

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Geodezija,
smer Geodezija

Kandidat:

Jože Hartman

Različni pristopi k izdelavi "poplnega" ortofota

Diplomska naloga št.: 743

Mentor:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Somentor:

asist. dr. Dejan Grigillo

Ljubljana, 6. 3. 2008

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **JOŽE HARTMAN** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

»RAZLIČNI PRISTOPI K IZDELAVI POPOLNEGA ORTOFOTA«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Škofja Loka, 15.02.2008

Jože Hartman

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 528.7(043.2)
- Avtor:** Jože Hartman
- Mentor:** doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
- Somentor:** mag. Dejan Grigillo
- Naslov:** Različni pristopi k izdelavi popolnega ortofota
- Obseg in oprema:** 61 str., 63 sl., 19 en., 5 pril.
- Ključne besede:** popolni ortofoto, digitalni model površine, zakrita območja, mozaičenje,

Izvleček

V prvem, teoretičnem delu moje diplomske naloge je glavna tema predstavitev različnih načinov izvedbe posameznih korakov v postopku izdelave popolnega ortofota. Na začetku sem predstavil (klasični) ortofoto in njegove slabosti, zaradi katerih se je potreba po popolnem ortofotu pravzaprav pojavila. Celoten postopek izdelave sem razdelil na sedem korakov: zajem podatkov za 3D model, 3D modeliranje, zajem posnetkov, orto rektifikacija, iskanje zakritih območij, barvno ujemanje ter mozaičenje in zabris stičnih linij. Pri zajemu podatkov za 3D model sem podrobneje predstavil zajem z laserskim skenerjem in s slikovnim ujemanjem. Obe metodi omogočata hiter zajem velike množice točk in sta tako zelo primerni za zajem podatkov za digitalni model površine (DMP). V poglavju 3D modeliranje je med drugim opisan tudi princip hibridnega modela, ki združuje nepravilno trikotniško mrežo - TIN (natančnost) in celično mrežo (enostavnost zapisa). Za fazo iskanja zakritih območij sem opisal pet metod: Z-bafer, poligonska metoda, trikotniška metoda, metodo kotov in metodo višin. V koraku mozaičenja so za izbiro med homolognimi piksli (prekrivajočih se ortoposnetkov) predstavljeni trije kriteriji: bližina nadira, bližina zakritega območja in vpadni kot pod katerim projekcijski žarek pade na DMP.

Glavni cilj praktičnega dela diplome je bil izdelava popolnega ortofota za enostaven objekt. Izbral sem si del fasade stanovanjskega bloka z dvema balkonoma. DMP sem opisal s petimi pravokotniki v prostoru. Za iskanje zakritih območij sem izbral metodo kotov, za mozaičenje pa kriterij bližine nadira. Barvno ujemanje in zabris stičnih linij nista bila uporabljena.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 528.7(043.2)
Author: Jože Hartman
Supervisor: Assist.Prof.Dr. Mojca Kosmatin Fras
Cosupervisor: M.Sc. Dejan Grigillo
Title: Different approaches to creating true orthophoto
Notes: 61 p., 63 fig., 19 eq., 5 ann.
Key words: true orthophoto, digital surface model, obscured (occluded) areas, mosaicking

Abstract

In the first, theoretical part of my diploma thesis main topic is presentation of different approaches to executing individual phases in procedure of creating true orthophotos. Firstly I explain main idea of (classical) orthophotos and its disadvantages, which caused the need of true orthophotos. I divide the whole procedure into seven steps: acquiring data for 3D model, 3D modelling, acquiring photographs, ortho rectification, locating obscured areas, colour matching and mosaicking with feathering. In step of acquiring data for 3D model I explain acquisition with laser scanner and with image matching in greater detail. Both methods allow quick acquisition of great amount of points and are therefore very convenient for creating digital surface model (DSM). 3D modelling chapter amongst others introduces hybrid model, which is combination of triangular irregular network - TIN (accuracy) and grid (simple data structure). Five methods for obscured areas detection are presented: Z-buffer method, polygon based method, triangle based method, angle based method and height based method. In mosaicking phase three criteria for choosing homologous pixels (from overlaying orthophotos) are presented: distance to nadir, distance to obscured areas and angle between projection ray and DSM.

The main aim of practical part of diploma thesis was to create a true orthophoto of a simple object. I chose a section of façade of residential block with two balconies. DSM is described with five rectangles in 3D space. I chose angle method for obscured area detection and distance to nadir criterion for mosaicking. Colour matching and feathering were not applied.

ZAHVALA

Najprej se iskreno zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras, ki me je pri pisanju diplomske naloge pozorno spremljala in z usmerjala z nasveti. Hvala tudi asistentoma mag. Dejanu Grigillu in Alešu Marjetiču za pomoč pri praktičnem delu diplome.

Najlepša hvala tudi staršema za vso finančno in moralno podporo skozi vsa leta študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	ORTOFOTO – PRINCIP IN SLABOSTI.....	3
2.1	Centralna projekcija	3
2.2	Princip izdelave ortofota	4
2.3	Kakovost ortofota	6
2.4	Pomanjkljivosti ortofota	9
2.5	Nadgradnja ortofota v popolni ortofoto	10
3	KORAKI IZDELAVE POPOLNEGA ORTOFOTA	13
3.1	Zajem podatkov za 3D model	13
3.1.1	Zajem z elektronskim tahimetrom.....	13
3.1.2	Vektorizacija na steroparih	15
3.1.3	Slikovno ujemanje	15
3.1.3.1	Ujemanje območij	16
3.1.3.2	Ujemanje pojavov	17
3.1.3.3	Strukturno ujemanje	19
3.1.3.4	Določitev začetnih vrednosti	19
3.1.3.5	Zajem DMP s slikovnim ujemanjem.....	21
3.1.4	Zajem z LIDAR-jem.....	22
3.1.5	Vektorizacija obstoječih virov	23
3.2	3D modeliranje.....	24
3.2.1	Projektivne ravnine	24
3.2.2	Celična mreža	24
3.2.3	Neppravilna trikotniška mreža.....	25
3.2.4	Hibridna mreža	26
3.3	Zajem posnetkov	27

3.4	Orto rektifikacija.....	28
3.4.1	Orientiranje posnetkov.....	28
3.4.2	Orto rektifikacija	29
3.4.2.1	Princip orto rektifikacije	29
3.4.2.2	Pospešitev postopka orto rektifikacije z uporabo binarnih dreves	31
3.5	Iskanje zakritih območij	33
3.5.1	Z-Bafer	33
3.5.2	Poligonska metoda	34
3.5.3	Trikotniška metoda.....	35
3.5.4	Metoda kotov	37
3.5.5	Metoda višin	37
3.6	Barvno ujemanje	38
3.7	Mozaičenje in zabris stičnih linij	41
3.7.1	Mozaičenje	41
3.7.2	Zabris stičnih linij	45
4	PRAKTIČNI PRIMER IZDELAVE POPOLNEGA ORTOFOTA	46
4.1	Izbira objekta obdelave.....	46
4.2	Terensko delo	46
4.2.1	Fotografiranje	47
4.2.2	Geodetske meritve.....	48
4.3	Pisarniško delo	49
4.3.1	Izračun koordinat točk iz geodetskih meritev.....	49
4.3.2	Kalibracija fotoaparata.....	49
4.3.3	Zunanja orientacija posnetkov	50
4.3.4	Pisanje algoritmov za izdelavo popolnega ortofota	52
4.3.4.1	Algoritem za orto rektifikacijo.....	52
4.3.4.2	Algoritem za iskanje zakritih območij	53

4.3.4.3	Algoritem mozaičenja.....	54
4.4	Uporabljena oprema.....	54
4.4.1	Seznam uporabljene opreme na terenu	54
4.4.1.1	Lastnosti fotoaparata Nikon D70	55
4.4.1.2	Lastnosti tahimetra TCRP1201 R300.....	55
4.4.2	Seznam uporabljene opreme v pisarni	55
4.5	Komentar rezultatov praktičnega dela.....	56
5	ZAKLJUČEK	58
VIRI.....		60
PRILOGE.....		62
	Priloga A: Fotografski zajem	
	Priloga A1: Pet posnetkov testnega polja	
	Priloga A2: Trije posnetki fasade (levi, srednji in desni)	
	Priloga B: Geodetski zajem	
	Priloga B1: Terenski zapisnik meritev	
	Priloga B2: Koordinate izmerjenih točk v obeh lokalnih koordinatnih sistemih	
	Priloga C: Orientacijski parametri	
	Priloga C1: Parametri notranje orientacije	
	Priloga C2: Parametri zunanje orientacije	
	Priloga D: Algoritmi iz Matlaba	
	Priloga D1: Algoritmi za orto rektifikacijo in določanje zakritih območij	
	Priloga D2: Algoritem mozaičenja	
	Priloga E: Vmesni in končni izdelki	
	Priloga E1: Ortoposnetki	
	Priloga E2: Ortoposnetki z lociranimi zakritimi (črnimi) območji	
	Priloga E3: Popolni ortofoto v merilu 1:600	

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Vzrok za premike reliefa v centralni projekciji.....	3
Slika 2.2: Princip izdelave ortofota (posredni postopek)	4
Slika 2.3: Grafični prikaz neposrednega in posrednega postopka.....	5
Slika 2.4: Primer mozaika iz šestih ortoposnetkov [Nielsen, 2004].....	5
Slika 2.5: Vpliv natančnosti DMR na natančnost ortofota.....	8
Slika 2.6: Spreminjanje velikosti premikov reliefa pri različnih snemalnih višinah [Nielsen, 2004]	9
Slika 2.7: Deformiran most na ortofotu [Nodic GmbH]	9
Slika 2.8: Nemodelirani objekti na ortofotu zakrivajo okolico [Schickler, Thorpe, 1998].....	9
Slika 2.9: Dvojno kartiranje [Kuzmin, Korytnik, Long, 2004]	10
Slika 3.1: Princip izračuna horizontalnih koordinat nove točke (levo) in višinske razlike (desno).....	15
Slika 3.2: Ciljna matrika in matrika iskanja [Wiedemann, Rodehorst, 1997].....	16
Slika 3.3: Ekstrakcija robov z gradientnim operatorjem [Alberts, Wiedemann]	18
Slika 3.4: Princip (levo) in primer (desno) slikovne piramide	20
Slika 3.5: Geometrija epipolarnih slik [Colorado school of mines]	20
Slika 3.6: Različni rezultati ob različno nastavljenih parametrih ujemanja [Pateraki, 2006] ..	21
Slika 3.7: Zračno lasersko skeniranje [USDA Forest Service]	22
Slika 3.8: Hibridni sistem Riegl LMS-Z420i [Riegl LMS GmbH].....	23
Slika 3.9: Nepravilna a) in pravilna b) izbira trikotnikov v Delaunay-evi triangulaciji [Nielsen, 2004]	25
Slika 3.10: Prečni prerez triangulacij preko enakih točk [Nielsen, 2004].....	25
Slika 3.11: Princip hibridne mreže [Kraus, Otepka, 2005]	26
Slika 3.12: Primer hibridne mreže [Kraus, Otepka, 2005]	26
Slika 3.13: Premiki reliefa za 70m visok objekt: levo (c=304mm, h=1500m), desno (c=152mm, h=750m) [Nielsen, 2004]	27
Slika 3.14: Karta vidnosti: črni predeli predstavljajo zakrita območja [Nielsen, 2004]	28
Slika 3.15: Razmerja med terenskimi in slikovnimi koordinatami orientirane podobe [Gorjup, 2001]	29

Slika 3.16: Shema binarnega drevesa zgrajenega iz enega korena, dveh vozlišč in štirih listov [Nielsen, 2004]	31
Slika 3.17: 2D primer izgradnje binarnega drevesa (omejena območja predstavljajo pravokotniki) [Nielsen, 2004]	32
Slika 3.18: Metoda pasov na 2D primeru [Nielsen, 2004].....	32
Slika 3.19: Desni žarek ne pride do fotoaparata [Nielsen, 2004]	33
Slika 3.20: Določitev zakritih območij z Z-baferjem [Bang et al., 2007].....	33
Slika 3.21: Model tristranih prizem [Oda et al., 2004]	35
Slika 3.22: Vidnost med prizmami in trikotniki [Oda et al., 2004]	35
Slika 3.23: Primer razvrščanja trikotnikov [Oda et al., 2004]	35
Slika 3.24: Princip trikotniške metode na konkretnem primeru [Oda et al., 2004]	36
Slika 3.25: Princip metode kotov [Kim, Ghanma, Habib, 2006].....	37
Slika 3.26: Princip metode višin [Bang et al, 2007]	38
Slika 3.27: Položaj Sonca ob snemanju vpliva na svetlost znotraj posnetka [Nielsen, 2004] .	38
Slika 3.28: Princip ujemanja kumulativnih histogramov [Nielsen, 2004]	39
Slika 3.29: Vhodne in njim pripadajoče izhodne barvne vrednosti [Nielsen, 2004]	40
Slika 3.30: Posnetek 1 (vhodni) [Nielsen, 2004]	40
Slika 3.31: Posnetek 2 (referenčni) [Nielsen, 2004]	40
Slika 3.32: Ujemanje kumulativnih histogramov modre komponente posnetka 1 in 2 [Nielsen, 2004]	40
Slika 3.33: Posnetek 1 po ujemanju histogramov [Nielsen, 2004]	40
Slika 3.34: Mozaik iz posnetkov 1 in 2 pred ujemanjem histogramov [Nielsen, 2004].....	41
Slika 3.35: Mozaik iz posnetkov 1 in 2 po ujemanju histogramov [Nielsen, 2004].....	41
Slika 3.36: Princip kombinirane utežne funkcije [Nielsen, 2004]	43
Slika 3.37: Uporaba kombinirane utežne funkcije na vhodnem posnetku [Nielsen, 2004].....	43
Slika 3.38: Sestava mozaika iz štirih posnetkov (kombinirana utežna funkcija) [Nielsen, 2004]	43
Slika 3.39: Obravnavano območje [Schickler, Thorpe, 1998].....	44
Slika 3.40: Optimalna stična linija na karti podobnosti za območje iz slike 3.39 [Schickler, Thorpe, 1998]	44
Slika 3.41: 3x3 filter povprečenja [Nielsen, 2004]	45
Slika 3.42: Učinek filtra povprečenja [Nielsen, 2004].....	45

Slika 4.1: Objekt obravnave	46
Slika 4.2: Plan fotografiranja.....	47
Slika 4.3: Testno polje	47
Slika 4.4: Vzpostavitev lokalnega koordinatnega sistema (tloris)	48
Slika 4.5: Oslonilne (zelene) in detajlne (rdeče) točke.....	49
Slika 4.6: Razmerje med novim in starim koordinatnim sistemom (tloris)	50
Slika 4.7: Razporeditev točk (po posnetkih), uporabljenih za izračun elementov zunanje orientacije.....	51
Slika 4.8: Predstavitev DMP s petimi pravokotniki v prostoru	52
Slika 4.9: Fotoaparat Nikon D70	55
Slika 4.10: Tahimeter Leica TCRP1201 R300.....	55
Slika 4.11: Končni izdelek in njegove pomanjkljivosti.....	56
Slika 4.12: Sestava mozaika	57

OKRAJŠAVE

DKN	digitalni katastrski načrt
DMP	digitalni model površine
DMR	digitalni model reliefa
DMV	digitalni model višin
DOF5	digitalni ortofoto v merilu 1:5000
GPS	Global Positioning System (slov.: sistem globalnega določanja položaja)
IME	inercialna merska enota
LIDAR	Light Detection and Ranging (slov.: lasersko skeniranje)
PC	projekcijski center
RGB	red, green, blue (slov. rdeča, zelena, modra)
TIN	triangular irregular network (slov.: mreža nepravilnih trikotnikov)
TPM	triangular prism model (slov.: model tristranih prizem)

1 UVOD

Popolni ortofoto (angl. true orthophoto) je nadgradnja klasičnega ortofota, v takšnem smislu, da so tudi objekti nad terenom prikazani planimetrično pravilno in v pravi velikosti. Za njegovo izdelavo rabimo orientirane prekrivajoče se fotografske posnetke in digitalni model površine (DMP, angl. digital surface model - DSM). Orientacija posnetkov omogoča rekonstrukcijo slikovnih žarkov za trenutek snemanja ter izračun presekov teh žarkov z DMP. Ti preseki določajo nove - pravilne položaje pikslov, perspektivni posnetek pa se na ta način pretvori v ortogonalnega. Vertikalni objekt je tako predstavljen le s svojo vrhno ploskvijo. Ker je v perspektivni projekciji tak objekt nagnjen v smeri stran od glavne točke posnetka, zakriva del svoje okolice. To pomeni, da za to zakrito območje na posnetku ni podatkov o radiometričnih vrednostih pikslov, ki so predstavljene s sivimi odtenki ali z barvo. Glavna naloga postopka za izdelavo popolnega ortofota je ravno zaznava zakritih območij in poskus zapolnitve le-teh s homolognimi piksli iz drugih posnetkov, na katerih so zakrita območja posneta iz drugih položajev. Pomen besede »popolni« v terminu popolni ortofoto pa ne gre razumeti absolutno, saj smo omejeni z možnostjo upoštevanja vseh podrobnosti, ki so zajete v DMP. Na ortofotu so pozicijsko pravilno predstavljeni le tisti objekti, ki so vključeni v DMP. Nivo podrobnosti DMP je odvisen predvsem od namena in finančnih omejitev. Z razvojem laserskega skeniranja so se v smislu podrobnosti zajema v vseh treh razsežnostih osnove odprle popolnoma nove možnosti. Zaradi le delne popolnosti, ki jo je v praksi iz navedenih razlogov možno doseči, izraz popolni ortofoto ni povsem pravilen in je za končnega uporabnika lahko zavajajoč, vendar se mi zdi, da je povsem primeren prevod angleškega izraza »true orthophoto«.

Enotne (uradne) opredelitve za popolni ortofoto (še) ni. V literaturi različni avtorji tako navajajo opredelitve, ki se precej razlikujejo. V članku (Amhar, Jansa, Ries, 1998) je popolni ortofoto predstavljen kot ortofoto, na katerem so tudi objekti, ki jih DMR (digitalni model reliefa) ne vsebuje, prikazani v ortogonalni projekciji. Ti objekti so največkrat stavbe in mostovi. Na drugi strani pa je v članku (Kuzmin, Korytnik, Long, 2004) popolni ortofoto opredeljen kot postopek, ki na zakritih območjih preprečuje dvojno kartiranje in omogoča

njihovo zapolnitev z radiometričnimi vrednostmi iz prekrivajočih se posnetkov ali pa zakrita območja le označi z izbrano barvo.

Popolni ortofoto ima kar nekaj prednosti pred navadnim (klasičnim), saj lahko na njem izvajamo planimetrične meritve, nanj se lahko položijo razni vektorski sloji (npr. komunalni vodi), uporabi pa se lahko tudi za prekritje 3D modela. Popolni ortofoto se zato s pridom uporablja tako na področju aerofotogrametrije (urbana središča), kot na področju terestrične fotogrametrije (v arhitekturi in arheologiji).

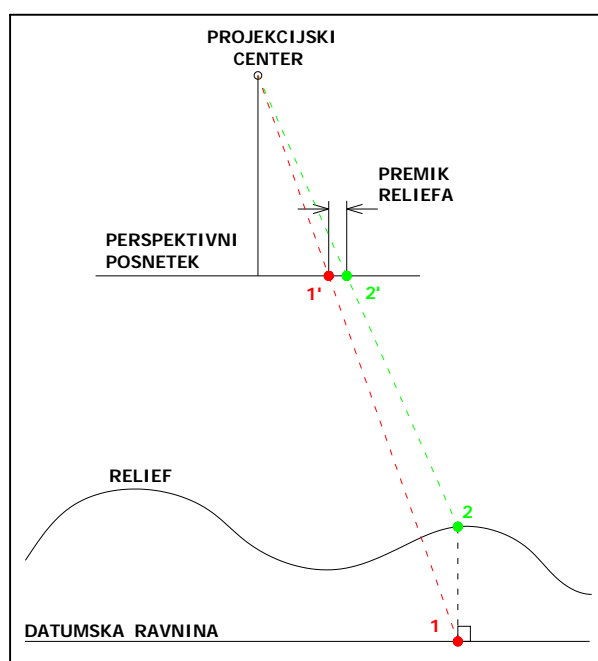
Ker je o popolnem ortofotu v slovenščini malo literature, sem se odločil, da to področje opišem v svoji diplomski nalogi. Naloga je razdeljena na dva dela: teoretičnega in praktičnega. V teoretičnem delu sta predstavljena klasični in popolni ortofoto. Za slednjega so opisane vse faze v postopku izdelave. Za vsako fazo so opisani tudi različni načini izvedbe, ki so bili razviti z namenom optimizacije postopka, ali pa z namenom uporabe v specifičnih primerih. Tukaj sem se osredotočil predvsem na izdelavo DMP, iskanje zakritih območij in njihovo zapolnitev s piksli iz drugih posnetkov. Pri izdelavi DMP je zelo obetavna možnost pridobivanja podatkov z laserskim skeniranjem. Algoritmi iskanja zakritih območij se razvijajo predvsem v smeri čim hitrejših izvedb. Za sestavo končnega izdelka, na katerem ne bo zakritih območij, se pikslom na vseh vhodnih orto posnetkih določijo uteži. Izračun uteži lahko temelji na upoštevanju različnih meril. Med piksli, ki kandidirajo za zapolnitev istega piksla na končnem orto posnetku je izbran tisti, ki ima največjo utež. V praktičnem delu diplome je opisan konkreten postopek izdelave popolnega ortofota. Za objekt obdelave sem si izbral del fasade bloka na Kotnikovi ulici, ki je prostorsko dovolj razgibana, da nazorno prikazuje bistvene probleme izdelave popolnega ortofota. Predstavljeni so tudi rezultati in njihova ocena.

2 ORTOFOTO – PRINCIP IN SLABOSTI

Popolni ortofoto je nadgradnja (klasičnega) ortofota. Zato je prav, da se najprej predstavi princip izdelave ortofota, njegove pomanjkljivosti in razlike s popolnim ortofotom.

2.1 Centralna projekcija

Običajna fotografija je posneta po načelih centralne projekcije. To pomeni, da fotografija predstavlja sliko sveta kot bi ga opazovali iz ene same točke – projekcijskega centra. V tej točki se stikajo vsi svetlobni žarki, ki padejo na fotografijo (film ali digitalno tipalo). Posledice tega je najlažje prikazati na aeroposnetku, ki je posnet vertikalno. V centralni projekciji so objekti, ki so horizontalno na isti, višinsko pa na različnih pozicijah, na posnetku prikazani na različnih položajih. To se na posnetku pokaže kot premik reliefa

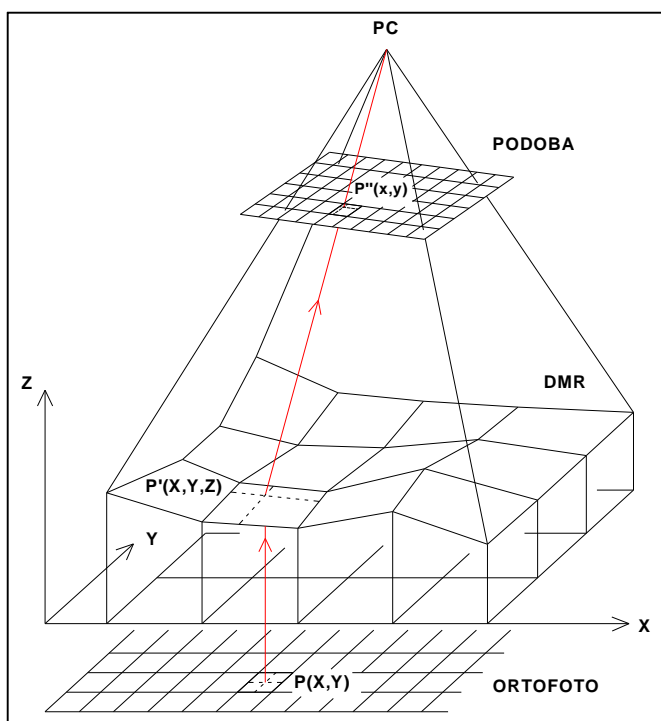


Slika 2.1: Vzrok za premike reliefa v centralni projekciji

(Slika 2.1). Na Sliki 2.1 se položaj točk 1 in 2 razlikuje le v višini, na perspektivni posnetek pa se projicirata tako, kot bi imeli različen tudi horizontalni položaj. Poleg premika reliefa ima centralna projekcija tudi to slabost, da so objekti, ki so bližje projekcijskemu centru, prikazani v večjem merilu kot tisti, ki so od projekcijskega centra bolj oddaljeni. Torej na perspektivnem posnetku tudi ni enotnega merila. Zaradi naštetih lastnosti se na perspektivnih posnetkih planimetričnih meritev ne more izvajati, problematično pa je tudi kombiniranje z vektorskimi sloji ali pa 3D modeli, ki so pozicijsko pravilni.

