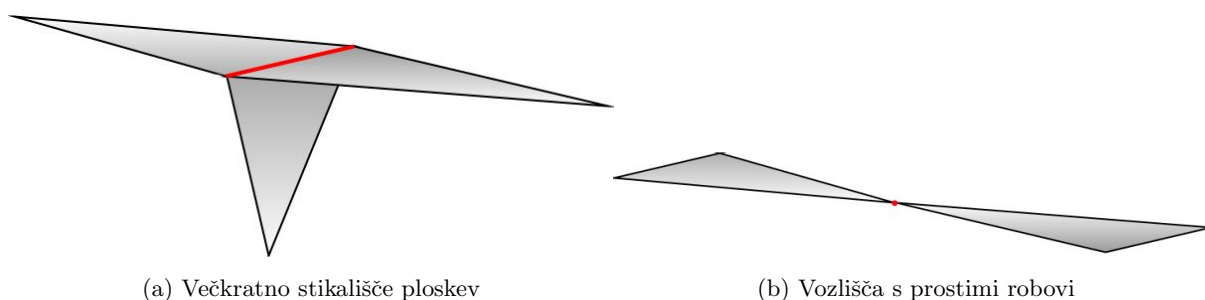
Sledi izračun razdalj med oblakom točk in ploskovnim 3D modelom. Podrobnosti načina izračuna so podane v poglavju teoretično ozadje (glej poglavje 2.3). Pri izračunu smo izbrali nastavitve, ki omogoča določitev predznaka izračunane razdalje.

4.5 Določitev topoloških lastnosti v 3D modelu

Topološke lastnosti in napake izgrajenih 3D modelih smo določili v programski opremi MeshLab, ki omogoča pregled karakteristik 3D modelov v smislu določitve števila vozlišč, ploskev in dimenzij objekta.

Izdelan 3D model lahko opišemo kot ploskev, ki poteka skozi vozlišča. Vse robove, kjer se ne stikata zgolj dve ploskvi, obravnavamo kot topološko napako. Obstajata dva slučaja, kjer navedeno velja:

- isti rob ploskve si delita več kot dve ploskvi (glej sliko 4.5a),
- ploskvi se stikata samo v vozlišču in nimata skupnega roba (glej sliko 4.5b).



Slika 4.5: Primeri topoloških napak ploskev.

5 REZULTATI OBDELAVE IN IZVEDENIH PRIMERJAV

V poglavju 5.1 bomo predstavili rezultate obdelave fotografij Kikladskega kipca ženske figure in cerkve Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke. Končni rezultati so predstavljeni s 3D modeli, ki so izdelani v različnih ravneh podrobnosti in pri različnih načinih modeliranja ploskve.

Poglavje 5.2 vsebuje rezultate primerjav izbranih 3D modelov, katerih cilj je določiti najprimernejše postopke in nastavitve za izgradnjo 3D modelov z uporabljenimi programsko opremo. Osredotočili se bomo na geometrične primerjave med oblaki točk laserskega skeniranja in izgrajenimi 3D modeli ter topološke napake, ki so nastale pri različnih načinih modeliranja ploskev.

5.1 Rezultati obdelave

5.1.1 Cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke

Fotogrametrično določene 3D modele cerkve Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke smo izdelali iz 652 fotografij in sicer 469 terestričnih ter 183 fotografij iz zraka. V preglednici 5.1 so prikazane lastnosti izgrajenih 3D modelov v različnih ravneh podrobnosti. Vsi modeli so zgrajeni z glajeno možnostjo modeliranja ploskve. Na ta način smo dobili topološko čist in v celoti povezan 3D model. Opazimo lahko, da se z zmanjševanjem razdalje med vozlišči posledično povečujejo število vozlišč in ploskev, velikost datoteke in čas izgradnje 3D modela.

Preglednica 5.1: Lastnosti 3D modela pri različnih ravneh podrobnosti (cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke).

Raven podr.	Razdalja med vozlišči (mm)	Število vozlišč	Število ploskev	Velikost (MB) (format: PLY)	Čas obdelave
Najnižja	55	1.567.136	3.049.047	80	16 min
Nizka	25	6.347.734	12.381.156	325	43 min
Srednja	15	29.598.434	58.141.745	1440	2 h 46 min
Visoka	3	161.537.781	317.769.170	6554	17 h 25 min

Strojna oprema računalnika nam ni dopuščala izgradnje 3D modela v najvišji ravni podrobnosti zaradi pomanjkanja delovnega pomnilnika. V primeru visoke ravni podrobnosti je program sicer izdelal 3D model, ki pa ga zaradi velikega števila vozlišč in posledično velikosti ustvarjene datoteke ni bilo možno pregledovati in urejati v nobenem programskem orodju. Za nadaljnjo obravnavo in izvedbo primerjav smo izbrali 3D model, zgrajen v srednji ravni podrobnosti, ki je na sliki 5.1 prikazan v obliki senčenega ploskovnega modela in modela, ki je obarvan glede na barvne vrednosti vozlišč.

Čas, ki bi ga namenili za izdelavo celotnega projekta, je ocenjen na približno 60 delovnih ur. Ta čas je določen glede na predpostavko, da je potek dela v celoti znan vnaprej, uporabljena je ista strojna oprema računalnika in da je osebje že seznanjeno z vsemi nalogami. Predviden časovni potek projekta:

- terestrični in zračni zajem fotografij - 8 ur,
- priprave na obdelavo (pregled, maskiranje) - 24 ur,
- proces slikovnega ujemanja - 26 ur in
- samodejna izgradnja 3D modela - 3 ure.



Slika 5.1: Pogled na izdelan 3D model cerkve Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke v srednji ravni podrobnosti iz različnih zornih kotov.

5.1.2 Kikladski kipec ženske figure

Izdelali smo 12 fotogrametrično določenih 3D modelov Kikladskega kipca ženske figure, ki se med seboj razlikujejo v številu uporabljenih fotografij, v izbrani ravni podrobnosti in v načinu modeliranja ploskve. Lastnosti posameznih dobljenih rezultatov so prikazane v preglednici 5.2.

Preglednica 5.2: Število vozlišč in ploskev 3D modelov Kikladskega kipca ženske figure določenih iz različnega števila fotografij v različnih ravneh podrobnosti in načinih modeliranja ploskve ($\times 10^6$).

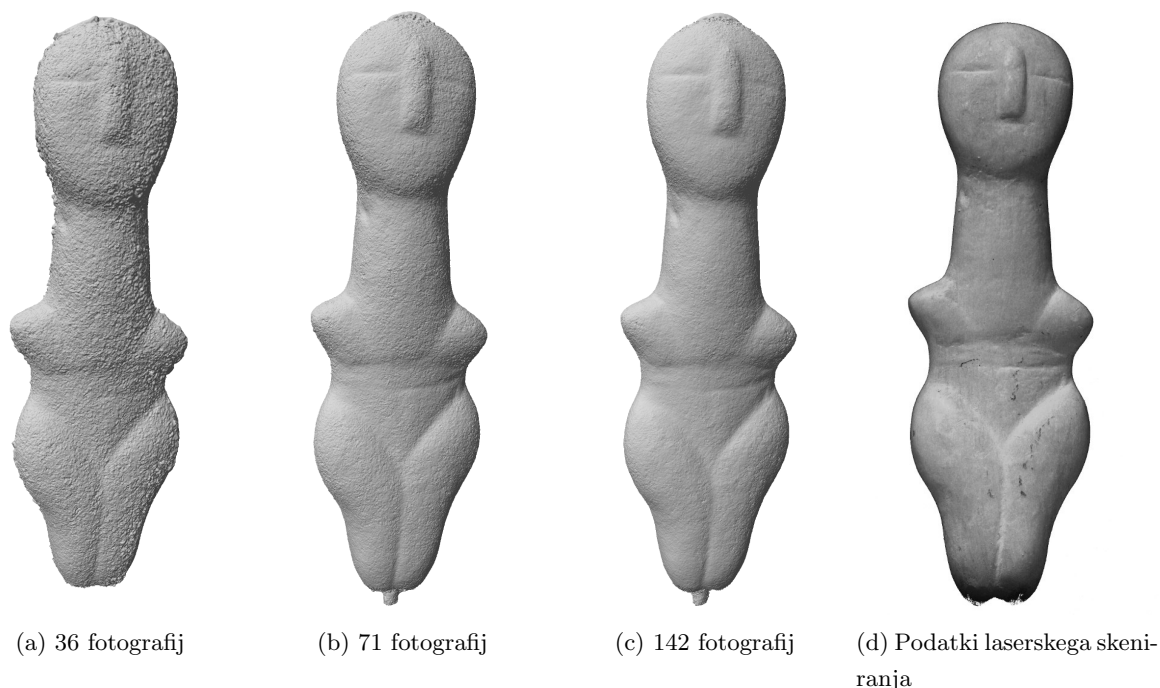
Raven podr.	Modeliranje	[$\times 10^6$]			Atribut	
		Št. posn.	36	71		142
Visoka	Neinterpolirano		1,78	1,77	1,78	Vozlišča
			3,54	3,52	3,55	Ploskve
	Glajeno		1,55	1,62	1,62	Vozlišča
			3,09	3,25	3,24	Ploskve
Najvišja	Neinterpolirano		9,86	12,88	15,54	Vozlišča
			19,24	25,29	30,28	Ploskve
	Glajeno		5,78	6,58	6,53	Vozlišča
			11,56	13,15	13,06	Ploskve

