

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:

Natlačen, D., 2015. Uporaba programa Insight3D za izdelavo 3D modela stavbe. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M., somentor Grigillo, D.): 57 str.

Datum arhiviranja: 09-09-2015

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:

Natlačen, D., 2015. Uporaba programa Insight3D za izdelavo 3D modela stavbe. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M., co-supervisor Grigillo, D.): 57 p.

Archiving Date: 09-09-2015

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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GEODEZIJA IN
GEOINFORMATIKA**

Kandidatka:

DAŠA NATLAČEN

**UPORABA PROGRAMA INSIGHT3D ZA IZDELAVO 3D
MODELA STAVBE**

Magistrsko delo št.: 4/II.GIG

**USING INSIGHT3D TO PRODUCE A 3D BUILDING
MODEL**

Graduation – Master Thesis No.: 4/II.GIG

Mentorica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Predsednik komisije:

prof. dr. Bojan Stopar

Somentor:

asist. dr. Dejan Grigillo

Ljubljana, 03. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Daša Natlačen izjavljam, da sem avtorica magistrskega dela z naslovom »Uporaba programa Insight3D za izdelavo 3D modela stavbe«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 28. 08. 2015

Daša Natlačen

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 528.7/.8(043.3)

Avtor: Daša Natlačen

Mentor: doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Somentor: asist. dr. Dejan Grigillo

Naslov: Uporaba programa Insight3D za izdelavo 3D modela stavbe

Tip dokumenta: Magistrsko delo

Obseg in oprema: 57 str., 36 sl., 8 pregl., 4 en.

Ključne besede: geodezija, bližnjelikovna fotogrametrija, 3D modeliranje, slikovno ujemanje, računalniški vid

Izvleček

V zadnjem desetletju je povezovanje bližnjelikovne fotogrametrije in računalniškega vida prevzelo vodilno vlogo pri 3D modeliranju objektov. Velik napredek so tako doživela programska orodja, ki omogočajo pridobivanje prostorskih podatkov iz niza fotografij, posnetih iz različnih perspektiv. Iz pestrega nabora programskih orodij, ki so danes dostopna na trgu, smo si za nalogo izbrali program Insight3D, da bi ga preizkusili, ker z njim še nimamo praktičnih izkušenj. Glavni cilj naloge je spoznati se s programom Insight3D ter izdelati 3D model izbranega objekta, v četrti ravni podrobnosti (LOD3) po standardu CityGML. Na začetku naloge so na kratko opisane teoretične osnove, na podlagi katerih deluje program Insight3D, sledijo navodila za izgradnjo 3D modela, največji del magistrske naloge pa obsega obdelava fotogrametrično zajetih podatkov ter opis težav, s katerimi smo se soočili pri uporabi programa Insight3D. Na koncu smo primerjali še tri programska orodja, ki delujejo po istem principu in so med uporabniki najbolj priljubljena. Geometrično točnost izdelanega 3D modela smo ocenili na podlagi fotogrametričnih meritev dolžin na izdelanem 3D modelu in geodetskih meritev teh dolžin v naravi.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: **528.7/.8(043.3)**

Author: **Daša Natlačen**

Supervisor: **Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.**

Co-advisor: **Assist. Dejan Grigillo, Ph.D.**

Title: **Using Insight3D to produce a 3D building model**

Document Type: **M. Sc. Tesis**

Notes: **57 p., 36 fig., 8 tab., 4 eq.**

Key words: **geodesy, close range photogrammetry, 3D modelling, image matching, computer vision**

Abstract

The leadership in object 3D modeling was in the past decade taken over by integration of close range photogrammetry and computer vision. Major progress was achieved in the development of software tools, which enable obtaining spatial data from series of images taken from different perspectives. In order to gain new experience, Insight3D application was chosen to be addressed in this master's thesis out of the rich set of software tools available on the market. The main goal of this thesis is to get familiar with the Insight3D application and to build a 3D model of the selected object in fourth level of detail (LOD3) according to the CityGML standard. The beginning of the thesis contains a short theoretical background about the Insight3D application mode of operation, followed by the instructions for building a 3D model. The largest part of the thesis comprises of the photogrammetrically captured data processing and the description of encountered difficulties while working with the Insight3D application. Finally, we compared three software tools that work according to the same principles and are the most popular among the users. Geometric accuracy of the 3D model was evaluated based on the photogrammetrically built 3D model and geodetic lines measurements.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Najprej bi se rada zahvalila mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras in somentorju asist. dr. Dejanu Grigillu za vso pomoč pri nastajanju magistrskega dela.

Hvala sodelavcem za praktične nasvete v času pisanja.

To delo posvečam svoji družini, ki me je skozi študijska leta podpirala, spodbujala in verjela vame. Še prav posebna zahvala pa gre mojima Mihi in Jaki za motivacijo, da sem študij dokončala.

Ta stran je namenoma prazna.

Kazalo

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	v
BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	vii
ZAHVALA	ix
1 UVOD	1
1.1 Predstavitev stanja na področju teme magistrske naloge.....	2
1.2. Cilji naloge.....	3
1.3. Načrt izvedbe in opis predvidene metodologije	4
2 OBJEKT OBDELAVE	5
3 TEORETIČNE OSNOVE	6
3.1 Splošno o fotogrametričnem zajemu podatkov	6
3.1.1 Postopek »Structure-from-motion« (SfM).....	6
3.1.2 Algoritem SIFT.....	9
3.2 Osnove kalibracije	13
3.3 Pol samodejni pristop programa Insight3D k izdelavi 3D modela	14
3.3.1 Slikovno prepoznavanje v programu Insight3D	15
3.3.2 Kalibracija fotoaparata v programu Insight3D.....	15
4 OPIS TERENSKE IZVEDBE FOTOGRAMETRIČNIH IN KLASIČNIH MERITEV	17
4.1. Uporabljen instrumentarij in programska orodja.....	17
4.1.1. Fotoaparat Nikon D70.....	17
4.1.2. Leica TCRP 1203+.....	18
4.1.3. Program Insight3D	19
4.1.4. Druga programska orodja	19
4.2. Opis metodologije.....	20
4.3 Načrt in izvedba snemanja.....	21

5	RAČUNALNIŠKA OBDELAVA PODATKOV	23
5.1	Delovanje programa Insight3D.....	23
5.1.1	Prepoznavanje in ujemanje homolognih značilnih točk	24
5.1.2	Avtokalibracija	25
5.1.3	3D oblak točk.....	26
5.1.4	Modeliranje	27
5.1.5	Teksturiranje modela	31
5.1.6	Shranjevanje in izvoz projekta	31
5.2	Obdelava fotogrametrično zajetih podatkov in težave pri delu s programom.....	32
5.2.1	Fotografiranje objekta	32
5.2.2	Slikovno ujemanje.....	33
5.2.3	Postopek kalibracije	35
5.2.4	3D oblak točk.....	36
5.2.5	Merjenje slikovnih točk.....	37
5.2.6	Teksture	37
5.2.7	Formati za izvoz in uvoz podatkov	37
5.2.8	Nestabilnost programa, nezmožnost interaktivnega vnosa podatkov	38
5.2.9	Slaba navodila, neodzivnost avtorja.....	39
5.2.10	Občutljivost na pravilno fotografiranje	39
5.3	Primerjava z drugo programsko opremo	39
6	REZULTATI OBDELAVE IN PRIMERJAVA 3D FOTOGRAMETRIČNEGA MODELA S TERENSKIMI MERITVAMI.....	44
6.1	Primerjava kontrolnih dolžin	46
7	ZAKLJUČEK.....	53
VIRI.....		55

Preglednice

Preglednica 1: Lastnosti digitalnega fotoaparata Nikon D70 in objektiva AF-S DX Zoom-Nikkor (Nikon, 2015).	17
Preglednica 2: Lastnosti elektronskega tahimetra Leica TCRP 1203+ (Gajšek, 2007).	18
Preglednica 3: Lastnosti gumbov, ki omogočijo prehod med detajli.....	29
Preglednica 4: Formati, ki jih lahko izvozimo oziroma uvozimo v program.	32
Preglednica 5: Primeri med uporabniki najbolj razširjenih programskih orodij.	40
Preglednica 6: Prikaz merjenih dolžin v naravi, na 3D modelu, odstopanje in RMSE, ki se nanašajo na sprednjo fasado senika.	47
Preglednica 7: Prikaz merjenih dolžin v naravi, na 3D modelu, odstopanje in RMSE, ki se nanašajo na tri fasade senika.	47
Preglednica 8: Prikaz merjenih dolžin v naravi, na 3D modelu, odstopanje in RMSE, ki se nanašajo na zakristijo.	50

Slike

Slika 1: Makro lokacija J'kopinovga skednja (Vir: Google maps).	5
Slika 2: J'kopinov skedenj (Kranjc, 2015).	5
Slika 3: Princip postopka SfM (Westoby in sod, 2012: str 301).....	7
Slika 4: Potek postopka SfM.	8
Slika 5: Algoritem SIFT (Mach, 2009).....	10
Slika 6: Značilne točke prepoznane z algoritmom SIFT (Mach, 2009).	11
Slika 7: Originalna (skrajno levo) in glajene fotografije (Mach, 2009).	11
Slika 8: Rezultat razlike dveh sosednjih fotografij v prostoru meril (ang. scale-space) (Mach, 2009).	12
Slika 9: Deskriptor iz slikovnih gradientov v okolici značilne točke (Hurrelmann, 2015).	13
Slika 10: Fotoaparat Nikon D70 (Nikon, 2015).	18
Slika 11: Shematski prikaz izdelave 3D modela.	21
Slika 12: Prikaz razporeditve zajetih fotografij.	22
Slika 13: Prikaz uporabniškega vmesnika in konzolnega okna programa.....	23
Slika 14: Dokument z uporabljenimi fotografijami.	24
Slika 15: Fotografije s prepoznanimi homolognimi značilnimi točkami.....	25
Slika 16: Shematski prikaz rezultatov avtokalibracije.	26
Slika 17: Izračunana 3D oblaka točk, na spodnji sliki je prikazan v realnih barvah.	27
Slika 18: Detajl, ki ga moramo naslednjega označiti.....	28
Slika 19: Prikaz boljšega in slabšega izračuna položaja homolognih točk.	29
Slika 20: 3D model.....	30
Slika 21: Nepopolno teksturiran 3D model.	31
Slika 22: Prikaz fotografiranja kamnitega zidu.	33
Slika 23: Prikaz fotografiranja objekta okoli grmovja.	33
Slika 24: Prikaz napačnega ujemanja značilnih točk na kamnitem zidu.....	34
Slika 25: Primer neobdelane in maskirane fotografije.....	35
Slika 26: Dva primera nepravilne kalibracije.....	36
Slika 27: Uporaba ukaza Reorient.....	36
Slika 28: Prikaz delno teksturiranega modela.....	37
Slika 29: Delno teksturirana 3D modela v programu Insight3D.....	44
Slika 30: Prikaz 3D modela objekta v programu MeshLab.	45
Slika 31: Georeferencirana 3D modela senika.	46
Slika 32: Skica izmerjenih dolžin na seniku.	48
Slika 33: Prikaz teksturiranega 3D modela zakristije v programu Insight3D.	49
Slika 34: Prikaz 3D modela zakristije v programu MeshLab.	50

Slika 35: Skica izmerjenih dolžin na zakristiji.	51
Slika 36: 3D modela senika in zakristije izdelana v programu 123D Catch.....	52

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

3D modeliranje ustvarja matematično predstavo 3D objektov, stvarnosti. Uporabniki si pri tem pomagajo z različnimi namenskimi programskimi opremami, kot sta Maya, Google SketchUp idr. Da bi predstavili fotorealistični 3D model fizične stvarnosti, tudi s teksturami, lahko uporabimo fotogrametrične metode, s katerimi lahko iz fotografij izdelamo 3D model. Temu v tuji literaturi pravijo 'Image-based Modelling', torej modeliranje na osnovi slik. Glavni cilj takšnega pristopa je, da se tretja razsežnost ustvari iz fotografij z uporabo računalniškega vida, preko postopkov prepoznavanja, vrednotenja in analize informacij (Long, 2010).

Popolna samodejna rekonstrukcija 3D modela objekta opazovanja iz nabora digitalnih fotografij, ki jih uporabnik posname sam, je kot »sveti gral« računalniškega vida. Še vedno se zdi, da je samodejno pridobivanje 3D modelov, kljub razvoju algoritmov, novih vpogledov v slikovno ujemanje in kalibracije fotoaparatorov, težko dosegljivo. Na drugi strani pa dostopnost digitalnih nizkocenovnih fotoaparatorov in sama privlačnost 3D vizualizacije poudarjajo potrebo po programskih orodjih, sposobnih ustvariti 3D model na osnovi digitalnih slik. Fotogrametrija je z razvojem računalniške tehnologije in naprednih računalniških algoritmov za obdelavo slik v zadnjem obdobju doživela pravi razcvet. Postopki postajajo vse hitrejši, programska oprema pa vedno bolj kompleksna (Mach, 2009).

Velik napredek so doživela programska orodja, ki omogočajo pridobivanje prostorskih podatkov iz niza fotografij, posnetih pod različnimi zornimi koti. 3D modeli in natančne rekonstrukcije stvarnosti se lahko uporabljajo za dokumentiranje zgodovinskih artefaktov (dokumentiranje kulturne dediščine), izdelavo modelov stavb, v gradbenem inženirstvu, forenziki (npr. rekonstrukcija avtomobilske nesreče), v rudnikih idr.

Iz pestrega nabora programskih orodij, ki so danes dostopna na trgu, smo si za magistrsko nalogo izbrali program Insight3D, da bi ga preizkusili, ker z njim še nimamo praktičnih izkušenj. Program Insight3D je odprtokodni program, ki je bil ustvarjen v sklopu diplomskega dela Lukasa Macha s Fakultete za matematiko in fiziko, Charles Univerze v Pragi. Program je bil izdelan z namenom čim večje samodejnosti ročnih postopkov in s tem lažje izdelave 3D modelov.

Predstavitev 3D modelov objektov se po kakovosti oziroma vključevanju podrobnosti deli glede na stopnjo posploševanja detajlov oziroma glede na ločljivost objektov (LOD – level of detail) (Kolbe, 2008). Prosti standard CityGML ki je namenjen izmenjavi in modeliranju 3D modelov definira pet ravni razpoznavnosti prikazovanja 3D modelov stavb, označenih od LOD0 do LOD4. V prvi ravni (LOD0) so stavbe ponazorjene zgolj s tlorisom stavb, druga raven prikazuje stavbe s tlorisom in podano višino, stavbe tako tvorijo bloki osnovnih 3D

geometrijskih teles. Tretja raven (LOD2) doda 3D modelom obliko strehe, detajlno obliko sten ter tematsko opredeljene fasade. V četrti ravni podrobnosti (LOD3) se podrobneje prikažejo streha, stene in manjši detajli, kot so vrata, okna, zunanja stopnišča, dimniki, balkoni idr., v peti ravni podrobnosti (LOD4) pa se poleg zunanosti stavb podrobno ponazori tudi notranjost objekta (Open Geospatial Consortium, 2012).

Magistrska naloga je razdeljena v sedem poglavij. V uvodu so predstavljeni cilji in hipoteze naloge, ter načrt izvedbe in opis predvidene metodologije. Sledi drugo poglavje s predstavitevjo objekta obdelave, v tretjem poglavju so predstavljene teoretične osnove, ki bodo pripomogle k razumevanju teme magistrske naloge. V četrtem poglavju je predstavljena izvedba fotogrametričnih in klasičnih meritev, to je uporabljen instrumentarij, programska orodja, metodologija in načrt fotografiranja. V petem poglavju je opisan postopek izdelave 3D modela v programu Insight3D, opis težav programa, in pa primerjava z drugo programsko opremo. V šestem poglavju je opisana primerjava fotogrametričnega modela s klasičnimi meritvami, v sedmem pa povzeti rezultati in ugotovitve. V zaključku magistrske naloge so navedeni viri.

1.1 Predstavitev stanja na področju teme magistrske naloge

Na trgu je več komercialnih rešitev, kot so Autodesk-ov ImageModeler (Autodesk ImageModeler, 2009) in PhotoModeler, produkt Eos Systems (PhotoModeler, 2014). Programa omogočata določanje gostega oblaka točk iz posnetih fotografij in modeliranje le tega (Mach, 2009). Na slovenskem trgu so v podjetju Modri planet razvili podoben program 3Dsurvey, ki na podlagi algoritmov računalniškega vida iz fotografij izračuna 3D koordinate objektnih točk in v dodatku omogoča tudi izdelavo ortofota (Modri planet, 2014). Na trgu obstajajo še druga primerljiva programska orodja – Pix4D (Pix4D, 2014), Dronemapper (Dronemapper, 2014), PhotoScan (Agisoft PhotoScan, 2014), Smart3Dcapture, ki ga je razvil Acute3D (Acute3D, 2015), Kodak Digital Science - Dimension Software (Kodak, 2015), Canoma (Canoma, 2001) idr.