2.2 Princip izdelave ortofota

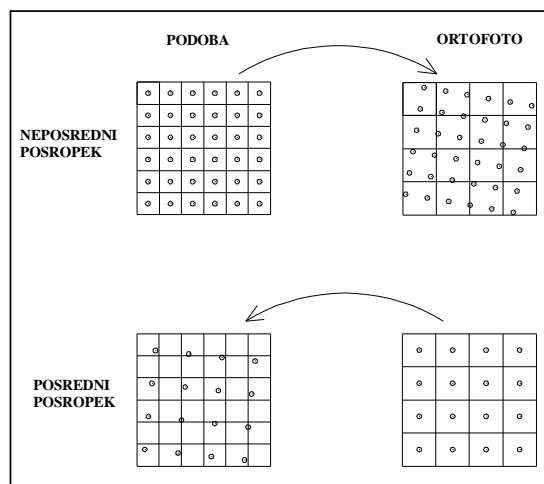
S postopkom izdelave ortofota fotografijo v pretvorimo iz centralne v ortogonalno projekcijo in v večji meri odstranimo zgoraj navedene slabosti centralne projekcije. Za njegovo izdelavo potrebujemo digitalni model reliefa (DMR) ter elemente notranje in zunanje orientacije vseh posnetkov. Če DMR-ja nimamo, nam lahko 3D osnovo predstavljajo stereopari – DMR je tako lahko vmesni izdelek pri izdelavi ortofota. Elemente notranje orientacije merskih fotoaparatorov poda proizvajalec v kalibracijskem poročilu, za nemetrične fotoaprato pa jo mora narediti uporabnik sam. Elemente zunanje orientacije se lahko izračuna na več načinov: za posamezen posnetek, za stereopar ali pa za blok posnetkov s projektom aerotriangulacije. Z orientacijo posnetke umestimo v prostor točno tako, kakor so bili v času ekspozicije. Sedaj lahko z enačbami centralne projekcije rekonstruiramo navidezno slikovno žarkovje (slikovni žarek je premica, ki poteka skozi slikovno točko in projekcijski center) in za vsak center piksla posnetka izračunamo presek slikovnega žarka z DMR. S presekom dobimo 3D koordinate (X, Y, Z) v objektovem koordinatnem sistemu. Vrednost koordinate Z se izračuna z interpolacijo vrednosti vogalnih višin celice DMR, znotraj katerega se nahaja presek slikovnega žarka. Centru piksla, iz katerega izhaja žarek, se tako pripišejo nove (ortofoto) koordinate (slika 2.2) in s tem je piksel orto rektificiran. Preseke lahko iščemo na dva načina: z neposrednim in posrednim postopkom. V neposrednem postopku žarek projiciramo v smeri od projekcijskega centra, preko slikovne ravnine (center piksla) do preseka z DMR. Presek se nato ortogonalno prenese na ravnino ortofota. Projiciran žarek praviloma ne pade točno v center piksla ortofota (Slika 2.3), zato moramo tudi



Slika 2.2: Princip izdelave ortofota (posredni postopek)

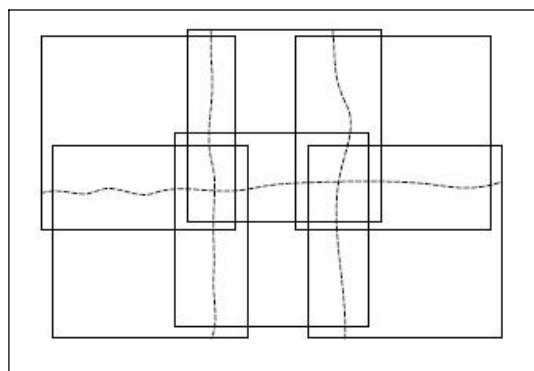
radiometrično vrednost piksla ortofota izračunati z interpolacijo. Pri posrednem postopku projekcija poteka v obratni smeri – iz centra piksla ortofota na slikovno ravnino. Dobljene

slikovne koordinate s translacijo pretvorimo v koordinatni sistem vhodne podobe. Ker žarki tudi v tem primeru posnetka ne prebodejo točno v centrih pikslov (Slika 2.3), se radiometrična vrednost na mestu vpada žarka določi z metodo najbližjega sosedstva ali pa z interpolacijo sosednjih vrednosti. Največ se uporabljata bilinearna in polinomska interpolacija. Ker je projiciranje za vse pikse časovno zamudno, se lahko poslužimo poenostavitve, pri kateri ne projiciramo vseh točk, ampak le t.i. sidrne točke, ki so običajno vogalne točke celic mreže DMR. Na osnovi teh točk se določijo parametri bilinearne transformacije med točkami ortofota in posnetka. Bilinearna transformacija se nato namesto enačb centralne projekcije uporabi za izračun slikovnih koordinat znotraj celice DMR.



Slika 2.3: Grafični prikaz neposrednega in posrednega postopka

Tako izdelamo posamezne ortoposnetke, ki jih nato združimo v ortofoto karto večjega formata. Ta postopek imenujemo mozaičenje. Stične linije v mozaiku se postavljajo vzdolž področij, ki so si na sosednjih ortoposnetkih zelo podobna, vsekakor pa ne čez zgradbe, ki niso vključene v DMR, saj so premiki reliefa za isti objekt na različnih posnetkih različnih smeri in velikosti. V primeru ročnega določanja se jih navadno postavi vzdolž naravnih mej (gozdna meja, sredina cest). V primeru avtomatskega določanja pa se z odštevanjem vrednosti homolognih pikslov na sosednjih ortoposnetkih določi področja največje podobnosti. Kljub skrbni izbiri poteka stičnih linij so le-te zaradi različne svetlosti ortoposnetkov še vedno vidne. Tega problema se najprej lotimo s postopkom ujemanja barv, ki se izvaja na območjih, kjer se ortoposnetki prekrivajo. Preostale razlike na spojih se nato zabriše še s filtrom povprečenja.



Slika 2.4: Primer mozaika iz šestih ortoposnetkov [Nielsen, 2004]

2.3 Kakovost ortofota

Na kakovost ortofota vpliva več dejavnikov:

- kakovost fotografije,
- natančnost parametrov orientacije,
- kakovost DMR,
- uporabljene metode za geometrično in semantično transformacijo,
- časovna ažurnost vhodne slike.

Na kakovost fotografije lahko gledamo z geometričnega ali semantičnega stališča. Pravilno geometrijo v prvi vrsti zagotavlja kakovostni objektiv fotoaparata. Drug pomemben vidik geometrije je ločljivost fotografije, ki je za digitalne fotografije določena s svetlobnim tipalom fotoaparata, v primeru skeniranja analognih fotografij pa z ločljivostjo skenerja. Merski fotoaparati in fotogrametrični skeneri sta danes že tako izpopolnjena, da nam ob kalibraciji in pravilnih postopkih uporabe zagotavljata kvalitetne digitalne fotografije. V procesu pridobivanja digitalne fotografije se pojavljajo še drugi pogreški, ki jih s skrbno načrtovanimi postopki lahko zmanjšamo na najmanjšo možno mero. Ostanjejo preostanki pogreškov optične distorzije, deformacije filma in geometrične natančnosti skenerja (Kosmatin Fras, 2004). Semantično kakovost (vidnost detajlov, svetlost, ostrina, ...) zagotavljamo s pravilno ekspozicijo, z izbiro časa snemanja izven vegetacijske dobe, v primeru analognega fotoaparata pa tudi z izbiro kakovostnega fotografskega filma.

Elemente notranje orientacije za merske fotoaparate poda proizvajalec v kalibracijskem poročilu. Ker se elementi notranje orientacije s časom spreminjajo, je kalibracijo treba ponavljati v predpisanih intervalih, pa tudi v primerih, ko je bil fotoaparati izpostavljen večjim mehanskim vplivom ali pa, ko se pojavijo večja sistematična odstopanja pri transformaciji slikovnih koordinat na robne marke.

Elemente zunanje orientacije lahko izračunamo z različnimi metodami: za posamezen posnetek, za stereopar ali v projektu aerotriangulacije. V splošnem je za oceno natančnosti potreben izračun z izravnavo, za katero je pogoj nadštevilno število oslonilnih točk. Na oceno natančnosti elementov vpliva tako njihovo število, kot njihova razporeditev po posnetku in

nenazadnje tudi kakovost njihovega signaliziranja. Natančnost elementov zunanje orientacije, določenih v projektu aerotriangulacije, se določi na osnovi ocene á-priori natančnosti oslonilnih točk in neodvisne primerjave med izračunanimi koordinatami in terensko izmerjenimi koordinatami na kontrolnih točkah (Kosmatin Fras, 2004).

DMR za gladek ravninski teren lahko sestavlja le mreža celic DMV (digitalnega modela višin). V primeru razgibanega terena, še posebej pri hitrih skokih v višini, pa tudi z manjšimi celicami ne moremo dovolj dobro prikazati poteka terena. Zato je mreži celic nujno treba dodati podatke o strukturnih linijah, robnih linijah, značilnih točkah itd. . Za poljubno točko (piksel ortofota) na DMR se višina določi z interpolacijo (npr. bilinearna, bikubična) med sosednjimi točkami. Torej natančnosti poljubne višine v DMR ne smemo enačiti z natančnostjo višin v vogalih celic, saj lahko ob interpolaciji pride do večjih odstopanj z resničnim terenom. Da bi imeli natančnost interpoliranih višin delno »pod nadzorom«, je ekipa priznanih evropskih strokovnjakov (Koelbl, 2001) določila velikosti celic DMR, potrebnih za doseganje določenih natančnosti interpoliranih točk. To je pomembno tudi za izdelavo ortofota, saj natančnost DMR neposredno vpliva na pozicijsko natančnost ortofota (Slika 2.5). Pogreške DMR lahko obravnavamo kot neupoštevane premike reliefa. Iz podobnih trikotnikov na Sliki 2.5 lahko izpeljemo naslednjo enačbo [Kraus, 1993]:

$$\Delta\rho = \Delta R \cdot \frac{c}{Z} = \Delta Z \cdot \frac{\rho}{Z} = \Delta Z \cdot \frac{\rho}{m \cdot c} \quad (2-1)$$

Pri čemer je:

$\Delta\rho$...radialni pogrešek na slikovni ravnini, zaradi višinskega pogreška dol. točke

ρ ...slikovna radialna razdalja med poljubno in glavno točko posnetka

ΔR ...radialni pogrešek planimetričnih koordinat točke na terenu

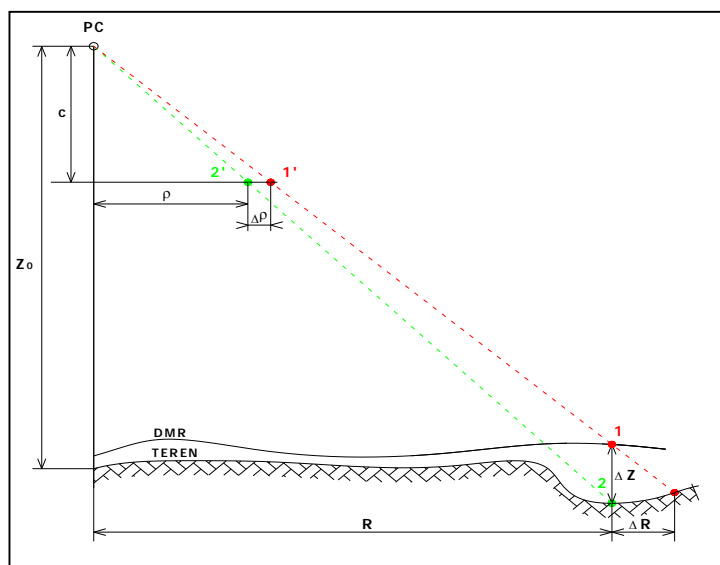
ΔZ ...vertikalni pogrešek točke

c ...goriščna razdalja (konstanta) fotoaparata

Z ...snemalna višina

m ...modul merila posnetka

Enačba velja za posnetek, ki je vzporeden terenu. Iz nje pa je razvidno, da se horizontalni pogreški ortofota zaradi pogreškov DMR večajo linearno z oddaljevanjem od središčne točke posnetka, z manjšanjem konstante fotoaparata in z manjšanjem snemalne višine.



Slika 2.5: Vpliv natančnosti DMR na natančnost ortofota

Kot je že bilo omenjeno (poglavje 2.2), se pri geometrični transformaciji lahko poslužimo poenostavitve z uporabo sidrnih točk. Za izračun slikovnih koordinat znotraj celic DMR se namesto enačbe centralne projekcije uporabi bilinearna transformacija. S tem v slikovnih koordinatah naredimo napako δ , ki jo izračunamo po empirično določeni enačbi [Kraus, 2003 cit. po Kosmatin Fras, 2004]:

$$\delta = \frac{s^2}{4 \cdot c} \cdot \tan \alpha \quad (2-2)$$

Pri čemer je:

- α ...naklonski kot terena,
- c ...konstanta fotoaparata,
- s ...velikost celice DMR v merilu fotografije.

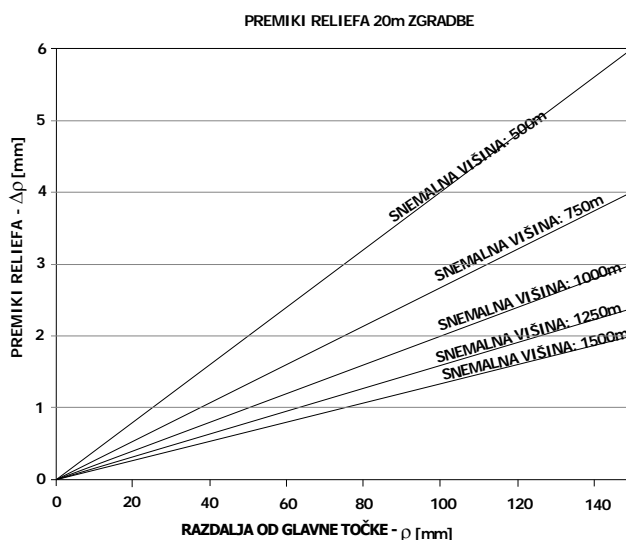
Tudi pri ekstremnih vrednostih vhodnih podatkov (za primer: $c = 150\text{mm}$, višina leta = 3km , stranica celice DMR = 50m , $\alpha = 50\%$) je napaka δ zanemarljive velikosti $5\mu\text{m}$.

Kot je vidno na sliki 2.3, projekcija žarkov ne določa eksaktne določitve radiometričnih vrednosti pikselov ortofota. Za določitev radiometričnih vrednosti pikselov obstaja več metod, vendar z vsako naredimo določeno interpretacijsko napako (v pikslu ni zapisana prava radiometrična vrednost), ki hkrati povzroči tudi geometrijsko napako. Najenostavnejša metoda je metoda najbližjega sosredstva, s katero se izbere tista radiometrična vrednost piksla,

katerega center je najbližji projicirani točki. Glavni minus te metode je precej velika interpretacijska napaka, ki je lahko za cel posnetek velika tudi do 30% vsebine posnetka [Kosmatin Fras, 2004]. Veliko bolj primerna je bilinearna interpolacija med štirimi sosednjimi piksli, saj z njo storimo interpretacijsko napako le nekaj odstotkov za cel posnetek. Transformacije višjih redov (bikubična, polinomska, ...) niso smiselne, saj se ob precej večji računski zahtevnosti interpretacijska napaka ne zmanjša bistveno.

2.4 Pomanjkljivosti ortofota

Ortofoto je narejen na osnovi DMR, v katerega niso vključeni grajeni objekti. Ti objekti zato niso pravilno orto rektificirani, npr. mostovi se »upognejo« navzdol, da bi sledili terenu pod njimi (Slika 2.7), visoki objekti pa s svojo nagnjenostjo zakrivajo okolico (Slika 2.8). Z enačbo (2-1) lahko izračunamo kako veliko območje zakriva določena zgradba. ΔZ v tem primeru predstavlja višino zgradbe. Slika 2.6 prikazuje odvisnost velikosti premikov reliefa od oddaljenosti središčne točke posnetka na primeru 20 m visoke zgradbe.



Slika 2.6: Spreminjanje velikosti premikov reliefa pri različnih snemalnih višinah [Nielsen, 2004]



Slika 2.7: Deformiran most na ortofotu [Nodic GmbH]



Slika 2.8: Nemodelirani objekti na ortofotu zakrivajo okolico [Schickler, Thorpe, 1998]

Slabost ortofota je tudi, da algoritem izdelave ne zazna zakritih območij. Kot je omenjeno že zgoraj, objekt, ki se hitro (pravokotno) dviga nad terenom zakriva okolico. Po njegovi orto rektifikaciji bi moralo območje, ki ga je prej zakrival, ostati brez radiometričnih vrednosti. Algoritem tega pojava ne zazna in posledica je dvojno kartiranje (Slika 2.9).



Slika 2.9: Dvojno kartiranje [Kuzmin, Korytnik, Long, 2004]

Kljub zgoraj naštetim pomanjkljivostim je ortofoto zadovoljiv izdelek v številnih primerih. Konec leta 2005

je bila na osnovi ankete 84 pogostejših kupcev ortofota v Sloveniji izvedena analiza o njegovi uporabi (Kosmatin Fras, Drobne, Gregorič, Oven, 2006). Pokazala je, da se uporaba ortofota v digitalni obliki (DOF5) povečuje. Poleg geodetov (26%) ga uporabljajo predvsem strokovnjaki iz drugih področij, kot so gradbeniki, arhitekti, gozdarji, urbanisti, agronomi, arheologi itd.. Največ se uporablja kot kartografska podlaga (42%), za zajem podatkov (31%) in kot kartografska osnova (22%). Večina uporabnikov (96%) je zadovoljna z njegovo generalno kakovostjo, vendar so kljub temu želje po večji ločljivosti, barvni tehniki in večji položajni natančnosti. Glede slednje je bilo izraženo predvsem nezadovoljstvo zaradi neuskkljenosti z različnimi podatkovnimi sloji (npr. DKN) in zaradi »zvrnjenosti« visokih objektov.

V splošnem pa se vedno bolj pojavljajo tudi potrebe po uporabi ortofota pri izdelkih velikih meril: v aero primerih pod 1:2000, v terestričnih pa pod 1:100. To je predvsem posledica vse večje uporabe ortofota kot rastrskega sloja v GIS, kot podlage pri posegih v prostor, pa tudi za lepljenje na 3D modele. V naštetih primerih se ortofoto kombinira z geometrično pravilnimi vektorskimi sloji, rezultat pa je zaradi slabega medsebojnega ujemanja manj uporaben.

2.5 Nadgradnja ortofota v popolni ortofoto

S popolnim ortofotom želimo odpraviti slabosti ortofota, omenjene v poglavju 2.4. Prvi pogoj za izdelavo je natančen, podroben in čim bolj popoln 3D model obravnavanega območja, ki ga imenujemo DMP (digitalni model površine, angl. DSM). V aerofotogrametriji je dovolj, če

DMP poleg terena vključuje še grajene objekte (zgradbe in mostove). V bližnjelikovni fotogrametriji, ki se ukvarja predvsem z dokumentiranjem arheoloških najdišč in kulturne dediščine, pa je potrebno zajeti vse detajle, ki bi lahko privedli do večjih premikov reliefa oz. površine objekta (npr. delov fasade). V splošnem se smatra, da so premiki reliefa velikosti 2-3 piksele za popolni ortofoto še sprejemljivi (Nielsen, 2004). Velik napredek pri zajemu vhodnih podatkov za DMP predstavlja lasersko skeniranje, ki področje obravnave predstavi z oblakom točk, določenim v 3D koordinatnem sistemu. Prednost je v hitrem in preprostem zajemu tudi v primeru zelo razgibanega terena. Pomanjkljivost v primeru zajema DMP je nekoliko slabša natančnost višinske koordinate (od položajne natančnosti boljša le v primeru zelo razgibanega terena) ter zapletena ekstrakcija posameznih tematik (stavb, krošenj dreves) in robnih linij, ki še vedno ostaja predmet znanstvenega raziskovanja. Nujno je tudi, da način predstavitve DMP (običajno TIN) omogoča shranjevanje več višin za »položajno« enake točke. Tako preidemo iz 2,5D¹ v 3D TIN. Šele 3D TIN daje možnost predstavitve objektov, ki se dvigajo pravokotno na svojo okolico.

Drugi pogoj je nadgrajen algoritem orto rektifikacije. Ta mora ugotoviti, kje se nahajajo zakrita območja in preprečiti dvojno kartiranje. Večina metod iskanja zakritih območij se opira na dejstvo, da je piksel ortofota zakrit, če pri posrednem postopku projiciranja žarek po prvem preseku z DMP, slednjega prebode še enkrat (večkrat). Vidnost se mora preveriti za vse piksele ortofota, zato so tovrstni algoritmi za računalnik precej obremenjujoči in s tem časovno potratni. Zaradi tega so bili v zadnjem času razviti algoritmi, ki namesto rastrskega pristopa (piksel za pikslom) pri iskanju zakritih območij uporabljajo le vektorski DMP. Zakriti pikseli dobijo posebno oznako, ki preprečuje zapis radiometrične vrednosti in s tem dvojno kartiranje.

Za zapolnitev zakritih območij potrebujemo dodatne fotografije, ki ista področja slikajo iz različnih zornih kotov. Tako je območje, ki je na eni fotografiji zakrito, lahko na drugih vidno. Za dobro fotografsko pokritje se priporoča 60% preklap na vseh štirih straneh

¹ V 2,5D modelu vsak par 2D koordinat lahko hrani le eno višino

fotografije. Popolni ortofoto je sestavljen kot mozaik »zaplata« pikslov vhodnih posnetkov. Za zapis v piksel popolnega ortofota kandidirajo homologni piksli iz več sosednjih fotografij. Izmed teh pikslov se v popolni ortofoto zapiše tisti, ki ima največjo utež. Uteži se računajo na osnovi določenih kriterijev (bližina nadira, bližina zakritega območja, ...).

Mozaik, ki pri tem nastaja, je zelo razdrobljen, saj poleg stičnih linij med fotografijami vsebuje tudi stične linije okrog zakritih območij in tudi znotraj le-teh zaradi izbire pikslov iz različnih fotografij. To nas sili k učinkoviti uskladitvi barv med fotografijami, ki jo dosežemo s pomočjo uskladitve kumulativnih histogramov barvnih vrednosti fotografij. Izbere se referenčna fotografija (histogram), s katero se nato uskladijo vse ostale. Po mozaičenju preostale razlike zabrišemo z uporabo filtra povprečenja vzdolž stičnih linij. Tako dobimo mehke barvne prehode med sestavnimi deli mozaika.

3 KORAKI IZDELAVE POPOLNEGA ORTOFOTA

Koraki izdelave popolnega ortofota si sledijo v naslednjem vrstnem redu:

- zajem podatkov za 3D model,
- 3D modeliranje,
- zajem posnetkov,
- orto rektifikacija,
- iskanje zakritih pikslov,
- barvno ujemanje posnetkov,
- mozaičenje in zabris stičnih linij.

S pomočjo novih algoritmov in strojne opreme je posamezne korake možno izvesti na različne načine.

3.1 Zajem podatkov za 3D model

Metode zajema se v splošnem delijo na:

- metode neposrednega zajema,
- metode posrednega zajema,
- kombinacije neposrednega in posrednega zajema.

Za neposredni zajem se smatrajo vsa terenska merjenja (tahimetrija, nivelman, ...), LIDAR (lasersko skeniranje) ter zajem iz letalskih in satelitskih posnetkov. Posredni zajem se izvaja na že obstoječih analognih ali digitalnih virih, kot so npr. topografske karte. Posredni način je glede na neposrednega hitrejši, vendar je manj natančen in zanesljiv. V nadaljevanju so opisani štiri primeri neposrednega in en primer posrednega zajema.

3.1.1 Zajem z elektronskim tahimetrom

Gre za klasično geodetsko izmero, s katero na osnovi kotnih in dolžinskih meritev računamo prostorske koordinate detajlnih točk v izbranem koordinatnem sistemu. Metoda je primerna v terestričnih primerih, ko objekti niso pretirano prostorsko razgibani in gostota detajla ni prevelika (npr. preproste fasade). V zadnjem času so na voljo tahimetri, ki omogočajo

merjenje razdalj brez reflektorja, kar močno pospeši samo izmero. Izračun horizontalnih koordinat točke T3(y_3, x_3) (glej Sliko 3.1):

$$y_3 = y_1 + \Delta y = y_1 + d_{13} \cdot \cos(90^\circ - (v_{12} + \alpha)) \quad (3-1)$$

$$x_3 = x_1 + \Delta x = x_1 + d_{13} \cdot \sin(90^\circ - (v_{12} + \alpha)) \quad (3-2)$$

Pri čemer so:

y_1, x_1 ...koordinati dane točke T1 (stojišče),

y_2, x_2 ...koordinati dane točke T2 (orientacijska točka),

d_{13} ...izmerjena horizontalna dolžina med točkama ,

v_{12} ...smerni kot iz točke T1 na točko T2 izračunan z enačbo:

$$v_{12} = a \tan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) + n \cdot 180^\circ \quad (3-3)$$

kjer je:

$n = 0$, če sta v oklepaju števec in imenovalec pozitivna,

$n = 1$, če je v oklepaju števec pozitiven in imenovalec negativen ali

ko sta števec in imenovalec negativna

$n = 2$, če je v oklepaju števec negativen, imenovalec pa pozitiven.