Model kipca smo izdelali z različnimi nizi posnetkov. Prvoten niz 142 fotografij smo zmanjševali za polovico dokler je program še uspel določiti pravilne položaje posnetkov v prostoru. 3D model nam je tako uspelo izgraditi iz niza 142, 71 in 36 posnetkov medtem ko na podlagi 18 posnetkov obdelava ni uspela (preglednica 5.3). Na slikah 5.2a - 5.2c so prikazani fotogrametrično določeni 3D modeli v najvišji ravni podrobnosti in glajenem načinu modeliranja ploskve pri različnem številu uporabljenih fotografij.

Preglednica 5.3: Število uporabljenih posnetkov, kotna razlika med posnetki na isti krožnici in rezultati procesa slikovnega ujemanja za Kikladski kipec ženske figure.

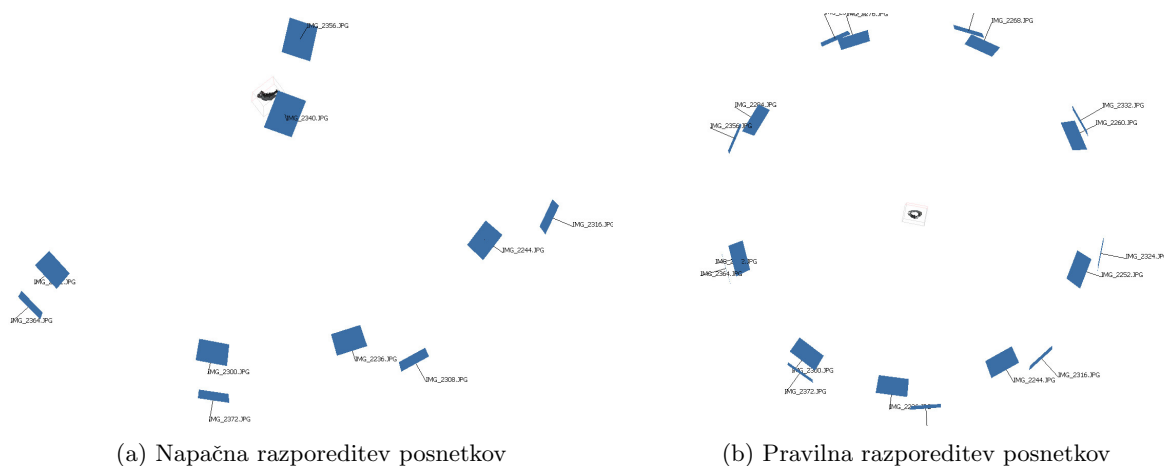
	Primer 1	Primer 2	Primer 3	Primer 4
Št. posnetkov	18 (9+9)	36 (18+18)	71 (35+36)	142 (71+71)
Kotna razlika	40°	20°	10°	5°
Slikovno ujemanje (uspeh)	Ne	Da	Da	Da
Slikovno ujemanje (trajanje)	14 s	38 s	1 min 53 s	6 min 35 s

Eden od razlogov za neuspeh pri nizu 18 fotografij je prevelika kotna razlika med posameznimi



Slika 5.2: Izdelani 3D modeli Kikladskega kipca ženske figure.

fotografijami (40°). Izkaže se tudi, da enakomerna kotna razdalja med posnetki za obravnavan objekt ni najboljša izbira, saj smo posledično na ozkih stranicah kipca posneli premalo fotografij, na podlagi katerih lahko določimo značilne točke za izračun medsebojnih položajev posnetkov. Na sliki 5.3a opazimo, da je program fotografije, ki vsebujejo sprednji del kipca razvrstil, pravilno, medtem ko so mu stranice in posledično prehod na zadnji del predstavljali nerešljiv problem. Slika 5.3b prikazuje pravilno določene položaje posnetkov, ki pa jih zaradi dejstva, da so bili določeni na podlagi večjega števila fotografij, nismo uporabili v nadaljnji obdelavi.



Slika 5.3: Napačna določitev zunanjih parametrov posnetov za niz 18 fotografij.

Glede na uporabljen način zajemanja fotografij v dveh koncentričnih krogih lahko zaključimo, da mora biti kotna razlika med posnetki za uspešno obdelavo vsaj 20° .

Zaradi pomankanja fotografij, ki bi vsebovale tudi skrajni vrh kipca (vrh glave) smo na tem območju dobili prekinitve ploskev. V glajenem načinu modeliranja je ploskev sicer zmodelirana, ampak se moramo zavedati dejstva, da predstavlja le neko predpostavljeno ploskev glede na okoliške točke. Problem lahko elegantno rešimo z zajemom nekaj dodatnih fotografij omenjenega območja. Na tem mestu bi bilo potrebno še enkrat razmisliti glede same razporeditve in razmikov med koncentričnimi krogi, saj bi težavo morda rešili že z rahlo spremembo vertikalnega razmika oziroma z dodanim še enim koncentričnim krogom. Zaradi neoptimalnega zajema omenjenega dela kipca smo le-tega izločili iz nadaljnjih geometrijskih primerjav.

Podobno kot pri cerkvi Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke (znan potek dela...) bomo tudi tu ocenili potreben čas za izvedbo celotne naloge. Čas izgradnje je podan za zajem in obdelavo niza 71 fotografij v glajenem načinu modeliranja in visoki ravni podrobnosti:

- zajem fotografij - 1 ura,
- priprave na obdelavo (pregled, maskiranje) - 2 uri,
- proces slikovnega ujemanja - 2 minuti,
- samodejna izgradnja 3D modela - 22 minut.

5.2 Rezultati primerjav

5.2.1 Geometrične primerjave

Geometrične primerjave smo izvedli med fotogrametrično določenimi 3D modeli in podatki laserskega skeniranja.

Posebej važno je, da izgrajeni modeli ne vsebujejo napak v modeliranih površinah. Tako smo na primer pri izgradnji objekta preverjali ali vsebuje vdrti ali izbočena območja glede na pravilen potek ploskve. Pri modeliranju značilnih krivin smo opazovali ustrezen potek in morebitne zgladitve.

3D modelom smo pravo velikost zagotovili z uporabo Helmertove transformacije, ki poleg premika in rotacije spremeni tudi njihovo merilo. Pomembno je poudariti, da se sprememba merila enakomerno prenese na celoten model in ne različno v različnih smereh. Iz omenjenega dejstva bi tako lahko prepoznali morebitne proporcionalne napake izgrajenega modela. Karikirano rečeno bi v primeru, ko bi bila širina objekta pravilna, višina pa napačna, to napako tudi zaznali.

Za primerjave uporabimo statistiki srednjo vrednost in razpršenost izračunanih razdalj. Razpršenost nam poda amplitudo odstopanj glede na pravilno obliko, medtem ko nam sre-

dnja vrednost poda informacijo o prevladujočem tipu zamika. Srednja vrednost v diplomski nalogi predstavlja aritmetično sredino izračunanih razdalj.