Nadalje je Evropska unija v enem od projektov razvila ARC 3D (3D-COFORM, 2012), ki uporabnikom omogoča, da preko spletnega vmesnika naložijo fotografije na spletni strežnik. Rezultat samodejnih izračunov iz oblaka točk je iz posnetih fotografij zmodelirano okolje. Nadaljnje urejevanje, pregledovanje, analiziranje 3D modelov je možno v sorodnem prosto dostopnem programu MeshLab (3D-COFORM, 2012). Po istem principu deluje tudi program Hypr3D (podjetja Viztu Technologies). Poznamo še nekatere druge sorodne sisteme – npr. Autodeskov 123 Catch in Insight3D, ki lahko 3D model tudi oblepi s teksturami (Mach, 2014).

Na spletu je mogoče zaslediti še druga programska orodja, ki se dobijo proti plačilu. Autodesk predstavlja RECAP 360, družba Triayaam Neitrea 3D Pro, Hippolyte Mounier je razvil PhotoSculpt, ki ne izdelava merskih 3D modelov ...

Vsem tem programskim orodjem je skupno, da po principih računalniškega vida ustvarjajo trirazsežno okolje. Najprej iz množice fotografij, posnetih pod različnimi zornimi koti, izdelajo 3D oblak točk. Določitev medsebojnega položaja posnetkov poteka samodejno, odvisno predvsem od sposobnosti prepoznavanja homolognih značilnih točk na fotografijah. V ta namen se največkrat uporabljata točkovna postopka slikovnega ujemanja - SIFT (Scale invariant feature transform) ali SURF (Speeded-up robust features). Zaradi velikega števila homolognih značilnih točk na fotografijah, temelji izračun notranjih in zunanjih parametrov posnetka na izravnavi po metodi najmanjših kvadratov. Postopek izračuna fotogrametričnega 3D oblaka točk je prva faza v postopku modeliranja, sledi izgradnja 3D modela in teksturiranje (Vidmar, 2014).

1.2. Cilji naloge

Glavni cilji magistrske naloge so spoznati se s programom Insight3D, izdelati 3D model izbrane stavbe z nemerskim nizkocenovnim fotoaparatom in ga primerjati s terenskimi meritvami. Opisali bomo potek izdelave 3D modela v programu Insight3D po korakih. Cilj je izdelava 3D modela stavbe četrte ravni podrobnosti oziroma prepoznavnosti (LOD3), od skupno petih, po standardu CityGML (Škrlec, 2013), torej bodo podrobnejše prikazane oblike strehe, stene, lahko pa tudi manjši detajli, kot so vrat, okna, dimniki ... Obravnavani program bomo primerjali z nekaterimi drugimi sorodnimi programi, na osnovi informacij iz literature.

V nalogi izhajamo iz naslednje predpostavke in cilja:

1. S programom Insight3D je možna izdelava 3D modela zunanosti stavbe v ravni podrobnosti LOD3 po standardu CityGML (Open Geospatial Consortium, 2012).
2. Ocenili bomo relativno geometrično točnost izdelanega 3D modela, tako da bomo primerjali izbrane dolžine med detajli na objektu, določene s terenskimi meritvami, z izmerjenimi dolžinami na izdelanem modelu.

1.3. Načrt izvedbe in opis predvidene metodologije

V magistrski nalogi bomo izdelali 3D model J'kopinovega senika v Škocjanu z odprtokodnim programom Insight3D. Program deluje na podlagi slikovnega ujemanja in je eden izmed množice programov, ki so dostopni na internetu in delujejo po podobnih principih. Program orientira posnetke v prostoru, izračuna 3D oblak točk in izdela 3D model. Izdelan 3D model je rezultat sosledja več korakov: fotografiranja objekta, uvoza fotografij v program, kalibracije fotoaparata, izračuna položaja točk -> 3D oblaka točk, 3D modeliranja in lepljenja tekstur na model.

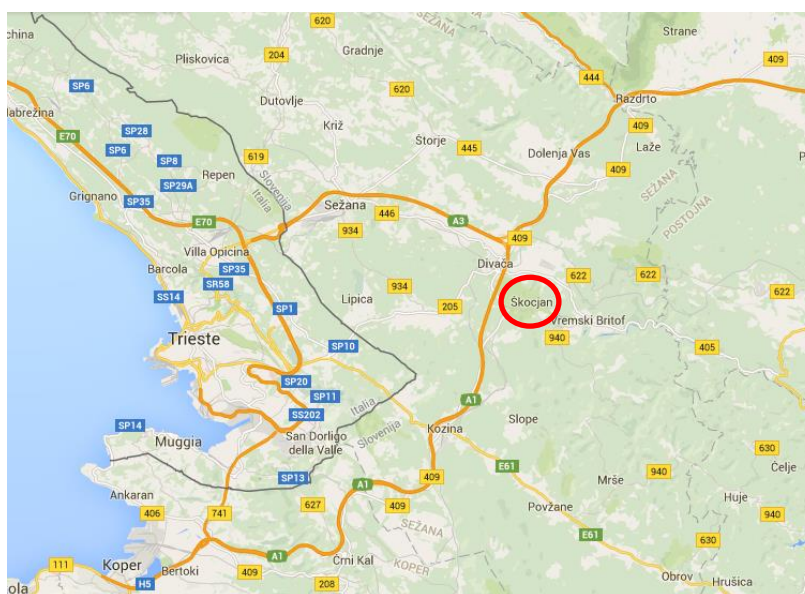
Izbran objekt je J'kopinov senik v Škocjanu, ki smo ga fotografirali z nemerskim fotoaparatom. J'kopinov senik leži na vzpetini sredi Krajinskega parka Škocjanske jame.

Za izvedbo naloge opravili naslednje aktivnosti:

1. Pripravili bomo ustrezen plan fotografiranja in ga izvedli na terenu.
2. Opisali bomo postopek izdelave 3D modela izbranega objekta v programu Insight3D.
3. Analizirali bomo geometrično točnost izdelanega 3D modela, tako da bomo fotogrametrični model primerjali s klasičnimi geodetskimi meritvami na objektu in določili odstopanje med fotogrametrično in geodetsko izmerjenimi kontrolnimi dolžinami.

2 OBJEKT OBDELAVE

Za izdelavo 3D modela smo si izbrali J'kopinov skedenj, sicer kulturni spomenik v sklopu Krajinskega parka Škocjanske jame. Skedenj, ki je v preteklosti služil kot pomožni gospodarski objekt J'kopinove domačije, stoji pred strnjenim naseljem Škocjan, v bližini njiv in travnikov. Podatki iz katastra pričajo, da je objekt stal že pred letom 1819 in se v tem času ni spremenil. Skedenj je enocelični objekt s pravokotnim tlorisom, pokrit z rženo slamo, temena stranskih kamnitih zidov pa so pokrita s skrlami. Danes je v skednju etnografska zbirka, v kateri je predstavljen postopek obdelovanja zemlje, pridobivanja žita in njegovo uporabo v dobi, ko se je oralo z živino (Občina Divača, 2015). Na sliki 1 je v rdečem krogu prikazana makro lokacija Škocjana, na sliki 2 pa J'kopinov skedenj.



Slika 1: Makro lokacija J'kopinovga skednja (Vir: Google maps).



Slika 2: J'kopinov skedenj (Kranjc, 2015).

3 TEORETIČNE OSNOVE

3.1 Splošno o fotogrametričnem zajemu podatkov

Na področju 3D rekonstrukcije objektov iz fotografij delujeta dve znanstveni vedi – fotogrametrija in računalniški vid (Štuhec, 2012).

Fotogrametrija je znanost o določitvi lokacije in oblike objekta iz fotografij. V 90. letih prejšnjega stoletja je imel na njen razvoj velik vpliv digitalni zapis podatkov, rezultat tega je prenos algoritmov in konceptov računalniškega vida v fotogrametrične postopke. Tako lahko programska oprema samodejno prepozna, poveže in preoblikuje značilnosti upodobljenih objektov na fotografijah v 3D elemente v objektnem prostoru (Štuhec, 2012).

Razvoj računalniškega vida sega v 70. leta prejšnjega stoletja, s težnjo dati računalniku 'človeški' vid, ter tako povrniti tretjo dimenzijo iz fotografij. Z algoritmi računalniškega vida je mogoče iz dveh fotografij določiti prostorsko lego točke in prostorsko lego fotoaparata. Značilnost algoritmov računalniškega vida v primerjavi s fotogrametričnimi je, da za izdelavo 3D modela ne potrebujemo podatkov o parametrih notranje orientacije fotoaparata ter lege in orientacije fotoaparata v času zajema fotografij. Postopek določevanja gostega oblaka točk iz fotografij poznamo pod izrazom »Structure-from-motion (v nadaljevanju SfM), saj omogoča izračun relativne projekcijske geometrije (Štuhec, 2012).

Povezovanje bližnjefotogrametrije in računalniškega vida je v zadnjem desetletju prevzelo vodilno vlogo pri 3D modeliranju objektov. Razvoj algoritmov na področju računalniškega vida, nižje cene in boljša kakovost digitalnih fotoaparatorov ter algoritmi za kalibracijo nemerskih fotoaparatorov so omogočili kakovostno modeliranje objektov na osnovi prekrivajočih se fotografij.

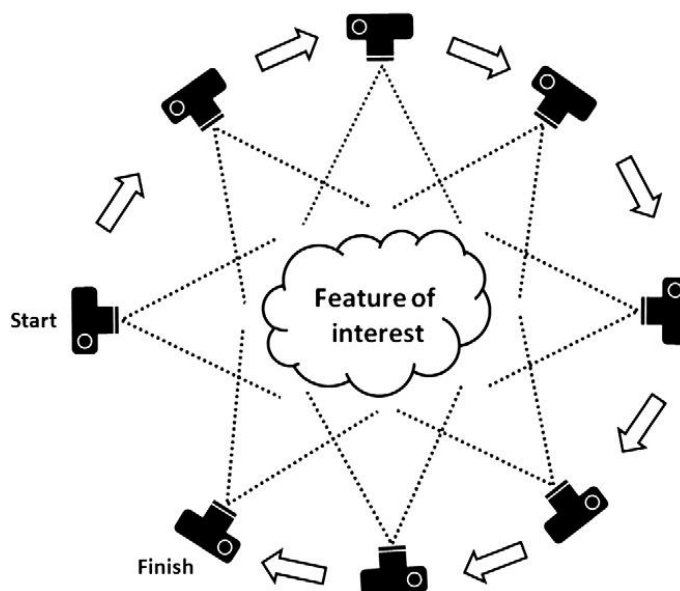
Fotogrametrični postopek SfM sicer deluje po enakih načelih kot stereo fotogrametrija, le da omogoči 3D modeliranje na podlagi večjega števila prekrivajočih se fotografij, posnetih pod različnimi zornimi koti (Westoby in sod, 2012).

3.1.1 Postopek »Structure-from-motion« (SfM)

Postopek SfM, razvit v 90. letih prejšnjega stoletja, je tesno povezan z razvojem računalniškega vida in algoritmi samodejnega prepoznavanja slikovnih značilk.

Slikovna značilka (ang. image feature), kratko značilka, je del fotografije, ki se v računalniškem vidu uporablja za potrebe razpoznavanja objektov, okolja, sledenje gibanja idr. Značilka je lahko enostavna, na primer značilna točka, oglišče, rob idr. ali kompleksna (objekti, krivulja idr.) struktura na fotografiji (Šajn, 2007).

Na podlagi postopka SfM za določitev relativne geometrije objekta ter relativnega položaja in orientacije fotoaparata pri fotografiranju ne potrebujemo točk s poznanimi 3D koordinatami, ampak se ti parametri izračunajo samodejno, s postopkom izravnave, ki temelji na veznih točkah na perspektivno različnih posnetkih (Westoby in sod, 2012).



Slika 3: Princip postopka SfM (Westoby in sod, 2012: str 301).

Na sliki 3 je predstavljen pristop postopka SfM, ki na podlagi velikega števila prekrivajočih se fotografij, posnetih pod različnimi zornimi koti, izvede postopek slikovnega ujemanja, kalibracijo in 3D modeliranje.

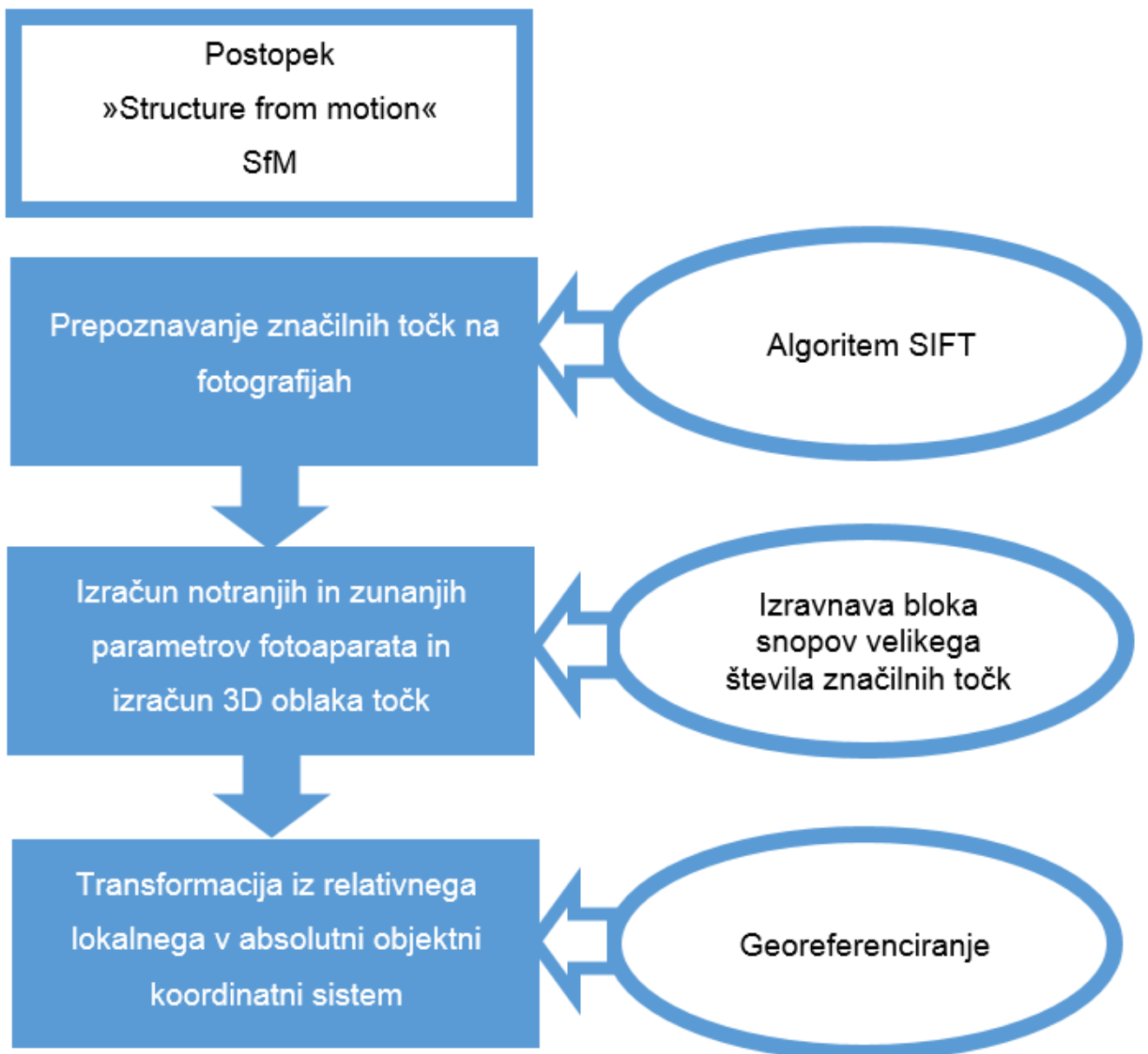
Kalibracija fotoaparata in medsebojni položaj fotografij se izračunajo na osnovi samodejnega prepoznavanja in ujemanja značilnih točk na večjem številu fotografij.

Za razliko od klasične fotogrametrije je 3D oblak točk, določen s postopkom SfM, izdelan v relativnem lokalnem koordinatnem sistemu, ki ga moramo naknadno transformirati v absolutni objektni koordinatni sistem, torej določiti rotacije modela ter merilo. To storimo z uporabo prostorske podobnostne transformacije, na podlagi ustreznega števila oslonilnih

točk, s poznanimi koordinatami v absolutnem objektne koordinatnem sistemu (Westoby in sod., 2012).

3.1.1.1 Potek postopka SfM

Postopek SfM predstavljajo trije koraki, prikazani na sliki 4.



Slika 4: Potek postopka SfM.

3.1.1.1.1 Fotografiranje in prepoznavanje značilnih točk

Glavni problem, ki ga obravnava postopek SfM, je določitev 3D položaja značilnih točk, prepoznanih na večjem številu fotografij, posnetih pod različnimi zornimi koti. Najpogostejši algoritem slikovnega ujemanja je točkovni postopek 'Scale invariant Feature Transform' (v nadaljevanju SIFT), ki vsaki značilni točki pripiše edinstven deskriptor, ki ga uporabi pri primerjavi značilnih točk na različnih fotografijah (Lowe, 1999).