Višinska razlika se izračuna z enačbo trigonometričnega višinomerstva (3-4) (glej sliko 3.1):

$$\Delta h_{12} = d_{12} \cdot \text{ctg}Z_{12} + i - l \quad (3-4)$$

pri čemer je:

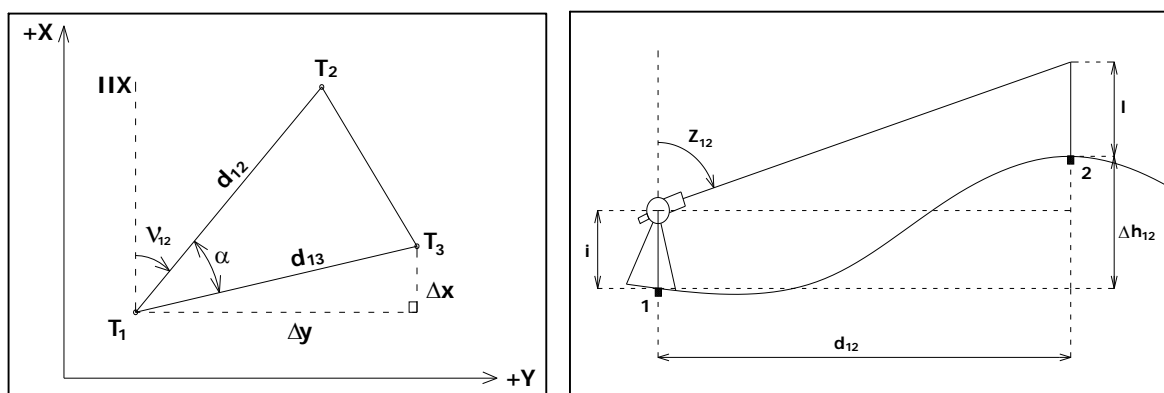
Δh_{12} ...višinska razlika med točkama T1 in T2,

d_{12} ...izmerjena horizontalna dolžina med točkama T1 in T2,

Z_{12} ...izmerjena zenitna distanca med točkama T1 in T2,

i ...višina inštrumenta,

l ...višina prizme.



Slika 3.1: Princip izračuna horizontalnih koordinat nove točke (levo) in višinske razlike (desno)

Če obravnavanega objekta ni potrebno predstaviti v globalnem koordinatnem sistemu, določimo lokalni koordinatni sistem. V primeru zajema fasade je običajno ena horizontalna os vzporedna fasadi, druga pa pravokotna nanjo; višinsko os določa smer vertikale.

3.1.2 Vektorizacija na stereoparih

Vektorizacija pomeni zajem vektorskih podatkov (točka, linija, areal) na analognih ali digitalnih georeferenciranih rastrskih virih. V primeru zadostnega prekrivanja sosednjih posnetkov (60%) jo lahko izvajamo na stereoparih. Z zunanjo orientacijo posnetke georeferenciramo, z notranjo pa rekonstruiramo slikovno žarkovje. Homologna svetlobna žarka posnetkov v stereoparu se tako sekata v točki na terenu, iz katere pravzaprav prihajata. To nam omogoča prostorski zajem točke tudi z višinsko koordinato. Za doseg stereo efekta na digitalni fotogrametrični postaji se uporabljajo različni principi, npr.: »crystal eyes«, polarizacijski princip, anaglifni princip, itd.. Prostorsko marko na zelenem horizontalnem položaju vertikalno »spustimo« na objekt obravnave in registriramo prostorske koordinate točk.

3.1.3 Slikovno ujemanje

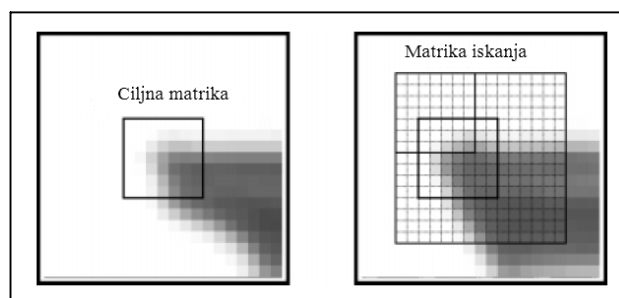
Slikovno ujemanje je postopek, ki izbrani točki s pomočjo matematičnih in statističnih metod avtomatsko poišče najbolj verjetno homologo točko na drugi podobi. Iskane točke so lahko določene vnaprej (tipizirane tarče na oslonilnih točkah, robne marke, ...) ali pa se jih določa sproti (gridne točke DMV, ročno ali samodejno določene vezne točke za relativno orientacijo, ...). S pridobitvijo homolognih točk pravzaprav dosežemo relativno orientacijo podob.

Ustrezen računalniški program nato izmeri paralakso iskane točke in ob poznanih parametrih absolutne orientacije izračuna njeno višino v izbranem koordinatnem sistemu. Tako dobimo vse tri koordinate posamezne točke, kar je osnova za kakršenkoli 3D model. Ločimo tri vrste slikovnega ujemanja:

- ujemanje območij (angl. area-based matching),
- ujemanje pojavov (angl. feature-based matching),
- strukturno ujemanje (angl. structural matching).

3.1.3.1 Ujemanje območij

Ujemanje območij temelji na primerjavi med barvnimi vrednostmi pikselov na dveh prekrivajočih se podobah. Območje v tem primeru predstavlja ciljna matrika, ki vsebuje iskano točko (center matrike) in njeno okolico. Ciljno matriko piksel po piksel premikamo po matriki iskanja (podobi, na kateri iščemo



Slika 3.2: Ciljna matrika in matrika iskanja [Wiedemann, Rodehorst, 1997]

homologno točko) ter za vsak posamezen položaj izračunamo stopnjo podobnosti. Pogoj za učinkovitost metode so dobro določene začetne vrednosti ujemanja (parametri relativne orientacije), pa tudi ostri prehodi med barvami na podobah. Za čimbolj enolično rešitev ujemanja je potrebno določiti ustrezno veliko ciljno matriko in ustrezno majhno matriko iskanja. Za izračun mere podobnosti se uporabljata križni korelacijski koeficient in metoda najmanjših kvadratov.

V primeru križnega korelacijskega koeficienta najboljše ujemanje predstavlja prekrivanje ciljne matrike in matrike iskanja na mestu, kjer je izračunani korelacijski koeficient največji. Križni korelacijski koeficient (ρ) se računa po naslednji enačbi [Hannah 1989 cit. po Pateraki, 2000]:

$$\rho = \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_1(r,c) - \mu_1) \cdot (g_2(r,c) - \mu_2)}{\sqrt{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_1(r,c) - \mu_1)^2 \cdot \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_2(r,c) - \mu_2)^2}}; \quad -1 \leq \rho \leq 1 \quad (3-5)$$

Pri čemer je:

- $g_1(r,c)$...barvna vrednost v pikslu r-te vrstice in c-tega stolpca ciljne matrike,
- μ_1 ...povprečna barvna vrednost v ciljni matriki,
- $g_2(r,c)$...barvna vrednost v pikslu r-te vrstice in c-tega stolpca matrike iskanja,
- μ_2 ...povprečna barvna vrednost v matriki iskanja.

Križna korelacija je hitra in učinkovita metoda, če so geometrične in radiometrične napake na podobah minimalne.

Metoda najmanjših kvadratov išče tak položaj na matriki iskanja, da je vsota kvadratov razlik med barvnimi vrednostmi ciljne matrike in matrike iskanja minimalna. Položaj ujemanja se poda s premiki ciljne matrike glede na njen začetni položaj v matriki iskanja. Za bolj natančno (subpikselsko) ujemanje se poleg premikov podajo tudi parametri spremembe oblike podobe (afina transformacija) in radiometrični popravki.

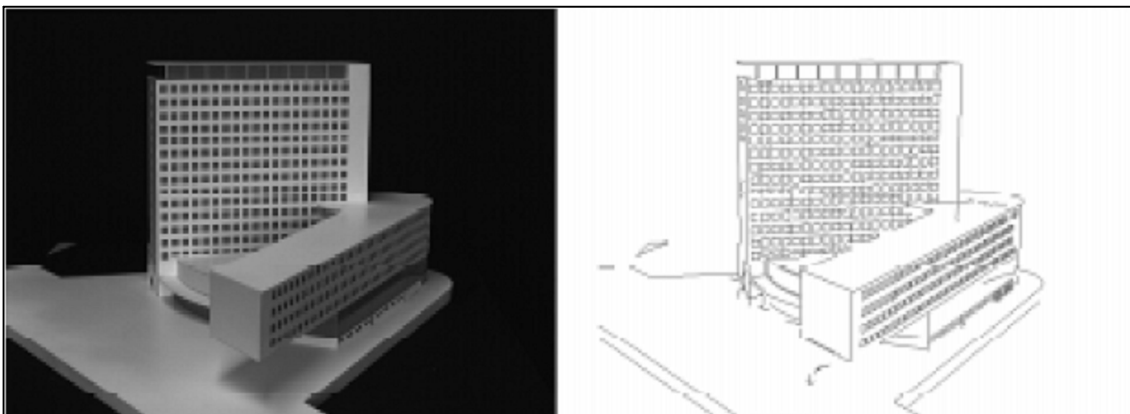
3.1.3.2 Ujemanje pojavov

Ujemanje pojavov je v bistvu ujemanje točk, robov in območij ter njihovih atributov, izluščenih iz podob. Postopek je sestavljen iz dveh faz: ekstrakcije pojavov iz podob ter iskanja teh pojavov na ostalih podobah. Druga faza je razdeljena še na dve podfazi. V prvi se na osnovi izbrane mere podobnosti sestavi začetni seznam, v drugi pa na podlagi objektnega modela končni seznam parov. Za čim lažje in hitrejšo prepoznavanje pojavov na drugih podobah je zelo važno, da so le-ti prepoznavni oz. se dobro razlikujejo od svoje okolice in ostalih pojavov. Postopek ni popolnoma avtomatiziran, saj za izvedbo potrebujemo približne vrednosti parametrov relativne orientacije in prekrivanja podob.

Točkovni pojavi se lahko izluščijo na osnovi različnih lokalnih operatorjev pogosto imenovanih tudi operatorji »zanimanja« (angl. interest operators). Atributi pojavov se izračunajo znotraj kvadratnega ali okroglega okna v določeni ali v vseh smereh. Vrednosti atributov se nato primerjajo z neko dopustno vrednostjo, na osnovi katere se odloči, ali je nek pojav dobro izbran ali ne. S tem se znotraj okna ohrani le pojav z najboljšimi vrednostmi atributov (npr. piksel z največjim gradientom barvnih vrednosti v določeni smeri). Z velikostjo okna je določena razporeditev in gostota izluščenih pojavov. Vrste atributov pojava

so odvisne od njegove razsežnosti in tipa ter od želene natančnosti ujemanja. Obstaja več operatorjev »zanimanja«, med katerimi ima vsak svojo strategijo iskanja. Trije med njimi so na kratko opisani v nadaljevanju. Moravec-ov operator zazna točke z visoko varianco barvnih vrednosti. Njegova slabost je, da ne najde točkovnih pojavov na področjih s slabim kontrastom. Luhmann in Ehlers sta izpeljala operator, ki pojave izbira tako, da so enakomerno razporejeni po celi podobi in se ne ozira na kontrast (Pateraki, 2000). Foerstner-jev operator odkriva vogale in središča krožno simetričnih pojavov.

Postopek iskanja robov najprej zazna posamezne piksele, ki ležijo na robu, nato pa te piksele poveže v linijo. Za zaznavanje in ujemanje robov obstaja več metod različnih avtorjev, največ se uporabljata gradientni operator in ničla Laplace-ovega operatorja. Gradientni operator računa lokalne gradientne barvnih vrednosti. Ekstrahirani robovi so običajno debeli. Najbolj uporabljana gradientna operatorja sta Sobel-ov in Prewitt-ov. Ničla Laplace-ovega operatorja predstavlja prevojne točke funkcije intenzitete na podobi. Ta operator je zelo občutljiv na šum, zato se navadno na podobi prehodno opravi operacija glajenja (npr. konvolucija z Gauss-ovim filtrom). Njegova sposobnost zaznave in kreiranja zaprtih obrisov poleg prednosti predstavlja tudi slabost, saj včasih ti obrisi niso povsem pravilni, lahko pa so tudi v celoti napačni (umetno tvorjeni).



Slika 3.3: Ekstrakcija robov z gradientnim operatorjem [Alberts, Wiedemann]

Postopek ekstrakcije območnih pojavov se ponavadi vrši na osnovi homogenosti barvnih vrednosti. Pri tem je potrebno postaviti mejo koliko se piksli glede barv še lahko razlikujejo, da se uvrstijo v območje. Ko je območje določeno, se homologna območja iščejo na osnovi več kriterijev podobnosti (oblika, velikost, relativna razmerja v geometriji,...).

3.1.3.3 Strukturno ujemanje

Strukturno ujemanje je včasih označeno tudi kot relacijsko ujemanje. Razvili so ga strokovnjaki na področju računalniškega vida in ne potrebuje nobenih začetnih vrednosti neznank (parametrov orientacije). Zato lahko naloge kot so relativna in absolutna orientacija, aerotriangulacija, zajem podatkov DMP postanejo popolnoma avtomatizirane. Ta metoda ujemanja ugotavlja skladnost med strukturnima opisoma dveh podob. Strukturni opis sestavljajo primitivi (točke, linije, areali) ter geometrične, topološke in radiometrične relacije med njimi. Vsak primitiv in relacija sta lahko opisana z več atributi, npr.:

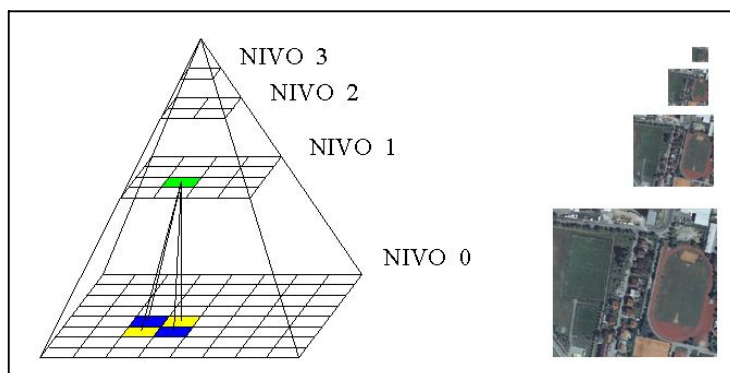
- točkovni primitiv: $P_i = \{ \text{koordinate} = (x, y), \text{siva vrednost} = s, \text{gradient} = g \}$,
- relacija med dvema linijama: $r_j = \{ \text{liniji } l_1, l_2, \text{preseka} = da, \text{kot} = \alpha \}$.

Z operatorji opisanimi v poglavju 3.1.3.2 se ekstrahirajo primitivi, nato pa se med njimi določijo še relacije. Odsotnost podatkov orientacije podob nadomesti rotacijsko invariantni korelacijski koeficient. Ta temelji na smereh gradienta, ki se pri rotiranju podobe medsebojno ne spreminjajo. Najboljše ujemanje se določi z največjo pogojno verjetnostjo med vsemi mogočimi ujemanji.

3.1.3.4 Določitev začetnih vrednosti

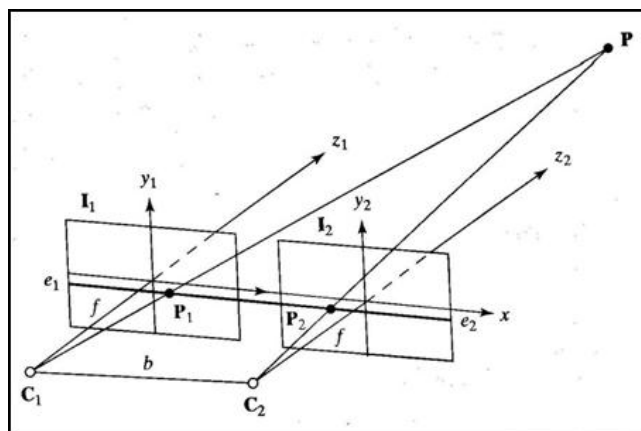
Dobro določene začetne vrednosti zmanjšajo območje iskanja na matriki iskanja ter z njim tudi število napačnih (večkratnih) ujemanj. Najbolj znani orodji za to sta metoda slikovnih piramid in epipolarna geometrija. Za kompleksnejše strukturno ujemanje pa so na voljo tudi druge metode.

Slikovna piramida na različnih nivojih hrani isto podobo v različnih ločljivostih. V najnižjem (ničelnem) nivoju je podoba v izvorni, v najvišjem pa v najmanjši ločljivosti. Pikel na določenem nivoju je izračunan iz majhne gruče (okna) pikselov na nižjem nivoju, pri čemer imajo lahko pikseli v gruči različne uteži. Cilj vsake piramide je, da razvrsti pojave na sliki glede na njihovo pomembnost (velikost, dolžino, kontrast ...) tako, da so v vrhnjih nivojih prisotni le še najpomembnejši pojavi. Začetno (približno) ujemanje se ponavadi izvede na najvišjem nivoju piramide.



Slika 3.4: Princip (levo) in primer (desno) slikovne piramide

Epipolarni oz. normalni podobi pridobimo tako, da originalni par podob s pomočjo parametrov relativne orientacije transformiramo v podobi, z vzporednima snemalnima osema, ki sta pravokotni na bazo. Na takih podobah vrstice sovpadajo z epipolarnimi linijami¹ (Slika 3.5: e_1 , e_2). Iskanje homologne točke na drugi podobi se tako omeji na iskanje vzdolž vrstice podobe, določene z epipolarno linijo obravnavane točke.



Slika 3.5: Geometrija epipolarnih slik [Colorado school of mines]

Čas postopka strukturnega ujemanja se večja eksponentno z večanjem števila primitivov v strukturnem opisu. Z namenom skrajšanja časa iskanja so v metodo ujemanja vključena različna orodja: utemeljena drevesna struktura iskanja, substrukturni pristop, razvrščanje primitivov in geometrične omejitve. Iskanje z utemeljeno drevesno strukturo najprej preveri vozlišča drevesa, ki verjetneje vodijo do rešitve (iskanje poteka po vozliščih, ki so si bolj

¹ Epipolarni liniji na paru slik tvori presek slikovnih ravnin z epipolarno ravnino, katero določata oba projekcijska centra in opazovana točka.

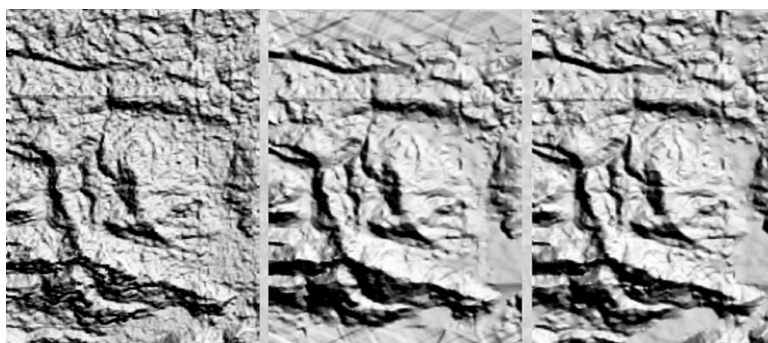
podobna). Substrukturni pristop združuje povezane primitive in relacije (npr. točka del linije) v substrukture in tako znatno zmanjša število primitivov. Razvrščanje primitivov se vrši glede na njihov tip, utež in podobnost tako, da se primitivi, ki verjetneje vodijo do rešitve preverijo prej. V primeru, da med strukturnima opisoma obstaja neka geometrična odvisnost (npr. afina transformacija), lahko le-to uporabimo kot geometrično omejitev, ki nam zmanjša območje iskanja.

3.1.3.5 Zajem DMP s slikovnim ujemanjem

Za pridobitev DMP se največ uporablja polavtomatski postopek slikovnega ujemanja, kjer se podobe pred ujemanjem obdelajo in približno orientirajo, po postopku pa je potrebno zamudno preverjanje, dopolnjevanje in popravljanje. Popolno avtomatizacijo bi načeloma lahko uporabili ravno v primeru DMP, saj naj bi DMP vseboval teren in vse nanj statično pritrjene objekte. V primeru DMV in DMR bi ob popolni avtomatizaciji tako morali ročno izločiti vse točke zajete na krošnjah in stavbah.

Problematičnim območjem, kjer so neizrazite teksture (težka ekstrakcija pojavov npr. na travnikih), hitre spremembe višine (z ujemanjem se vedno ne določijo vsi robovi) in gozdovi (nekatero točke so tudi na terenu), je potrebno nameniti posebno pozornost.

Trenutno je v večini komercialnih sistemov vgrajeno ujemanje območij s križnim korelacijskim koeficientom, ki se izvaja le na gridnih točkah. Kot vidimo (Slika 3.6) so rezultati lahko zelo različni zaradi različno nastavljenih parametrov ujemanja, ki v nekaterih primerih nimajo jasno določenega vpliva na končni izdelek (Pateraki, 2006). Razlike pa so možne tudi zaradi različnih ploskovnih interpolacij med zajetimi točkami.

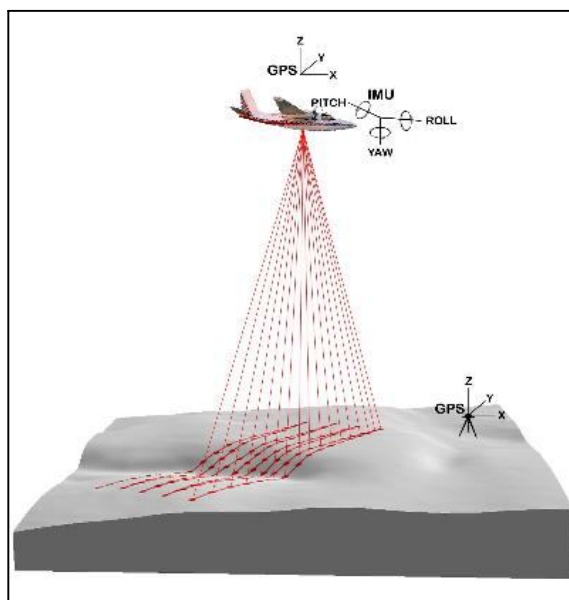


Slika 3.6: Različni rezultati ob različno nastavljenih parametrih ujemanja [Pateraki, 2006]

3.1.4 Zajem z LIDAR-jem

Kratica LIDAR (Light Detection And Ranging) se na področju daljinskega zaznavanja uporablja za označevanje laserskega skeniranja. Laserski skener je naprava, ki omogoča hitro pridobitev množice točk podanih s koordinatami v 3 razsežnem prostoru. Glavna sestavna dela sta laserski razdaljemer in naprava za odklon laserskega žarka. Laserski razdaljemer oddaja ozek snop monokromatske in koherentne svetlobe, ki ga imenujemo laserski žarek. Ta se na napravi za odklon odkloni za določen kot in nato potuje do objekta, kjer se difuzno odbije. Tipalo vgrajeno v laserski skener zazna del odbite laserske svetlobe in zabeleži čas potovanja laserskega žarka. Na osnovi registriranega časa se izračuna razdalja med laserskim skenerjem in merjeno točko. Tako dobimo polarne koordinate (odklon, razdalja), ki so osnova za izračun kartezičnih koordinat v referenčnem koordinatnem sistemu. Principa se v aero in terestričnih sistemih delno razlikujeta.

V aero sistemih je laserski skener vpet v letalo ali helikopter. Laserski žarek s spreminjanjem odklona prečesava teren pravokotno na smer leta. Za izračun koordinat posamezne točke v referenčnem koordinatnem sistemu, ob zabeleženih dolžini in odklonu žarka, potrebujemo tudi pozicijo in orientacijo skenerja za vsak trenutek meritev. To nam zagotavljata GPS (sistem globalnega določanja položaja) in IME (inercialna merska enota, angl. IMU). Med vsemi tremi napravami morajo biti natančno določeni relativni odnosi v položaju (t.i. kalibracija sistema). Novejši laserski skenerji so za vsak posamezen žarek sposobni registrirati več odbojev. Največkrat potrebujemo prvi (npr. vrh krošenj) in zadnji (teren) odboj, kar s



Slika 3.7: Zračno lasersko skeniranje [USDA Forest Service]

pridom uporabljamo pri zajemu podatkov DMR na gozdnatih predelih. S podatki o intenziteti odbitih žarkov (odvisna od vpadnega kota in materiala) pa je možno pridobiti podobe, ki so podobne črno-belim ali infra-rdečim podobam obravnavanega področja. Na višinsko

natančnost vplivata predvsem natančnost merjene razdalje in z GPS določene višine ter deloma višina leta (vplivi atmosfere). Na pozicijsko natančnost vpliva natančnost GPS pozicioniranja, IME orientiranja in meritev odklona laserskega žarka. V splošnem je višinska natančnost boljša od pozicijske. Poleg natančnosti ima zelo pomembno vlogo gostota zajetih točk, ki je odvisna od hitrosti meritev (števila izmerjenih točk v sekundi), minimalne spremembe odklona žarka, odprtinskega kota skenerja ter hitrosti in višine leta.