Iz geometričnih izračunov odstopanj bomo lahko razbrali, da večjih napak pri modeliranju ni, saj bi se sicer pokazale v izračunih z značilnimi premiki srednjih vrednosti odstopanj od povprečja (zamik Gaussove porazdelitve). Medtem ko bomo na določenih mestih zaznali zgladitve ploskve.

5.2.1.1 Cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke

V našem primeru je cilj geometrijskih primerjav določiti splošen pregled, kako se fotogrametrično določen 3D model izkaže na območjih z različno dinamiko spremembe detajla. Cilj ni določitev absolutnih razlik med modeloma - za to bi potrebovali boljše in bolj preverjene podatke laserskega skeniranja.

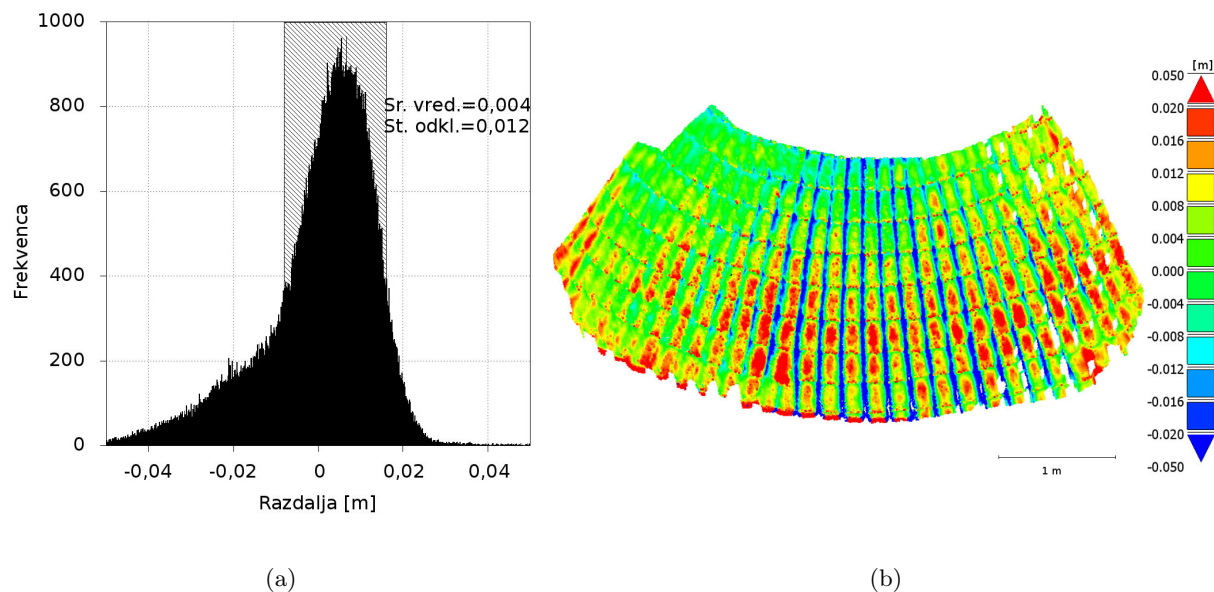
Cerkev Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke smo primerjali z delnimi laserskimi skeni, posnetimi iz posameznih stojišč. Za primerjavo smo izbrali 11 delnih skenov, ki so ustrezali pogojem za primerjavo, opisanih v poglavju 4.3. Primerjana območja se med seboj razlikujejo v dinamiki sprememb površja objekta:

- območja visoke raznolikosti (streha),
- območja nizke raznolikosti (kamnita stena),
- območja mešane raznolikosti (celoten delni sken).

Čprav je bilo izvedenih več primerjav, so grafični prikazi v tem poglavju prikazani samo za najbolj značilne primere na vsakem od zgoraj omenjenih območjih. Tako so na slikah 5.4, 5.5 in 5.6 grafično prikazane izračunane razdalje. Slike 5.4a, 5.5a in 5.6a prikazujejo histograme izračunanih odstopanj. Na grafih je s šrafuro prikazano območje vrednosti, ki se nahajajo znotraj izračunanega standardnega odklona. Slike 5.4b, 5.5b in 5.6b prikazujejo razlike oblakov točk z barvno lestvico.

V preglednici 5.4 so prikazana odstopanja med izbranimi oblaki točk laserskega skeniranja in fotogrametrično določenim 3D modelom. Način izračuna odstopanj je podan v poglavju 2.3. Dobljeni rezultati kažejo na boljše prileganje na območjih z nizko in slabše prileganje na območjih z visoko in mešano raznolikostjo.

Velika odstopanja na območjih z visoko raznolikostjo lahko pripišemo več dejavnikom. Delno je dobljen rezultat odvisen od načina modeliranja ploskve (glajen) in ravni podrobnosti izdelanega 3D modela (srednji). Z višanjem ravni podrobnosti bi dobili boljše rezultate vendar nam celotnega objekta z uporabljeno strojno opremo računalnika v višjih ravneh podrobnosti ni uspelo zmodelirati. Območja visoke raznolikosti povečini predstavljajo strešniki, ki so zaradi



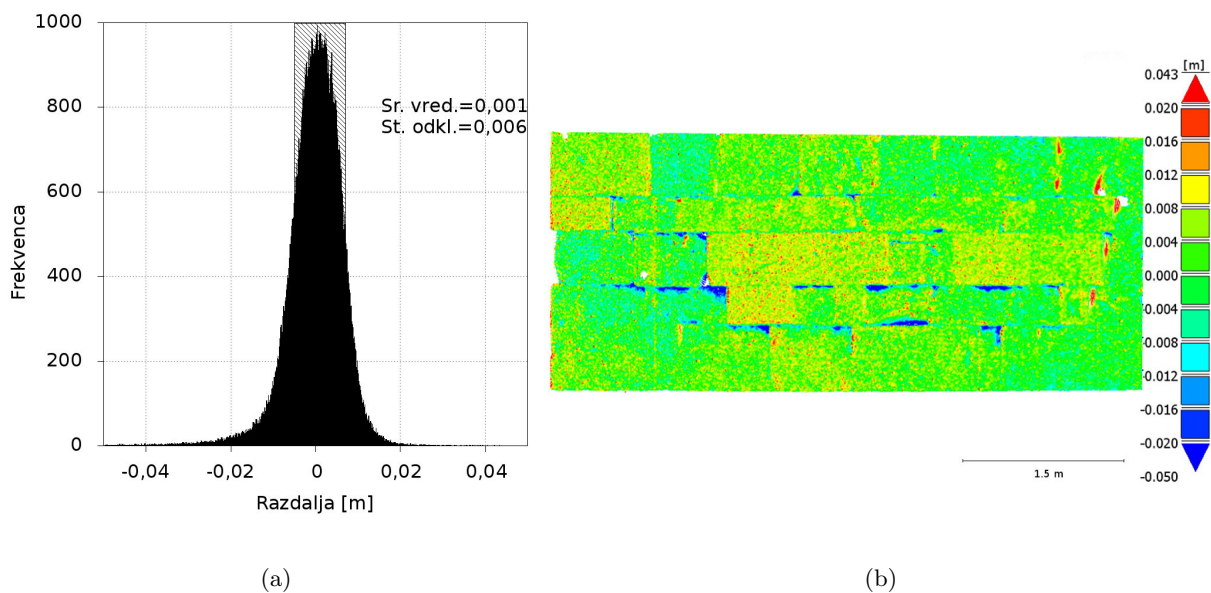
Slika 5.4: Grafični prikaz odstopanj na območju visoke raznolikosti (streha).

minimalnih sprememb v intenziteti slikovnih elementov manj primerni za slikovno ujemanje. Posledično je prepoznanih manj značilnih točk ali pa so te slabše določene. Ploskev fotogrametrično določenega 3D modela je na tem območju močno posplošena (glej sliko 5.7).