3.1.1.1.2 Določitev 3D oblaka točk

Izračun notranjih in zunanjih parametrov fotografije temelji na podlagi izravnave bloka snopov velikega števila homolognih značilnih točk na različnih fotografijah. S tem se izboljša natančnost določitve položajev posnetkov in se izračunajo kalibracijski parametri fotoaparata. Izravnava večinoma temelji na nelinearni metodi najmanjših kvadratov (Remondino in sod., 2012). S postopkom triangulacije se naknadno izračuna 3D oblak točk v relativnem koordinatnem sistemu (Westoby in sod., 2012).

3.1.1.1.3 Naknadna obdelava

Transformacijo iz relativnega lokalnega koordinatnega sistema v absolutni objektni koordinatni sistem zagotovimo s poznanimi koordinatami istih točk v 3D oblaku točk in absolutnem koordinatnem sistemu (Westoby in sod., 2012).

3.1.2 Algoritem SIFT

Glavni postopek računalniškega vida je SfM, ki temelji na slikovnem ujemanju. Obstajajo različni algoritmi slikovnega ujemanja, kot na primer:

- SIFT (Scale-invariant feature transform) (Lowe, 1999),
- SURF (Speeded-up robust features) (Bay, Tuytelaars, Van Gool, 2007),
- MSER (Maximally stable extremal regions) (Donoser, Bischof, 2006),
- MSCR (Maximally stable color regions) (Forssen, 2007) idr.,

ki omogočajo samodejno prepoznavanje značilnih točk na različnih slikah, kot je prikazano na sliki 5 (Mach, 2009).



Slika 5: Algoritem SIFT (Mach, 2009).

V splošnem navedeni algoritmi prepoznajo značilne točke na fotografijah, kot so vogali, svetle točke, jim pripišejo deskriptorje, to je vektorje značilnih točk, ki opisujejo del slike (Mach, 2009).

V postopku slikovnega ujemanja je SIFT eden izmed najbolj razširjenih algoritmov. Za ta algoritem je značilno, da prepoznane značilne točke s pripisanimi deskriptorji na referenčni fotografiji shrani v bazo. Značilne točke naslednje fotografije primerja z bazo referenčne fotografije in izračuna evklidsko normo razlike deskriptorjev ter s tem določi najprimernejšega kandidata vsaki značilni točki. Za par izbere tisti značilni točki, ki sta si najbolj podobni oziroma ima razlika deskriptorjev najmanjšo normo med vsemi značilnimi točkami (Lowe, 2004).

SIFT omogoča dobro kalibracijo fotoaparata, saj daje dobre rezultate ne glede na orientacijo fotografij (Mach, 2009). Algoritem namreč omogoča zaznavanje homolognih značilnih točk neodvisno od razlik v merilu, zasukih in premikih fotografij, delno je tudi neodvisen od osvetlitve in šumov na fotografijah ter drugih popačenj (Lowe, 2004). Na sliki 6 so prepoznane značilne točke z algoritmom SIFT.



Slika 6: Značilne točke prepoznane z algoritmom SIFT (Mach, 2009).

Algoritem SIFT je namenjen prileganju fotografij istega objekta zajetega iz različnih perspektiv, za določanje značilnih točk pa išče ekstreme preko različnih ločljivosti fotografij (Šajn, 2007).

Algoritem na začetku progresivno gladi slike s pomočjo Gaussovega filtra, kjer se deviacija spreminja od σ do $2 * \sigma$. Prikaz rezultata progresivnega glajenja oziroma tako imenovanega kaskadnega filtriranja je prikazan na sliki 7.



Slika 7: Originalna (skrajno levo) in glajene fotografije (Mach, 2009).

V naslednjem koraku se te glajene slike odštevajo od njihovih neposrednih sosedov (ang. difference of Gaussian), rezultat razlike neposrednih sosedov je viden na sliki 8.



Slika 8: Rezultat razlike dveh sosednjih fotografij v prostoru meril (ang. scale-space) (Mach, 2009).

Glajenje je računsko manj zahtevno od spreminjanja ločljivosti, tako da se ta algoritem predlaga zaradi zmanjšanja računske kompleksnosti pri pomanjšavi slik, saj obstaja linearna povezava med glajenjem slike s faktorjem σ in zmanjševanjem njene ločljivosti (Šajn, 2007).

Algoritem SIFT sestavljajo štirje koraki (Lowe, 2004):

- »scale-space extrema detection« - postopek iskanja značilnih točk,
- »keypoint localization« - postopek prepoznavanja in umestitve značilnih točk,
- »orientation assignment« - določitev orientacije značilnih točk in
- »keypoint descriptor« - izračun deskriptorja značilnih točk.

3.1.2.1 Scale-space extrema detection - postopek iskanja značilnih točk

Postopek iskanja značilnih točk poteka preko detekcije ekstremov med različnimi ločljivostmi fotografij. Na vsaki glajeni fotografiji se primerjajo točkovni elementi z osmimi sosednjimi točkovnimi elementi na isti fotografiji in devetimi točkovnimi elementi na sosednjih fotografijah. Izberemo tiste, ki od vseh sosedov odstopajo (Šajn, 2007).

3.1.2.2 Keypoint localization - postopek prepoznavanja in umestitve značilnih točk

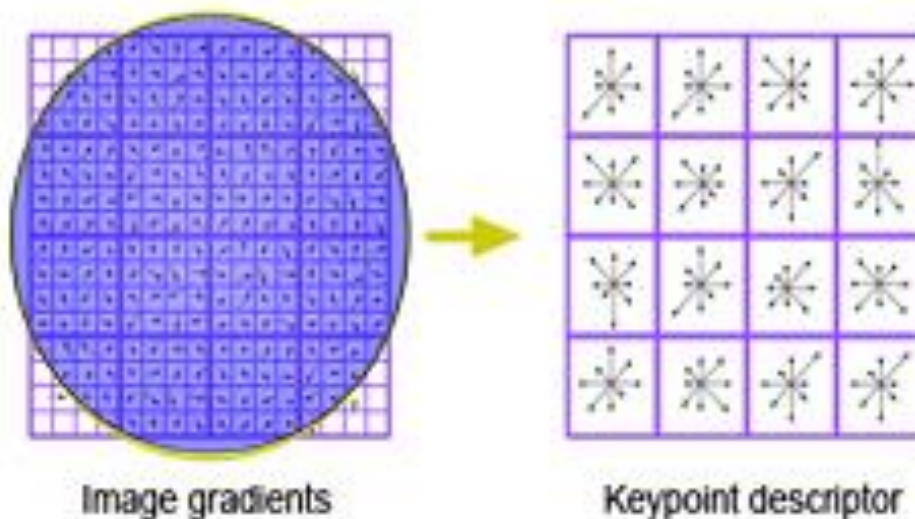
V tem koraku se značilne točke določijo na osnovi najdenih ekstremov s pomočjo mere stabilnosti (Šajn, 2007).

3.1.2.3 Orientation assignment - določitev orientacije značilnih točk

Orientacijo določimo z uporabo bilinearne interpolacije tako, da za vsako značilno točko izračunamo smerne odvode v okolici 16 x 16 (Šajn, 2007).

3.1.2.4 Keypoint descriptor - deskriptor značilnih točk.

Značilno točko, ki pripada določeni ločljivosti, opišemo s 128-dimenzionalnim vektorjem na podlagi izračunanih smernih odvodov (Šajn, 2007).



Slika 9: Deskriptor iz slikovnih gradientov v okolici značilne točke (Hurrelmann, 2015).

Šestnajst podobmočij in osem smeri, to je vektor z 128 elementi in je deskriptor značilne točke. Na sliki 9 prikazan kot 'keypoint descriptor'.

3.2 Osnove kalibracije

Fotoaparati so osnovno orodje fotogrametrije. Glede na uporabljen tehnologijo jih delimo na analogne in digitalne, z vidika uporabe pa na merske in nemerske fotoaparate. Medtem, ko imajo merski fotoaparati laboratorijsko določene vrednosti notranje orientacije, ki so stabilni

in robustni, imajo nemerski fotoaparati spremenljivo optiko ter nestabilne in neznane parametre notranje orientacije (Cigelšek, 2012).

Parametri notranje orientacije, to so konstanta fotoaparata, položaj glavne točke na sliki in distorzija objektiva, opisujejo glavne geometrijske lastnosti idealizirane preslikave centralne projekcije, obenem pa definirajo merski slikovni koordinatni sistem. S centralno projekcijo matematično opišemo odnose med fotografiranim objektom, fotoaparatom in sliko. Preslikava objekta v centralni projekciji se izvaja po zakonih projektivne geometrije, torej je pomembno, da objektna točka, projekcijski center in slikovna točka ležijo na isti premici (Cigelšek, 2012).

Poleg določitve parametrov notranje orientacije, je potrebno določiti tudi optično distorzijo. Približek distorzije lahko zmodeliramo, torej opišemo matematično, če poznamo koeficiente distorzije, ki jih določimo s postopkom kalibracije fotoaparata. Največkrat uporabljena metoda kalibracije je metoda s kalibracijskim poljem – mrežo točk z znanimi koordinatami. Na podlagi znanih dejanskih koordinat točk kalibracijskega polja in na zajetih slikah izmerjenih koordinat točk istega polja izračunamo koeficiente distorzije. Distorzijo opišemo z enačbo (1), to je s parametri distorzije k_c , koordinatami 'popačene' točke $[x_d \ y_d]$, koordinate 'nepopačene' točke $[x \ y]$, in $r^2 = x^2 + y^2$ (Mrovlje, 2009). Od uporabljenih parametrov in modela je odvisno kako dober približek dejanskega stanja nastane (Clarke in sod., 1998).

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_c(1)r^2 + k_c(2)r^4 + k_c(5)r^6) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_c(3)xy + k_c(4)(r^2 + 2x^2) \\ k_c(3)(r^2 + 2y^2) + 2k_c(4)xy \end{bmatrix} \quad (1)$$

Merski fotoaparati imajo parametre notranje orientacije definirane pred odhodom na teren, pri nemerskih moramo za to poskrbeti sočasno s fotografiranjem objekta na terenu. Ena od možnosti je, da kalibracijo opravimo na podlagi perspektivno različnih posnetkov objekta in izračun notranje orientacije fotoaparata vključimo v izravnavo bloka snopov (ang. bundle block adjustment) (Cigelšek, 2012).

3.3 Pol samodejni pristop programa Insight3D k izdelavi 3D modela

V magistrski nalogi bomo spoznali delovanje programa Insight3D, ki deluje na podlagi pol samodejnega pristopa izdelave 3D modela. V prvi fazi omogoča samodejno prepoznavanje homolognih značilnih točk na zajetih fotografijah in kalibracijo, v drugi fazi pa ročno identifikacijo in prepoznavanje slikovnih točk ter modeliranje.

Princip programa je čim hitrejša izgradnja 3D modela. Zahteven in dolgotrajen postopek je postopek kalibracije, njegova točnost pa pripomore h kakovostni izgradnji 3D modela. Najpomembnejša koraka pri kalibraciji sta samodejno prepoznavanje homolognih značilnih točk in pa prilagoditev algoritmov kalibracije v smislu robustnosti, saj se pri samodejnem prepoznavanju homolognih značilnih točk pojavijo grobe napake, ki jih mora program v postopku kalibracije prepoznati (Mach, 2009).

3.3.1 Slikovno prepoznavanje v programu Insight3D

Insight3D deluje na podlagi dobro definiranega in preizkušenega prej opisanega algoritma SIFT. Prepoznanim značilnim točkam je dodeljen 128 dimenzionalni vektor, deskriptor, ki ga primerja z deskriptorji naslednje fotografije. Iskanje prepoznanih značilnih točk na fotografijah predstavlja dolgotrajne izračune, sploh, če se primerja vsak možen par značilnih točk (Mach, 2009).

3.3.2 Kalibracija fotoaparata v programu Insight3D

Po končanem slikovnem ujemanju sledi kalibracija fotoaparata.

Program Insight3D zgradi rešitev za par fotografij z izračunom projekcijske matrike, ki vsebuje parametre zunanje orientacije fotografije (poljubno merilo, translacija, rotacija), z uporabo fundamentalne matrike. Fundamentalna matrika opisuje preslikavo, ki povezuje točke na dveh fotografijah, ki pripadata isti točki v prostoru.

Fotografije razporedi glede na število homolognih značilnih točk v padajočem vrstnem redu, nato pa naključno izbere par fotografij in oceni fundamentalno matriko z uporabo linearnega algoritma.

Za zagotavljanje robustnosti operacije, uporabi algoritem RANSAC, ki izloči morebitne šume oziroma napačno prepoznane homologne značilne točke na fotografijah.

Na koncu določi položaj značilne točke vidne na obeh fotografijah s triangulacijo, na podlagi najmanj dveh znanih projekcij te točke. Predpostavimo, da imamo dane projekcijske matrike P_1, P_2, \dots, P_n in koordinate x_1, x_2, \dots, x_n projekcije te točke z vsake fotografije. Namen je najti tako točko X v \mathcal{P}^3 prostoru, ki minimizirala vsoto kvadratov razdalje med projekcijama (2) (Mach, 2009):

$$\min_X \sum_{i=1 \dots n} d(P_i X, x_i)^2$$

(2)

V postopku kalibracije se poleg klasičnih parametrov notranje orientacije (goriščna razdalja, radialna distorzija idr.) izračunajo tudi relativni položaji fotoaparata glede na izračunan oblak točk (Mach, 2009).

4 OPIS TERENSKE IZVEDBE FOTOGRAMETRIČNIH IN KLASIČNIH MERITEV

4.1. Uporabljen instrumentarij in programska orodja

Za izdelavo magistrske naloge smo uporabili naslednji instrumentarij:

- fotoaparát Nikon D70 in objektiv AF-S DX Zoom-Nikkor,
- elektronski tahimeter Leica TCRP 1203+ in stativ,
- trasirko s prizmo,
- GPS anteno in
- merski trak.

In naslednja programska orodja:

- Insight3D,
- MeshLab in
- Adobe Photoshop.

4.1.1. Fotoaparát Nikon D70

Za fotografiranje objekta smo uporabili nemerski digitalni zrcalno-refleksni fotoaparát Nikon D70, z objektivom AF-S DX Zoom-Nikkor 18-70 mm f/3.5-4.5G IF ED, kot ga vidimo na sliki 10. Lastnosti uporabljenega fotoaparata so navedene v preglednici 1 (Nikon, 2015).

Preglednica 1: Lastnosti digitalnega fotoaparata Nikon D70 in objektivu AF-S DX Zoom-Nikkor (Nikon, 2015).

Lastnosti	Vrednosti
Število vseh pikslov	6.24 MP
Svetlobno tipalo	CCD
Velikost tipala	23.7 mm x 15.6 mm
Ločljivost	3008 x 2000
Občutljivost tipala	ISO 200 - 1600
Goriščna razdalja	18 – 70 mm
Zaslonka	3.5-29
Čas zaklopa	1/8000 – 30 sek



Slika 10: Fotoaparati Nikon D70 (Nikon, 2015).

4.1.2. Leica TCRP 1203+

Elektronski tahimeter Leica TCRP 1203+ je produkt Švicarskega podjetja Leica. Sodi med sodobne in zmogljive tahimetre serije TPS1200, ki omogočajo poleg merjenja kotov in dolžin ter dolžin brez reflektorja, tudi samodejno prepoznavanje in sledenje reflektorja, samodejno natančno viziranje, daljinsko vodenje idr. (Gajšek, 2007). V preglednici 2 so navedene nekatere lastnosti uporabljenega elektronskega tahimetra.

Preglednica 2: Lastnosti elektronskega tahimetra Leica TCRP 1203+ (Gajšek, 2007).

Lastnosti	Vrednosti
Natančnost merjenja horizontalnih smeri in zenitnih razdalj	3" (1,0 mgon)
Natančnost merjenja dolžin z reflektorjem	2 mm + 2 ppm
Natančnost merjenja dolžin brez reflektorja	3 mm + 2 ppm
Natančnost kompenzatorja	1,0" (0,3 mgon)
Doseg z reflektorjem	3000 m
Doseg brez reflektorja	300 m

4.1.3. Program Insight3D

Po končanem terenskem fotografiranju stavbe smo delo nadaljevali na računalniku. Uporabili smo program Insight3D, ki je avtorsko delo Lukasa Macha. Insight3D je odprtokodni program, delujoč v okolju Windows ali Linux, ki je namenjen izdelavi 3D modelov iz zajetih fotografij. Za fotografiranje stavbe potrebujemo zgolj običajen digitalni fotoaparatus.

V programu smo delo opravili po naslednjih korakih:

1. uvoz fotografij stavbe,
2. samodejno prepoznavanje značilnih točk,
3. kalibracija fotoaparata,
4. izračun 3D oblaka točk,
5. modeliranje,
6. teksturiranje modela,
7. shranjevanje in izvoz modela.

Za nemoteno delovanja programa Insight3D smo uporabili računalnik z naslednjimi lastnostmi:

- procesor Intel Core i7,
- pomnilnik 16 GB (RAM) in
- grafična kartica AMD Radeon HD 6700 Series.