Terestrični sistem je statičen in potrebuje usmerjanje žarka v horizontalni in vertikalni smeri. Vsaka točka se tako izmeri s horizontalnim in vertikalnim odklonom ter dolžino. Skeniranje se izvaja z zaporednim zajemom vertikalnih profilov. Georeferenciranje se izvede z neposrednim (določitev stojišča in začetnih kotov skenerja v referenčnem koordinatnem sistemu) ali posrednim postopkom (oslonilne točke).

Za izdelavo DMP je zajet oblak točk potrebno prečistiti in odstraniti moteče objekte (npr. avtomobile, ograje, ...). Na osnovi prečiščenih podatkov se izdelava 3D model, ki je računalniško primernejši za nadaljnje obdelave (npr. TIN, celična mreža). Glavna problema izdelave sta učinkovita ploskovna interpolacija in zanesljiva ekstrakcija robov. Za slednjo je predpogoj velika gostota točk, ki jo novejši laserski skenerji z lahkoto zagotovijo. Precejšnjo pomanjkljivost predstavlja odsotnost semantičnih podatkov. Zato je priporočljivo, da se objekt obravnava zajame tudi s fotografijami. V ta namen so bili razviti skenerji z vgrajenimi digitalnimi fotoaparati oz. hibridni sistemi (potrebna je medsebojna kalibracija skenerja in fotoaparata). Tako se lahko vsaki s skenerjem zajeti točki pripiše barvna vrednost iz podobe.



Slika 3.8: Hibridni sistem Riegl LMS-Z420i [Riegl LMS GmbH]

3.1.5 Vektorizacija obstoječih virov

Vektorizacija, kot je že omenjeno, predstavlja zajem vektorskih podatkov (točka, linija, areal) na analognih in digitalnih rastrskih georeferenciranih virih. Vektorizacija je lahko ročna,

polavtomatska ali pa avtomatska. Pri ročni vektorizaciji mora operater risati točke in linije in je zato zelo zamudna. Pri polavtomatski računalniški program sam sledi liniji, vendar mu mora operater pomagati na začetku (določi katerim barvnim vrednostim naj sledi) in na presekih linij. Programi za avtomatsko vektorizacijo sami prepoznavajo linije, zato je potrebno naknadno preverjanje in popravljanje. V polavtomatski in avtomatski vektorizaciji sledenje linij lahko poteka po njihovem robu ali pa po njihovi sredini. Vektorizacija je lahko uspešna le, če so na rastrski podlagi meje med območji različnih barv dobro vidne. Ena glavnih pomanjkljivosti, ki se jih moramo zavedati je, da so podatki pridobljeni z vektorizacijo vedno slabše natančnosti kot viri.

Zelo pogosto se z vektorizacijo zajemajo plastnice iz topografskih kart in načrtov. Vse tako zajete plastnice najprej ležijo v isti ravnini. Nato s pripisom višine vsaki posamezni plastnici pridobimo DMR. DMR kombiniran z digitalnim modelom zgradb pa predstavlja DMP, ki ga potrebujemo za izdelavo popolnega ortofota.

3.2 3D modeliranje

3.2.1 Projektivne ravnine

Objekt se prikaže s projektivno (regresijsko) ravnino, ki se najbolj prilega oslonilnim točkam na objektu. Takšna predstavitev se uporablja le za ravne ali skoraj ravne objekte, saj se kasneje na popolnem ortofotu pravilno prikažejo le točke, ki dejansko ležijo na projektivni ravnini. Projektivne ravnine se v kombinaciji s perspektivno transformacijo večinoma uporabljajo za metrične predstavitve enostavnih fasad (Mencinger, 2005). Možna bi bila tudi uporaba v primeru objektov, ki se jih da opisati z majhnim številom (na popolnem ortofotu vidnih) središčnih ravnin.

3.2.2 Celična mreža

Celično mrežo predstavlja mreža enakih kvadratnih celic, ki imajo v vogalih znane prostorske koordinate. Navadno se pridobi z merjenjem višin iz stereopara s postopki slikovnega ujemanjem, lahko pa se tudi interpolira iz plastnic ali TIN-a. Višina poljubne točke znotraj posamezne celice se izračuna z interpolacijo vogalnih višin. Ta oblika 3D modela se v

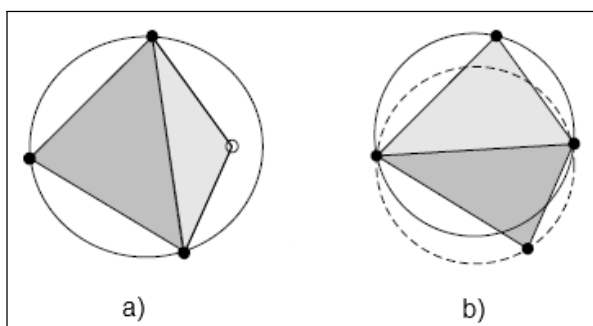
digitalni obliki lahko enostavno zapiše kot dvorazsežna matrika in je zelo primerna za GIS analize. Pomanjkljivost je predvsem omejena ločljivost, zaradi katere so lahko izpuščeni pomembni detajli (predvsem hitre spremembe modelne ploskve kot npr. soteske, zgradbe; minimumi in maksimumi reliefa, idr.). Zaradi tega je celična mreža bolj primerna za predstavitev zveznih in gladkih ploskev.

3.2.3 Nepravilna trikotniška mreža

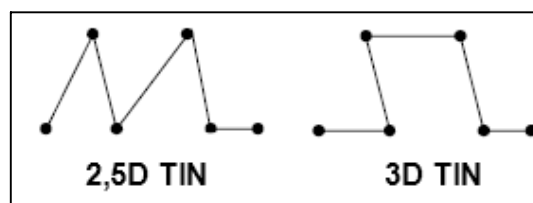
Nepravilna trikotniška mreža (angl. Triangular Irregular Network, TIN) je množica v prostoru danih točk, ki so povezane v mrežo trikotnikov. Višina poljubne točke se izračuna z interpolacijo višin v ogliščih trikotnika.

Za sestavo trikotniške mreže se največkrat uporablja Delaunay-eva triangulacija, za katero je pravilno konstruiran samo trikotnik, katerega očrtan krog ne vsebuje nobene druge točke (slika 3.9). S tem se povezujejo horizontalno najbližje točke. Rezultat Delaunay-eva triangulacije je tako mreža čim manjših in čim pravilnejših trikotnikov.

Za uporabo takšnega pristopa pri izgradnji DMP je potrebno algoritem ravninske triangulacije nadgraditi. Najprej se na zelo ravnih področjih odstranijo odvečne točke (predvsem v primeru laserskega skeniranja). Sama triangulacija proizvede t.i. 2,5D TIN, ki v izbrani ravnini povezuje najbližje točke in v istih točkah lahko hrani le eno višino. Za pravi 3D TIN mora algoritem omogočati konstruiranje trikotnikov tudi preko navpičnih in previsnih objektov (Slika 3.10). Poleg točk morajo vhodni podatki vsebovati tudi lomne linije, ki jih mora ustrezn algoritem pravilno vključiti v mrežo trikotnikov.



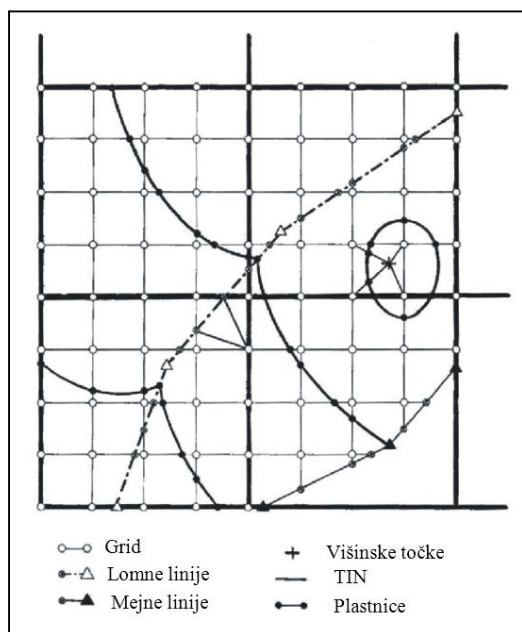
Slika 3.9: Nepravilna a) in pravilna b) izbira trikotnikov v Delaunay-evi triangulaciji [Nielsen, 2004]



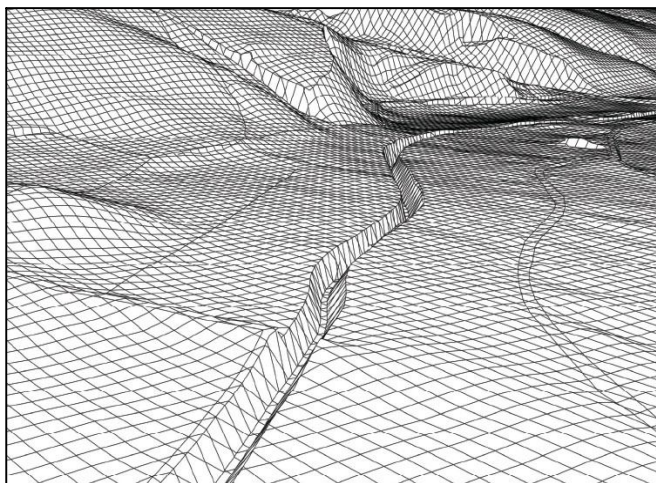
Slika 3.10: Prečni prezek triangulacij preko enakih točk [Nielsen, 2004]

3.2.4 Hibridna mreža

Hibridna mreža je relativno gosta celična mreža, ki je na bolj razgibanih področjih dopolnjena z značilnimi linijami (prelomi, grebeni, ...) in točkami (vrhovi, dna, ...). Linije in točke se v hibridno mrežo vključijo z lokalno izgradnjo TIN-a (Slika 3.11). Celično mrežo se iz nepravilno razporejenih zajetih točk izpelje z interpolacijsko metodo, ki je zelo podobna Kriging-u. Značilne linije in točke se lahko pridobijo z ročnim zajemom (npr. fotogrametrično), obstajajo pa že tudi različni algoritmi za njihovo avtomatsko ekstrakcijo iz LIDAR-skih meritev. Hibridna mreža je kompromis med natančnostjo (TIN) in enostavnostjo zapisa (celična mreža) 3D modela.



Slika 3.11: Princip hibridne mreže [Kraus, Otepka, 2005]

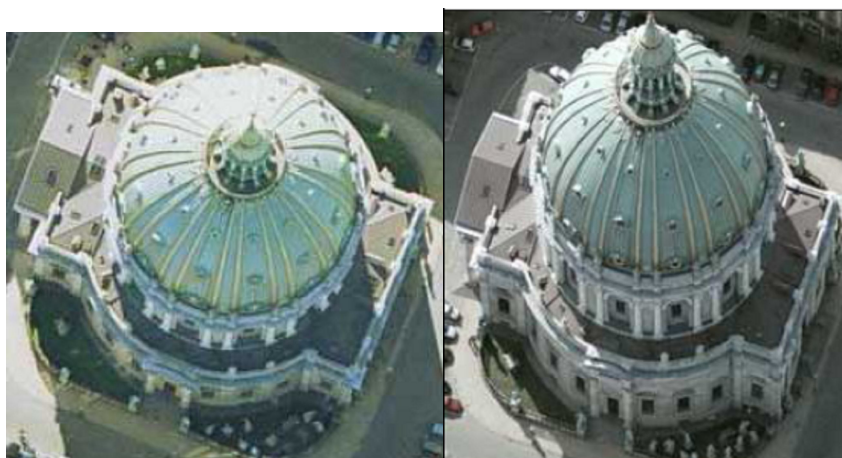


Slika 3.12: Primer hibridne mreže [Kraus, Otepka, 2005]

3.3 Zajem posnetkov

Na popolnem ortofotu lahko tudi po končani izdelavi ostane nekaj zakritih območij. Za minimiziranje teh območij je ključnega pomena izbira ustreznega objektiva in zadostno prekrivanje sosednjih fotografij.

Namesto široko kotnih je veliko bolje uporabiti normalno kotne objektivne. S slednjimi lahko enako veliko območje zajamemo s fotografiranjem z večje razdalje, pri tem pa so premiki reliefa istih objektov precej manjši (Slika 3.13). Snemanje z večje razdalje ni vedno mogoče, saj v aerofotogrametriji večja višina leta predstavlja dodaten strošek, v terestričnih primerih pa je velikokrat problem pomanjkanje prostora v okolici obravnavanega objekta.



Slika 3.13: Premiki reliefa za 70m visok objekt: levo ($c=304\text{mm}$, $h=1500\text{m}$), desno ($c=152\text{mm}$, $h=750\text{m}$) [Nielsen, 2004]

V postopku mozaičenja je posamezno točko dobro imeti pokrito z vsaj dvema posnetkoma, saj s tem zmanjšamo verjetnost, da bi na koncu ostala brez radiometrične vrednosti. To v veliki meri dosežemo s 60% preklpom v obeh smereh, ki na nekaterih mestih zagotavlja tudi trojno prekrivanje. Obstoječi aerosnetki v Sloveniji (20-30% prečni preklp) torej niso primerni za izdelavo popolnega ortofota.

Uspešnost zajema glede pokritosti lahko preverimo z analizo vidnosti, ki se pravzaprav izvede v fazi iskanja zakritih območij (glej poglavje 3.4.2). Z njo najprej za vsak posamezen posnetek določimo zakrita območja oz. karto vidnosti (Slika 3.14). Zakrita območja so v tem primeru analogna sencam objektov, ki bi jih dobili, če bi v projekcijski center postavili izvor

svetlobe. Nato karte vidnosti prekrivajočih se posnetkov položimo eno na drugo in dobimo piksele, ki niso vidni na nobenem posnetku. V zahtevnih primerih (npr. gosta in visoka pozidava) se smatra, da je popolni ortofoto zadovoljiv, če zakrita območja ne predstavljajo več kot 1% obravnavnega območja (Nielsen, 2004).



Slika 3.14: Karta vidnosti: črni predeli predstavljajo zakrita območja [Nielsen, 2004]

3.4 Orto rektifikacija

3.4.1 Orientiranje posnetkov

Orientiranje posnetkov je nujno za rekonstrukcijo slikovnega žarkovja, na osnovi katerega se iščejo preseki žarkov z DMP. Orientacijo posnetkov delimo na notranjo in zunanjo orientacijo.

Na osnovi notranje orientacije lahko rekonstruiramo žarkovje med projekcijskim centrom in slikovno ravnino. Parametri so konstanta fotoaparata (c), koordinati projekcijskega centra v slikovni ravnini (x_0, y_0) in radialna distorzija objektiva (dr). Pri merskih fotoaparatih parametre poda proizvajalec v kalibracijskem poročilu, vendar se s časom lahko spremenijo, zato je v določenih časovnih intervalih kalibracijo potrebno ponoviti. Radialna distorzija objektiva predstavlja večino popačenja, ki nastane zaradi napak objektiva. Popravki so usmerjeni radialno na glavno točko posnetka in so na enakih oddaljenostih od nje konstantni. Popravka slikovnih koordinat izračunamo z naslednjima enačbama:

$$dx = \frac{x - x_0}{r} \cdot dr \quad (3-6)$$

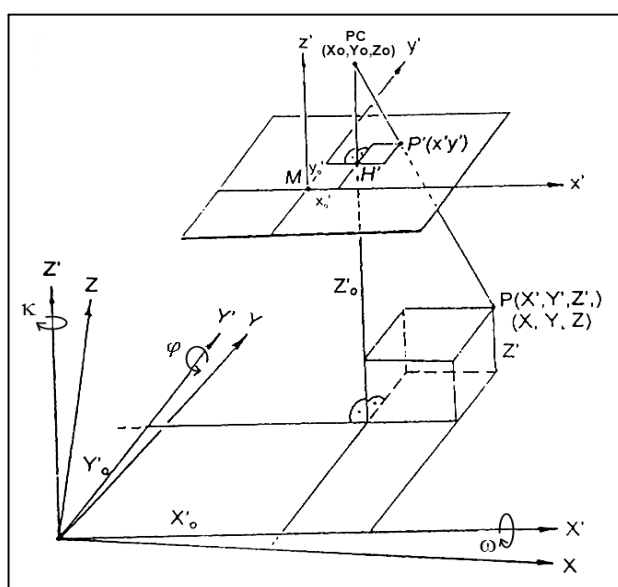
$$dy = \frac{y - y_0}{r} \cdot dr \quad (3-7)$$

Pri čemer so:

x, y ...slikovni koordinati obravnavane točke,

x_0, y_0 ... slikovni koordinati glavne točke,
 dr ... dana vrednost radialne distorzije,
 r ... razdalja med obravnavano in glavno točko.

Z zunanjo orientacijo posnetek postavimo in orientiramo v tak položaj kot je bil v času snemanja. Za vsak posnetek je potrebno določiti translacijo (X_0, Y_0, Z_0) in rotacijo (ω, φ, κ) slikovnega koordinatnega sistema glede na objektovnega (Slika 3.15). Izračunamo jih lahko za enega, ali pa za več posnetkov hkrati (stereopar, blok posnetkov v aerotriangulaciji).



Slika 3.15: Razmerja med terenskimi in slikovnimi koordinatami orientirane podobe [Gorjup, 2001]

3.4.2 Orto rektifikacija

3.4.2.1 Princip orto rektifikacije

Orto rektifikacija pomeni iskanje presekov rekonstruiranih žarkov z DMP in njihovo projekcijo na izbrano horizontalno ravnino (npr. projekcijsko ravnino referenčnega koordinatnega sistema). Večinoma se uporablja posredni postopek projekcije v smeri od središča piksla popolnega ortofota preko preseka z DMP do orientiranega posnetka, kjer se pikslu popolnega ortofota pripiše radiometrična vrednost pripadajočega piksla posnetka. Presek žarka z DMP za vsak piksel da tretjo (višinsko) koordinato, ki jo izračunamo z interpolacijo sosednjih vrednosti (vogali celice ali trikotnika).

Na osnovi znanih prostorskih koordinat lahko (iz razmerij na sliki 3.15) slikovne koordinate izračunamo z naslednjima enačbama [Gorjup, 2001]:

$$x = x_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (3-8)$$

$$y = y_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (3-9)$$

Pri čemer so:

- x, y ... koordinate obravnavane točke v slikovni ravnini,
- x_0, y_0 ... koordinate projekcijskega centra v slikovni ravnini,
- X, Y, Z ... koordinate obravnavane točke v objektovem koordinatnem sistemu,
- X_0, Y_0, Z_0 ... koordinate projekcijskega centra v objektovem koordinatnem sistemu,
- r_{ij} ... elementi rotacijske matrike (izračunane iz kotov ω, φ, κ),
- c ... konstanta fotoaparata.

S translacijo med sredino in zgornjim levim pikslom podobe ter z zamenjavo predznaka osi y slikovne koordinate pretvorimo v koordinatni sistem podobe (matriko):

$$st = x + (st_{maks} / 2 + 0.5) \quad (3-10)$$

$$vr = -y + (vr_{maks} / 2 + 0.5) \quad (3-11)$$

Pri čemer so:

- st_{maks}, vr_{maks} ... število stolpcev, vrstic vhodne podobe,
- st ... stolpec podobe,
- vr ... vrstica podobe.

Ker tako projiciran žarek ne pade na sredino piksla podobe, se barvna vrednost izračuna z interpolacijo. Najpogosteje se uporablja bilinearno interpolacijo štirih najbližjih pikslov [Kraus, 1993]:

$$g_{\xi, \eta} = \left(1 - \frac{\xi}{\Delta} - \frac{\eta}{\Delta} + \frac{\xi \cdot \eta}{\Delta^2}\right) \cdot g_1 + \left(\frac{\xi}{\Delta} - \frac{\xi \cdot \eta}{\Delta^2}\right) \cdot g_2 + \left(\frac{\eta}{\Delta} - \frac{\xi \cdot \eta}{\Delta^2}\right) \cdot g_3 + \frac{\xi \cdot \eta}{\Delta^2} \cdot g_4 \quad (3-12)$$

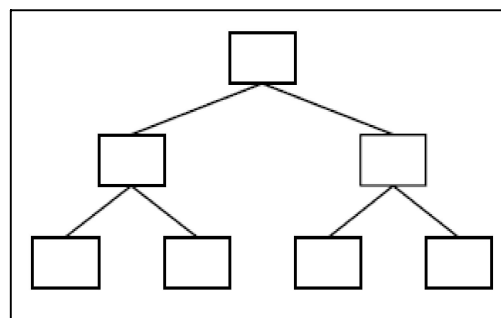
Pri čemer je:

- $g_{\xi, \eta}$... iskana barvna vrednost (na mestu vpada žarka),
- ξ, η ... slikovni koordinati na mestu vpada žarka,
- Δ ... velikost stranice piksla
- g_1, g_2, g_3, g_4 ... barvne vrednosti štirih najbližjih pikslov.

Za pospešitev celotnega postopka se lahko uporabi poenostavitev s sidrnimi točkami (glej poglavje 2.2), v nadaljevanju pa je opisana tudi pospešitev z uporabo binarnih dreves.

3.4.2.2 Pospešitev postopka orto rektifikacije z uporabo binarnih dreves

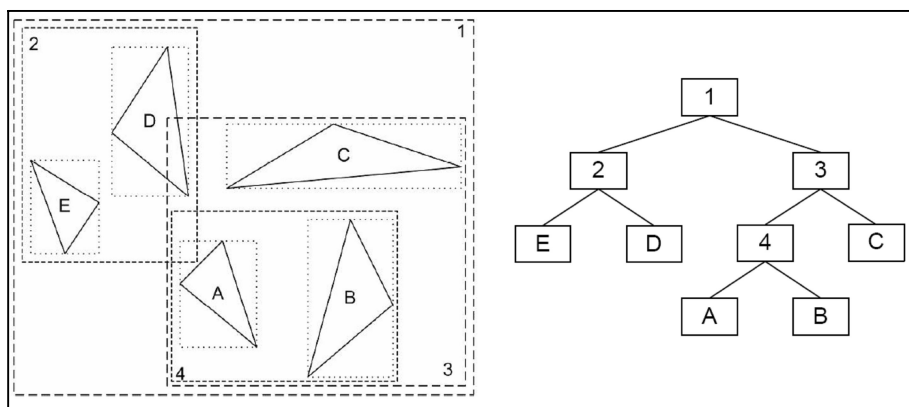
Ta metoda sledenja žarka se je najprej uporabljala v računalniških 3D igrah, kjer se npr. računa, kje bo izstrelek naletel na oviro. Princip temelji na zapisu DMP z binarnim drevesom, znotraj katerega je postopek sledenja žarka veliko hitrejši. Binarno drevo je sestavljeno iz korena (najvišje vozlišče), vozlišč (na različnih nivojih) in listov (dno drevesa). Iz vsakega vozlišča lahko izhajata največ dve podvozlišči. V vsakem



Slika 3.16: Shema binarnega drevesa zgrajenega iz enega korena, dveh vozlišč in štirih listov [Nielsen, 2004]

vozlišču sta shranjena kazalca na podvozlišči in omejeno območje, ki vsebuje določen del DMP oz. vse geometrične elemente (trikotnike, celice, ...) shranjene v njegovih podvozliščih. Za zelo primerno obliko omejenega območja se je izkazal kvader, katerega robovi so vzporedni koordinatnim osem objektovga koordinatnega sistema. Tak kvader se lahko predstavi le z dvema vogalnima točkama, iskanje presekov med žarkom in območjem pa močno poenostavi.

Izgradnja drevesa poteka od spodaj navzgor. V posamezen list se shrani kvader, ki vsebuje natanko en geometrični element (trikotnik, celica, ...). Število geometričnih elementov tako določa širino drevesa. Po dva lista se nato združita v vozlišče na višjem nivoju, od tu naprej pa se združuje po dve vozlišči v nadvozlišča na višjih nivojih. Postopek združevanja se ponavlja toliko časa, da se združita zadnji vozlišči v koren. Način združevanja vozlišč ključno vpliva na hitrost procesorsko zahtevnega iskanja presekov. Zato nam je v interesu, da se preseki iščejo na čim manjšem številu vozlišč. Združevanje dveh kvadrov zato poteka tako, da se prostornina novega kvadra (ki vsebuje oba »pod« kvadra) poveča minimalno, saj se s tem zmanjša možnost, da ga seka žarek in s tem možnost nepotrebnega nadaljnega iskanja presekov na podvozliščih. V ta namen se je kot najbolj učinkovito izkazalo združevanje kvadrov, katerih središča so najbližja.