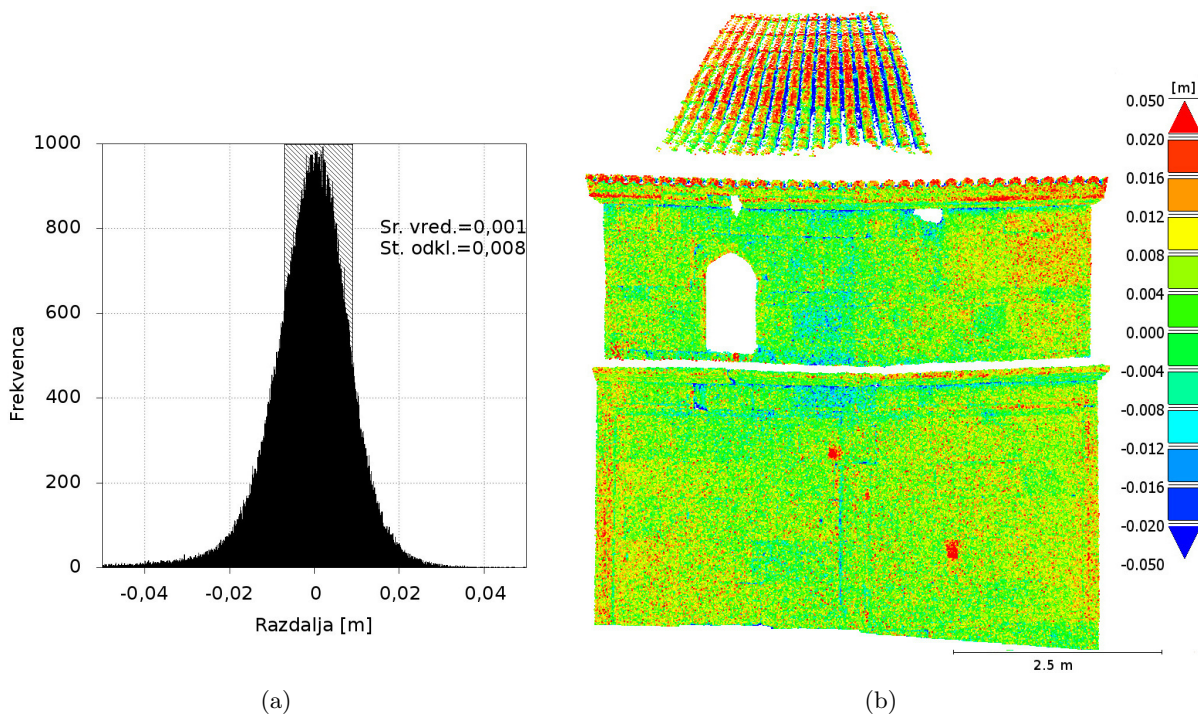
Preglednica 5.4: Rezultati izračuna razdalj med delnimi oblaki točk laserskega skeniranja in fotogrametrično določenimi 3D modeli za cerkev Kioutouklou Baba Bek-tashic Tekke (v cm).

Št. delnega skena	Raznolikost	Sr. vred.	St. odklon σ
		[cm]	[cm]
1	Visoka	0,3	1,7
2	Visoka	0,4	1,2
3	Mešana	0,1	0,8
4	Mešana	0,1	1,0
5	Mešana	0,1	1,0
6	Mešana	0,2	1,3
7	Mešana	0,2	1,4
8	Mešana	0,3	1,8
9	Mešana	0,3	2,0
10	Nizka	0,1	0,5
11	Nizka	0,1	0,6

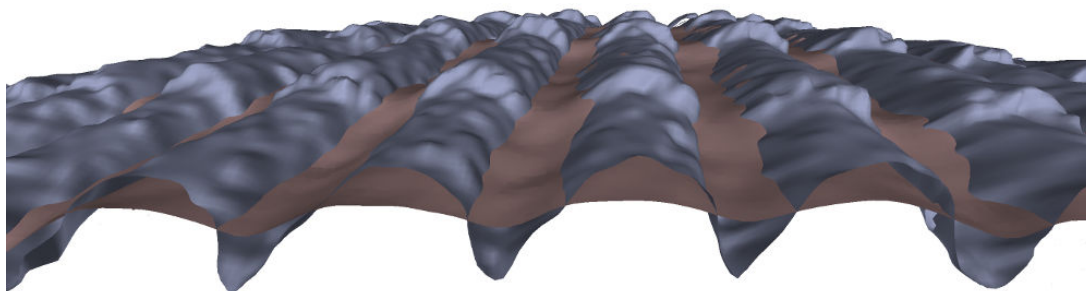
Odstopanje med podatkovnima tipoma je najmanjše na območjih nizke raznolikosti. Rezultat



Slika 5.5: Grafični prikaz odstopanj na območju nizke raznolikosti (zid).



Slika 5.6: Grafični prikaz odstopanj na območju mešane raznolikosti (celoten delni sken).



Slika 5.7: Prikaz poteka ploskve fotogrametrično določenega 3D modela in podatkov laserskega skeniranja (siva barva).

lahko pripišemo dejstvu, da modeliramo dokaj ravno površino in ne ukrivljeno, kot pri območjih z visoko raznolikostjo. Že zaradi tega so razlike med modeloma manjše. Poleg tega je na teh območjih (kamnit zid) večje število elementov, ki jih postopek slikovnega ujemanja prepozna in jim določi položaje v prostoru. Tudi na tem območju zaznamo zgladitve fotogrametrično določenega 3D modela. Tako lahko na sliki 5.5b opazimo območja obarvana z modro oziroma rdečo barvo, ki predstavljajo zglajene robove kamnov v zidu.

Iz primerjave porazdelitev na slikah 5.4a, 5.5a in 5.6a lahko razberemo, kateri prispevek k napaki prevladuje. Na slikah 5.5a in 5.6a, kjer je porazdelitev podobna Gaussovi, lahko glavni prispevek odstopanj pripišemo šumu v meritvah laserskega skeniranja. Na sliki 5.4a vidimo, da je Gaussov vrh zamaknjen ter da ima prisoten rep pri negativnih vrednostih. Razlog, da srednja vrednost ni enaka nič je, da je fotogrametrično določen 3D model zamaknjen glede na referenčen oblak laserskega skeniranja. Debel rep porazdelitve pa nam pove, da je slabo modelirana tudi sama oblika 3D modela na tem območju. Prisotnost šuma v meritvah laserskega skeniranja je lahko posledica premajhnega vpadnega kota laserskega žarka, neprimernosti površine za odboj žarka in drugih omejitev metode laserskega skeniranja (Opravš, 2008).

5.2.1.2 Kikladski kipec ženske figure

Na prvi pogled bi lahko rekli, da je obravnavan kipec za slikovno ujemanja popolnoma neprimeren. Zanj je namreč značilno, da na njegovem površju ne zasledimo velikih sprememb barv ali vzorcev. Prav tako so njegove poteze preproste in neizrazite. Zaradi naštetih dejstev bomo še z večjim zanimanjem opazovali, kako in v kakšni meri bo postopek slikovnega ujemanja uspešen pri prepoznavanju točk za izgradnjo fotogrametrično določenega 3D modela.