4.1.4. Druga programska orodja

Naslednje programske orodje, ki smo ga uporabili, je brezplačni, odprtokodni program MeshLab. MeshLab ni le pregledovalnik, je program za izdelavo, obdelavo, urejanje in pregledovanje oziroma analizo 3D modelov (Cignoni in sod., 2008). Program MeshLab smo uporabili, da smo enemu izmed 3D modelov na podlagi klasično izmerjenih oslonilnih točk zagotovili absolutno orientacijo, drugemu 3D modelu pa merilo, na podlagi ročno izmerjenih karakterističnih dolžin.

Dodatno programske orodje, ki smo ga uporabili, je Adobe Photoshop, produkt podjetja Adobe Systems. Adobe Photoshop je profesionalni računalniški program za obdelavo, shranjevanje, optimizacijo fotografij in drugih rastrskih grafik (Adobe Photoshop, 2015). Program Adobe Photoshop smo uporabili za maskiranje fotografij, ki smo jih uporabili pri izdelavi 3D modela.

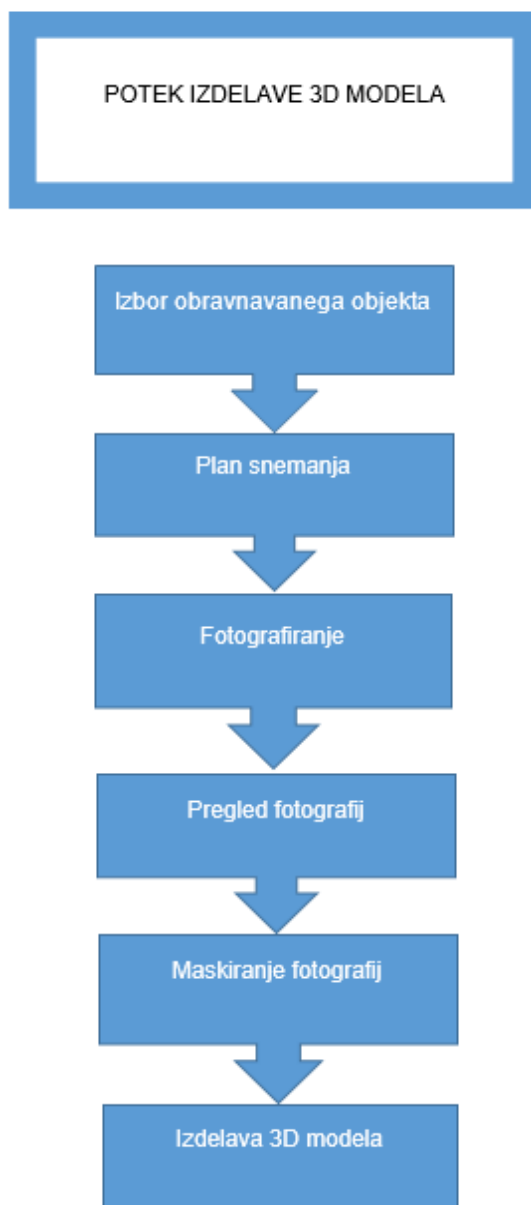
4.2. Opis metodologije

Preden smo se lotili izdelave 3D modela izbranega objekta, smo se najprej spoznali s programom Insight3D.

V naslednji fazi dela je bil izbor obravnavanega objekta in ogled terena. Na podlagi velikosti objekta, njegove lege in priporočil glede fotografiranja iz navodil, ki so priložena programu, smo naredili plan snemanja. Fotografiranje je bilo potrebno izvesti tako, da je bil na vsaki fotografiji viden čim večji del obravnavanega objekta, fotografije so morale biti ostre, preklop med sosednjimi fotografijami naj bi bil čim večji, sam kot med različnimi stojišči fotografiranja pa čim manjši, zaželeno je, da med 15° in 25° . Nadalje je bilo pomembno, da je bilo na obravnavanem objektu čim več detajla in tekstur, saj je na monotonih stenah premalo detajlov za dobro prepoznavanje značilnih točk, zaradi pravilne določitve goriščne razdalje se je bilo potrebno izogniti fotografiranju samo ene ravnine v prostoru, prepovedano je bilo obrezovanje fotografij ter priporočeno upoštevati, da je vsak detajl viden na vsaj treh slikah (Mach, 2009).

Po končanem fotografiranju je sledil pregled fotografij. Glede na to, da program Insight3D ne omogoča maskiranja fotografij, smo zato izbrali program Adobe Photoshop in maskirali del fotografij. Zanimal nas je zgolj obravnavani objekt, s tem pa smo se izognili okolici, ki bi nam kasneje lahko povzročala težave pri prepoznavi homolognih značilnih točk. Za maskiranje fotografij smo se odločili šele na podlagi težav, ki smo jih imeli pri obdelavi podatkov v programu, kljub temu, da za to ni priporočil v navodilih.

Prvi korak v programu Insight3D je bilo prepoznavanje in ujemanje značilnih točk. To je ključen korak za uspešnost kalibracije. Po končani kalibraciji je sledilo ročno označevanje identičnih/homolognih točk (ang. user vertices) na čim večjem številu fotografij ter njihovo povezovanje v ploskve in modeliranje objekta. Ko smo imeli model končan, je sledilo teksturiranje zmodeliranih ploskev. Končanemu modelu je bilo potrebno zagotoviti še merilo. Z nekaj karakterističnimi razdaljami smo to storili v programu MeshLab. Na koncu smo geometrično točnost 3D izdelanega modela preverili z geodetskimi meritvami kontrolnih dolžin. Shematski prikaz posameznih faz izdelave 3D modela stavbe je prikazan na sliki 11.



Slika 11: Shematski prikaz izdelave 3D modela.

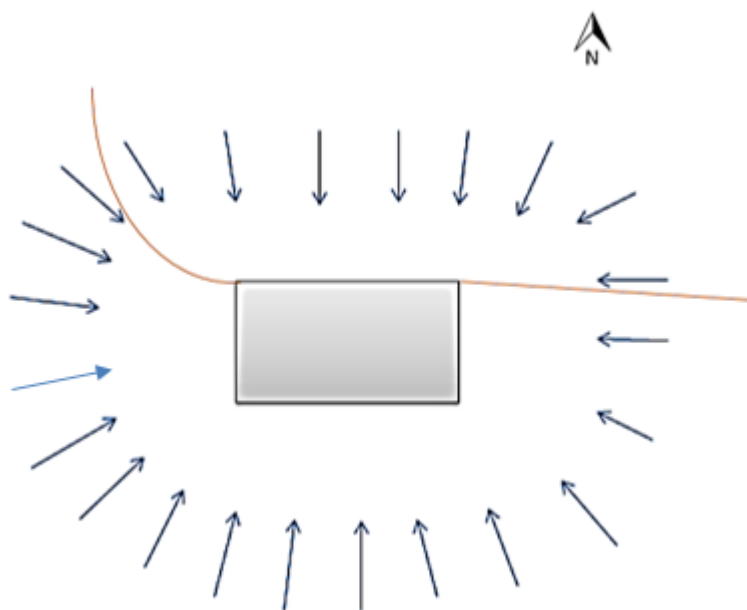
4.3 Načrt in izvedba snemanja

Namen magistrske naloge je bil, da se spoznamo z delovanjem programa Insight3D in v končni fazi naredimo 3D model izbranega objekta ter izvedemo primerjavo fotogrametričnega izdelka s klasičnimi geodetskimi meritvami. Glede na to, da nam je bil program Insight3D popolnoma nepoznan, smo si za obravnavan objekt izbrali enostavno stavbo, pravokotne oblike, z grobimi teksturami.

Za fotografiranje smo uporabili nemerski fotoaparat Nikon D70, ki je na naši fakulteti na voljo za študijske namene, in je tudi ustrezal namenu naše naloge.

Pri zajemu fotografij smo se držali priporočil iz navodil. Glede na lastnosti izbranega objekta, ki je pritličen in razmeroma majhen, smo za zajem objekta načrtovali zgolj terestrične fotografije. Razdalja med objektom in stojišči je bila približno 7 m. Pri fotografiranju smo pazili, da so bile fotografije ostre, posnete iz približno enake oddaljenosti, zaradi zaželenega preklopa ter kota med sosednjimi fotografijami se nismo mogli izogniti fotografiranju zgolj ene ravnine v prostoru, v našem primeru sprednje in zadnje fasade. Pozornost smo usmerili tudi na kamniti zid, ki se iz sprednje strani objekta razteza v vzhodni in zahodni smeri. Pri zajemu vzhodne fasade smo se morali izogniti grmovju. Za izdelavo končnega modela smo uporabili 23 fotografij. Prikaz razporeditve obravnavanih fotografij je na sliki 12, v oranžni barvi je nakazan kamnit zid.

Fotografiranje smo načrtovali na oblačen dan, da smo se čim bolj izognili sencam in neenakomerni osvetlitvi.



Slika 12: Prikaz razporeditve zajetih fotografij.

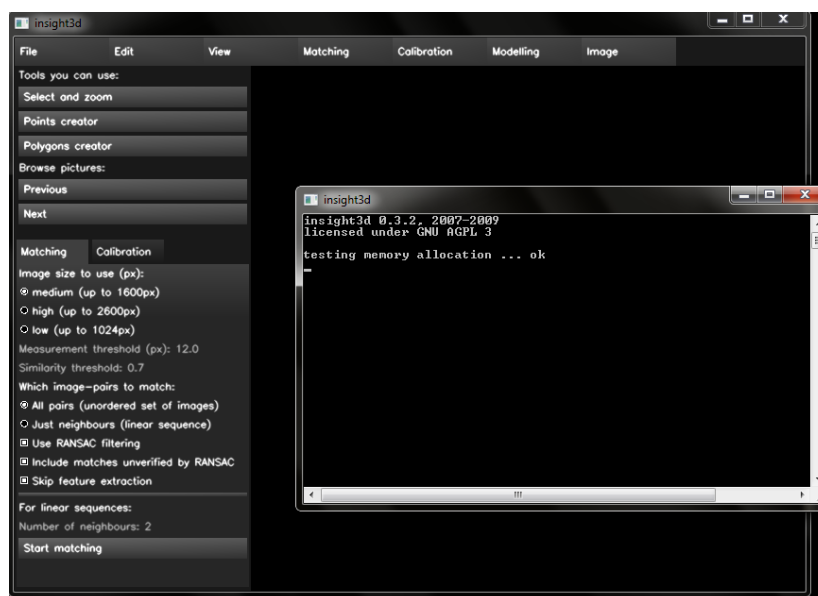
5 RAČUNALNIŠKA OBDELAVA PODATKOV

Najprej smo se spoznali s programom Insight3D, analizirali postopke obdelave, v drugem koraku pa izdelali topološko urejen 3D model izbranega objekta.

Postopek delovanja programa Insight3D sem opisala s pomočjo navodil za uporabo programa - Insight3D - quick tutorial (Mach, 2009).

5.1 Delovanje programa Insight3D

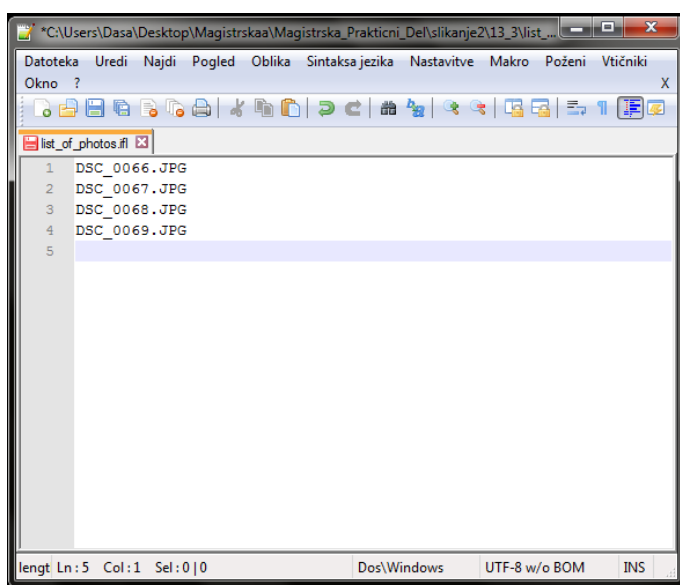
Najprej namestimo program Insight3D na disk in zaženemo insight3d.exe. Slika 13 prikazuje uporabniški vmesnik in konzolno okno programa Insight3D.



Slika 13: Prikaz uporabniškega vmesnika in konzolnega okna programa.

Na vrhu uporabniškega vmesnika se nahaja glavni meni, z zavihki 'File', 'Edit', 'View', 'Matching', 'Calibration', 'Modelling' in 'Image'. Na levi strani se nahajajo bližnjice, ki omogočajo hitrejše upravljanje programa. Ko odpremo program, se pojavi tudi konzolno okno, v katerem se prikazujejo podatki o delovanju programa in informacije o morebitnih napakah.

Ko zaženemo program Insight3D, se odpre prazen projekt. Naslednji korak je, da vanj dodamo slike. S klikom na 'File' -> 'Add image' dodamo sliko po sliko. Hitrejši način je, da ustvarimo datoteko z besedilom (prikazana na sliki 14), vanjo shranimo imena fotografij (v vsaki vrstici ime ene fotografije) in odpremo datoteko. Pomembno je, da je datoteka z besedilom shranjena v isti mapi kot uporabljene fotografije. Primer datoteke z besedilom je prikazan na spodnji sliki.



Slika 14: Dokument z uporabljenimi fotografijami.

Ko dodamo fotografije v program, se nam prva iz seznama prikaže v uporabniškem vmesniku programa.

5.1.1 Prepoznavanje in ujemanje homolognih značilnih točk

Ko imamo fotografije vnesene v program, lahko začnemo s postopkom prepoznavanja homolognih značilnih točk. To lahko storimo na dva načina, tako da primerjamo vsako fotografijo z vsako – vse pare ali samo sosednje fotografije (po vrsti kot smo jih vnesli v program) med seboj.

Če je v projektu devet ali več fotografij, je priporočljivo, da se homologne značilne točke prepozna zgolj med sosednjimi fotografijami («Just neighbours (linear sequence)«). Nastavimo lahko tudi različne stopnje ločljivosti fotografij – visoko, srednjo ali nizko. Višja ločljivost pomeni več točk za primerjavo.

Postopek prepoznavanja homolognih značilnih točk traja nekaj časa. V povprečju za deset fotografij traja približno minuto, v tem času lahko postane program neodziven. Ko je postopek prepoznavanja homolognih značilnih točk končan, vidimo označene homologne značilne točke na fotografiji. Prikažejo se črni majhni kvadrati, ki predstavljajo značilne točke, uspešno prepoznane tudi na drugih fotografijah. Na sliki 15 so desno zgoraj prikazane fotografije, na katerih je izbrana homologna značilna točka uspešno prepoznana.

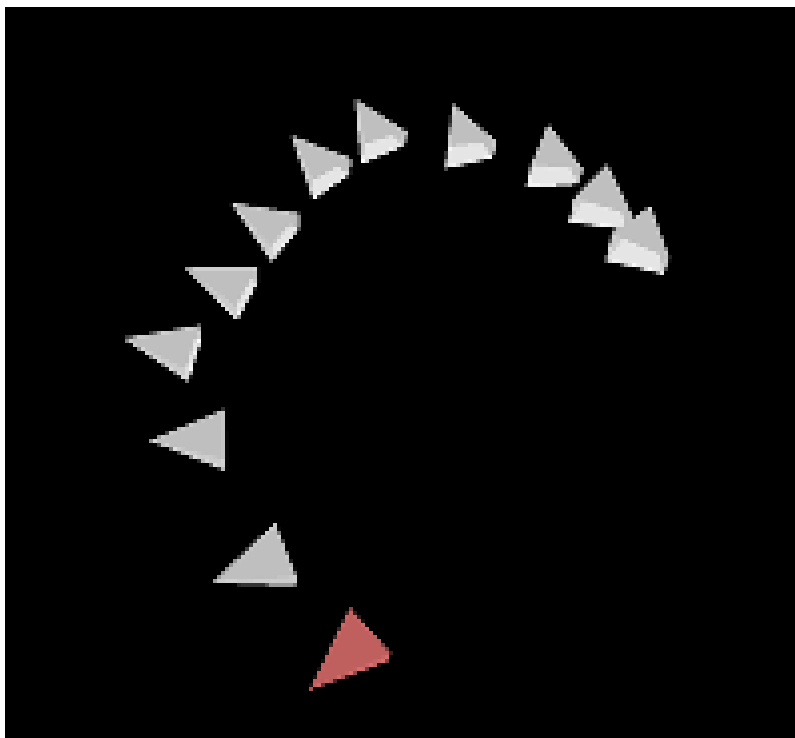


Slika 15: Fotografije s prepoznanimi homolognimi značilnimi točkami.

5.1.2 Avtokalibracija

Naslednji korak je sama kalibracija, izračun parametrov notranje orientacije fotoaparata. V primeru, ko so homologne značilne točke razporejene po celotni fotografiji in je število pravilno prepoznanih homolognih značilnih točk veliko, s postopkom kalibracije ne bi smeli imeti težav.