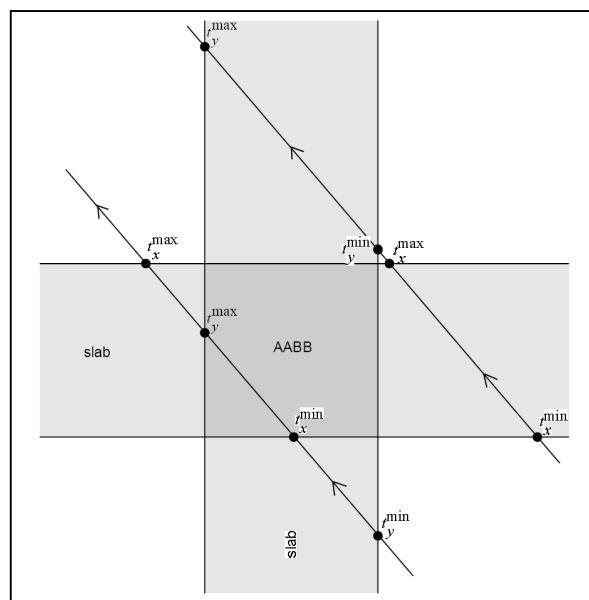
Slika 3.17: 2D primer izgradnje binarnega drevesa (omejena območja predstavljajo pravokotniki) [Nielsen, 2004]

Preverjanje presekov se v drevesu izvaja od zgoraj navzdol. Če žarek seka določen kvader, se postopno testirajo tudi kvadri v podvozliščih. Na posameznem kvadru se presek testira z metodo pasov (angl. slabs method). Pas predstavljata dve vzporedni ravnini, v katerih ležita nasprotni stranici kvadra. Kvader je na ta način določen s tremi pasovi. Presek žarka in kvadra testiramo na osnovi presekov z ravninami, ki določajo pasove. Čas testiranja je odvisen predvsem od višine drevesa. Metoda je zelo primerna za velika območja, saj se ob enkratnem povečanju števila geometričnih elementov globina drevesa poveča le za en nivo. Iskanje presekov s kvadri je veliko hitrejše kot iskanje s kompleksno 3D ploskvijo. Testiranje preseka z DMP se izvede samo v primeru, ko žarek doseže list. Princip metode pasov je prikazan na 2D primeru, kjer je omejujoče območje pravokotnik, ki ga določata dva pasova omejena s po dvema vzporednima premicama. Za test moramo z naslednjima enačbama [Nielsen, 2004] izračunati razdalji t^{\min} in t^{\max} od izvora žarka do presekov s premicami:

$$t^{\min} = \max(t_x^{\min}, t_y^{\min}, t_z^{\min}) \quad (3-13)$$

$$t^{\max} = \min(t_x^{\max}, t_y^{\max}, t_z^{\max}) \quad (3-14)$$

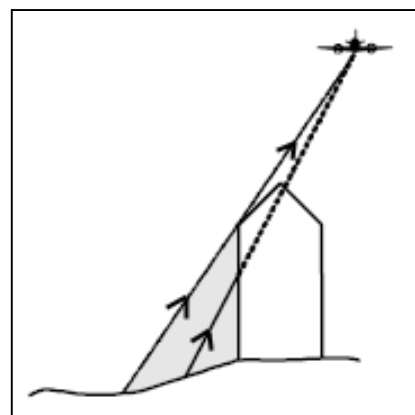
Če velja $t^{\min} \leq t^{\max}$, žarek seka pravokotnik.



Slika 3.18: Metoda pasov na 2D primeru [Nielsen, 2004]

3.5 Iskanje zakritih območij

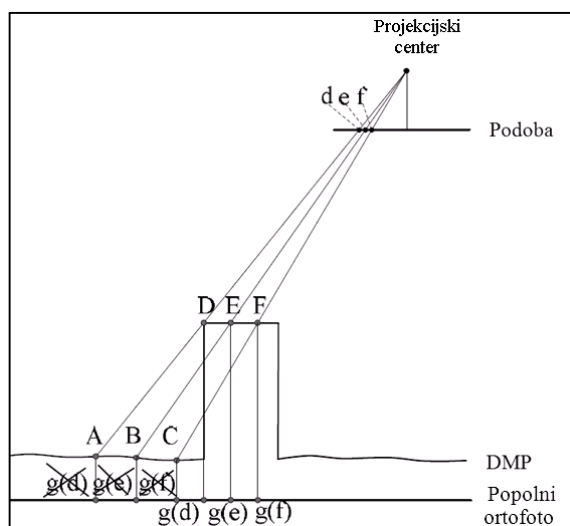
Iskanje zakritih pikslov poteka sočasno s posrednim postopkom orto rektifikacije. Ob projiciranju žarka se preverja, če slednji na poti od DMP do posnetka, na DMP naleti še enkrat (Slika 3.16). Piksla popolnega ortofota, iz katerega izhaja tak žarek, se na posnetku ne vidi in ga je potrebno označiti kot zakritega. S preveritvijo vseh pikslov pridobimo tudi karto vidnosti (Slika 3.14). Za izvedbo te računalniško zahtevne faze je razvitih več metod.



Slika 3.19: Desni žarek ne pride do fotoaparata [Nielsen, 2004]

3.5.1 Z-Bafer

Dvojno kartiranje se pojavlja, ker se v postopku orto rektifikacije za isto barvno vrednost piksla na posnetku »potegujeta« dve točki DMP oz. popolnega ortofota (Slika 3.20). Za rešitev tega problema se lahko uporabi dejstvo, da objekti, ki so v prostoru bližje projekcijskemu centru, na posnetku zakrivajo tiste, ki so od njega bolj oddaljeni. V ta namen se sestavi matrika Z-bafer (angl. Z-buffer) z enako ločljivostjo kot posnetek. Vanjo se za vsak piksel posnetka shrani najkrajša razdalja (Z) med pikslu odgovarjajočo točko na DMP in projekcijskim centrom. To na primeru slike 3.19 pomeni, da se ob posrednem postopku orto rektifikacije točki A najprej pripiše piksel d, v istoležno celico Z-bafer matrike pa razdalja med PC (projekcijskim centrom)



Slika 3.20: Določitev zakritih območij z Z-baferjem [Bang et al., 2007]

in A. Ko hočemo piksel pripisati točki D ugotovimo, da je d že pripisan točki A. Ker je razdalja med PC in D krajša, se piksel d pripíše točki D, točka A se označi kot zakrita, v pikslu Z-bafer matrike pa se razdalja med PC in A prepíše z razdaljo med PC in D.

Zaradi nekaterih zaokrožanj znotraj postopka je lahko vidnost posameznih točk ali linij napačno ugotovljena. Ta šum se odstrani na koncu z uporabo »pravila večine« (Rau, Chen, Chen, 2002). Problem glede natančnosti lahko predstavlja tudi slaba ločljivost vhodnega posnetka (postopek se izvaja »piksel po piksel«). Predvsem problematična so območja blizu hitrih skokov v višini (npr. stene zgradb), kjer se lahko pojavi dvojno kartiranje. Rešitev je z dodajanjem psevdo pikselov vzdolž vertikalnih sten (Rau, Chen, Chen, 2002). Z-bafer je vgrajen v večini programov za izdelavo popolnega ortofota, vendar ima slabost, da je zahteven glede spomina (Z-bafer matrika) in procesorja (računanje razdalj).

V primeru aero ali satelitskega snemanja so višji objekti bližje projekcijskemu centru, zato lahko za določitev zakritih območij namesto razdalj Z uporabimo višine točk. Metoda se imenuje višinski bafer in je precej hitrejša od Z-bafer-ja.

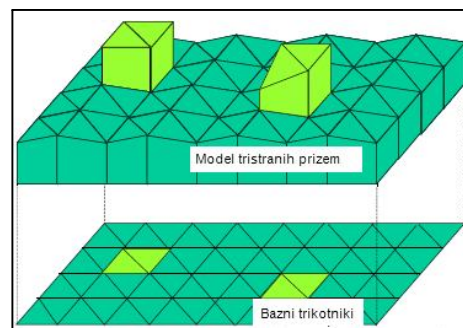
3.5.2 Poligonska metoda

Potrebni podatki za to metodo so orientacijski parametri posnetkov in DMP zgrajen iz poligonov. V prvem koraku poligone projiciramo na slikovno ravnino izvornega posnetka, kjer se zaradi perspektivne projekcije med seboj prekrivajo in sekajo. Na osnovi projiciranih poligonov celotno slikovno ravnino razdelimo na posamezne dele oz. ploskve. Za posamezno ploskev poiščemo vse poligone, ki segajo na njeno območje in izmed njih na osnovi oddaljenosti od projekcijskega centra določimo edinega vidnega. Vse vidne poligone projiciramo nazaj na DMP, s čimer se določijo območja, ki so vidna na izvornem posnetku. Ta območja nato projiciramo na ravnino popolnega ortofota, kjer so s tem določena vidna oz. zakrita območja.

Poligonska metoda je glede na rastrske veliko hitrejša (brez računanja in hranjenja velikih matrik) in natančnejša, saj so zakrita območja predstavljena v vektorski obliki. Veliko število presekov poligonov lahko postopek občutno upočasni, vendar se to v praksi običajno ne dogaja. Število presekov lahko zmanjšamo z večjo konstanto fotoaparata in s snemanjem iz večje oddaljenosti.

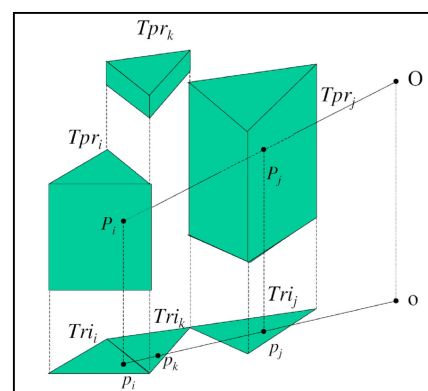
3.5.3 Trikotniška metoda

3D osnova za to metodo mora biti model tristranih prizem (angl. triangle prism model oz. TPM), ki je nekakšna nadgradnja TIN-a. Zgornji trikotniki predstavljajo teren in objekte na njem. Spodnji (bazni) trikotniki so ortogonalna projekcija zgornjih na ravnino, ki leži na enaki ali manjši višini kot najnižja točka DMP. Stranske ploskve predstavljajo vertikalne stene. Prizme se med seboj ne sekajo, ampak se le dotikajo v stranskih ploskvah oz. stranicah baznih trikotnikov.



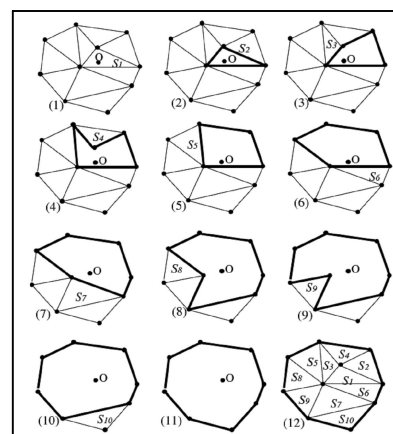
Slika 3.21: Model tristranih prizem [Oda et al., 2004]

Vidnost prizem (Tpr) glede na prostorsko točko O se lahko prenese na vidnost baznih trikotnikov (Tri) glede na točko o , ki je ortogonalna projekcija točke O na ravnini baznih trikotnikov (Slika 3.22). Če je prizma Tpr_i glede na točko O zakrita s prizmo Tpr_j , je tudi trikotnik Tri_i glede na točko o zakrit s trikotnikom Tri_j . Sklepanje o vidnosti prizem na osnovi vidnosti trikotnikov je možno samo v primeru nezakrivanja (npr. trikotnik Tri_j ni zakrit s trikotnikom $Tri_i \rightarrow$ prizma Tpr_j ni zakrita s prizmo Tpr_i).



Slika 3.22: Vidnost med prizmami in trikotniki [Oda et al., 2004]

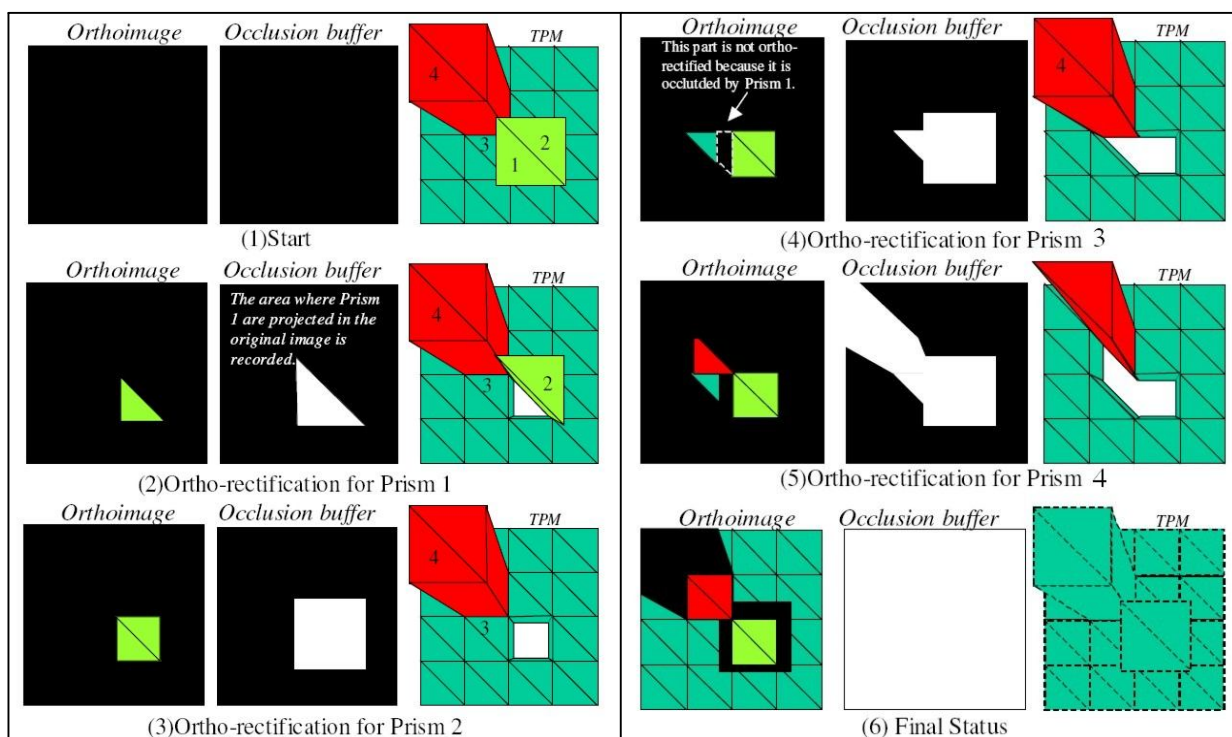
Na osnovi zgornjih zakonitosti je možno za določeno gledišče (o) sestaviti tako zaporedje baznih trikotnikov $s = \{Tri_1, Tri_2, \dots, Tri_n\}$, kjer za vsak indeks $i < j$ ($i, j = 1, \dots, n$) velja, da trikotnik Tri_i ne zakriva trikotnika Tri_j . Tako zaporedje imenujemo zaporedje vidnosti. V zaporedju vidnosti prizem (glede na O) so slednje razvrščene v enakem vrstnem redu kot njim odgovarjajoči bazni trikotniki: $S = \{Tpr_1, Tpr_2, \dots, Tpr_n\}$.



Slika 3.23: Primer razvrščanja trikotnikov [Oda et al., 2004]

Zaporedje vidnosti prizem se nato med postopkom orto rektifikacije uporabi za iskanje zakritih območij. Pred postopkom je potrebno pripraviti izhodno matriko ortofota (angl. orthoimage) in matriko zakritih območij (angl. occlusion buffer). Velikost matrike zakritih območij je enaka velikosti matrike vhodne podobe.

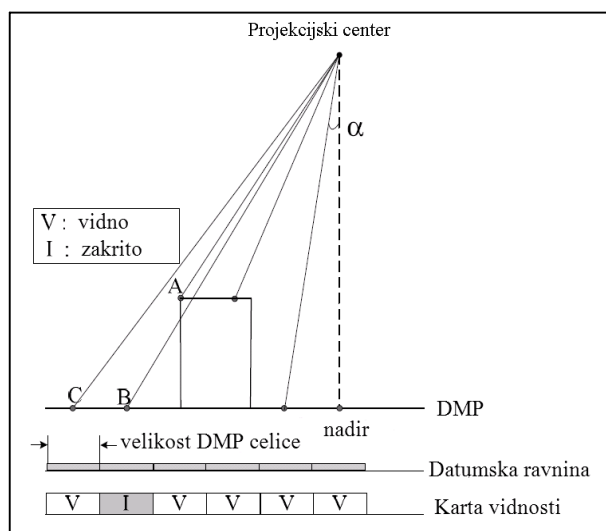
Za boljšo predstavitev je opisan postopek na konkretnem primeru, ki ga prikazuje slika 3.24. V prvem koraku vzamemo prvo prizmo iz zaporedja vidnosti, njen pravi položaj zapišemo v matriko ortofota, v matriko zakritih območij pa se zapiše površina, ki jo je zakrivala na vhodnem posnetku. Po vrsti enako stori za preostale prizme v zaporedju, vendar je treba vsakič preveriti, če so piksli, ki jih na posnetku hočemo orto rektificirati v matriki zakritih območij označeni kot zakriti. Takšni piksli se po orto rektifikaciji tudi na popolnem ortofotu označijo kot zakriti.



Slika 3.24: Princip trikotniške metode na konkretnem primeru [Oda et al., 2004]

3.5.4 Metoda kotov

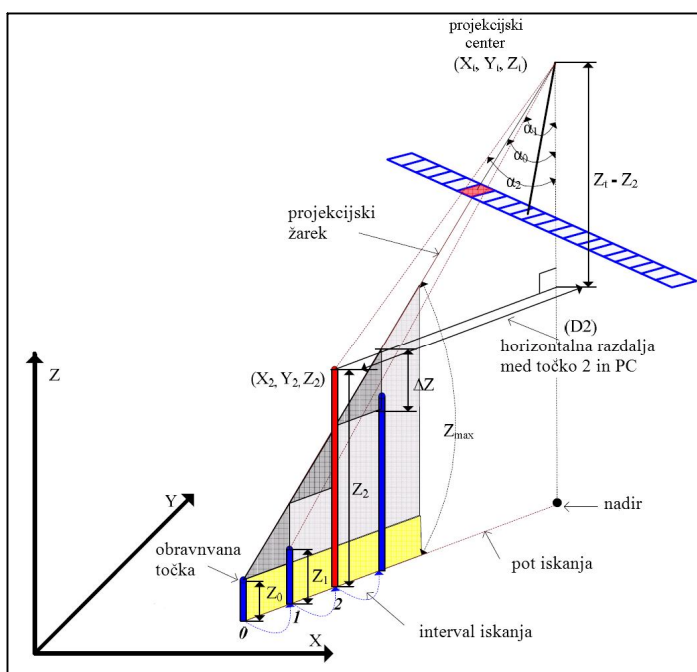
Metoda na osnovi kotov (ang. angle based method) spremlja spreminjanje vrednosti kota (α) med nadirno smerjo in žarkom, medtem ko ta sledi DMP v radialni smeri glede na nadirno točko na terenu (Slika 3.25). Ko se z žarkom radialno oddaljujemo od nadirne točke in se kot α stalno povečuje vemo, da na poti nismo prešli nobenega zakritega območja. Na slednjega naletimo v primeru, ko se kot α ob takšnem premikanju naenkrat zmanjša. Do konca zakritega območja bomo prišli, ko bo trenutni kot α presegel kot α v zadnji vidni točki. Poleg različice s prečesavanjem DMP v posameznih radialnih smereh je možno tudi različica, ko se žarek pomika po spirali z izhodiščem v nadirni točki. Metoda ni odvisna od velikosti piksla posnetka na terenu in je procesorsko (računsko) precej zahtevna. Izvedba v terestričnem primeru je enaka, le da nadirno točko nadomesti točka, ki jo določa žarek pravokoten na neko srednjo ravnino DMP.



Slika 3.25: Princip metode kotov [Kim, Ghanma, Habib, 2006]

3.5.5 Metoda višin

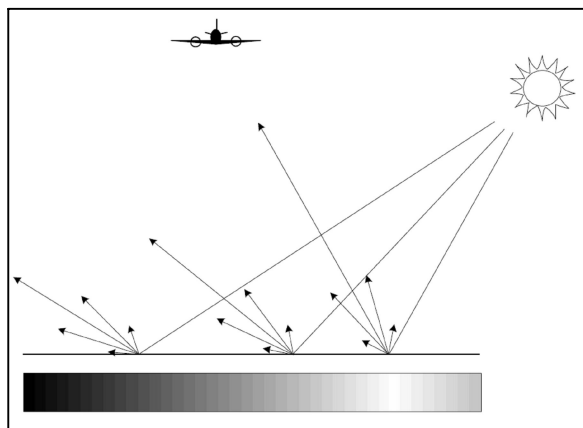
Ideja metode višin (angl. height based method) je, da je projekcijski žarek vidne točke vedno višji od točk DMP vzdolž linije iskanja, ki poteka v smeri od obravnavane do nadirne točke (Slika 3.26). Višina žarka se za vsako točko na poti iskanja izračuna na osnovi višine projekcijskega centra (Z_t) in višinske razlike (ΔZ), ki je odvisna od naklona žarka in velikosti pomika vzdolž poti iskanja (vnaprej določen konstanten interval). Če je torej katera točka DMP vzdolž poti iskanja višja od žarka, je obravnavana točka zakrita. Ker sta vhodna podatka le položaj projekcijskega centra in DMP, ločljivost vhodnega posnetka na postopek nima nobenega vpliva. Zakrita območja so zato določena hitro in z jasno določenimi mejami ter malo napakami.



Slika 3.26: Princip metode višin [Bang et al, 2007]

3.6 Barvno ujemanje

Različni posnetki istega področja se lahko med seboj radiometrično precej razlikujejo. Vzroke gre iskati predvsem v postopkih fotografiranja (dnevni in letni čas, film), razvijanja in skeniranja. Na stopnjo svetlosti znotraj posameznega posnetka lahko zelo vpliva relativni kot Sonca glede na položaj snemanja, zaradi česar so področja v smeri Sonca svetlejša (Slika 3.27). Na lokalne razlike v svetlosti dodatno vpliva razgibanost obravnavanega območja in površine, katerih svetlost je zelo odvisna od kota gledanja (npr. vodne površine). Predvsem pri aero snemanju se zaradi večje bližine objekta lahko večja svetlost pojavi na osrednjem delu posnetka, vendar se ta vpliv večinoma odstrani z ustreznimi filtri na objektivu fotoaparata. Zaradi radiometričnih razlik med posnetki so v mozaiku lahko močno vidne stične linije, kar je za popolni ortofoto nesprejemljivo (Slika 3.34).



Slika 3.27: Položaj Sonca ob snemanju vpliva na svetlost znotraj posnetka [Nielsen, 2004]

Usklajevanje barv se izvaja na orto rektificiranih posnetkih, na katerih poznamo lokacije zakritih območij. Pred usklajevanjem je treba na nek način vsakemu posnetku določiti radiometrične lastnosti. Za opis barve v posameznem pikslu obstaja več načinov. Najbolj uporabljan je opis barve v RGB prostoru, kjer se vsaka barva lahko predstavi kot kombinacija rdeče, zelene in modre barve. Večinoma je dovolj, da je za vsako komponento na voljo 256 stopenj intenzivnosti, kar nam da 16,7 milijona kombinacij oz. barvnih odtenkov. Radiometrične lastnosti posnetka opišemo s histogrami posameznih barvnih komponent. Tako lahko postopek barvnega ujemanja izvedemo z ujemanjem histogramov posnetkov. Izbrati je potrebno referenčni histogram ($h_1(v_{out})$), s katerim se bodo usklajevali vsi ostali ($h_0(v_{in})$). Ta je lahko histogram posnetka, ki ima najboljši vizualni učinek, lahko pa je vnaprej izbrane oblike (npr. Gauss-ov poveča kontraste v sencah in močnih osvetlitvah). Ujemanje lahko izvedemo na kumulativnih histogramih, kjer želimo doseči, da bo veljalo [Nielsen, 2004]:

$$c_1(v_{out}) = c_0(v_{in}) \quad (3-15)$$

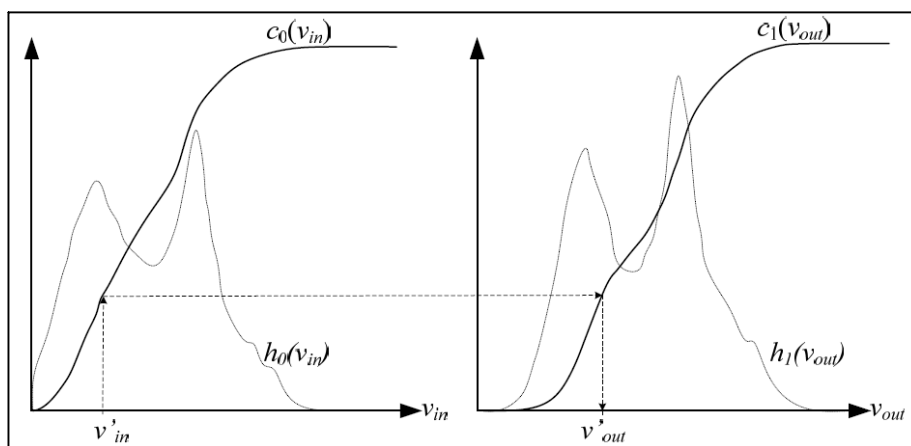
pri čemer je:

c_1 ...kumulativni referenčni histogram,

c_0 ...kumulativni vhodni histogram,

v_{out} ...vrednost intenzitete v referenčnem kumulativnem histogramu,

v_{in} ...vrednost intenzitete v vhodnem kumulativnem histogramu.