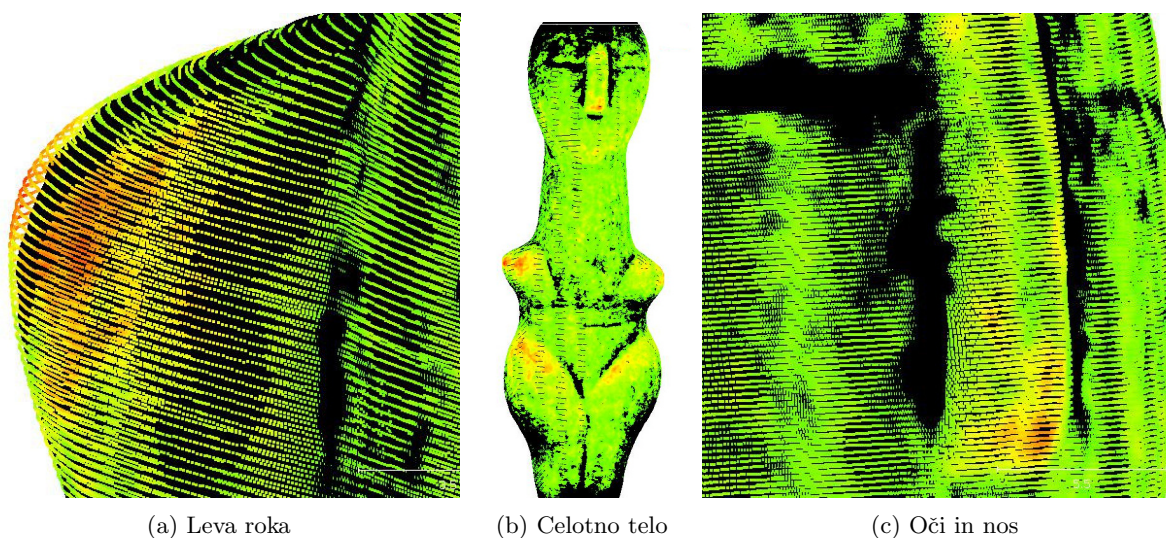
Iz dobljenih geometričnih primerjav bomo določili optimalno število fotografij, izbrano raven podrobnosti in način modeliranja ploskve za obravnavan kipec.

Rezultati geometrijskih primerjav so podani v preglednici 5.5. Opazimo, da so vse srednje

vrednosti izračunanih razdalj pozitivne. Pozitivne razdalje dobimo na mestih, kjer je 3D model glede na oblak točk laserskega skeniranja določen bolj proti notranjosti objekta. V našem primeru zaznamo, da so značilne krivine zmodelirane z manjšo ukrivljenostjo v primerjavi z njihovim pravilnim potekom (glej sliko 5.8). Glede na dejstvo, da ima kipec več izbočenih delov (roke, boki,...) kot vbočenih delov (oči) je tak rezultat pričakovan.

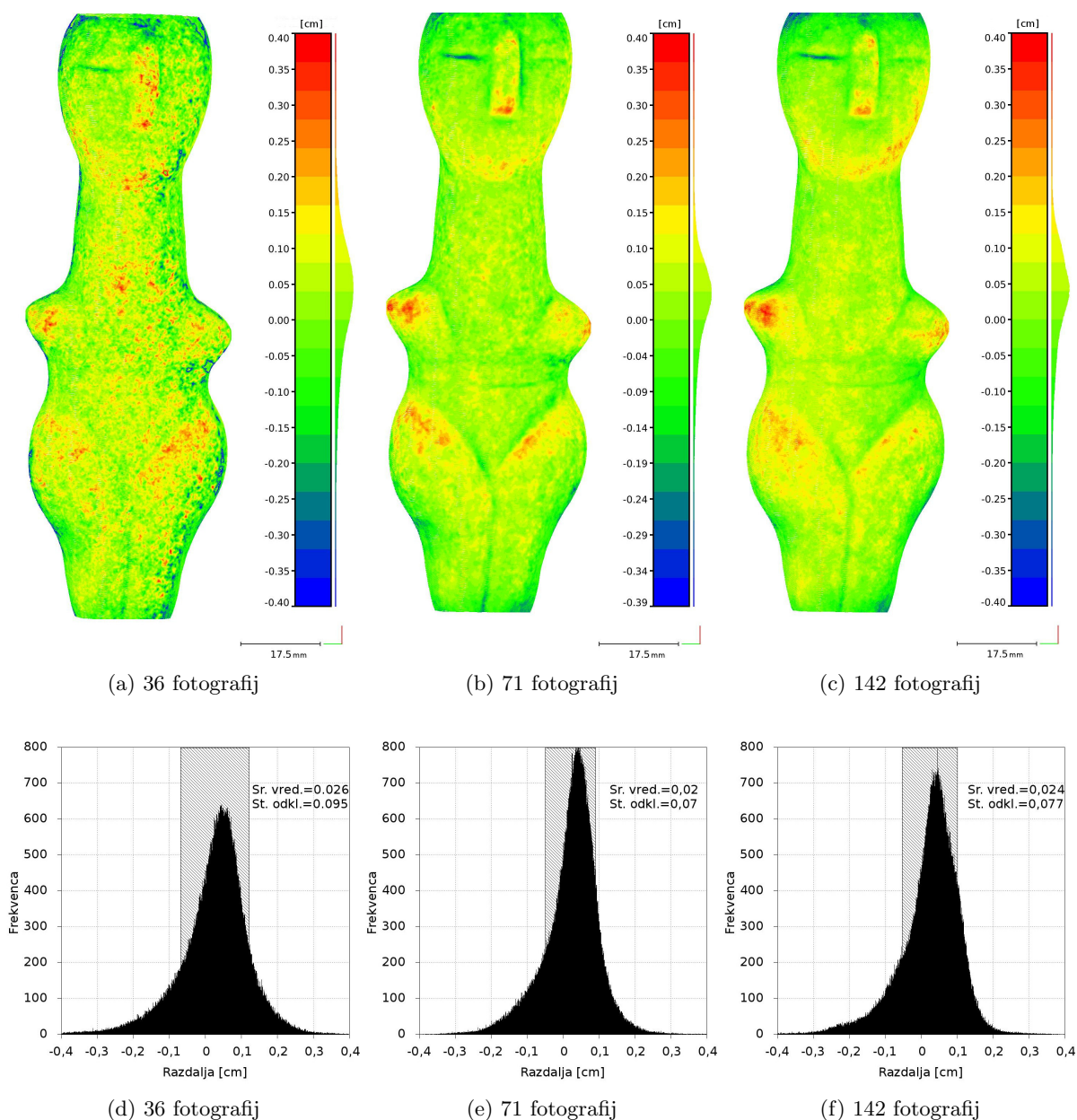
Preglednica 5.5: Rezultati izračuna razdalj med oblakom točk laserskega skeniranja in fotogrametrično določenimi 3D modeli Kikladskega kipca ženske figure.

RP	Modeliranje	[cm]			Vrednost
		Št. posnetkov			
		36	71	142	
Visok	Neinter.	0,021	0,026	0,025	Sr. vred.
		0,092	0,079	0,083	St. odklon
	Glajeno	0,026	0,020	0,024	Sr. vred.
		0,095	0,070	0,077	St. odklon
Najvišji	Neinter.	0,018	0,006	0,018	Sr. vred.
		0,095	0,075	0,090	St. odklon
	Glajeno	0,023	0,023	0,018	Sr. vred.
		0,102	0,073	0,080	St. odklon



Slika 5.8: Prikaz razlik med 3D modelom izdelanim iz fotogrametrično določenega oblaka točk (črna barva) in podatki laserskega skeniranja (barvne točke).

Največja odstopanja med fotogrametrično določenimi 3D modeli in oblakom točk laserskega skeniranja zasledimo na območju značilnih krivin. Kot značilne krivine obravnavamo oči, nos,



Slika 5.9: Prikaz rezultatov geometričnih primerjav med oblakom točk laserskega skeniranja in fotogrametrično določenimi 3D modeli Kikladskega kipca ženske figure (visoka raven podrobnosti, glajen način modeliranja ploskve).

brado, roke in boke. Na slikah 5.9a - 5.9c so ta območja obarvana z oranžno in rdečo barvo, ki predstavljata izračunane pozitivne razdalje. Opazimo tudi, da so celotna območja brade, rok in bokov močno zglajena, medtem ko se na območju trupa zmodeliran oblak točk približa oblaku točk laserskega skeniranja. Pri najmanjšem številu uporabljenih fotografij zasledimo močno valovito zmodelirano ploskev, kar se odraža v njenih lokalnih odstopanjih (glej sliko 5.9a).