Postopek kalibracije izberemo v meniju 'Calibration' -> 'Automatic calibration'. Postopek računanja parametrov notranje orientacije fotoaparata traja nekaj trenutkov – odvisno je od števila fotografij. Rezultat kalibracije vidimo v pregledovalniku ('Overview mode'), to so piramide na sliki 16, ki predstavljajo položaj fotoaparata ob zajemu posamezne fotografije. Pregledovalni način 'Overview mode' izberemo v meniju 'Edit' -> 'Mode' -> 'Overview mode'.



Slika 16: Shematski prikaz rezultatov avtokalibracije.

Na sliki 16 je v rožnato obarvana piramida, ki predstavlja položaj fotoaparata pri zajemu fotografije, izbrane v pregledovalniku »Shot mode«.

V primeru, da so piramide obrnjene z osnovno ploskvijo proti navideznemu oblaku točk, bo 3D oblak točk, ki ga izračunamo v naslednjem koraku, pravilno orientiran.

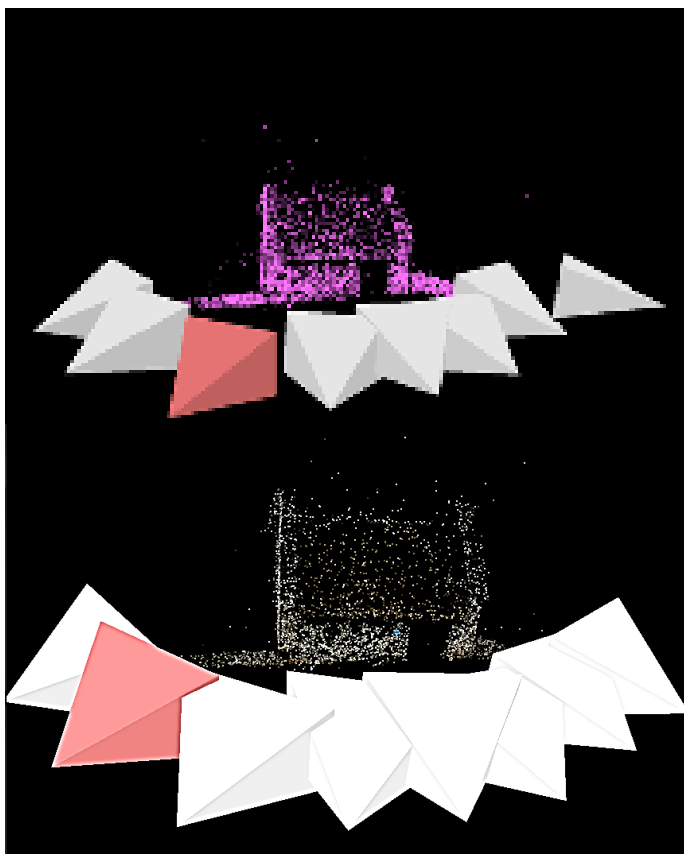
Po postopku kalibracije so notranja in zunanja orientacija fotoaparata določeni v relativnih enotah.

5.1.3 3D oblak točk

Pravilen izračun kalibracije lahko preverimo z izračunom 3D oblaka točk celotnega objekta. Kreiranje 3D oblaka točk dobimo v meniju 'Modelling' -> 'Triangulate all vertices'.

V primeru, da je oblak točk deformiran, je lahko razlog v slabem prepoznavanju in ujemanju homolognih značilnih točk. V tem primeru uporabimo ukaz 'Modelling' -> 'Triangulate, only trusted', ki izračuna 3D oblak točk zgolj iz tistih ujemajočih homolognih značilnih točk, za katere obstaja večja verjetnost, da so pravilne.

3D oblak točk si lahko ogledamo v pregledovalniku 'Overview mode'. V kolikor ga želimo videti v realnih barvah (slika 17), uporabimo ukaz 'Image' -> 'Colorize vertices'.



Slika 17: Izračunana 3D oblaka točk, na spodnji sliki je prikazan v realnih barvah.

5.1.4 Modeliranje

Najprej si moramo pazljivo ogledati izračunan 3D oblak točk. Če ni prišlo do napake pri izračunu, kar sklepamo na podlagi vizualnega pregleda 3D oblaka točk, lahko nadaljujemo z modeliranjem.

Prvi korak modeliranja je označevanje slikovnih točk na različnih fotografijah, drugi korak je izgradnja 3D modela, povezovanje homolognih objektnih točk v ploskve. Označevanje slikovnih točk se izvaja interaktivno preko modula 'Shot mode'.

5.1.4.1 Identifikacija in označevanje slikovnih točk

Postopek modeliranja izvedemo v načinu 'Shot mode' ('Edit' -> 'Mode' -> 'Shot mode'). Da bi se izognili nepreglednosti med samodejno prepoznanimi točkami, to je 3D oblakom točk, jih lahko začasno izklopimo z ukazom 'View' -> 'Show/Hide automatic points', saj identične slikovne točke na novo ustvarimo in niso del 3D oblaka točk

Za identifikacijo slikovnih točk uporabimo orodje 'Points creator', ki se nahaja v levem delu uporabniškega vmesnika programa. Ista slikovna točka, detajl mora biti označen najmanj na dveh fotografijah.

Kreiranje istih slikovnih točk oziroma detajlov izvedemo z levim klikom na miški. Z aktivnim orodjem 'Points creator' vidimo pod kurzorjem miške povečano sliko, kar nam pomaga pri bolj natančni določitvi detajla. S kolescem na miški povečamo in pomanjšamo fotografijo.

Ko na fotografiji označimo vse želene slikovne točke, detajle, se s klikom na 'Next' oziroma 'Previous' gumb, ki ležita v levem delu uporabniškega vmesnika programa, premaknemo na naslednjo oziroma prejšnjo fotografijo, kjer še nismo ročno označili detajlov.

Tokrat se moramo označevanja slikovnih točk lotiti v istem vrstnem redu, kot smo se ga na prvi fotografiji. Kot je prikazano na sliki 18, pod kurzorjem miške opazimo detajl, ki smo ga kot prvega označili na prvi fotografiji, pod njim pa povečano fotografijo, ki nam pomaga pri bolj natančni določitvi istega detajla.



Slika 18: Detajl, ki ga moramo naslednjega označiti.

Prehod med prvim detajlom in naslednjimi, ki jih moramo še označiti na fotografiji, lahko opravimo z gumbi na tipkovnici, opisanimi v preglednici 3.

Preglednica 3: Lastnosti gumbov, ki omogočijo prehod med detajli.

Gumb	Njegova lastnost
'Page down'	Preskočimo trenutni detajl
'Page up'	Vrnemo se na prejšnji detajl
'Home key'	Pokaže prvi, še neoznačen detajl
'End key'	Dovoli označiti nov detajl

Slikovne točke označimo na čim večjem številu fotografij, in s triangulacijo izračunamo njihov objektni položaj v meniju 'Modelling' -> 'Triangulate user vertices'. Na sliki 19 so levo prikazani boljše, desno pa slabše izračunani položaji objektnih točk.



Slika 19: Prikaz boljšega in slabšega izračuna položaja homolognih točk.

Slika 19 prikazuje natančnost izračunanih položajev objektnih točk. Natančnost predstavlja dolžina zelene puščice. Večja kot je dolžina, slabša je natančnost.

V primeru, da smo se zmotili pri določevanju slikovnih točk, jih lahko izbrišemo tako, da z desnim klikom na miški označimo točko, ta se obarva vijolično, in izberemo v meniju 'Edit' -> 'Erase selected points'. Na enkrat lahko izberemo eno ali več slikovnih točk.

Če želimo izbrisati slikovno točko na vseh fotografijah, jo najprej izberemo v meniju 'Edit' -> 'Select' -> 'Add corresponding points' in jo nato izberemo po istem postopku, kot eno samo.

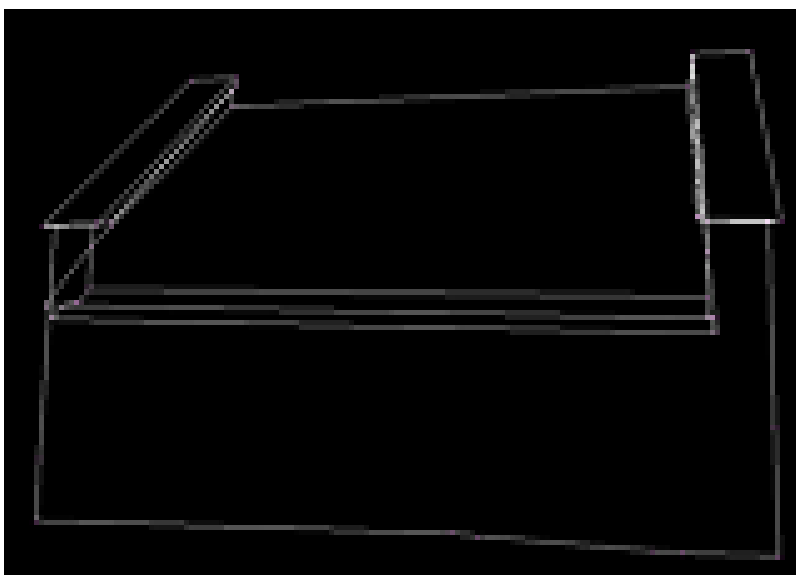
Ko označimo vse zelene slikovne točke na vseh fotografijah in jim izračunamo položaj, si jih lahko ogledamo v pregledovalniku 'Overview mode'. Objektne točke so določene v 3D lokalnem koordinatnem sistemu.

5.1.4.2 Povezovanje objektnih točk v ploskve

Ko imamo določene objektne točke in njihov položaj v 3D lokalnem koordinatnem sistemu, jih povežemo v ploskve, to je zgradimo 3D model.

Vrnemo se v način 'Shot mode' in aktiviramo orodje za kreiranje ploskev (ang. 'polygons creator'), v levem delu uporabniškega vmesnika programa.

Z levim klikom na miški izberemo objektne točke in jih povežemo v zelene ploskve. Ploskev, ki jo kreiramo in s katero upravljamo, je obarvana vijolično. Ko smo z njo zadovoljni, potrdimo s tipko Enter na tipkovnici in ploskev se obarva belo (slika 20).



Slika 20: 3D model.

V primeru, da bi jo želeli ponovno izbrati, in jo po možnosti izbrisati, jo določimo s klikom 'PageDown' oziroma 'PageUp' na tipkovnici. Ko se zelena ploskev obarva vijolično, lahko z njo upravljamo. Izberemo jo v meniju 'Edit' -> 'Erase current polygon'. Določeno objektno

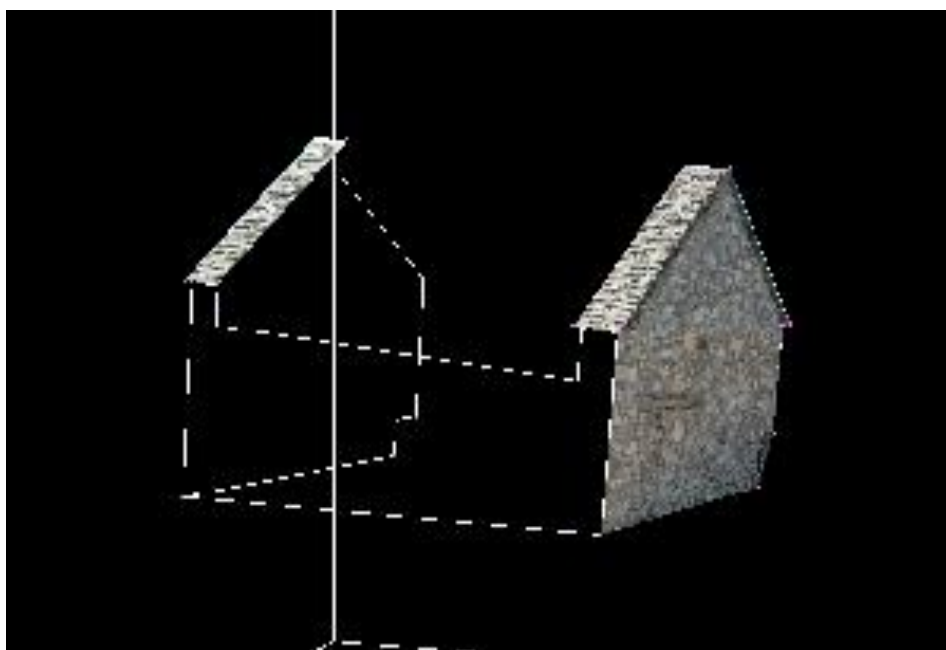
točko iz kreirane ploskve izločimo, če pritisnemo na tipkovnici tipko Shift in jo označimo z levim klikom na miški.

Ni nam potrebno označiti iste ploskve na vseh fotografijah, kjer so vidne objektne točke. Dovolj je, da to storimo enkrat.

5.1.5 Teksturiranje modela

V pregledovalniku 'Overview mode' si lahko ogledamo 3D model. Če manjka kakšna izmed ploskev, je razlog v napačni določitvi slikovne točke in izračunanega njenega položaja. V takem primeru ponovimo zgoraj opisan postopek.

Sledi še zadnji korak modeliranja, to je teksturiranje ploskev, ki je opravljen enostavno, s klikom na meni 'Image' -> 'Generate textures'. Na sliki 21 je prikazano nepopolno teksturiranje 3D modela.



Slika 21: Nepopolno teksturiran 3D model.

5.1.6 Shranjevanje in izvoz projekta

Priporočljivo je, da projekt med samim delom večkrat shranimo. V glavnem meniju 'File' -> 'Save project', določimo ime projektu in ga shranimo s končnico *.i3d, odpremo ga v meniju 'File' -> 'Open project'.

Model lahko izvozimo v več različnih formatov, ki so zapisani v preglednici 4.

Preglednica 4: Formati, ki jih lahko izvozimo oziroma uvozimo v program.

Izvozni format	Uvozni format
VRML *.vrml	RealVIZ projekt *.rzml, *.rzi
Sandy3D ActionScript *.as	Points *.txt
RealVIZ project *.rzml, *.rzi	Pointcloud *.txt
Cameras *.txt	
Pointcloud *.txt	

5.2 Obdelava fotogrametrično zajetih podatkov in težave pri delu s programom

Pri uporabi programa Insight3D in modeliranju objekta smo naleteli na kar nekaj težav.

5.2.1 Fotografiranje objekta

Kot prvo bi omenili fotografiranje objekta. Na prvi pogled se zdi izbran objekt enostaven za modeliranje, vendar nam je nekaj težav povzročalo že samo fotografiranje le tega. Iz sprednje strani objekta se v vzhodni in zahodni smeri razteza kamniti zid, na vzhodni strani je dodatno oviro predstavljalo grmovje.

- Kamniti zid

Kamniti zid je predstavljal težavo pri prepoznavanju in ujemanju značilnih točk. Izkazalo se je, da je potrebno pri fotografiranju objekta, kjer se stika s kamnitim zidom, le tega fotografirati bolj detajlno, tako, da je kamniti zid na čim večjem številu fotografij (čim večje prekrivanje). Tako smo zagotovili zadostno število značilnih točk po celotnem kamnitem zidu in uspešno kalibracijo fotoaparata. Prikaz fotografiranja kamnitega zidu je na sliki 22.



Slika 22: Prikaz fotografiranja kamnitega zidu.

- Grmovje

Grmovje na vzhodni stani objekta nam je preprečilo, da bi fotografirali okoli objekta z enake oddaljenosti in enakim kotom snemanja. Tako je bil kot med stojiščem pred in po grmovju večji od priporočenega. Na sliki 23 je prikaz fotografiranja objekta, glede na opisano oviro – grmovje.



Slika 23: Prikaz fotografiranja objekta okoli grmovja.

5.2.2 Slikovno ujemanje

V fazi prepoznavanja značilnih točk so nam težave povzročali kamniti zid, detajli na fotografiji v okolici obravnavanega objekta in število fotografij, ki smo jih uporabili.

- Kamniti zid

Kot smo že omenili, smo morali biti pri fotografiranju kamnitega zida bolj temeljiti in ga fotografirati z večjim preklopom med sosednjimi fotografijami. S tem smo omogočili, da je bilo na vsaki fotografiji dovolj značilnih točk, ki jih je program lahko primerjal z značilnimi točkami na drugih fotografijah. Na sliki 24 je prikazano napačno ujemanje značilnih točk.



Slika 24: Prikaz napačnega ujemanja značilnih točk na kamnitem zidu.

- Detajli okoli obravnavanega objekta

Okolica obravnavanega objekta je enolična. Težava se je pokazala pri prepoznavanju značilnih točk in ujemanju le teh. Prišlo je do napak, ki so v naslednjem koraku otežile kalibracijo. Zato smo se odločili, da fotografije maskiramo, kljub temu, da program tega ne omogoča in v navodilih za to ni priporočil. Tako smo v programu Adobe Photoshop pobelili okolico obravnavanega objekta, kot je prikazano na sliki 25.

S tem smo se izognili večjemu številu napačno povezanih značilnih točk in posledično pravilno izračunali parametre kalibracije fotoaparata.



Slika 25: Primer neobdelane in maskirane fotografije.