Slika 3.28: Princip ujemanja kumulativnih histogramov [Nielsen, 2004]

Iskano količino iz enačbe (3-15) izrazimo takole [Niblack, 1985 cit. po Nielsen, 2004]:

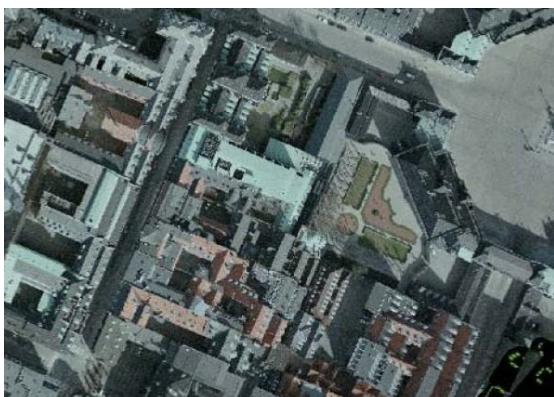
$$v_{out} = c_1^{-1}(c_0(v_{in})) \quad (3-16)$$

S tem lahko za vsako vrednost intenzitete v vhodnem kumulativnem histogramu oz. posnetku izračunamo izhodno (novo) vrednost intenzitete in jih shranimo v tabelo (Slika 3.29).

v_{in}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	...	255
v_{out}	0	2	2	4	5	5	6	7	7	7	8	9	11	14	14	15	18	19	20	...	240

Slika 3.29: Vhodne in njim pripadajoče izhodne barvne vrednosti [Nielsen, 2004]

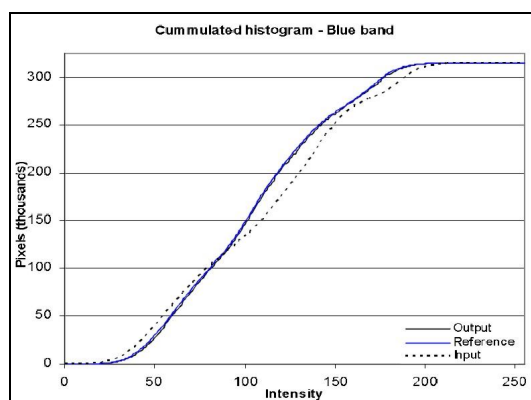
Ker se ujemanje histogramov izvede na orto rektificiranih posnetkih z znanimi zakritimi območji, se za sestavo zgornje tabele res uporabijo piksli, ki predstavljajo iste objekte.



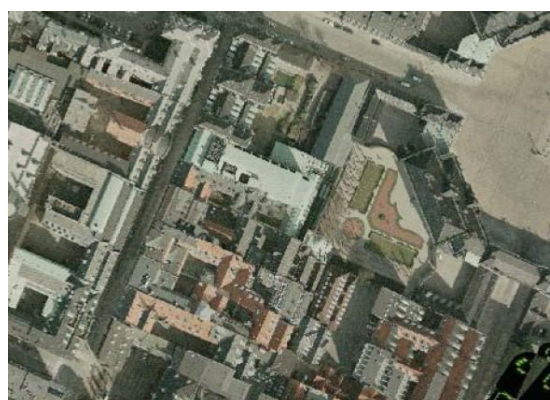
Slika 3.30: Posnetek 1 (vhodni) [Nielsen, 2004]



Slika 3.31: Posnetek 2 (referenčni) [Nielsen, 2004]



Slika 3.32: Ujemanje kumulativnih histogramov modre komponente posnetka 1 in 2 [Nielsen, 2004]



Slika 3.33: Posnetek 1 po ujemanju histogramov [Nielsen, 2004]



Slika 3.34: Mozaik iz posnetkov 1 in 2 pred ujemanjem histogramov [Nielsen, 2004]



Slika 3.35: Mozaik iz posnetkov 1 in 2 po ujemanju histogramov [Nielsen, 2004]

Zaradi senc in vegetacije se posnetki tudi po ujemanju med seboj razlikujejo in v mozaiku lahko povzročijo vidnost stičnih linij. Problem vegetacije se da rešiti z zajemom posnetkov v istem letnem času. Za odkrivanje in zmanjšanje vpliva senc obstaja več metod, ki v svojem bistvu temeljijo na istem principu. Za vsak posnetek je potrebno najprej ugotoviti azimut in višinski kot Sonca, s katerima je določena smer iz katere na DMP padajo vzporedni sončni žarki. Nadaljnji postopek iskanja senc je zelo podoben postopku iskanja zakritih območij. Odstranitev senc se izvrši z ujemanjem histogramov. V ta namen je potrebno okoli vsake sence določiti območje, ki bo služilo kot referenčno v postopku ujemanja histogramov. Znotraj referenčnega območja morajo biti zajeti podobni objekti kot v senci, zato je ta korak precej težaven.

3.7 Mozaičenje in zabris stičnih linij

3.7.1 Mozaičenje

Cilj mozaičenja je iz posameznih ortofotov sestaviti ortofoto karto zelenega (večjega) formata, na kateri bi imela tudi zakrita območja radiometrične vrednosti. Zaradi preklopa med posnetki je (vsak) piksel končnega izdelka viden na več vhodnih ortofotih. Zato je potrebno določiti merila, na osnovi katerih bomo izbrali najbolj primernega. Na podlagi meril se vsem pikslom na vhodnih ortofotih izračunajo uteži. Med piksli, ki kandidirajo za zapolnitev istega

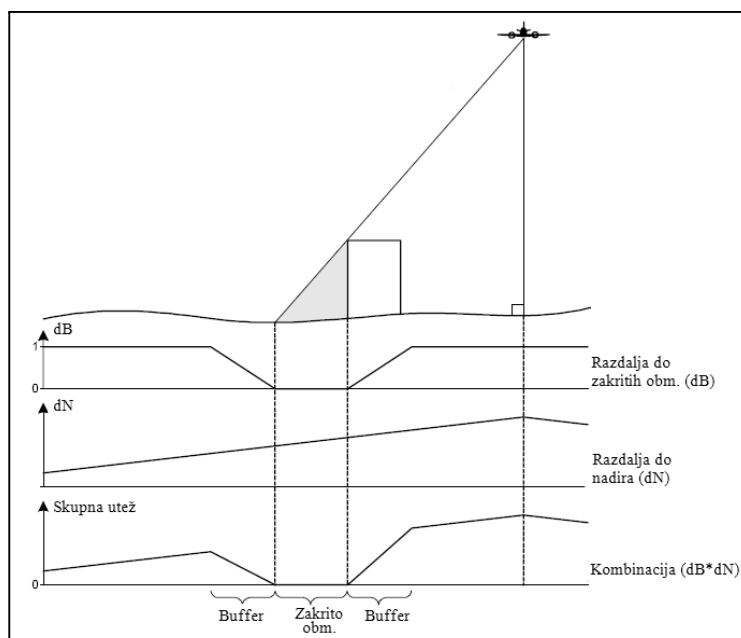
piksla končnega izdelka, se tako izbere tisti z največjo utežjo. Za izračun uteži se večinoma uporablja kombinacija naslednjih dveh meril:

- bližina nadira,
- bližina zakritih območij,

S prvim merilom dosežemo, da imajo piksli, ki so na svojem posnetku bližje nadirni točki, večjo utež. V bližini nadira je malo verjetno, da bomo naleteli na zakrito območje. Če se to zgodi, se izbere piksel, ki je drugi najbližji nadirni točki svojega posnetka. Metoda je hitra in enostavna, mozaiki pa dokaj homogeni. Njena velika slabost je občutljivost na nenatančnosti v DMP. Izvedba v terestričnem primeru je enaka, le da nadirno točko nadomesti točka, ki jo določa žarek pravokoten na neko srednjo ravnino DMP.

Drugo merilo pikslom, ki so na svojih posnetkih bolj oddaljeni od zakritih območij, pripiše večjo utež. To pomeni, da bodo stične linije potekale med zakritimi območji (npr. med stavbami, po slemenih streh). Nenatančnosti v DMP v tem primeru ne vplivajo na končni izdelek. Ker so zakrita območja brez radiometričnih vrednosti, bi izbira pikselov v bližini zakritega območja povzročila »neskladnost« posnetka (Schickler, Thopre, 1998). Rezultat je precej razdrobljen mozaik, kar povečuje možnost, da stična linija poteka čez v DMP nemodelirane objekte. Tako je na stični liniji na primer vidno drevo, ki ima premike reliefa v različnih smereh, ali pa del avta, ki ga odreže stična linija.

S kombinacijo prvih dveh meril izkoristimo prednosti obeh pristopov. Bližino nadira upoštevamo z utežno funkcijo, ki se ji vrednost linearno povečuje proti nadirni točki. Da pikselov ne bi izbirali v bližini zakritih območij, moramo okrog slednjih tvoriti vmesna območja (ang. buffer zones), znotraj katerih utežna funkcija pada od zunanlega roba (vrednost 1) proti notranjemu robu oz. zakritemu območju, kjer doseže vrednost 0 (nič). Združitev obeh utežnih funkcij izvedemo z njunim množenjem (Slika 3.36). Širino vmesnega območja moramo izbrati previdno. Prevelika širina zmanjša vpliv bližine nadira in lahko povzroči prekritje celotnega mozaika z vmesnimi območji. Premajhna širina pa ne pušča dovolj prostora za polaganje filtra za dodaten zabris stičnih linij.



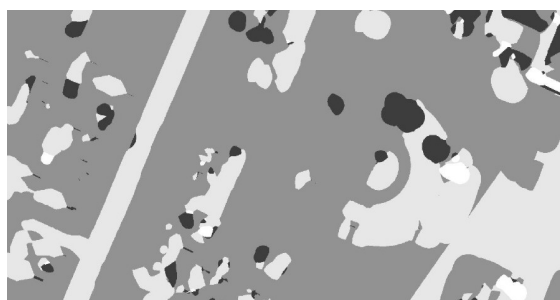
Slika 3.36: Princip kombinirane utežne funkcije [Nielsen, 2004]

Uteži izračunamo za vse vhodne posnetke. Na sliki 3.36 je primer uporabe kombinirane utežne funkcije za izračun uteži pikselov vhodne slike. Svetlejša barva predstavlja večje uteži. Nadirna točka je v desnem delu posnetka.



Slika 3.37: Uporaba kombinirane utežne funkcije na vhodnem posnetku [Nielsen, 2004]

Slika 3.38 prikazuje sestavo mozaika iz štirih posnetkov na podlagi kombinirane utežne funkcije. Različna barva predstavlja piksele iz različnega vhodnega posnetka. Mozaik ni preveč razdrobljen in je večinoma sestavljen iz dveh najbližjih posnetkov, preostala dva pa ga dopolnjujeta le na določenih mestih.



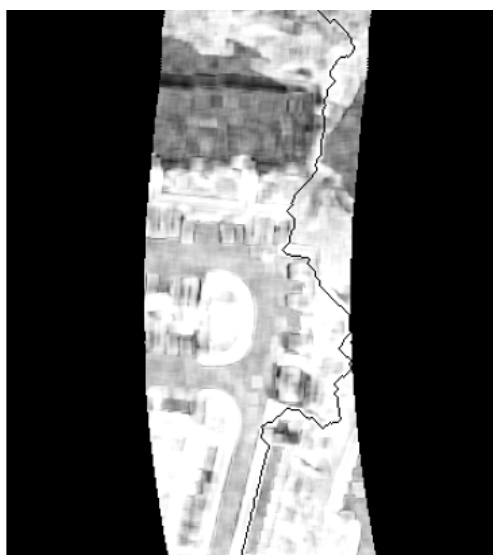
Slika 3.38: Sestava mozaika iz štirih posnetkov (kombinirana utežna funkcija) [Nielsen, 2004]

Z namenom izboljšanja mozaika se v kombinacijo prvih dveh meril lahko vključijo še dodatna. Za večjo ločljivost končnega ortofota, se večja utež pripiše vhodnemu pikslu iz posnetka, katerega žarek na DMP pade pod bolj pravim kotom. V ta namen je potrebno za vse piksele vhodnih posnetkov izračunati karto kotov med projekcijskim žarkom in normalo v odgovarjajoči točki DMP. Zmanjšanje razdrobljenosti mozaika se doseže tako, da dobi večjo utež piksel tistega vhodnega posnetka, katerega piksli so v okolici obravnavanega piksla na končnem orto posnetku, prisotni v večjem številu. Okolico obravnavanega piksla predstavlja okno določene dimezije (npr. 3x3), ki ima središče v obravnavanem pikslu.

Stične linije, ki so določene na osnovi zgornjih meril, imenujemo začetne stične linije in se lahko uporabijo kot osnova za določitev novih, bolj optimalnih. Optimizacija je usmerjena v cilj, da stične linije ne bi potekale čez nemodelirane objekte (avte, drevesa, ...), ki na različnih vhodnih posnetkih izgledajo različno. En način, da se temu izognemo, je položitev stičnih linij čez področja, ki so si na različnih vhodnih posnetkih radiometrično najbolj podobna. Radiometrično podobnost dveh posnetkov dobimo z enostavnim odštevanjem barvnih vrednosti v istoležnih pikslih. Iskanje optimalne stične linije poteka na karti radiometrične podobnosti z grafom utežene funkcije. Območje iskanja je omejeno z določeno oddaljenostjo od začetne stične linije.



Slika 3.39: Obravnavano območje [Schickler, Thorpe, 1998]



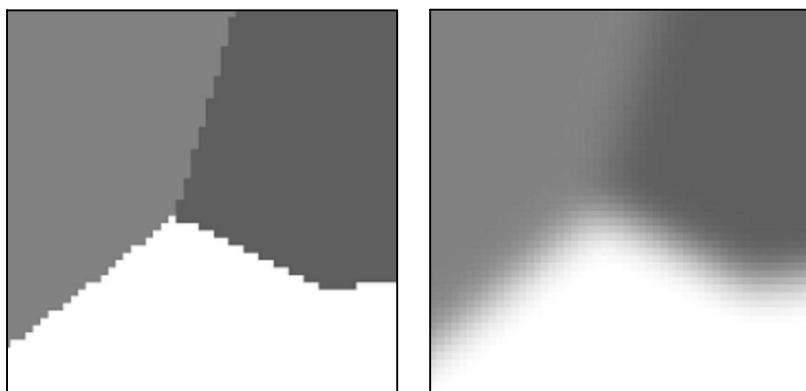
Slika 3.40: Optimalna stična linija na karti podobnosti za območje iz slike 3.39 [Schickler, Thorpe, 1998]

3.7.2 Zabris stičnih linij

Kljub skrbno izbranim stičnim linijam so slednje na nekaterih mestih še vedno vidne. Za zgladitev prehodov med sestavnimi deli mozaika se uporabi filter povprečenja (Slika 3.41), ki za izračun barvne vrednosti določenega piksla upošteva tudi barve sosednjih pikslov. Filter polagamo po stični liniji in za vsak položaj izračunamo novo barvno vrednost centralne celice, ki jo predstavlja povprečje barvnih vrednosti znotraj filtra.

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Slika 3.41: 3x3 filter povprečenja [Nielsen, 2004]



Slika 3.42: Učinek filtra povprečenja [Nielsen, 2004]

4 PRAKTIČNI PRIMER IZDELAVE POPOLNEGA ORTOFOTA

4.1 Izbira objekta obdelave

Za nazoren prikaz izdelave popolnega ortofota sem moral poiskati objekt, ki ima prostorsko primerno razgibano površino in se ga da opisati s preprostim DMP. Pomembno je, da je pred objektom dovolj prostora ter da ga ne zakrivajo kake ovire (npr. drevesa), saj bi bila v nasprotnem primeru terenska izmera in fotografiranje zelo otežkočena ali celo nemogoča. Dobro je tudi, da so na površini objekta detajli, katerih vogale lahko uporabimo za oslonilne točke. Tem kriterijem je zadostila fasada bloka na Kotnikovi ulici 25 v Ljubljani (Slika 4.1). Osredotočil sem se le na del fasade omejen z oranžno linijo.



Slika 4.1: Objekt obravnave

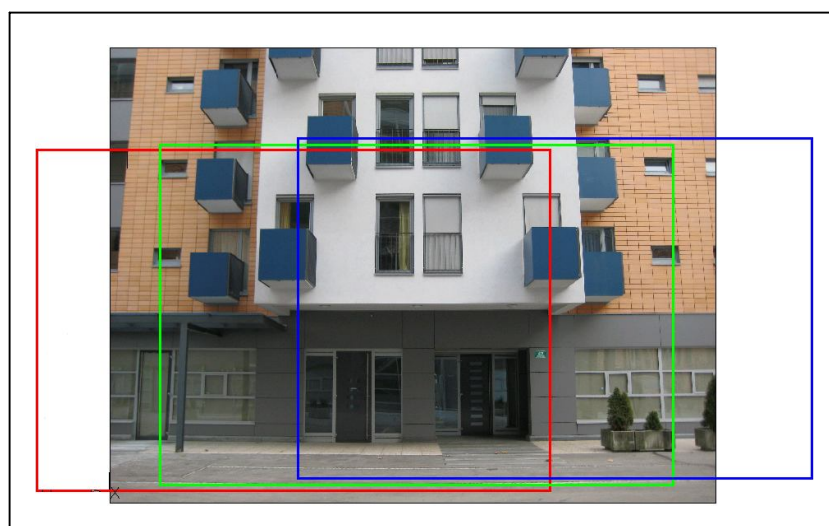
4.2 Terensko delo

Pred dejanskimi terenskimi meritvami sem določil približne mere objekta, preveril, če je možna ustrezna razporeditev oslonilnih točk in določil približne položaje stojišč za geodetsko in fotogrametrično izmero. Na osnovi teh podatkov sem kasneje naredil približen plan fotografiranja.

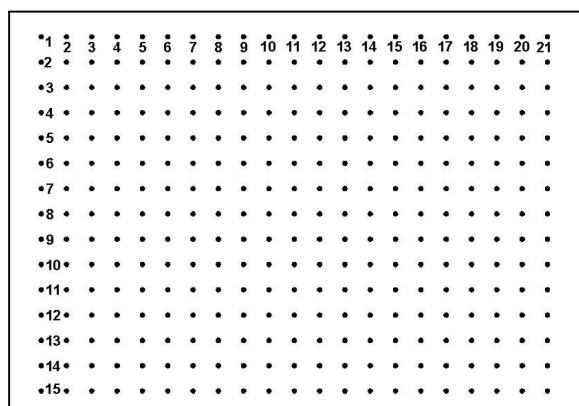
4.2.1 Fotografiranje

Fotografiranje se navadno opravi pred geodetskimi meritvami. Tako lahko preverimo, če so načrtovane oslonilne točke na posnetkih dobro vidne in po potrebi določimo nove.

Na terenu sem glede na približen plan fotografiranja (Slika 4.2) najprej nastavil konstanto fotoaparata in naredil pet posnetkov testnega polja (Priloga A1) (iz štirih vogalov in sredine), ki sem jih kasneje uporabil za kalibracijo fotoaparata. Testno polje (Slika 4.3) predstavlja ravna plošča, na katero je nanešena mreža (15x21) enakih točk (pik), ki imajo z znane koordinate. Na vsakem izmed posnetkov mora testno polje pokrivati čim večjo površino. Ob nespremenjenih nastavitvah fotoaparata sem nato fasado zajel s tremi posnetki (Priloga A2) in sicer tako, da bo popolni ortofoto vseboval čim manj zakritih območij, s približno 70% preklopom pa bi bil eventuelno mogoč tudi kasnejši stereo zajem.



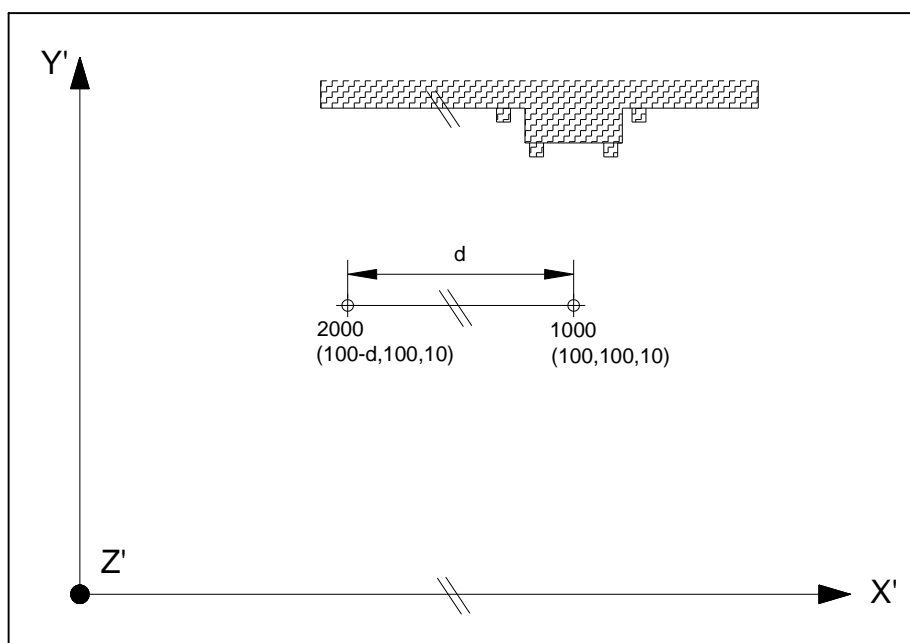
Slika 4.2: Plan fotografiranja



Slika 4.3: Testno polje

4.2.2 Geodetske meritve

V prvi fazi sem moral opredeliti lokalni koordinatni sistem, ki bo čimbolj poenostavil opis fasade z DMP. Najprej sem določil stojišče (1000), iz katerega je bilo možno zajeti vse načrtovane oslonilne in detajlne točke. Nato sem določil še orientacijsko točko (2000), ki je ležala na s fasado vzporedni liniji. Stojišču sem določil koordinate (100m, 100m, 10m), orientacijski točki pa (100m-d, 100m,10m) (d predstavlja horizontalno razdaljo med stojiščem in orientacijsko točko). Višina 10m se nanaša na center inštrumenta. S tem sem na višini inštrumenta določil lokalni desnosučni kartezični koordinatni sistem s horizontalno X' osjo, ki je vzporedna fasadi, s horizontalno Y' osjo, ki je pravokotna na fasado in z vertikalno Z' osjo. Vrednost 100m za X' in Y' koordinato stojišča sem privzel z namenom izoginitve negativnih koordinat oslonilnih in detajlnih točk.



Slika 4.4: Vzpostavitev lokalnega koordinatnega sistema (tloris)

Nato sem v eni krožni legi izmeril 8 oslonilnih točk, ki mi bodo služile za zunanjo orientacijo in 32 detajlnih točk (Slika 4.5), ki jih bom uporabil za izgradnjo DMP. Podatki o meritvah so v Prilogi B1.



Slika 4.5: Oslonilne (zeleno) in detajlne (rdeče) točke

4.3 Pisarniško delo

4.3.1 Izračun koordinat točk iz geodetskih meritev

Na osnovi koordinat stojišča in orientacijske točke sem iz meritev (smeri in dolžin) s programskim paketom Liscad SEE Version 6.2 izračunal koordinate oslonilnih in detajlnih točk (Priloga B2).