Za obravnavan kipec je najprimernejši glajen način modeliranja ploskve. Iz rezultatov geome-

tričnih primerjav je namreč razvidno, da so standardni odkloni dobljenih vrednosti praviloma manjši kot pri neinterpoliranem načinu modeliranja. Rezultat ni bil pričakovan, saj splošno velja, da se neinterpolirane ploskve bolje prilegajo dejanskemu poteku objekta, saj težijo k povezovanju najbližjih točk med sabo. V našem primeru bi lahko večja odstopanja pri neinterpoliranem načinu modeliranja pripisali dejstvu, da so nekatere točke zaradi značilnosti objekta (monotonost barv) slabo določene in se odražajo kot šum. Omenjene točke imajo manjši vpliv na glajen način modeliranja zaradi dejstva, da ta način pri določitvi poteka ploskve uporablja metodo najmanjših kvadratov in se ustvarjena ploskev točkam zgolj približa. Na ta način imajo točke, ki močno odstopajo od pravilne ploskve (npr. šum) na končno modelirano ploskev manjši vpliv kot pri neinterpoliranem načinu modeliranja.

Oglejmo si še rezultate obdelave pri uporabi različnega števila fotografij. Fotogrametrično določen model iz 36 posnetkov vsebuje slabše določeno območje stranic kipca, ki so, podobno kot pri nizu 18 fotografij, posledica prevelike kotne razlike med posnetki na tem območju. Vrednosti izračunanih standardnih odklonov vrednosti so največje ravno pri nizu 36 fotografij in sicer skoraj 0,1 mm.

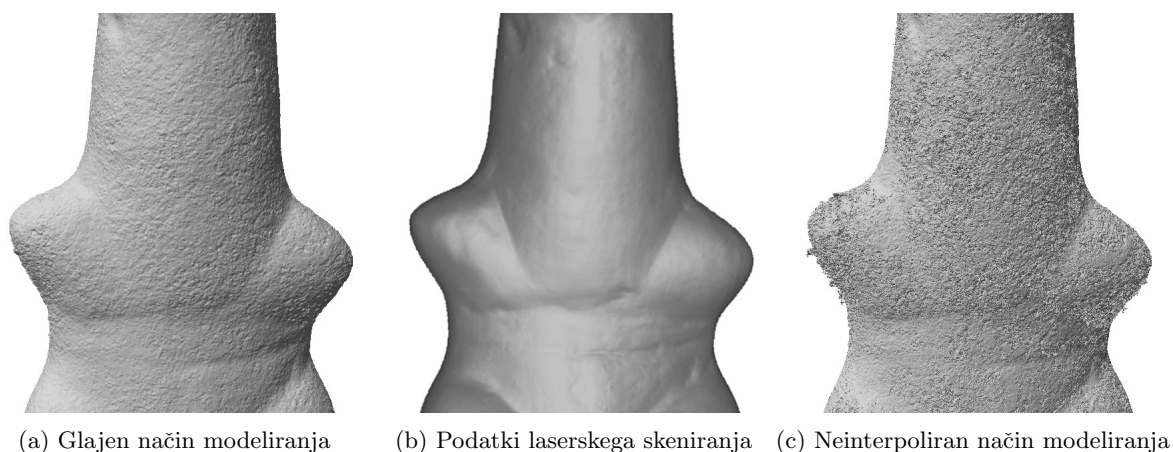
Pred obdelavo in pri vizualnem pregledu 3D modelov smo najboljše rezultate pričakovali iz niza 142 fotografij (glej slike 5.2a - 5.2c). Prepričani smo bili tudi, da bo povečanje števila fotografij močno doprineslo k izboljšanju geometričnih rezultatov primerjav. Po izvedenih geometričnih primerjavah smo ugotovili, da potek modelirane ploskve ni izboljšan glede na niz 71 fotografij. V vseh primerih smo namreč dobili večje standardne odklone izračunanih razdalj.

Nepričakovane rezultate lahko pojasnimo na več načinov. Razlago je smotrno začeti že pri prvi fazi postopka slikovnega ujemanja in sicer prepoznavanju značilnih točk. Kot smo podrobneje opisali v poglavju 2.1 značilne točke na fotografijah prepoznamo na podlagi razlik v intenziteti slikovnih elementov. Značilnim točkam pripišemo deskriptor, ki ga med drugim določa tudi okolica značilne točke. Ker je obravnavan objekt monotonih barv in brez izrazitih potez, ima veliko značilnih točk podobne deskriptorje. Zato lahko pride do napak pri prepoznavanju iste značilne točke na različnih fotografijah. Lažno ujemanje nekaterih deskriptorjev ima vpliv na izračun zunanjih parametrov posnetkov in na izračun izboljšanih notranjih parametrov fotoaparata. Z večanjem števila fotografij in povečevanjem ravni podrobnosti se povečuje tudi delež lažnih ujemanj. To se posledično odraža tudi na rezultatih kot povečanje standardnih odklonov izvedenih geometrijskih primerjav.

Pomemben kriterij pri odločitvi predstavlja tudi čas zajema fotografij in čas celotne obdelave. Ocenjujemo, da je čas zajema 71 fotografij za približno četrtno krajši od zajema 142 fotografij. Pri tem smo upoštevali potreben čas za pripravo na zajem, ki je v obeh primerih enak. Pregled in maskiranje fotografij je za polovico krajše pri nizu 71 fotografij. Čas samodejnega izračuna položajev značilnih točk je približno 3,5 krat daljši (preglednica 4.1), medtem ko je čas izgradnje 3D modela približno 2 krat daljši pri obdelavi niza z 142 fotografijami (preglednica 5.1).

5.2.2 Topološke primerjave

Pri vizualnem pregledu izdelanih 3D modelov kipecev Kikladske ženske figure smo opazili, da modeli, izdelani z neinterpoliranim načinom modeliranja vsebujejo večje število ploskev, ki očitno odstopajo od predvidenega poteka ploskve (slika 5.10).



Slika 5.10: Vizualna primerjava fotogrametrično ustvarjenega 3D modela (71 fotografij, najvišja raven podrobnosti) in oblaka točk laserskega skeniranja.

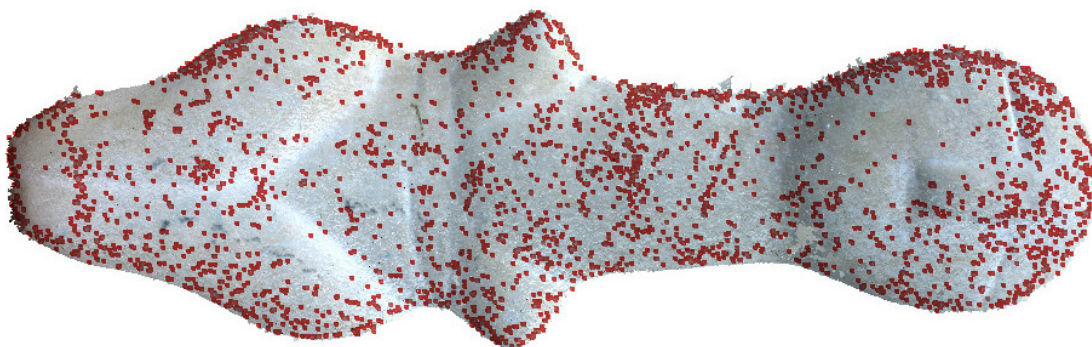
Rezultat je pričakovan, saj način neinterpoliranega modeliranja pri izgradnji 3D modela v ploskev vključi vse prepoznane značilne točke. Posledično ploskev določi tudi skozi vozlišča, ki predstavljajo napačno določene točke oziroma šum.

Poleg vizualnega pregleda smo izdelanim 3D modelom določili tudi število topoloških napak (preglednica 5.6). Določili smo število vozlišč s prostimi robovi (slika 5.11) in število večkratnih stikališč ploskev. Modeli, ki so nastali z načinom gladkega modeliranja ploskve, ne vsebujejo vozlišč s prostimi robovi, kar pomeni, da so omenjeni modeli neprekinjeni in v celoti povezani. Ravno nasprotno pa pri neinterpoliranem načinu modeliranja ploskve nastane večje število topoloških napak, ki predstavljajo prekinitev gladke ploskve. Poenostavljeno lahko rečemo, da so 3D modeli, zmodelirani v glajenem načinu modeliranja ploskve, nepropustno zaprti kar pa ne drži za neinterpolirane modele.