- Število obravnavanih fotografij

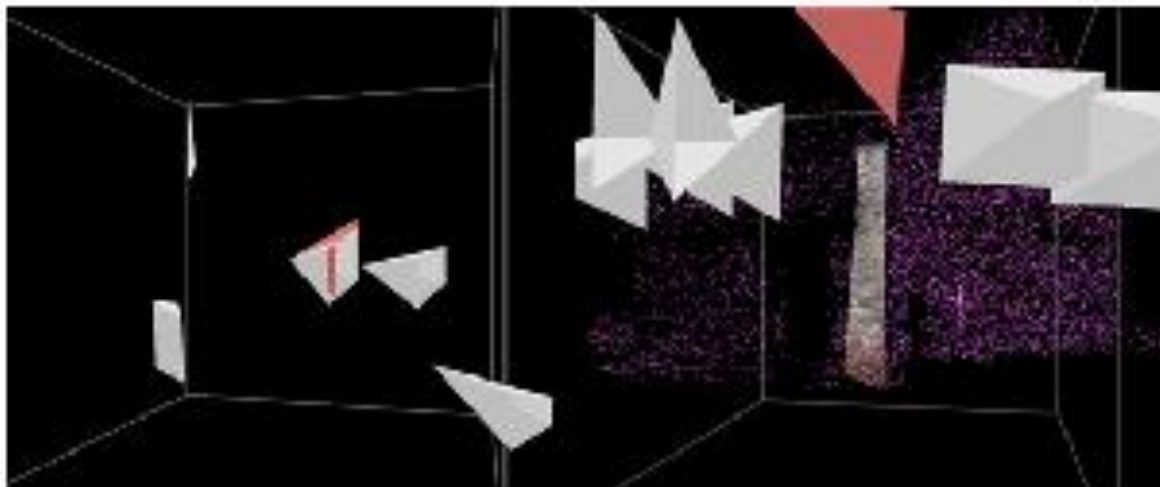
Pri večjih objektih, bolj zahtevnih oblik, je težava število fotografij. Večje kot je število fotografij, več je možnosti, da bi prišlo do napake pri slikovnem ujemanju in posledično pri izračunu notranje in zunanje orientacije fotografij. Težava je, da ne moremo preveriti, pri kateri fotografiji se pojavi napaka. Tako lahko zgolj ugibamo in preizkušamo različne kombinacije fotografij, po možnosti posnetih pod različnimi pogoji, z različnimi nastavitvami fotoaparata. Število fotografij vpliva tudi na hitrost obdelave podatkov in na samo stabilnost programa.

5.2.3 Postopek kalibracije

Pri postopku kalibracije smo naleteli na številne težave. Kot prvo se je za težavo izkazalo nepravilno ujemanje homolognih značilnih točk. To smo izboljšali z maskiranjem fotografij, preden smo jih vključili v obravnavo.

Program Insight3D omogoča samodejno kalibracijo fotoaparata. Pogoj za uspešno izvedbo kalibracije je dobro ujemanje homolognih značilnih točk. Težava je v tem, da iz programa ni možno dobiti kalibracijskega poročila s podatki o morebitnih napakah kalibracije, natančnosti parametrov notranje orientacije, kakovosti fotografij idr. O uspešnosti kalibracije priča zgolj razporeditev ter skladna oblika piramid, ki prikazujejo položaje fotoaparata pri fotografiranju, tako da lahko o pravilnosti postopka sklepamo zgolj posredno. Dva primera nepravilne kalibracije sta prikazana na sliki 26. Sklepamo lahko, da položaji fotoaparata v času zajema fotografij niso bili takšni, kot jih s piramidami prikazuje slika 26. Različne oblike piramid na sliki 26 prikazujejo velike in neresnične spremembe parametrov notranje orientacije med fotografiranjem. Program ne omogoča postopnega dodajanja fotografij v projekt, saj začne

postopek kalibracije vedno znova. Tako ne moremo presoditi katere fotografije povzročajo težave.



Slika 26: Dva primera nepravilne kalibracije.

5.2.4 3D oblak točk

Po postopku kalibracije sledi izračun 3D oblaka točk. Kljub uspešnemu postopku kalibracije se je velikokrat zgodilo, da so se piramide pri izračunu 3D oblaka točk obrnile, kot je razvidno iz slike 27 (levo) in je bil 3D oblak točk rotiran okoli z in y osi.

Težavo smo preprosto rešili z ukazom v meniju 'Modelling' -> 'Coordinate frame' ... -> 'Reorient'. Piramide in 3D oblak točk so se zopet postavili v pravilni položaj, kot je prikazano na sliki 27 (desno).



Slika 27: Uporaba ukaza Reorient.

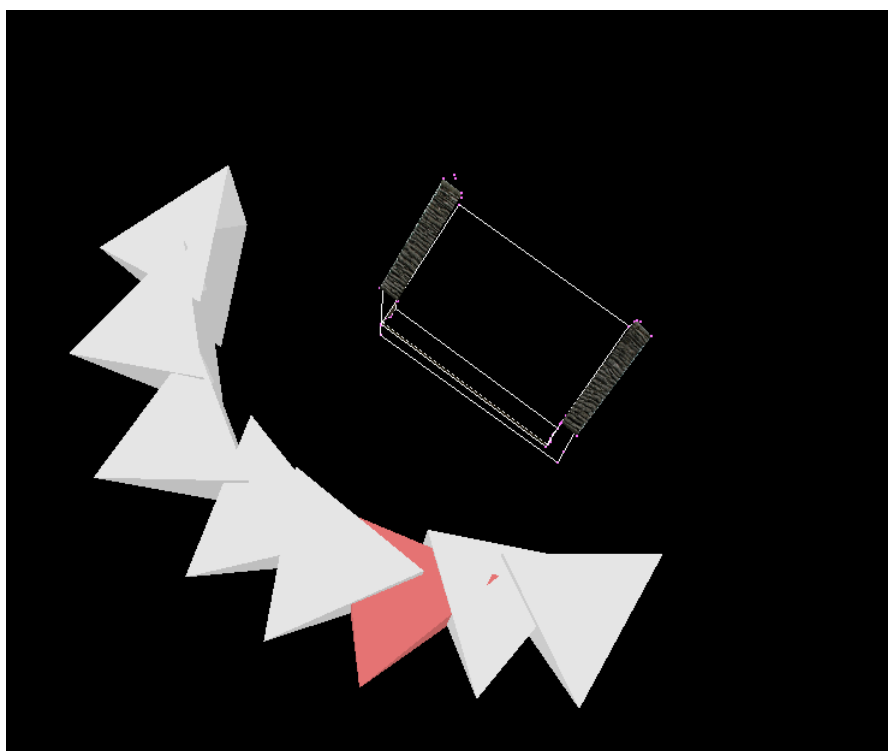
5.2.5 Merjenje slikovnih točk

Slikovne točke merimo v modulu 'Shot mode'. Statistične parametre izračuna objektivnih točk lahko preverjamo zgolj grafično. Pri tem ugotovimo grobe napake identifikacije slikovnih točk, ki jih v takem primeru izbrišemo in ponovno zajamemo.

5.2.6 Teksture

Težave nam je povzročalo dodajanje tekstur. Samo teksturiranje modela naj bi bil preprost končni korak pri modeliranju. Vendar pa nismo mogli na enkrat teksturirati celotnega modela, pokrile so se zgolj nekatere ploskve modela, kar je razvidno iz slike 28.

Program ne omogoča izvoza tekstur skupaj z modelom.



Slika 28: Prikaz delno teksturiranega modela.

5.2.7 Formati za izvoz in uvoz podatkov

Ena izmed večjih pomanjkljivosti programa je majhna izbira formatov za zapis 3D podatkov. Program omogoča uvoz tekstovnih formatov (*.ifl oziroma *.txt), s katerim uvozimo več

fotografij naenkrat, ali uvoz posameznih fotografij (*.jpg, *.png). Omogočen je uvoz projekta v zapisu RealVIZ (*.rzml ali *.rzi) ter oblaka točk (*.txt).

Kot najbolj uporaben format za izvoz 3D modela se je izkazal format VRML (*.vrml, *.wrl), ki ga uporabljamo za predstavitev 3D interaktivne vektorske grafike. Ta format nam je omogočal uvoz 3D modela v MeshLab, vendar pa nam je Insight3D omogočal le izvoz ploskev brez tekstur. Ostali formati, ki jih je mogoče izvoziti so navedeni v preglednici 4.

Pri uporabi programa smo pogrešali možnost uporabe večjega števila različnih formatov, ki bi nam omogočili izvoz vseh informacij oziroma bi imeli na izbiro izvoz različnih vrst podatkov, ki nas zanimajo. Na primer format OBJ in U3D, ki tako kot VRML podpirata izvoz tekstur, ali PLY, s podatki o barvi za vsako točko 3D modela ter COLLADA z metapodatki. Dobrodošla bi bila tudi formata U3D in X3D, ki sta standardna formata za izmenjavo podatkov o računalniški grafiki oziroma predstavitev in prenos 3D-scen in objektov, ali vsesplošno uporabni PDF (Štuhec, 2012).

5.2.8 Nestabilnost programa, nezmožnost interaktivnega vnosa podatkov

Med uporabljanjem programa je priporočljivo, da projekt večkrat shranimo, saj se je program izkazal kot nestabilen. Kadar se pojavi težava, ki je ne uspe rešiti, neha delovati. Velikokrat se je to zgodilo pri prepoznavanju in ujemanju značilnih točk, torej v operacijah, ki uporabljajo več delovnega spomina računalnika. V naslednjih korakih nismo zaznali težav.

Nestabilnost programa se je izkazala tudi pri obravnavanju večje količine podatkov, to je večjem številu fotografij (nad 20). Pri prepoznavanju značilnih točk smo izbrali najnižjo ločljivost fotografij, ampak je program potreboval veliko časa ter pred zaključkom postopka nehal delovati.

Nezmožnost interaktivnega vnosa podatkov se je pokazala kot slabost predvsem pri prepoznavanju in ujemanju značilnih točk. V primeru napačno prepoznane značilne točke je ni možno ročno izločiti ali po potrebi določiti novo značilno točko, da bi s tem pripomogli k boljšim rezultatom postopkov.

Zgrajen model nima pravega merila in orientacije v prostoru. Program nima funkcij, ki bi omogočile določitev merila in absolutne orientacije v koordinatnem sistemu, zato moramo za georeferenciranje modela uporabiti druga programska orodja.

5.2.9 Slaba navodila, neodzivnost avtorja

Program je brezplačen, odprtokodni, s kratkimi navodili, ki so sicer razumljiva, vendar ne obsegajo vseh funkcij, ki jih naj bi program omogočal. Določene funkcije, ki smo jih preizkusili, niso delovale, o njih ni ničesar zapisano, avtor programa se ne odziva na vprašanja s strani uporabnikov, ravno tako ni veliko souporabnikov programa, ki bi svoja vprašanja in izkušnje delili na forumih. Uporabnik ni deležen nikakršne podpore.

5.2.10 Občutljivost na pravilno fotografiranje

Program se je izkazal kot zelo občutljiv na pravilno fotografiranje objekta. Težave nam je povzročalo grmovje na vzhodni strani objekta. Na tem mestu nismo mogli fotografirati po priporočilih iz navodil, kar se je pri izdelavi 3D modela pokazalo za nepremostljivo oviro. Objekta nismo mogli izdelati v enem projektu, temveč smo ga razdelili na sprednjo fasado ter ostale tri fasade. Zaradi grmovja smo vzhodno fasado fotografirali preveč od strani, kar se pri izdelanem 3D modelu treh fasad objekta odraža kot geometrična netočnost. Dimenzije izdelanega 3D modela se na tem mestu razlikujejo od dimenzij v naravi.

5.3 Primerjava z drugo programsko opremo

Na trgu je množica programskih orodij, komercialnih ali nekomercialnih, odprtokodnih, ki se uporabljajo na področju fotogrametrije. V tabeli 4 so predstavljene nekatere lastnosti najpogosteje uporabljenih programskih orodij, ki smo jih povzeli po navedenih virih. Vsem je skupno, da delujejo po postopku SfM.

Pri vsakem programskem orodju je pomembno, da zajamemo fotografije po priporočilih iz navodil, naložimo fotografije v program, in postopamo po navodilih.

Priporočila, ki delajo programsko opremo kupcem zanimivejšo, so sledeča: uporabniku prijazno programsko orodje, v veliki meri samodejna obdelava, hitra obdelava, cena, visoka natančnost, možnost uporabe izdelkov v drugih programskih orodjih, robustnost in stabilnost programa, obdelava velikih količin podatkov, podpora uporabnikom s strani avtorjev, možnost interaktivnega vnosa podatkov ...

V preglednici 5 so navedeni nekateri programi, ki so med uporabniki najbolj razširjeni, in njihove lastnosti.

Preglednica 5: Primeri med uporabniki najbolj razširjenih programskih orodij.

Programsko orodje	Delovno okolje	Cena	Odprtost	Avtor
VisualSFM	OS X, Linux, Windows	/	Ne	Changchang Wu
ReCap 360	Windows	/	Ne	Autodesk
123D Catch	iOS, Android, Windows	/	Ne	Autodesk
PhotoScan Standard	OS X, Linux, Windows	179 \$, 3499 \$	Ne	Agisoft
ARC3D	OS X, Linux, Windows	/	Da	Katholieke Universiteit Leuven
Insight3D	Linux, Windows	/	Da	Lukas Mach
Pix4D	Windows	Discovery /, Mesečno 260 €, Letno 2600 €	Ne	Pix4D SA

Primerjava treh programskih orodij, ki so med uporabniki najbolj razširjeni:

- PhotoScan

Programsko orodje PhotoScan je produkt ruskega podjetja Agisoft LLC. Na tržišču sta osnovna in profesionalna različica, obe sta ponujeni kot komercialna produkta. Za nakup osnovne različice, ki jo je mogoče nadgraditi v profesionalno različico, je potrebno odšteti 179 \$, profesionalne pa 3499 \$. Kupljena licenca nima časovnih omejitev, ponuja pa 12 mesečno tehnično podporo in nadgradnjo programa. V izobraževalne namene je na voljo študijska verzija.

Ta programska oprema ponuja vrsto funkcij, osnovna različica omogoča aerotriangulacijo, izdelavo oblaka točk, 3D modela in tekstur, profesionalna pa še nastavitve koordinatnega

sistema, izdelava DMV in ortofota, georeferenciranje, 4D rekonstrukcijo objektov, obdelavo multispektralnih fotografij, vnos kode Python idr.

Za nemoteno delovanje programa so priporočljive tri računalniška konfiguracije. Osnovna konfiguracija s pomnilnikom do 32 GB RAM-a, procesor Intel i7 CPU, 4 x 4 GB (16 GB) oziroma 4 x 8 GB (32 GB) ter grafično kartico Nvidia GeForce GTX 680 ali GeForce GTX 780. Za še hitrejše in nemoteno delovanje je priporočljiv pomnilnik s 64 GB RAM-a (Agisoft PhotoScan, 2014).

- Pix4Dmapper

Programsko orodje Pix4Dmapper je produkt podjetja Pix4D SA iz Švice. Na voljo so štiri različne licence programa. Pix4D Discovery mapper je brezplačna, namenjena reklamam, vendar ima omejitve pri izgradnji končnih izdelkov, ravno tako ne omogoča nadgradnje in podpore proizvajalca. Profesionalna različica je na voljo v treh različnih verzijah. V vseh je možna instalacija programa na dva računalnika, razlikuje pa se v višini plačila ter časovne veljavnosti licence. Enomesečno licenco najamemo za 260 € in omogoča podporo in nadgradnjo programa, enoletno različico najamemo za 2600 €, lahko pa programsko orodje kupimo za 6500 € ter pridobimo podporo in nadgradnjo v prvem letu.

Izdelki, ki jih pridobimo s programom Pix4D so: georeferenciran ortomozaik, DMR, teksturiran 3D oblak točk, animacije skozi 3D oblak točk, možnost izračuna volumnov, izdelava plastnic, izdelki za Googleve aplikacije (*.kml, *.html), izračun notranjih in zunanjih parametrov fotoaparata, video animacije idr. (Pix4D, 2015).

Za učinkovito in nemoteno delovanje programa je zaželena programska in strojna oprema z naslednjimi lastnostmi: 64bit Windows, 6-Core CPU i7, 16 GB RAM-a pomnilnika ter katerokoli grafično kartico proizvajalca Nvidia.

- AutoDesk 123D Catch

AutoDesk 123D predstavlja vrsto aplikacij, uporabnih na področju modeliranja. Fotogrametrična aplikacija je 123D Catch, ki generira 3D model iz fotografij, ostale, kot so 123D Circuits, Design, Make, Meshmixer, idr, so namenjene modeliranju.

123D Catch je brezplačna aplikacija, ki za delovanje ne potrebuje zmogljive računalniške opreme, saj prenesemo fotografije na AutoDeskov strežnik. Vsi algoritmi se izvajajo na njihovem strežniku, uporabnik dobi zgolj končni rezultat, izdelan 3D model.