4.3.2 Kalibracija fotoaparata

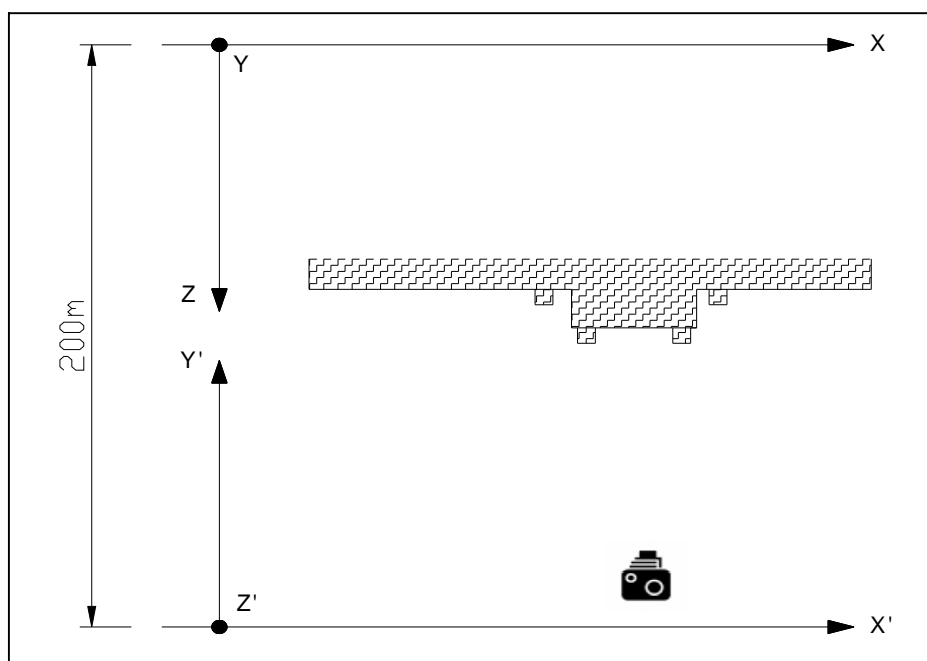
Kalibracijo sem izvedel v programskem paketu Modifoto, oz. v njegovih modulih Fotoanalist in FA_kalibracija. V modulu Fotoanalist sem izmeril slikovne koordinate točk (pik) na petih podobah testnega polja. Izmerjene in dane koordinate točk na testnem polju so vhodni podatek v modul FA_kalibracija. Slednji nam izračuna parametre notranje orientacije fotoaparata (Priloga C1), med katerimi so tudi konstanta fotoaparata, koordinati glavne točke in prva dva koeficienta radialne distorzije, ki ju FA_kalibracija uporabi za odpravo vpliva radialne distorzije na posamezni podobi fasade.

Kot se je kasneje izkazalo pri pisanju algoritmov za ortorektifikacijo, dobljena glavna točka ni bila uporabna za izdelavo ortofota. Vzrok je v tem, da nam modul FA_kalibracija izračuna glavno točko najboljše simetrije radialne distorzije, ki jo program uporabi za odpravo radialne distorzije iz posnetkov. Ta se je v tem primeru precej razlikuje od dejanske glavne točke oz. glavne točke avtokolimacije. Ker slednje ne poznam, sem v nadaljnjih postopkih predpostavil, da imata obe koordinati glavne točke vrednost nič.

4.3.3 Zunanja orientacija posnetkov

Pred samo orientacijo posnetkov sem koordinate oslonilnih (in detajlnih) točk pretvoril v nov koordinatni sistem, katerega osi so glede na fotoaparatusmerjene enako kot v aero primerih (Slika 4.6) in se s tem izognil prirejanju enačb (3-8) in (3-9). Pretvorbo sem opravil z enačbami (4-1):

$$\begin{aligned} X &= X' \\ Y &= Z' \\ Z &= 200m - Y' \end{aligned} \quad (4-1)$$



Slika 4.6: Razmerje med novim in starim koordinatnim sistemom (tloris)

Seznam pretvorjenih koordinat je v prilogi Prilogi B2.

Zunanjo orientacijo sem naredil s pomočjo digitalne fotogrametrične postaje DVP oz. njenim modulom Mono orientations, s katerim orientiramo vsak posamezen posnetek posebej. Vhodni podatki so parametri notranje orientacije fotoaparata in koordinate oslonilnih točk. Za vsak posnetek iščemo 6 parametrov zunanje orientacije: 3 koordinate projekcijskega centra (X_0, Y_0, Z_0) in 3 rotacije (ω, φ, κ) slikovne ravnine okrog posamezne osi izbranega koordinatnega sistema. To pomeni, da za vsak posnetek potrebujemo vsaj tri polne oslonilne točke. Ker večina oslonilnih točk leži v isti ravnini, lahko pride pri izračunu do singularne rešitve in slabe zanesljivosti parametrov zunanje orientacije. Zato sem za oslonilne točke uporabil še štiri detaljne točke, ki so bile razporejene po različnih ravninah. Razporeditev vseh uporabljenih točk po posnetkih je prikazana na sliki (4.7) (pokritost s posnetki zaradi perspektivnosti fotografije v ozadju ni prikazana povsem pravilno).



Slika 4.7: Razporeditev točk (po posnetkih), uporabljenih za izračun elementov zunanje orientacije

Parametri zunanje orientacije so v Prilogi C2.

4.3.4 Pisanje algoritmov za izdelavo popolnega ortofota

Zaradi postavitve koordinatnega sistema (vzporednost ravnine XY s fasado) sem DMP fasade lahko predstavil petimi ravnimi ploskvami, na katerih je koordinata Z konstantna (Slika 4.8). Predpostavil sem tudi, da so območja s konstantno koordinato Z pravokotne oblike. Ker je bilo vsako območje posneto z nadštevilnim številom točk, sem meje (koordinati X in Y) ter koordinato Z vsakega pravokotnega območja določil s sredinami odgovarjajočih koordinat. Pri tem sem izločil nekatere koordinate, ki so vidneje odstopale od povprečja.

Vse algoritme sem napisal v programu Matlab 6.5.0 R13 in so priloženi v Prilogi D.



Slika 4.8: Predstavitev DMP s petimi pravokotniki v prostoru

4.3.4.1 Algoritem za orto rektifikacijo

Tukaj sem s posrednim postopkom projekcije za piksele ortofota iskal barvne vrednosti na vhodnih posnetkih. Vhodni podatki so bili posnetek, ter njegovi parametri notranje in zunanje orientacije. Izbral sem si ločljivost 1 cm, ki glede na vhodne posnetke ni bistveno zmanjšala vizualne kakovosti. Algoritem tako s centimetrskimi koraki potuje po DMP, z »if« stavki ugotavlja koordinato Z ter s pomočjo enačb (3-8) in (3-9) projicira žarke nazaj na slikovno ravnino. Žarki v splošnem ne padejo v centre pikslov posnetka. Za prireditev barvne vrednosti posameznemu pikslu ortofota sem uporabil interpolacijo z metodo najbližjega sosredstva, s

katero sem na posnetku izbral barvno vrednost tistega piksla, katerega center je najbližje mestu vpada projiciranega žarka. Rezultat so trije ortoposnetki (Priloga E1), na katerih je viden pojav dvojnega kartiranja.

4.3.4.2 Algoritem za iskanje zakritih območij

Cilj tega koraka je, da območja, ki na posnetkih niso vidna in se na ortofotu izrazijo kot dvojno kartiranje, označimo s črno barvo. Za ta namen sem se poslužil metode kotov (poglavje 3.5.4). S slednjo lahko poljubno nastavljam natančnost iskanja, pa tudi njena implementacija v Matlabu je bila dokaj preprosta.

Pogoj za uspešnost algoritma je, da je začetna točka iskanja na DMP vidna iz projekcijskega centra. Taka točka je sigurno tista, v katero žarek iz projekcijskega centra na DMP pade pod pravim kotom. To v konkretnem primeru pomeni, da sem za X in Y koordinato privzel koordinati X_0 in Y_0 projekcijskega centra, Z koordinata pa je določena z DMP na položaju X_0 , Y_0 . Problem je bil edino pri desnem posnetku, ko sta X_0 in Y_0 koordinati projekcijskega centra padli izven območja DMP. V tem primeru sem nastavljal, da sem DMP navidezno podaljšal do koordinate X_0 in sicer tako kot, da se bela in siva stena nadaljujeta z nespremenjenima Z koordinatama. Tako algoritem na tem (navideznem) delu DMP ni mogel odkriti (napačnih) zakritih območij.

Koraki pomikanja po DMP so za vse tri posnetke enaki. Najprej sem določil 3' kotni pomik, ki naj bi tudi na največji oddaljenosti 10 m od začetne točke iskanja zagotovil med sosednjimi potmi iskanja razmik manjši od 1cm. Začetni pomik vzdolž poti iskanja je bil 1 cm. Ker so bile ob takih korakih pomikanja posamezne gruče zakritih pikslov napačno ugotovljene, sem kotni korak zmanjšal na 2', dolžinski pa na 0.5 cm. Tudi pri teh nastavitvah rezultat ni povsem zadovoljiv, saj so ponekod robovi zakritih območij zobčasti. Ta pojav je verjetno posledica uporabe metode najbližjega sosedstva, saj ga nisem uspel odpraviti niti z manjšimi koraki pomikanja.

Rezultat tega algoritma so ortofoti z označenimi zakritimi območji (Priloga E2) in pa karte vidnosti, ki jih uporabimo kot vhodne podatke v postopku mozaičenja.

4.3.4.3 Algoritem mozaičenja

S sestavo končnega izdelka (popolnega ortofota) iz posameznih ortofotov skušamo čimbolj odstraniti zakrita območja. V ta namen sem pikslom vhodnih ortofotov dodelil uteži na osnovi oddaljenosti od nadira, oz. v tem primeru od začetne točke iskanja opisane v poglavje 4.3.4.2. Bližje kot je piksel tej točki, večjo utež dobi, saj je bolj verjetno, da je viden iz projekcijskega centra. Pikslom na zakritih območjih, sem dodelil utež z vrednostjo nič in s tem dosegel, da je zakrit piksel izbran le v primeru, ko je zakrit na vseh treh ortoposnetkih. Nekatera območja so tako ostala črna, saj nekateri deli fasade (nad balkoni) niso bili pokriti z nobenim posnetkom. Za boljši izgled končnega izdelka bi bilo dobro zabrisati stične linije med deli mozaika, ki so zaradi neuskladitve histogramov vhodnih posnetkov na nekaterih delih dokaj izrazite. Popolni ortofoto obravnavanega objekta ter prikaz sestave mozaika sta priložena v Prilogi E3.

4.4 Uporabljena oprema

4.4.1 Seznam uporabljene opreme na terenu

Na terenu sem uporabil naslednjo opremo:

- fotogrametrična oprema:
 - fotoaparati Nikon D70,
 - testno polje,
- geodetska oprema:
 - tahimeter Leica TCRP1201 R300,
 - 2 stativa GST20 Professional,
 - merska prizma GPR121 Professional,
 - nosilec prizme GZR3,
 - ročni merski trak.

4.4.1.1 Lastnosti fotoaparata Nikon D70

Osnovni tehnični podatki fotoaparata:

- največja (efektivna) ločljivost: 6.24 (6.1) milijona pikselov,
- tipalo: CCD 23.7 x 15.6 mm,
- hitrost zaklopa: 30 – 1/8000 sekunde,
- največja velikost posnetkov: 3008 x 2000 piksel,
- format posnetka: NEF (RAW), JPEG,
- LCD zaslon: 1.8 , 130.000 pikselov,
- objektiv: Nikkor AF-S 18-70mm f/3.5 - 4.5 G ED.



Slika 4.9: Fotoaparat Nikon D70

4.4.1.2 Lastnosti tahimetra TCRP1201 R300

Osnovni tehnični podatki tahimetra:

- natančnost kotnih meritev (ISO 17123-3): do 1 ,
- natančnost dolžinskih meritev (17123-4):
 - s standardno prizmo: do 2mm; 2ppm,
 - brez prizme: do 3mm; 2ppm,
- doseg dolžinskih meritev:
 - s standardno prizmo: do 3.5 km,
 - brez prizme: čez 500m,
- dvoosni elektronski kompenzator,
- standardni, hitri ali sledilni način merjenja,
- ATR – samodejno precizno viziranje,
- PowerSearch – samodejno iskanje prizme.



Slika 4.10: Tahimeter Leica TCRP1201 R300

4.4.2 Seznam uporabljene opreme v pisarni

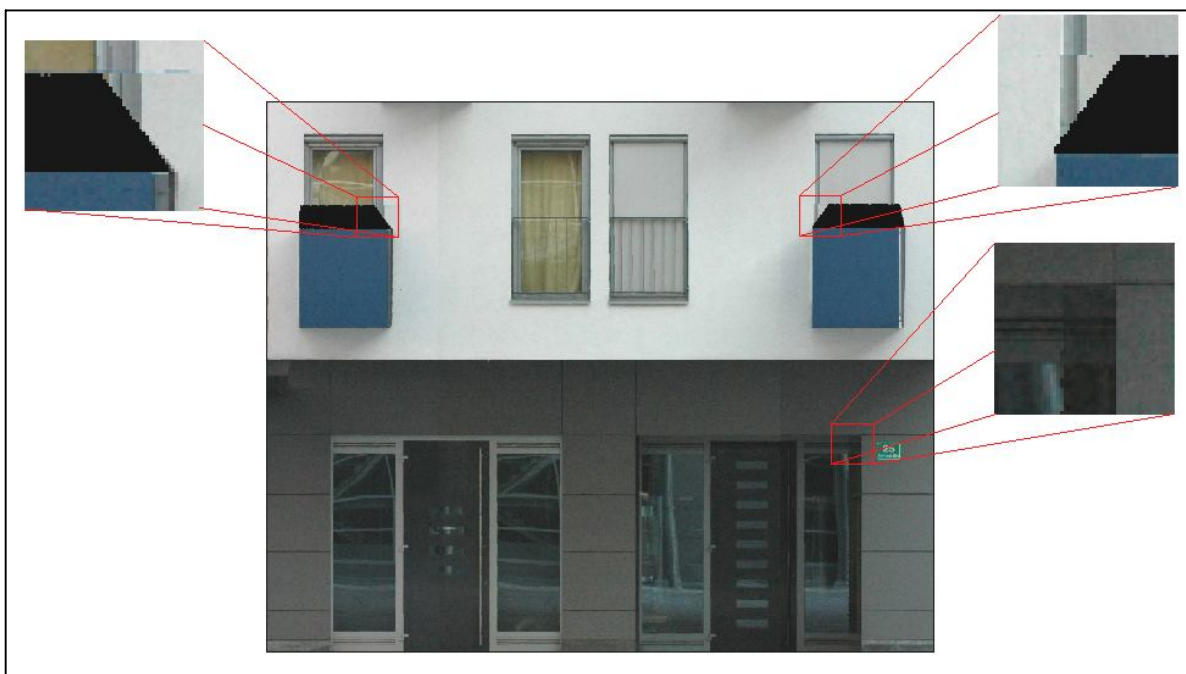
V pisarni sem uporabil naslednjo opremo:

- programski paket Liscad SEE Version 6.2,
- digitalno fotogrametrično postajo DVP oz. njen modul Mono orientations,
- programski paket Modifoto oz. njegova modula Fotoanalist in FA_kalibracija,
- programski paket Matlab 6.5.0 R13.

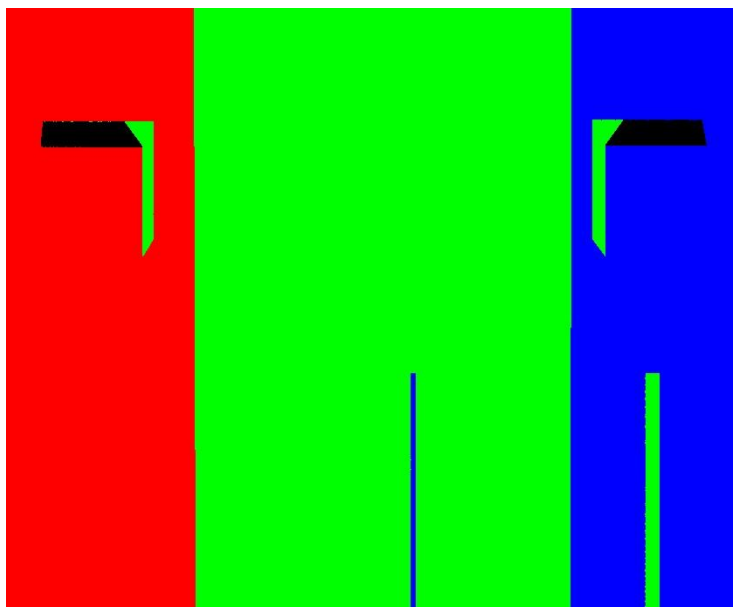
4.5 Komentar rezultatov praktičnega dela

Popolni ortofoto pridobljen v okviru praktičnega dela diplome ima določene pomanjkljivosti (Slika 4.11). Najbolj vizualno očitni sta črni območja nad balkonoma, ki jih s posnetki, zajetimi s tal, ni bilo mogoče zapolniti. Na stikih delov mozaika ob okvirih oken je viden manjši zamik. Za nesovpadanje na zunanjih robovih okvirja bi lahko krivili predpostavljeni koordinati glavne točke in omejeno natančnost DMP. Na notranjih robovih pa je zamik nastal, ker sem okni vključil v isto ravnino kot fasado. Zaradi te poenostavitve okvirja nista pravilno ortorektificirana in sta na srednjem ortoposnetku (iz katerega sta vzeta dela mozaika ob balkonih) ožja kot na levem oz. desnem ortoposnetku. Sestava mozaika je prikazana na Sliki 4.12 (rdeče – levi ortoposnetek, zeleno – srednji ortoposnetek, modro – desni ortoposnetek, črno – zakrita območja).

Nekoliko moteča je tudi vidnost stičnih linij med posameznimi deli mozaika, ki bi jo lahko odpravil s predhodno uskladitvijo histogramov vhodnih posnetkov, na popolnem ortofotu pa bi jo lahko še dodatno omilil s filtrom povprečenja.



Slika 4.11: Končni izdelek in njegove pomanjkljivosti



Slika 4.12: Sestava mozaika

5 ZAKLJUČEK

Popolni ortofoto z vključevanjem grajenih objektov v DMP v večji meri odstrani premike reliefa, ki so prisotni na (klasičnem) ortofotu. Zaradi njih nemodelirani objekti niso prikazani na pravem položaju in zakrivajo svojo okolico, kar povzroča težave pri kombiniranju z drugimi položajno pravilnimi sloji. Z razvojem tehnologije laserskega skeniranja in uporabo slikovnega ujemanja je zajem DMP, kot osnove za popolni ortofoto, veliko hitrejši in lažji, s čimer se je »pohod« popolnega ortofota še pospešil. Razvoj intenzivno poteka tudi na metodah za iskanje zakritih območij. Najprej so se pojavile t.i. rastrske metode (med katerimi je tudi Z-bafer), ki so za računalnik procesno in spominsko precej zahteven, glavni minus pa je z velikostjo piksla vhodnega posnetka omejena natančnost določanja zakritih območij. Zaradi tega se je razvilo več metod, ki so za računalnik manj zahtevne, natančnost iskanja pa je neodvisna od ločljivosti vhodnih posnetkov. Skupno tem metodam je, da za vhodne podatke potrebujejo le podatke o zunanji orientaciji posnetkov in DMP. Za zelo dobri rešitvi sta se izkazali metoda kotov in metoda višin [Bang, Habib, Shin, Kim, 2007]. Pri teh metodah je natančnost določitve zakritih območij odvisna predvsem od natančnosti DMP. Tudi DMP prikazan s TIN mrežo je lahko v primeru velikih in kompleksnih modelov (zajetih z laserskim skeniranjem) zahteven za računalnik. Zato je bila izpeljana hibridna mreža, ki predstavlja kompromis med natančnostjo (TIN) in enostavnostjo zapisa (celična mreža) 3D modela. Za kakovosten popolni ortofoto je potreben tudi učinkovit algoritem mozaičenja, ki ga zagotavlja kombinacija kriterijev bližine nadira in zakritih območij ter vpadnega kota projekcijskih žarkov na DMP.

Izdelavo popolnega ortofota v okviru te diplomske naloge sem zastavil tako, da je bila izvedba posameznih korakov čimbolj enostavna. Za to je bil pogoj objekt, ki se ga lahko enostavno opiše z ravninami (po možnosti pravokotnimi med sabo), saj mi tako ni bilo potrebno zgraditi TIN-a. S tem in z vzpostavitvijo koordinatnega sistema, ki ima koordinatne ravnine vzporedne objektovim, se zelo poenostavijo tudi algoritmi za izdelavo popolnega ortofota (ni potrebno uvažati TIN-a, enostaven opis ravnin v Matlab-u). Za iskanje zakritih območij sem uporabil metodo kotov, ki dovoljuje poljubno nastavitev natančnosti (velikost koraka) iskanja, hkrati pa jo je bilo v Matlab-u enostavno zapisati. Dobljena zakrita območja

so tako določena zelo natančno, na nekaterih delih nazobčane meje pa so najverjetneje posledica uporabe interpolacije z metodo najbližjega sosedstva. Tudi najbolj preprost kriterij (bližina nadira), ki sem ga uporabil za mozaičenje, se je v tem primeru izkazal za popolnoma zadovoljivega. Z izbranim objektom in metodami sem tako kljub njihovi enostavnosti lahko nazorno prikazal glavne značilnosti in težave v treh bistvenih korakih izdelave popolnega ortofota: orto rektifikacije, iskanja zakritih območij in mozaičenja.

VIRI

- Albertz, J., Wiedemann, A. 1999. From analogue to digital close-range photogrammetry. V: Altan, O., Gründig, L. (ur.). First Turkish-German Joint Geodetic Days. Istanbul, 27-29 September 1995. Istanbul, Istanbul Technical University: str. 245-253
<http://www.al-wie.de/lit/IstCR.pdf> (24.10.2007)
- Amhar F., Jansa J., Ries C. 1998. The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with conventional DTM. IAPRS, 32,4: 16-22.
<http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/jansa57.pdf> (16.05.2007)
- Balletti C., Guerra F., Lingua A., Rinaudo F. 2003. True digital orthophoto of San Marco basilica in Venice. IAPRSSIS, Vol. XXXIV, Part 5, W12: 43-48.
http://www.commission5.isprs.org/wg4/workshop_ancona/proceedings/09.pdf (16.05.2007)
- Bang K. I., Habib A. F., Shin S. W., Kim K.O. 2007. Comparative Analysis of Alternative Methodologies for True Ortho-photo Generation from High Resolution Satellite Imagery. V: ASPRS 2007 Annual Conference. Tampa, Florida.
www.ssmatics.com/TrueOrtho-photoGeneration_ASPRS07_ve.pdf (21.09.2007)
- Bitenc M. 2007. Analiza podatkov in izdelkov zračnega laserskega skeniranja na projektu Neusidler See. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Geodetska smer: 123 str.
- Ettarid M., Mhand A. A., Aloui R. 2005. Digital True Orthophotos Generation. V: FIG Working Week 2005 and GSDI-8 - From Pharaohs to Geoinformatics. Cairo, Egypt.
http://www.fig.net/pub/cairo/papers/ts_27/ts27_05_ettarid_et_al.pdf (21.09.2007)
- Gorjup, Z., 2001. Temelji fotogrametrije in postopki izvedenja, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 142 str.
- Kosmatin Fras, M. 2004. Vpliv kakovosti vhodnih podatkov na kakovost ortofota. Geodetski vestnik 48, 2: 167-178.
- Kosmatin Fras M., Drobne S., Gregorič H., Oven J. 2006. Raziskave uporabe ortofota (DOF5) v praksi. Geodetski vestnik 50, 2: 258-269.
- Kraus, K., Waldhäusl, P., Stewardson, P. (prev.) 1993. Photogrammetry: Fundamentals and Standard Processes, Volume 1. Četrta izdaja Bonn, Dümmler Verlag: 397 str.
- Kraus K., Otepka J., Fritsch D. (ur.). 2005. DTM Modelling and Visualization – The SCOP Approach. V: Photogrammetric week 05. Germany, Stuttgart: 241-252.
http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/kk_jo_photogrammetric_week_2005.pdf (30.10.2007)
- Kuzmin Y., Korytnik S., Long O. 2004. Polygon-based orthophoto generation. IAPRS, Vol. XXXV-B4. Istanbul, Turkey: 529-531.
<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm4/papers/405.pdf> (09.011.2007)

Mencinger, S. 2005. Primerjava različnih postopkov fotogrametričnega dokumentiranja stavbnih fasad na izbranem primeru. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Geodetska smer: 92 str.

Nielsen Odegaard, M. 2004. True orthophoto generation. Master Thesis. Kgs. Lyngby, Technical University of Denmark, Informatics and Mathematical Modelling: 126 str.
http://www.iter.dk/projects/docs/imm-thesis-2004-50_web.pdf (01.05.2007).