Z večanjem števila uporabljenih fotografij in ravni podrobnosti se povečuje tudi število prepoznanih značilnih točk, kar privede do večjega števila topoloških napak. Povprečje razmerja med prepoznanimi topološkimi napakami in celotnim številom vozlišč v posameznih 3D modelih znaša približno 0,3%.

Preglednica 5.6: Prikaz števila topoloških napak fotogrametrično določenih 3D modeli Kikladskega kipca ženske figure pri uporabi različnega števila fotografij in različnega načina modeliranja ploskve.

Raven podr.	[Število napak]						Vrsta topološke napake
	36 posn.		71 posn.		142 posn.		
	Neinter.	Glajen	Neinter.	Glajen	Neinter.	Glajen	
Visok	204	0	166	0	184	0	Vozlišče
	487	417	551	504	667	542	Ploskev
Najvišji	3693	0	5930	0	12487	0	Vozlišče
	7393	2902	15297	4105	22405	3765	Ploskev



Slika 5.11: Prikaz vozlišč (obarvane točke), ki predstavljajo stičišče dveh ploskev brez skupnih robov za fotogrametrično določen 3D model kipca ženske figure (36 fotografij, neinterpoliran model, najvišja raven podrobnosti).

6 RAZPRAVA

Pri obdelavi fotografij smo upoštevali glavno načelo uporabljenega programskega orodja in postopka: samodejno določanje oblik iz nerazvščenih in nekalibriranih fotografij. Na podlagi prepoznanih istih značilnih točk na različnih fotografijah dobimo množico točk, s katerimi izračunamo položaje posnetkov v prostoru (parametri zunanje orientacije) in izboljšamo parametre notranje orientacije (goriščna razdalja, distorzije, ...). Vsi parametri so tako določeni sočasno in na način, da čim boljše opišejo preseke žarkov, iz katerih dobimo pravilne položaje značilnih točk v prostoru. V poglavju 5.2 smo opozorili na ugotovitev, da je določitev značilnih točk v nekaterih primerih nezanesljiva. Posledično so nezanesljivi iz njih izračunani parametri, kar se na izdelanih modelih odraža kot šum na površini in v slabših rezultatih geometričnih primerjav. Napakam v izračunanih izboljšanih notranjih parametrov fotoaparata bi se lahko izognili s predhodno določeno kalibracijo fotoaparata, ki sicer za izračun modela ni nujno potrebna.

Geometrične primerjave smo opravili z izračunom razdalj med zmodeliranim fotogrametrično določenim 3D modelom in oblakom točk laserskega skeniranja. Zmodeliran model smo uporabili zato, ker nam programsko orodje ni omogočalo pregleda in izvoza gostega fotogrametrično določenega oblaka točka. S tem smo posredno primerjali fotogrametrično določen oblak točk z lasersko izmerjenim. Tudi če bi želeli izračunati razliko med oblakoma točk neposredno, bi uporabili podoben način izračuna, kot je bil uporabljen pri izračunih razdalj med oblakom točk in modelirano ploskvijo. Da lahko izračunamo razdaljo med dvema oblakoma točk moramo enega od njih delno (lokalno) modelirati. Tudi v tem načinu izračuna razdalj bi fotogrametrično določen oblak točk modelirali s ploskvijo, do katere bi računali razdaljo. Končen rezultat bi bil zato podoben dobljenemu.

Rezultat postopka so izračunani položaji točk v prostoru. Zaradi nepoznanih položajev projekcijskih centrov posnetkov je model določen v poljubnem prostoru, kjer sta njegova orientacija in merilo poljubno nedoločena. Pravilno merilo objekta lahko zagotovimo z enostavnimi dolžinskimi meritvami med izbranimi točkami, medtem ko je določitev absolutnega položaja točk v izbranem koordinatnem sistemu večinoma v domeni geodetske stroke.

Iz rezultatov lahko povzamemo par bistvenih navodil, ki jih je smiselno upoštevati pri zajemu fotografij za izgradnjo fotogrametrično določenega 3D modela. Za zagotovitev dobrih rezultatov moramo posneti veliko število fotografij z velikim medsebojnim prekrivanjem. Paziti moramo na pravilno razporeditev fotografij okrog objekta. V primeru Kikladskega kipca ženske figure smo tako določili, da je za uporabljen način zajema (dva koncentrična kroga) najprimernejša 10° kotna razlika med fotografijami. Pri tem velja omeniti dejstvo, da enakomerna razporeditev fotografij okrog objekta ni nujno najboljša rešitev. Na mestih, kjer je objekt ožji in se tako pojavljajo hitrejše spremembe poteka ploskve, je potrebno zgostiti interval snemanja v primerjavi z deli za katere so značilne manjše ukrivljenost površja. Če ugotovimo, da imamo premalo fotografij nekega območja jih lahko enostavno pridobimo. Za zajem ne potrebujemo usposoblje-

nega strokovnjaka kot za rokovanje s laserskimi skenerji zato lahko dodatne fotografije pridobi kdorkoli, ki se nahaja v bližini objekta in ima na voljo primeren fotoaparatus.

Skrajni primer tega so študije, v katerih so avtorji uspeli izgraditi fotogrametrično določene 3D modele brez lastnega zajema fotografij (Snavey, Seitz in Szeliski, 2006). Uporabili so namreč fotografije znanih in obiskanih turističnih destinacij, kjer obiskovalci fotografirajo isti objekt iz podobnih vendar še vseeno edinstvenih položajev.

3D modele lahko določimo iz ogromnega niza fotografij in v najvišji ravni modeliranja ploskve. Za to potrebujemo ustrezno računalniško zmogljivost, ki omogoča izvedbo vseh izračunov. Na ta način dobimo izjemno natančen model, ki pa ga je težko pregledovati in urejati z današnjimi računalniki. Tako ogromen model ni primeren za objavo na svetovnem spletu. Pri zajemu podatkov ni edini kriterij najvišja možna podrobnost končnega modela ampak predvsem zahteve naročnika, glede na katere prilagodimo način zajema in obdelave fotografij.

Kot omenjeno že v uvodu, je bil cilj raziskave razviti metodo in celovit postopek za izdelavo 3D modelov objektov kulturne dediščine.

Obraunavan postopek ima zelo široke možnosti uporabe. Tipičen primer je izgradnja modela objekta, ki se nahaja v muzeju ali na arheološkem najdbišču in ga ne smemo premikati. Če bi tak objekt želeli digitalizirati s triangulacijskih skenerjem bi za to potrebovali laboratorij in v njem nameščen in skalibriran skener. Potreben bi bil tudi prevoz do laboratorija, ki pa je lahko iz različnih razlogov nemogoč, bodisi zaradi občutljivosti predmeta ali pa zaradi njegove velikosti. V našem primeru lahko zajem opravimo na licu mesta, zajem pa izvede prisoten arheolog ali kurator v muzeju. Hkrati z obliko objekta zajamemo tudi njegovo barvo. Nadaljnja obdelava zajetih fotografij je z uporabo komercialnih programskih orodij v veliki meri samodejna in zato hitra. Naročniku zato v kratkem času in z nizkimi stroški izdelamo široko uporaben 3D model.

Poleg primernosti za enostavnejše meritve in vizualizacijo so modeli uporabni tudi za izračune osnovnih gabaritov objekta in za grobo določanje površine in prostornine objekta. Iz dobljenih podatkov je mogoče izrisati načrte z osnovnimi elementi (okna, vrata, . . .) oziroma določiti poteke značilnih krivulj na objektu.

Zamislamo si lahko tudi aplikacije, v katerih natančnost določenega 3D modela ni zadostna. Čeprav fotogrametrično določen 3D model ne vsebuje večjih sistematičnih napak pri opisovanju ploskve, smo pri vseh modelih zaznali zgladitve ploskve. Postopek tako ni primeren za določevanje majhnih sprememb na površini objekta; npr. erozijskih poškodb, ki nastanejo kot posledica poškodb kamnine zaradi izpostavljenosti vremenskim vplivom.

VIRI

123D Catch. 2014.

<http://www.123dapp.com/catch> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

3D ICONS. 2014. 3D ICONS pilot project.

<http://3dicons-project.eu> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

AgiSoft. 2014.