- Primerjava vseh treh programskih orodij, glede na izkušnje uporabnikov:

Programsko orodje 123D Catch je sposobno popolnoma samodejne obdelave podatkov. Uporabnik naloži fotografije na Autodeskov strežnik in jih pošlje v obdelavo. Po končani obdelavi, dobi obvestilo o rezultatih, to je 3D modelu, 3D oblaku točk ter podatkih o položaju fotoaparata, na e-mail naslov, in si jih kasneje prenese na svoj disk. Modelu zagotovi merilo s poznanimi dolžinami, koordinatni sistem pa določi na primer po glavnih oseh stavbe. 123D Catch omogoča izvozne formate, ki jih lahko uvozimo v ImageModeler, Meslab, Sketchup idr. (Gerke, 2012).

123D Catch je brezplačno programsko orodje, ki dosega, na podlagi izkušenj uporabnikov, pri modeliranju dobre rezultate. Razlog je v postopku SfM, ki je enak kot pri programskem orodju Capture3D, sicer enemu izmed najdražjih programskih orodij dostopnih na trgu. Slabost programskega orodja 123D Catch je dejstvo, da Autodesku s tem, ko naložimo fotografije na njihov strežnik, omogočimo tudi pravice, do uporabe naših izdelkov.

PhotoScan omogoča vrsto operacij, ki omogočijo izgradnjo zelo kakovostnih izdelkov. V programskem orodju je enostavno poravnati fotografije, teksturirati ploskve, georeferencirati model idr. V njegovo korist priča tudi prijaznost programa do uporabnika ter topološka popolnost pri izgradnji 3D modelov. PhotoScan omogoča v osnovni verziji kalibracijo fotoaparata, ki jo lahko s posebnim modulom nadgradimo in izboljšamo rezultate, poravnava fotografij je enostavna, s točkami s poznanimi koordinatam.

PhotoScan omogoča izvoz veznih točk v Bingo (*.dat), ORIMO (*.txt), oblak točk kot XYZ PointCloud (*.txt), PhotoScan (*.oc3), Adobe PDF (*.pdf), model kot COLLADA (*.dae), Autodeskoc DXF (*.dxf), VRML model (*.wrl), teksture (*.jpg, *.tiff, *.png idr.). V PhotoScan pa ne moremo uvoziti veznih točk in oblaka točk, medtem ko lahko v program uvozimo ali izvozimo notranje in zunanje parametre fotoaparata (*.xml za PhotoScan, *.out za Bundler idr.) (Agisoft PhotoScan User Manual, 2014).

Interaktivni vnos podatkov (v fazi triangulacije in izgradnje DMR) izboljša rezultate in poveča stabilnost programa. PhotoScan omogoča obdelavo velike količine podatkov (na primer izdelavo modela iz približno 600 fotografij je potreboval 18 ur (Vidmar, 2014)), ki pa zahtevajo dovolj zmogljivo računalniško opremo in čas. Uporabniki, v večini začetniki, imajo lahko težave z uporabo programa, saj je potrebno vsa pojasnila glede funkcij ukazov poiskati v navodilih in forumih (Agisoft PhotoScan Forum, 2015).

Programsko orodje Pix4D ravno tako omogoča interaktiven vnos podatkov, kar poveča robustnost in stabilnost programa. Pix4D slovi kot uporabniku zelo prijazno programsko orodje, z veliko podpore avtorjev programa, kar pri drugih programih ni pravilo. Visoka cena v

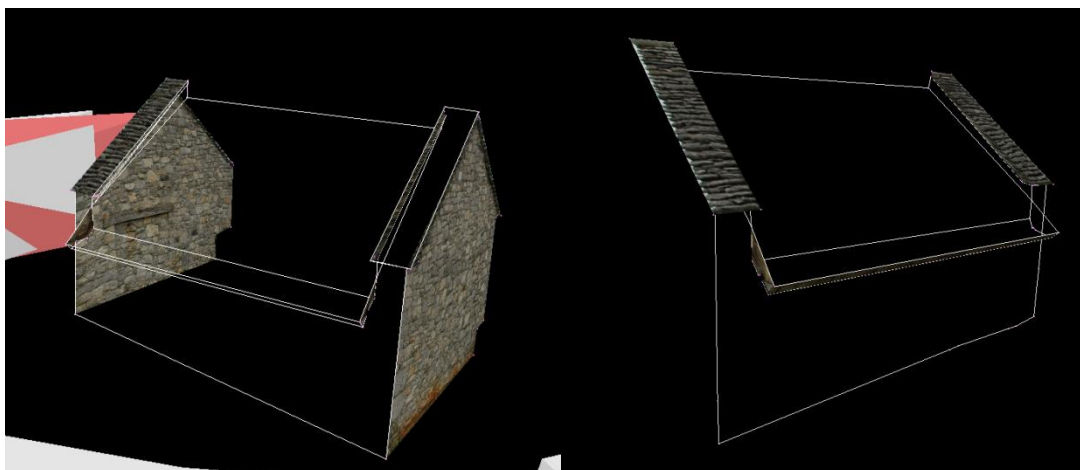
primerjavi z ostalimi programskimi orodji in uporaba zgolj na operacijskem sistemu Windows vsekakor ne pričata v njegovo korist.

Pix4D omogoča izvoz cele vrste različnih formatov, kompatibilnih z drugimi programskimi orodji. Tako lahko izvozimo notranje in zunanje parametre fotoaparata, oblak točk v različnih formatih – med pomembnejšimi so: *.las za uvoz v ArcGIS, *.xyz za v AutoCAD, *.ply za v MeshLab – DMR lahko izvozimo kot *.xyz in uvozimo v AutoCAD ali *.las za uvoz v ArcGIS, teksturirane 3D modele lahko izvozimo kot *.ply v MeshLab, ali *.pdf. Poleg tega omogoča izvoz cele vrste drugih izdelkov in formatov za v različna programska orodja, kot so Inpho, Global Mapper, Google Earth in Google Maps, Blender, Windows Media Player in drugi (Pix4D, 2015).

6 REZULTATI OBDELAVE IN PRIMERJAVA 3D FOTOGRAMETRIČNEGA MODELA S TERENSKIMI MERITVAMI

V programu Insight3D nam ni uspelo izdelati celotnega 3D modela senika v enem projektu. Objekt smo razdelili na dva dela – sprednjo (severno) fasado ter ostale tri (zahodno, južno in vzhodno) fasado.

Na sliki 29 sta prikazana delno teksturirana 3D modela v programu Insight3D. Program nam ni omogočil izvoza tekstur 3D modelov, smo pa uspeli narediti dva topološko popolna 3D modela. Levo je prikazan 3D model treh fasad senika, desno pa 3D model sprednje fasade senika.



Slika 29: Delno teksturirana 3D modela v programu Insight3D.

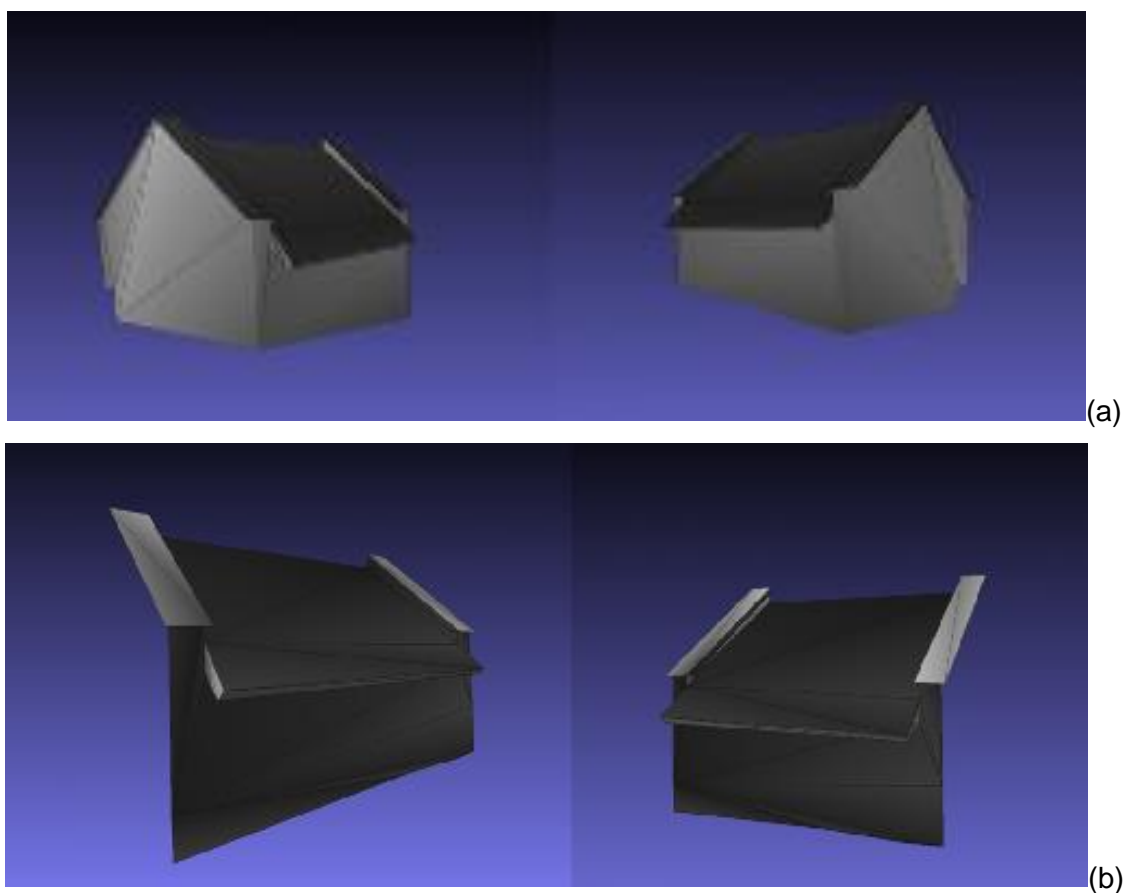
Izdelanima 3D modeloma v programu Insight3D je bilo potrebno določiti še absolutni položaj ter pravo merilo. To smo zagotovili v programu MeshLab.

Z detajlno polarno metodo izmere smo določili koordinate oslonilnih točk na objektu v novem državnem koordinatnem sistemu D96/TM. Na osnovi koordinat oslonilnih točk, ki so služile kot vhodni podatek v programu MeshLab, smo z orodjem Reference Scene 3D modelu določili položaj v novem državnem koordinatnem sistemu D96/TM in merilo. Poleg oslonilnih točk smo izmerili še kontrolne točke, ki so služile za izračun dolžin po enačbi (3).

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

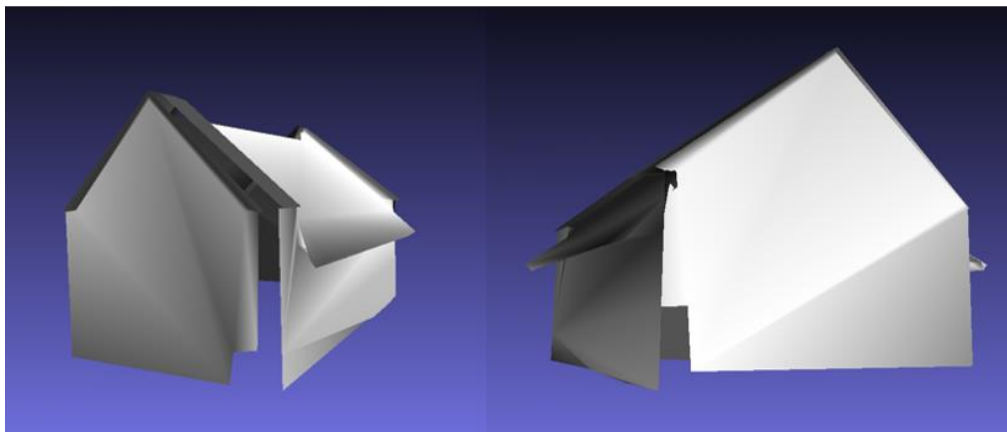
(3)

Na georeferenciranem 3D modelu smo v programu MeshLab izvedli meritve dolžin in jih primerjali z izračunanimi dolžinami iz koordinat kontrolnih točk. Na sliki 30 (a) je prikazan georeferenciran 3D model treh fasad objekta, na sliki 30 (b) pa georeferenciran 3D model sprednje fasade objekta v programu MeshLab.



Slika 30: Prikaz 3D modela objekta v programu MeshLab.

Izdelana 3D modela nismo združili. Program MeshLab namreč omogoča združitev dveh modelov na podlagi prekrivanja skupnih ploskev (orodje Alignment), ki pa jih v tem primeru nimamo. Z namenom prikaza obeh 3D modelov v enem, smo združili oba 3D modela v novem državnem koordinatnem sistemu D96/TM. Rezultat združitve je prikazan na sliki 31.



Slika 31: Georeferencirana 3D modela senika.

Na sliki 31 (levo) je mogoče opaziti geometrično nepopolnost enega izmed 3D modelov. Na 3D modelu treh fasad, natančneje na vzhodni fasadi, je prišlo do grobe napake. Že na pogled je videti ta fasada prekratka. V nadaljevanju bomo potrdili to ugotovitev, na podlagi rezultatov iz preglednice 7.

6.1 Primerjava kontrolnih dolžin

Kakovost prostorskih podatkov lahko opišemo z geometrično točnostjo, ki nam poda stopnjo ujemanja rezultatov meritev z dejansko vrednostjo. V našem primeru smo za mero geometrične točnosti uporabili koren srednjega kvadratnega pogreška (ang. root mean square error), v nadaljevanju RMSE, ki smo ga izračunali iz odstopanj kontrolnih dolžin.

Oceno geometrične točnosti smo izvedli na osnovi primerjave fotogrametrično izdelanega 3D modela in geodetskih meritev objekta v naravi. Primerjali smo izračunane dolžine iz koordinat kontrolnih točk na objektu ter fotogrametrične meritve teh dolžin na 3D modelu. Na osnovi odstopanj med izmerjenimi dolžinami smo izračunali še RMSE.

RMSE je mera za odstopanje slučajne spremenljivke od neke standardne oziroma privzete vrednosti. Uporabljamo ga kot mero točnosti. Enačba za RMSE je (4), kjer je x_i posamezna vrednost slučajne spremenljivke z n členi – v našem primeru dolžina na 3D modelu, x_{pi} pa standardna oziroma privzeta vrednost – v našem primeru referenčna dolžina v naravi (Frančula, Lapaine, 2003).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{pi})^2}$$

(4)

V preglednici 6 so prikazane izračunane dolžine med kontrolnimi točkami v naravi, fotogrametrične meritve dolžin na 3D modelu in odstopanje med njimi ter izračunani RMSE, ki se nanašajo na sprednjo fasado objekta, izmerjene dolžine so prikazane na sliki 32 (a).

Preglednica 6: Prikaz merjenih dolžin v naravi, na 3D modelu, odstopanje in RMSE, ki se nanašajo na sprednjo fasado senika.

SENİK - sprednja fasada			
Oznaka dolžine	Dolžina v naravi [m]	Dolžina v modelu [m]	Odstopanje [m]
1	8,39	8,41	-0,02
2	7,31	7,34	-0,03
3	0,78	0,78	0,00
4	0,77	0,71	0,06
5	2,88	2,88	0,00
RMSE [m]			0,03

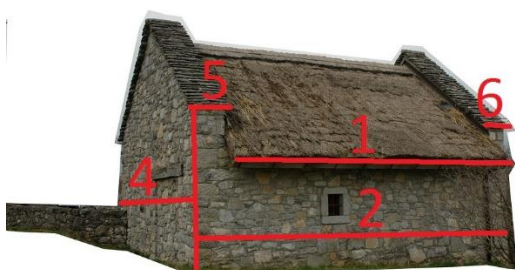
V preglednici 7 so prikazane izračunane dolžine med kontrolnimi točkami na ostalih treh fasadah v naravi, fotogrametrične meritve na 3D modelu in odstopanje med njimi ter RMSE, na sliki 32 (b) pa so prikazane izmerjene dolžine na seniku.

Preglednica 7: Prikaz merjenih dolžin v naravi, na 3D modelu, odstopanje in RMSE, ki se nanašajo na tri fasade senika.

SENİK - 3 fasade			
Oznaka dolžine	Dolžina v naravi [m]	Dolžina v modelu [m]	Odstopanje [m]
1	7,31	7,28	0,03
2	8,37	8,29	0,08
3	6,30	5,86	0,44
4	6,30	6,30	0,00
5	0,75	0,76	-0,01
6	0,75	0,77	-0,02
7	3,12	3,04	0,08
RMSE [m]			0,17
RMSE - brez 3. dolžine [m]			0,05



(a)



(b)



Slika 32: Skica izmerjenih dolžin na seniku.

Na podlagi rezultatov iz preglednice 6, ki se nanašajo na 3D model sprednje fasade senika, je razvidno, da je RMSE 0,03 m. Iz preglednice 7, kjer so podatki o ostalih treh fasadah senika, pa je razvidno, da je RMSE izdelanega 3D modela 0,17 m.

Kot smo že na sliki 31 ugotovili, so nam rezultati iz preglednice 7 potrdili, da je prišlo na vzhodni fasadi do grobe napake. Na sliki 32 (a) je ta dolžina prikazana pod številko 3, v preglednici 7 pa je obarvana rdeče. Razlika med izmerjeno dolžino v naravi ter dolžino v 3D modelu je v ostalih primerih nekaj centimetrov, pri dolžini označeni s številko 3 pa 0,44 m. Prišlo je do napake pri izgradnji 3D modela.

Ta groba napaka je posledica fotografiranja, saj se glede na ovire na terenu nismo mogli v celoti držati priporočil iz navodil. Na vzhodni fasadi je fotografiranje oviralo grmovje, tako da je bil zorni kot med dvema zaporednima fotografijama nekoliko večji, kot navadno. Ugotovili smo, da je imel program Insight3D težave pri prepoznavanju značilnih točk na teh dveh posnetkih. Kar se je kasneje pokazalo tudi pri neuspešni kalibraciji in modeliranju. S tem

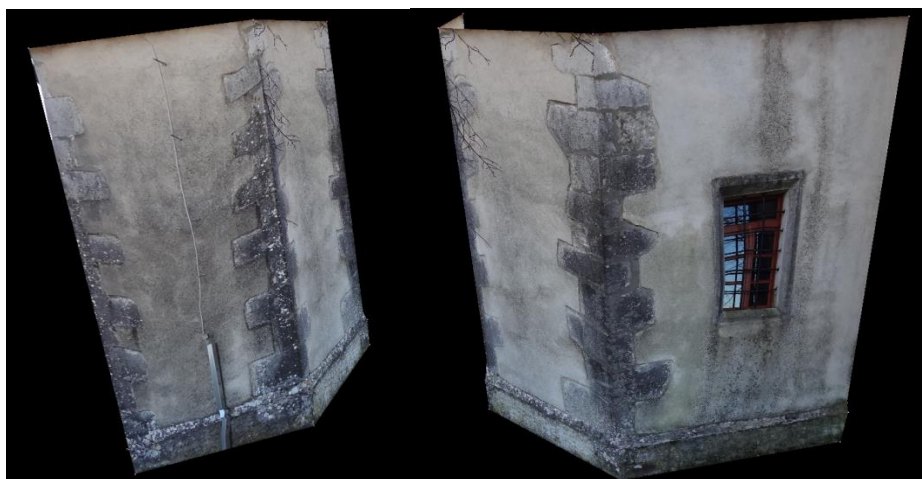
razlogom smo tudi ločili senik na dva dela in izdelali dva 3D modela. Program je vseeno slabo izdelal vzhodno fasado. Tako smo izmerjeno dolžino številka 3 izločili iz nadaljnje obravnave. RMSE znaša po odstranitvi grobe napake 0,05 m.

Pri modeliranju senika smo se soočali s številnimi težavami, tako da nam je zgolj delno uspelo izdelati 3D model v želeni četrti ravni podrobnosti LOD3 po standardu CityGML. Zahteve četrte ravni podrobnosti (LOD3) so detajlno prikazana zunanost, to pomeni, da imajo stavbe modelirana stopnišča, dimnike, balkone, okna, zračnike idr. Glede na stopnjo prikazanega detajla, ki smo ga zmodelirali na izdelanem 3D modelu senika, to je poenostavljen objekt z dodano streho, smo zadostili zahtevam tretje ravni podrobnosti (LOD2).

Glede na težave pri modeliranju senika, smo želeli izdelati še en 3D model manjšega, enostavnejšega objekta, ter tako še enkrat preizkusiti program Insight3D pri izdelavi manj kompleksnih 3D modelov. Izbrali smo si del cerkve, zakristijo, v Škocjanu.

Pri modeliranju zakristije smo se držali vseh navodil glede fotografiranja objekta. Predvsem smo pazili, da je bil zorni kot med fotografijami enakomeren, ter da je imel izbran objekt čim več ravnin, ki se sekajo pod kotom.

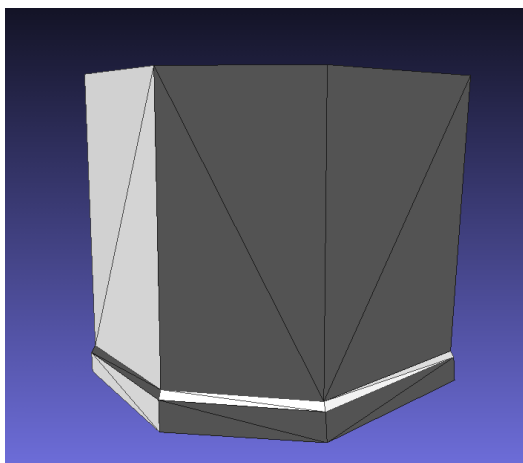
Pri izdelavi 3D modela zakristije nismo imeli težav. Program se je izkazal kot primeren za manjše, manj kompleksne stavbe. Na sliki 33 je prikazan teksturiran 3D model zakristije.



Slika 33: Prikaz teksturiranega 3D modela zakristije v programu Insight3D.

Izdelan 3D model v programu Insight3D nima pravega merila, niti določenega položaja v novem državnem koordinatnem sistemu D96/TM. Ker nas je zanimala zgolj izgradnja 3D

modela ter njegova geometrična točnost, smo mu merilo zagotovili v programu MeshLab. Na terenu smo izmerili karakteristične dolžine z merskim trakom. Na podlagi izmerjenih karakterističnih dolžin, ki so služile kot vhodni podatki, smo mu merilo določili z orodjem Scale. Na sliki 34 je prikazan 3D model v programu MeshLab.



Slika 34: Prikaz 3D modela zakristije v programu MeshLab.

Podatki, ki se nanašajo na zakristijo se nahajajo v preglednici 8. Prikazane so merjene dolžine z merskim trakom v naravi, fotogrametrično merjene na 3D modelu, odstopanje in RMSE.

Preglednica 8: Prikaz merjenih dolžin v naravi, na 3D modelu, odstopanje in RMSE, ki se nanašajo na zakristijo.

CERKEV - zakristija			
Oznaka dolžine	Dolžina v naravi [m]	Dolžina v modelu [m]	Odstopanje [m]
1	2,31	2,33	-0,02
2	2,34	2,29	0,05
3	2,90	2,88	0,02
4	4,45	4,43	0,02
5	0,36	0,34	0,02
6	0,55	0,48	0,07
7	0,50	0,46	0,04
8	0,36	0,37	-0,01
9	0,10	0,13	-0,03
10	0,10	0,13	-0,03
11	0,09	0,10	-0,01
RMSE [m]			0,03

Na sliki 35 so prikazane dolžine na zakristiji, ki smo jih upoštevali pri analizi.



Slika 35: Skica izmerjenih dolžin na zakristiji.

Na podlagi rezultatov iz preglednice 8, ki se nanašajo na 3D model zakristije je razvidno, da je RMSE 0,03 m.

Iz analize podatkov lahko povzamemo, da je s programom Insight3D mogoče izdelati 3D model v rangu natančnosti nekaj centimetrov.

Glede na ugotovitev, da je program občutljiv na pravilno fotografiranje objekta, smo želeli izdelati 3D model z istimi fotografijami, kot so bile uporabljene v programu Insight3D, vendar drugim programskim orodjem. Izbrali smo Autodeskov 123D Catch, ker je brezplačen program, dostopen na svetovnem spletu.

Izdelana 3D modela sta na sliki 36. Oba 3D modela sta topološko popolna, sorazmerna, izdelana v enem projektu, teksturirana itd. Iz rezultatov lahko sklepamo, da smo fotografiranje izbranega senika izvedli korektno, težave pri izgradnji 3D modela pa lahko pripišemo občutljivosti algoritmov prepoznavanje značilnih točk v programu Insight3D.



Slika 36: 3D modela senika in zakristije izdelana v programu 123D Catch.

7 ZAKLJUČEK

Povezovanje bližnjelikovne fotogrametrije in računalniškega vida je v zadnjem desetletju prevzelo vodilno vlogo pri 3D modeliranju objektov. Razvoj algoritmov na področju računalniškega vida, nižje cene in boljša kakovost digitalnih fotoaparatorov ter algoritmi za kalibracijo nemerskih fotoaparatorov so omogočili kakovostno modeliranje objektov na osnovi prekrivajočih se fotografij. Tako so velik napredek doživela programska orodja, ki omogočajo pridobivanje prostorskih podatkov iz niza fotografij, posnetih pod različnimi zornimi koti. Iz pestrega nabora programskih orodij, dostopnih na trgu, smo si za magistrsko nalogo izbrali program Insight3D, da bi ga preizkusili, saj nimamo praktičnih izkušenj z njim.

Glede na cilje, ki smo si jih zastavili na začetku magistrske naloge, lahko povzamemo, da smo jih zgolj delno izpolnili.

Glavni zastavljeni cilj je bil spoznati se s programom Insight3D, kar nam je v večji meri uspelo. Spoznali smo delovanje programa, pri tem pa se soočali z veliko težavami že pri samem zajemu fotografij, saj smo pri uporabi programa ugotovili, da se je potrebno v celoti držati priporočil glede fotografiranja, drugače nastopijo težave pri delovanju programa – tako smo se soočali s težavami pri postopku slikovnega ujemanja in kalibraciji. Nadalje smo imeli težave z orientacijo izdelanega 3D oblaka točk, izdelavo tekstur idr. Veliko težav nam je povzročal izvoz 3D modela, saj ima program na razpolago malo različnih formatov za izvoz 3D modelov. Kljub izbranemu *.vrml formatu, ki je splošno uporabljen za izvoz teksturiranih 3D modelov, pa program ni izvozil tekstur. Program se je izkazal kot nestabilen, ne omogoča interaktivnega vnosa podatkov, ki bi na primer pripomoglo k boljšemu prepoznavanju značilnih točk ali poravnavi fotografij, priložena so nepopolna navodila ...

Glede na težave nam je zgolj delno uspelo 3D model izdelati v želeni četrti ravni podrobnosti LOD3 po standardu CityGML. Izbranega objekta nismo sestavili v enem projektu, ampak smo ga izdelali v dveh korakih – posebej sprednjo (severno) fasado ter posebej ostale tri fasade. Razlog za neuspešno izdelavo celotnega 3D modela je v sami občutljivosti programa Insight3D pri postopkih slikovnega ujemanja in kalibracije. To smo potrdili z izdelavo še enega 3D modela. Izbrali smo si del cerkve, zakristijo v Škocjanu in potrdili domnevo, da program uspešno deluje na majhnih, enostavnejših objektih, ki jih je mogoče zajeti brez ovir. Pri 3D modelu zakristije nam je to uspelo, saj smo izdelali geometrično točen 3D model. Glede na težave, s katerimi smo se soočali pri modeliranju senika, nam je uspela izdelava v tretji ravni podrobnosti (LOD2) po standardu CityGML. V našem primeru smo ocenili geometrično točnost izdelanega 3D modela v rangu nekaj centimetrov, kar je lahko za določene vrste aplikacij sprejemljivo.

Ker smo se želeli prepričati, da je bilo fotografiranje izbranega objekta senika izvedeno korektno, smo iz istih fotografij izdelali 3D model v drugem programskem orodju. Izbrali smo brezplačni Autodeskov 123D Catch, Rezultat je potrdil domnevo, da smo fotografiranje izvedli korektno, slabe rezultate v programu Insight3D pa lahko pripišemo občutljivosti algoritmov prepoznavanja značilnih točk v programu.

Na podlagi rezultatov lahko zaključimo, da ima program Insight3D veliko pomanjkljivosti.

Razlog je lahko v namenu izdelave programa, saj je bil ustvarjen v sklopu diplomskega dela Lukasa Macha s Fakultete za matematiko in fiziko v Pragi. Pomanjkljivosti bi lahko iskali ravno v dejstvu, da je bil program izdelan v študijske in ne komercialne namene, kar bi vsekakor pomenilo odgovornost avtorjev pri podpori in nasvetih do kupcev oziroma uporabnikov. V neodzivnosti avtorja programa lahko sklepamo, da nima namena nadgradnje svojega izdelka, v odprtokodnosti programa pa vidimo priložnost v izpopolnitvi, spreminjanju in popravljanju kode algoritmov s strani uporabnika samega, kar bi pripomoglo k stabilnosti delovanja programa.

VIRI

123D Catch. 2014.

<http://www.123dapp.com/catch> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)

3DVIA. 2015.

<http://www.3dvia.com/> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)

3D-COFORM. 2012.

<http://www.3d-coform.eu/index.php/tools/arc-3d-webservice> (Pridobljeno 14. 1. 2015.).

Acute3D. 2015.

<http://www.acute3d.com/> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)

Adobe Photoshop. 2015.

<http://www.photoshop.com/products/photoshop> (Pridobljeno 14. 5. 2015.)

Agisoft PhotoScan. 2015.

<http://www.agisoft.com/> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)

Agisoft PhotoScan Forum. 2015. Agisoft Vs Competitors.

<http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=3237.0> (Pridobljeno 2. 5. 2015.)

Agisoft PhotoScan User Manual, Standard Edition, Version 1.1. 2014.

http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_1_en.pdf (Pridobljeno 29. 4. 2015.)

Arico surveying. 2010.

<http://www.aricosurveying.com/?79,leica-tcrp1203-r400-3-robotic-total-station> (Pridobljeno 14. 5. 2015.)

Autodesk ImageModeler. 2009.

<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?id=11390028&siteID=123112> (Pridobljeno 15. 1. 2015.)

Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L. 2008. SURF: Speeded Up Robust Features. Computer vision and Image Understanding 110: 346-359.

Canoma. 2001.

<http://vw.indiana.edu/tutorials/canoma/welcome.htm> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)

Canon 350d. 2014.

http://www.dpreview.com/products/canon/slrs/canon_eos350d (Pridobljeno 15. 1. 2015.)

Cigelšek, L. 2012. Kalibracija digitalnega fotoaparata na testnem polju. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Cigelšek): str. 1, 7.

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

Donoser, M., Bishof, H. 2006. Efficient Maximally Stable Extreme Region (MSER) Tracking. Institute for Computer Graphics and Vision. Graz University of Technology: loč. pag.

Dronemapper. 2014.

<http://dronemapper.com> (Pridobljeno 15. 1. 2015.)

Clarke, T. A., Fryer J. G. 1998. The development of camera calibration methods and models, *Photogrammetric Record*, 16, 91: 51-66.

Forsen, P. E. 2007. Maximally Stable Colour Regions for Recognition and Matching. Department of Computer Science. University of British Columbia.

Frančula, N., Lapaine, M. (ur.). 2003. Geodetski rječnik. Zagreb, Državna geodetska uprava, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Gajšek, S. 2007. Zmožnost in uporabnost instrumenta Leica SmartStation. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Gajšek): 42 str.

Gerke, M. 2012. UAV-Photogrammetry from an enduser's perspective. Workshop at KIT. Germany, University of Twente.

http://www.itc.nl/library/papers_2012/general/gerke_uav_ppt.pdf (Pridobljeno 1. 5. 2015.)

Kodak. 2015.

<https://www.kodak.com/global/en/service/digCam/dc260/ownerManual/11acquire7.shtml>

(Pridobljeno 15. 1. 2015.)

Kolbe, T. H. 2008. Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. The 3rd International Workshop on 3D Geo-Information, Seoul, South Korea: 15-31.

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.

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

Mach, L. Insight3d - quick tutorial. 2009.

http://insight3d.sourceforge.net/insight3d_tutorial.pdf (Pridobljeno 15. 1. 2015.)

Modri planet. 2014.

<http://www.modriplanet.si> (Pridobljeno 14. 1. 2105.)

Mrovlje, J. 2009. Vpliv distorzije na razdalje, izračunane s pomočjo stereoskopskih slik. *Elektrotehniški vestnik* 77, 1: 43-48. str. 44.

Občina Divača. 2015. Kulturna dediščina, J'kopinov skedenj.

http://www.tic-divaca.si/kulturna_dediscina/divaski_prag/2005122111445561/

(Pridobljeno 18. 3. 2015.)

Open Geospatial Consortium. 2012. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard

<http://www.opengeospatial.org/standards/citygml> (Pridobljeno 14. 5. 2015.)

ReCap 360. 2015.

<http://www.autodesk.com/products/recap/features/photo-recap-360/> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)

PhotoModeler. 2014.

<http://www.photomodeler.com> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)

PhotoSculpt. 2010.

<http://photosculpt.net/>(Pridobljeno 14. 1. 2015.)

Pix4D. 2014.

<http://pix4d.com/products/> (Pridobljeno 14. 1. 2015.)

Šajn, L. 2007. Večresolucijska parametrizacija za klasifikacijo tekstur in uporaba za analizo scintigrafskih slik. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za računalništvo in informatiko (samozaložba L. Šajn): str. 38-40.

Škrlec, K. 2013. Fotogrametrični zajem stavb v različnih ravneh podrobnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Škrlec): 23.

Štuhec, S. 2012. Dvojnepoldimenzionalno in tridimenzionalno uporabljanje artefaktov. Arheološka obvestila. Glasilo Slovenskega arheološkega društva, 29: 87-98.

Vidmar, B. 2014. Analiza uporabnosti fotogrametrično določenega oblaka točk za izdelavo 3D modela objekta kulturne dediščine. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Vidmar): str. 3, 34.

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