<http://www.agisoft.com> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Ahmadabadian, A.H., Robson, S., Boehm, J., Shortis, M., Wenzel, K., Fritsch, D. 2013. A comparison of dense matching algorithms for scaled surface reconstruction using stereo camera rigs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 78: 157–167.
doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.01.015.

Arius. 2009.

http://www.rcip-chin.gc.ca/contenu_numerique-digital_content/fiches_techniques-tip_sheets/lab_mvc_3d_interactive-vmc_lab_3d_interactive/index-eng.jsp
(Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Aspert, N., Santa-Cruz, D., Ebrahimi, T. 2002. MESH: Measuring Errors between Surfaces using the Hausdorff distance. V : *IEEE International Conference on Multimedia and Expo : Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo 2002 (ICME)*, 26-29 August, 2002: p.705-708.

Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Gool, L.V. 2008. Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding* 110, 3: 346–359.

Besl, P.J., McKay, N.D. 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. *Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14, 2: 239–256.
doi:10.1109/34.121791.

Canon 350d. 2014.

http://www.dpreview.com/products/canon/slrs/canon_eos350d (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Canon A630. 2006. Canon Digital Camera PowerShot A640/A630 Advanced Camera User Guide. Canon INC.

http://gdlp01.c-wss.com/gds/0/0900001230/01/PSA640_630CUGba-EN.pdf
(Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Chui, C.K. 1992. *An Introduction to Wavelets*. San Diego, Academic Press Professional: 266 str.

Cignoni, P., Rocchini, C., Scopigno, R. 1998. Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces. *Computer Graphics Forum* 17, 2: 167–174.

Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., Ranzuglia, G. 2008. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. Sixth Eurographics Italian Chapter Conference : 129–136.

Cubify. 2014.

<http://cubify.com> (Pridobljeno 15. 11. 2014.).

Dellaert, F., Seitz, S.M., Thorpe, C.E., Thrun, S. 2000. Structure from Motion without Correspondence. *Computer Vision and Pattern Recognition 2*: 557–564.

Doneus, M., Verhoeven, G., Fera, M., Briese, C., Kucera, M., Neubauer, W. 2011. From deposit to point cloud: a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. *Geoinformatics 6*: 81–88.

Dorsch, R.G., Häusler, G., Herrmann, J.M. 1994. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement. *Applied Optics 33*, 7: 1306–1314.

doi:10.1364/AO.33.001306.

Dronemapper. 2014.

<http://dronemapper.com> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Engels, C., Stewénius, H., Nistér, D. 2006. Bundle adjustment rules. *Photogrammetric Computer Vision 2*: 2161–2168.

Fitton, J. 1999. *Cycladic Art. Introductory Guides*. London, Trustees of the British Museum: 96 str.

Furukawa, Y., Ponce, J. 2010. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 32*, 8: 1362–1376.

doi:10.1109/TPAMI.2009.161.

Guptill, S.C. (ur.), Morrison, J.L. (ur.). 1995. *Elements of Spatial Data Quality*. The International Cartographic Association Series. Elsevier Science Limited: 202 str.

Hanks, P. 2003. *Dictionary of American Family Names: A-F*. Oxford, Oxford University Press: 1356 str.

Higgins, R. 1972. A Cycladic Idol. *British Museum quarterly*. London, British Museum: 118 str.

Hirschmüller, H. 2005. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. *Computer Vision and Pattern Recognition 2*: 807–814.

Koutsoudis, A., Vidmar, B., Arnaoutoglou, F. 2013. Performance evaluation of a multi-image 3D reconstruction software on a low-feature artefact. *Journal of Archaeological Science 40*, 12: 4450–4456.

Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., Chamzas, C. 2014. Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage* 15, 1: 73–79.

Leonard, B. (ur.). 2011. Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms: As Amended Through April 2010. Darby, Diane Publishing: 690 str.

Lowe, D.G. 1999. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. V : Proceedings of the International Conference on Computer Vision - Volume 2, Kerkyra, Greece, September 20-27, 1999: p. 1150–1157.

Lowe, D.G. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60, 2: 91–110.
doi:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

Lowry, H. 2009. In the footsteps of the Ottomans: a search for sacred spaces & architectural monuments in northern Greece. Istanbul, Bahçeşehir University Press: 231 str.

Luebke, D. 2003. Level of Detail for 3D Graphics. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics Series. Burlington, Morgan Kaufmann Publishers: 390 str.

Mach, L. 2009. Semi-automatic system for reconstruction of 3D scenes. Diplomaska naloga. Praga, Univerza v Pragi, Fakulteta za matematiko in fiziko (samozaložba L. Mach): 55 str.

McCarthy, J. 2014. Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement. *Journal of Archaeological Science* 43: 175–185.
doi:10.1016/j.jas.2014.01.010.

Modri planet. 2014.
<http://www.modriplanet.si> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Morris, T. 2004. Computer Vision and Image Processing. Cornerstones of computing. Basingstroke, Palgrave Macmillan Limited: 300 str.

Navodila Photoscan v0.8.5. 2012. Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition (Version 0.8.5). Agisoft LLC.
http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_0_8_5_en.pdf (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Navodila Photoscan v1.0. 2014. Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition (Version 1.0). Agisoft LLC.
http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_1_0_0_en.pdf (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Nikon. 2014.
<http://www.dpreview.com/reviews/nikond40> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Opravš, P. 2008. Postopek in natančnost tehnologije 3R terestričnega laserskega skeniranja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Opravš): 102 str.

Ouédraogo, M.M., Degré, A., Debouche, C., Lisein, J. 2014. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. *Geomorphology* 214: 339–355.
doi:10.1016/j.geomorph.2014.02.016.

Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., Chamzas, C. 2007. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage* 8, 1: 93–98.

PhotoModeler. 2014.

<http://www.photodeler.com> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Photosynth. 2014.

<https://photosynth.net> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Pix4D. 2014.

<http://pix4d.com> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T., Troisi, S. 2012. Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – A Critical Overview. *Lecture Notes in Computer Science* 7616: 40–54.
doi:10.1007/978-3-642-34234-9_5.

Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F. 2014. State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record* 29, 146: 144–166.
doi:10.1111/phor.12063.

Renfrew, C. 1984. Speculations on the use of Early Cycladic sculpture. V: Fitton, J.L. (ur.). *Cycladica, Studies in Memory of N.P.Goulandris : Proceedings of the Seventh British Museum Classical Colloquium, London, June, 1984*. Published for the Trustees of the British Museum by British Museum Publications: p. 24-30.

Reu, J.D., Plets, G., Verhoeven, G., Smedt, P.D., Bats, M., Cherretté, B., Maeyer, W.D., Deconynck, J., Herremans, D., Laloo, P., Meirvenne, M.V., Clercq, W.D. 2013. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40, 2: 1108–1121.
doi:10.1016/j.jas.2012.08.040.

Schneider, P.J., Eberly, D. 2002. *Geometric Tools for Computer Graphics*. New York, Morgan Kaufmann: 1056 str.

Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R. 2006. Photo Tourism: Exploring Photo Collections in 3D. *ACM Transactions On Graphics* 25, 3: 835–846.

doi:10.1145/1141911.1141964.

Specifikacije ILRIS. 2004. Specifikacije ILRIS 36D .

http://jgc.gr/images/stories/products/scanners/ilris/LIbroch_ILRIS_36D.pdf

(Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Statut ISPRS. 2012. Statut of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

<http://www.isprs.org/documents/statutes12.aspx> (Pridobljeno 11. 11. 2014.).

Szeliski, R. 2010. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Texts in Computer Science. Springer: 832 str.

Vergauwen, M., Gool, L.V. 2006. Web-based 3D Reconstruction Service. *Machine Vision and Applications* 17, 6: 411–426.

doi:10.1007/s00138-006-0027-1.

Šumrada, R. 2005. *Strukture podatkov in prostorske analize*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 284 str.

Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., Reynolds, J. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300–314.

doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

Wu, C. 2011. VisualSFM: A visual structure from motion system.

<http://ccwu.me/vsfm/> (Pridobljeno 9. 11. 2014.).

Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., Seitz, S.M. 2011. Multicore bundle adjustment. *Computer Vision and Pattern Recognition* : 3057–3064.