Oda K., Lu W., Uchida O., Doihara T. 2004. Triangle-based visibility analysis and true orthoimage generation. IAPRS, XXXV-B3. Istanbul, Turkey: 623-626.
<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/343.pdf> (09.11.2007)

Schickler W., Thorpe A. 1998. Operational procedure for automatic true orthophoto generation. IAPRS, Vol. 32/4. Stuttgart, Germany: 527-532.
<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/commIV/schickler58.pdf> (16.05.2007)

Pateraki M. 2000. Matching methods for automatic DTM generation. V: Geodaetisches Seminar SS/2000 – Internal report IGP (Institut für Geodäsie und Photogrammetrie). Zürich, Switzerland.
<http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/maria/matching.pdf> (18.10.2007)

Pateraki M. 2006. Image matching, point transfer, DSM generation. International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling". Crete, Greece.
http://www.photogrammetry.ethz.ch/summerschool/pdf/06_Maria_Matching.pdf (24.10.2007)

Rau J. Y., Chen N. Y., Chen L. C. 2002. True Orthophoto Generation of Built-up Areas Using Multi-View Images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Volume 68, Number 6: 581-588.
<http://www.asprs.org/publications/pers/2002journal/june/abstracts.html#581> (06.11.2007)

Wiedemann A., Rodehorst V. 1997. Towards automation in architectural photogrammetry using digital image processing. CIPA International Symposium '97. Göteborg, Sweden.
<http://www.fpk.tu-berlin.de/~albert/lit/CIPA97.pdf> (24.11.2007)

NODIC GmbH - Nordostdeutsche Ingenieurconsult
http://www.nodic.de/images/ortho_web.jpg (19.11.2007)

Colorado school of mines
http://egweb.mines.edu/faculty/tvincent/Welding/fundamentals_of_stereo_computer.htm
(29.11.2007)

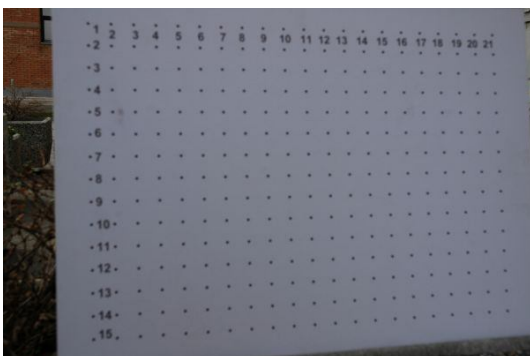
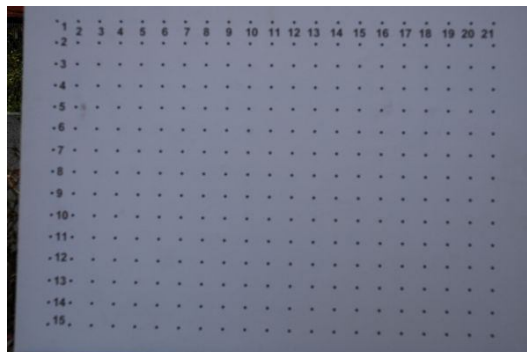
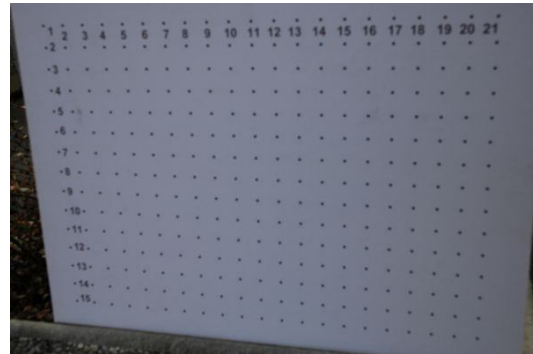
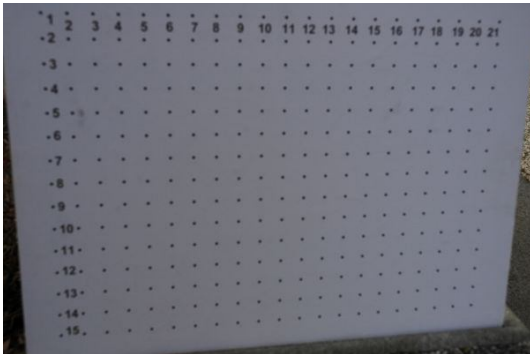
USDA Forest Service, University of Washington
http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/lidar_technology.htm (03.12.2007)

Riegl Laser Measurement Systems
<http://www.riegl.com> (22.12.2007)

PRILOGE

Priloga A: Fotografski zajem

Priloga A1: Pet posnetkov testnega polja



Priloga A2: Trije posnetki fasade (levi, srednji in desni)



Priloga B: Geodetski zajem

Priloga B1: Terenski zapisnik meritev

1	010	Leica TPS-1100 Series	JOZE.raw				
2	011	19. December 2007					
3	051	GR					
4	053	M					
5	021	XY					
5	061	1000	100.000	100.000	10.000		
5	061	2000	78.403	100.000	10.000		
5	102		1000	1.684	1.684	2000	0.000
6	111		2000	0.00000	99.98720	0.0000	0000
7	111		2001	0.00250	99.98730	21.5970	0000
9	111		1	71.32300	80.67740	20.8880	0000
10	111		2	75.81430	104.94450	19.4090	0000
11	111		3	82.97890	80.67370	16.3020	0000
12	111		4	83.70550	104.80980	18.7620	0000
13	111		5	105.52610	80.08450	15.8230	0000
14	111		6	108.20280	105.25590	18.1820	0000
15	111		7	118.67630	77.26320	20.0180	0000
16	111		8	120.25570	103.59110	19.0970	0000
17	111		100	83.20870	79.23650	16.4070	0000
18	111		101	105.30120	78.61160	15.9330	0000
19	111		102	77.17790	84.52180	19.7310	0000
20	111		103	81.97080	84.21350	14.8680	0000
21	111		104	81.97950	89.32500	14.6150	0000
22	111		105	77.19450	89.67050	14.9650	0000
23	111		106	83.39430	85.23970	15.9580	0000
25	111		107	83.33020	90.24770	15.7190	0000
26	111		108	78.83820	90.41420	16.0570	0000
27	111		109	105.89950	83.52690	14.3580	0000
28	111		110	111.11080	83.71120	14.4960	0000
29	111		111	111.14160	89.14770	14.2310	0000
30	111		112	105.88580	89.03460	14.1000	0000
31	111		113	110.28260	89.98630	15.3880	0000
32	111		114	105.40500	89.93060	15.2500	0000
33	111		115	105.44960	84.69900	15.4980	0000
34	111		116	111.83810	91.61410	15.3890	0000
35	111		117	109.93760	92.95530	18.3000	0000
36	111		118	109.93710	105.78410	18.1980	0000
37	111		119	77.35240	91.95240	16.1250	0000
38	111		120	80.84300	93.19880	18.9160	0000
39	111		121	80.84490	105.06720	18.8710	0000
40	111		122	80.84510	105.63430	18.8170	0000
44	111		123	106.72440	96.24480	18.1010	0000
45	111		124	106.70270	105.83110	18.0760	0000
46	111		125	96.66300	96.24710	18.0250	0000
47	111		126	96.67350	105.30160	18.0550	0000
48	111		127	96.67350	105.86520	18.0010	0000
49	111		128	106.14670	105.11390	20.5920	0000
50	111		129	106.14780	96.28860	19.6040	0000
51	111		130	97.13650	96.50610	20.5480	0000
52	111		131	97.13510	104.67330	20.6000	0000

Priloga B2: Koordinate izmerjenih točk v obeh lokalnih koordinatnih sistemih

TOČKA	X'[m]	Y'[m]	Z'[m]	X[m]	Y[m]	Z[m]
1	91,322	117,945	16,243	91,322	16,243	82,055
2	92,824	117,971	8,494	92,824	8,494	82,029
3	95,890	115,004	14,873	95,890	14,873	84,996
4	95,264	118,099	8,584	95,264	8,584	81,901
5	101,305	114,998	14,870	101,305	14,870	85,002
6	102,328	117,970	8,501	102,328	8,501	82,030
7	105,423	117,954	16,998	105,423	16,998	82,046
8	105,965	118,110	8,923	105,965	8,923	81,890
100	95,948	115,005	15,257	95,948	15,257	84,995
101	101,251	114,990	15,253	101,251	15,253	85,010
102	93,281	117,933	14,750	93,281	14,750	82,067
103	95,972	113,839	13,649	95,972	13,649	86,161
104	95,975	113,837	12,439	95,975	12,439	86,163
105	94,822	113,831	12,418	94,822	12,418	86,169
106	95,995	115,006	13,667	95,995	13,667	84,994
107	95,979	115,005	12,399	95,979	12,399	84,995
108	94,820	115,006	12,409	94,820	12,409	84,994
109	101,284	113,820	13,674	101,284	13,674	86,180
110	102,435	113,811	13,669	102,435	13,669	86,189
111	102,442	113,810	12,414	102,442	12,414	86,190
112	101,282	113,832	12,417	101,282	12,417	86,168
113	102,444	115,000	12,410	102,444	12,410	85,000
114	101,277	115,005	12,402	101,277	12,402	84,995
115	101,287	114,997	13,689	101,287	13,689	85,003
116	102,821	114,993	12,021	102,821	12,021	85,007
117	102,828	117,967	12,021	102,828	12,021	82,033
118	102,817	117,903	8,349	102,817	8,349	82,097
119	94,429	114,995	12,033	94,429	12,033	85,005
120	94,425	117,963	12,017	94,425	12,017	82,037
121	94,425	117,966	8,500	94,425	8,500	82,034
122	94,445	117,901	8,337	94,445	8,337	82,099
123	101,905	117,969	11,067	101,905	11,067	82,031
124	101,892	117,901	8,347	101,892	8,347	82,099
125	99,057	117,969	11,062	99,057	11,062	82,031
126	99,060	117,968	8,498	99,060	8,498	82,032
127	99,064	117,900	8,344	99,064	8,344	82,100
128	101,979	120,430	8,348	101,979	8,348	79,570
129	101,887	119,480	11,142	101,887	11,142	80,520
130	99,077	120,496	11,127	99,077	11,127	79,504
131	99,076	120,524	8,489	99,076	8,489	79,476
1000	100,000	100,000	10,000	100,000	10,000	100,000
2000	78,403	100,000	10,000	78,403	10,000	100,000
2001	78,403	100,001	10,004	78,403	10,004	99,999

Priloga C: Orientacijski parametri

Priloga C1: Parametri notranje orientacije

3621.445425 0.799060 998.596677
0.000000 3622.776420 1486.281252
0.000000 0.000000 1.000000

-0.071130 0.252720

RMSE = 0.511210

0.971629 -0.030072 -0.234591
-0.017227 0.980250 -0.197009
0.235882 0.195460 0.951922
-171.523840 -231.479649 656.255238

0.965472 -0.039683 -0.257466
-0.011712 0.980718 -0.195076
0.260243 0.191356 0.946391
-165.108922 -239.255946 662.496547

0.972281 0.050989 -0.228187
0.006030 0.970139 0.242474
0.233736 -0.237129 0.942941
-184.952473 -252.081477 866.805388

0.999001 -0.010787 0.043369
0.021261 0.968295 -0.248902
-0.039309 0.249575 0.967557
-188.181171 -232.536305 744.202257

0.995764 0.014923 0.090728
-0.033768 0.977143 0.209886
-0.085522 -0.212061 0.973507
-188.183740 -273.314994 848.038052

Zgornji podatki predstavljajo izpis iz izhodne datoteke modula FA_kalibracija. Izmed teh podatkov sem za nadaljnje korake uporabil le rdeči vrednost, ki predstavljata vrednosti konstante fotoaparata v smereh osi koordinatnega sistema podobe. Konstanto sem izračunal kot aritmetično sredino teh dveh vrednosti. Enota je piksel. Rumeno obarvani (vrednosti prvih dveh koeficientov v polinomski enačbi radialne distorzije) in zeleno obarvani (koordinati glavne točke najboljše simetrije – enota je piksel) številki modul FA_kalibracija uporabi za odpravo vpliva radialne distorzije na zajetih podobah.

Priloga C2: Parametri zunanje orientacije

Poročilo o zunanji orientaciji za levi posnetek:

RESULTS OF THE DVP MONO ORIENTATIONS
(23-01-2008 13:40:12)
G:\TOF\54_0.DAT

DESCRIPTION :

Image used

Image name : G:\TOF\DSC_0054_R.TIF
Image date : 2000/7/7
Image time : 11:33:32
Image size : 18169446

Focal : 3622.100000

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 23-01-2008
Time : 13:41:28

Results of transformations

Images

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	-1504.500	1000.500	-0.077	-0.115	0.000	-0.000
2	1504.500	1000.500	0.077	-0.115	0.000	-0.000
3	1504.500	-1000.500	0.077	0.115	0.000	0.000
4	-1504.500	-1000.500	-0.077	0.115	0.000	0.000

Space resection

Date : 23-01-2008
Time : 13:49:57
Photo standard error : 0.500000
Ground standard error : 0.005000, 0.005000, 0.005000
Ground file :

Estimated accuracy of ground coordinates

No	Std Error X	Std Error Y	Std Error Z
1	0.004	0.004	0.005
2	0.003	0.003	0.005
3	0.003	0.003	0.005
4	0.003	0.003	0.005
5	0.004	0.004	0.005
6	0.004	0.004	0.005
105	0.004	0.004	0.005
119	0.003	0.003	0.005

Exterior orientation results

	First		Afterwards	
	Value	Std-Error	Value	Std-Error
XCentre :	94.498	0.018	95.044	0.241
YCentre :	10.006	0.019	11.948	0.241
ZCentre :	100.723	0.008	102.598	0.241
Omega :	6°42' 6"	0° 3'42"	0° 0' 0"	3° 0' 0"
Phi :	-1°59'18"	0° 3'24"	0° 0' 0"	3° 0' 0"
Kappa :	0°48'47"	0° 1'29"	1°28'45"	5° 0' 0"

Ground control point coordinates

No	Xphoto	Yphoto	Residual X	Residual Y
1	-716.717	767.904	0.126	0.426
2	-467.957	-720.160	0.139	-0.310
3	193.571	665.667	0.162	0.147
4	12.063	-704.162	0.376	-0.223
5	1388.120	643.920	-0.150	-0.353
6	1386.120	-735.158	-0.100	0.277
105	-40.689	172.853	-0.436	-0.139
119	-140.943	41.745	-0.018	0.177

Image and ground coordinates table

No	X Pixels	Y Pixels	X Ground	Y Ground	Z Ground
1	788.750	233.250	91.322	16.243	82.055
2	1037.500	1721.500	92.824	8.494	82.029
3	1699.000	335.500	95.890	14.873	84.996
4	1517.500	1705.500	95.264	8.584	81.901
5	2893.500	357.250	101.305	14.870	85.002
6	2891.500	1736.500	102.328	8.501	82.030
105	1464.750	828.375	94.822	12.418	86.169
119	1364.500	959.500	94.429	12.033	85.005

Standard error on planimetric ground coordinates at given Z

No	Std Error X	Std Error Y
1	0.002	0.011
2	0.004	-0.008
3	0.004	0.004
4	0.009	-0.006
5	-0.005	-0.010
6	-0.003	0.007
105	-0.012	-0.004
119	-0.001	0.005

Poročilo o zunanji orientaciji za srednji posnetek:

RESULTS OF THE DVP MONO ORIENTATIONS
 (23-01-2008 14:22:06)
 G:\TOF_0\55_0.DAT

DESCRIPTION :

Image used

Image name : G:\TOF_0\DSC_0055_R.TIF
 Image date : 2000/7/7
 Image time : 11:33:30
 Image size : 18656852

Focal : 3622.100000

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 23-01-2008
 Time : 14:23:09

Results of transformations

Images

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	-1504.500	1000.500	-0.077	-0.115	0.000	-0.000
2	1504.500	1000.500	0.077	-0.115	0.000	-0.000
3	1504.500	-1000.500	0.077	0.115	0.000	0.000
4	-1504.500	-1000.500	-0.077	0.115	0.000	0.000

Space resection

Date : 23-01-2008
 Time : 14:45:51
 Photo standard error : 0.500000
 Ground standard error : 0.005000, 0.005000, 0.005000
 Ground file :

Estimated accuracy of ground coordinates

No	Std Error X	Std Error Y	Std Error Z
1	0.023	0.022	0.029
2	0.020	0.019	0.029
3	0.017	0.017	0.029
4	0.018	0.018	0.029
5	0.017	0.017	0.029
6	0.018	0.018	0.029
7	0.023	0.022	0.029
8	0.022	0.020	0.029
105	0.018	0.019	0.029
112	0.019	0.018	0.029
116	0.018	0.017	0.029
119	0.017	0.017	0.029

Exterior orientation results

	First		Afterwards	
	Value	Std-Error	Value	Std-Error
XCentre :	98.677	0.013	98.551	0.246
YCentre :	10.018	0.013	11.559	0.246
ZCentre :	100.969	0.005	103.050	0.246
Omega :	5°22'45"	0° 2'35"	0° 0' 0"	3° 0' 0"
Phi :	0°27'40"	0° 2'19"	0° 0' 0"	3° 0' 0"
Kappa :	0°43'26"	0° 0'59"	2°22'58"	5° 0' 0"

Ground control point coordinates

No	Xphoto	Yphoto	Residual X	Residual Y
1	-1330.243	839.395	0.368	0.113
2	-1109.734	-620.922	0.178	-0.199
3	-576.711	743.907	-0.170	0.187
4	-633.464	-608.674	-0.003	-0.078
5	620.338	730.909	0.177	0.114
6	727.593	-646.919	0.275	0.132
7	1298.616	949.881	-0.034	-0.404
8	1425.622	-573.928	-0.322	0.440
105	-896.725	255.218	-0.347	-0.264
112	663.340	235.471	0.073	-0.176
116	965.103	100.737	0.147	-0.100
119	-922.476	124.734	-0.247	0.234

Image and ground coordinates table

No	X Pixels	Y Pixels	X Ground	Y Ground	Z Ground
1	175.250	161.750	91.322	16.243	82.055
2	395.750	1622.250	92.824	8.494	82.029
3	928.750	257.250	95.890	14.873	84.996
4	872.000	1610.000	95.264	8.584	81.901
5	2125.750	270.250	101.305	14.870	85.002
6	2233.000	1648.250	102.328	8.501	82.030
7	2804.000	51.250	105.423	16.998	82.046
8	2931.000	1575.250	105.965	8.923	81.890
105	608.750	746.000	94.822	12.418	86.169
112	2168.750	765.750	101.282	12.417	86.168
116	2470.500	900.500	102.821	12.021	85.007
119	583.000	876.500	94.429	12.033	85.005

Standard error on planimetric ground coordinates at given Z

No	Std Error X	Std Error Y
1	0.009	0.002
2	0.005	-0.005
3	-0.005	0.005
4	-0.000	-0.002
5	0.005	0.003
6	0.007	0.003
7	-0.002	-0.011
8	-0.009	0.011
105	-0.010	-0.008
112	0.002	-0.005
116	0.004	-0.003
119	-0.007	0.006

Poročilo o zunanji orientaciji za desni posnetek:

RESULTS OF THE DVP MONO ORIENTATIONS
 (23-01-2008 14:48:10)
 G:\TOF_0\56_0.DAT

DESCRIPTION :

Image used

Image name : G:\TOF_0\DSC_0056_R.TIF
 Image date : 2000/7/7
 Image time : 11:33:24
 Image size : 18469574

Focal : 3622.100000

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 23-01-2008
 Time : 14:49:06

Results of transformations

Images

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	-1504.500	1000.500	-0.077	-0.115	0.000	-0.000
2	1504.500	1000.500	0.077	-0.115	0.000	-0.000
3	1504.500	-1000.500	0.077	0.115	0.000	0.000
4	-1504.500	-1000.500	-0.077	0.115	0.000	0.000

Space resection

Date : 23-01-2008
 Time : 14:56:24
 Photo standard error : 0.500000
 Ground standard error : 0.005000, 0.005000, 0.005000
 Ground file :

Estimated accuracy of ground coordinates

No	Std Error X	Std Error Y	Std Error Z
3	0.004	0.004	0.005
4	0.004	0.004	0.005
5	0.003	0.003	0.005
6	0.003	0.003	0.005
7	0.004	0.004	0.005
8	0.004	0.004	0.005
112	0.004	0.004	0.005
116	0.003	0.003	0.005

Exterior orientation results

	First		Afterwards	
	Value	Std-Error	Value	Std-Error
XCentre :	103.093	0.018	102.474	0.218
YCentre :	10.011	0.019	12.145	0.218
ZCentre :	101.002	0.008	100.789	0.218
Omega :	7° 6'24"	0° 3'37"	0° 0' 0"	3° 0' 0"
Phi :	2°20' 7"	0° 3'19"	0° 0' 0"	3° 0' 0"
Kappa :	359°42'26"	0° 1'28"	350°59'45"	5° 0' 0"

Ground control point coordinates

No	Xphoto	Yphoto	Residual X	Residual Y
3	-1413.246	607.924	0.049	-0.083
4	-1335.993	-723.910	0.016	-0.048
5	-246.448	620.422	-0.154	0.152
6	3.813	-746.157	-0.188	-0.083
7	574.336	851.894	0.176	0.123
8	708.842	-664.167	-0.176	0.134
112	-288.699	132.233	0.062	-0.140
116	85.316	4.499	0.207	-0.073

Image and ground coordinates table

No	X Pixels	Y Pixels	X Ground	Y Ground	Z Ground
3	92.250	393.250	95.890	14.873	84.996
4	169.500	1725.250	95.264	8.584	81.901
5	1259.000	380.750	101.305	14.870	85.002
6	1509.250	1747.500	102.328	8.501	82.030
7	2079.750	149.250	105.423	16.998	82.046
8	2214.250	1665.500	105.965	8.923	81.890
112	1216.750	869.000	101.282	12.417	86.168
116	1590.750	996.750	102.821	12.021	85.007

Standard error on planimetric ground coordinates at given Z

No	Std Error X	Std Error Y
3	0.002	-0.002
4	0.000	-0.001
5	-0.004	0.004
6	-0.005	-0.002
7	0.004	0.003
8	-0.004	0.003
112	0.002	-0.004
116	0.006	-0.002

Priloga D: Algoritmi iz Matlaba

Priloga D1: Algoritmi za orto rektifikacijo in določanje zakritih območij

Algoritem za levi posnetek:

```
%%%%%%%%ORTO REKTIFIKACIJA

%VHODNI PODATKI
%Uvoz podobe
vhodna=imread('DSC_0054_r.tif');

%Notranja orientacija
c= 3622.1; %enota je piksel
x0= 0; %enota je piksel, pretvorba iz KSa podobe v slikovni KS
y0= 0;

%Zunanja orientacija
X0= 94.498;
Y0= 10.006;
Z0= 100.723;
o= (6+42/60+6/3600)*pi/180;
fi= -(1+59/60+18/3600)*pi/180;
k= (48/60+47/3600)*pi/180;

%IZRAČUN

%Izračun rotacijske matrike
Ro = [1, 0, 0;
      0, cos(o), -sin(o);
      0, sin(o), cos(o)];
Rfi = [cos(fi), 0, sin(fi)
      0, 1, 0
      -sin(fi), 0, cos(fi)];
Rk = [ cos(k), -sin(k), 0
      sin(k), cos(k), 0
      0, 0, 1 ];

R = Ro*Rfi*Rk;

%Projekcija žarkov iz DMP na slikovno ravnino (posredni postopek)

p=0; %indeks piksla OF
r=0;

for Y=15.255:-0.01:8.344

    p=p+1;
    r=0;
    for X=94.427:0.01:101.285

        if X >= 94.427 & X <=102.824 & Y >= 12.023 & Y <= 15.255 %cela bela fasada
            Z = 85.004;
        end

        if X >=94.821 & X <=95.987 & Y >=12.411 & Y <=13.667 %levi balkonček
            Z = 86.169;
        end

        if X >=101.283 & X <=102.439 & Y >=12.411 & Y <=13.682 %desni balkonček
            Z = 86.189;
        end
    end
end
```

```
if X >=94.427 & X <=102.824 & Y >=8.344 & Y <=12.023           %cela siva fasada
    Z = 82.033;
end

if X >=99.059 & X <=101.899 & Y >=8.344 & Y <=11.065         %vhod
    Z = 79.531;
end

x=x0-c*(R(1,1)*(X-X0)+R(2,1)*(Y-Y0)+R(3,1)*(Z-Z0))/(R(1,3)*(X-X0)+R(2,3)*...
(Y-Y0)+R(3,3)*(Z-Z0));
y=y0-c*(R(1,2)*(X-X0)+R(2,2)*(Y-Y0)+R(3,2)*(Z-Z0))/(R(1,3)*(X-X0)+R(2,3)*...
(Y-Y0)+R(3,3)*(Z-Z0));

x=round(x+((size(vhodna,2))/2+0.5)); %pretvorba iz slikovnega v KS podobe
y=round(-y+((size(vhodna,1))/2+0.5)); %in interpolacija z metodo najbližjega sosedstva

r=r+1;

OF(p,r,1)=vhodna(y,x,1);
OF(p,r,2)=vhodna(y,x,2);
OF(p,r,3)=vhodna(y,x,3);

end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ISKANJE ZAKRITIH OBMOČIJ OZ. VIDNOSTI (METODA KOTOV)

vidnost = 255*ones(size(OF,1),size(OF,2));

for delta=0:2:21599           %rotacijski korak je korak 2'
    delta=delta*pi/180/60;
    alfa_korak_1=-pi/2;       %začetni vrednosti - if stavek bo v prvem koraku sigurno zavržen
    alfa_maks=-pi/2;

    for d=0:0.005:11           %vzdolž radialne smeri je korak 0.5cm
                                %11m (diag. fasade), da je sigurno zajeta cela fasada (zanka se
                                %na mejah prekine z break stavkom)

        X=X0+d*sin(delta);
        Y=Y0+d*cos(delta);

        if X < 94.427 || X > 101.285 || Y < 8.344 || Y > 15.255           %meje objekta
            break
        end
        if X >= 94.427 && X <=102.824 && Y >= 12.023 && Y <= 15.255         %cela bela fasada
            Z = 85.004;
        end

        if X >=94.821 && X <=95.987 && Y >=12.411 && Y <=13.667           %levi balkonček
            Z = 86.169;
        end

        if X >=101.283 && X <=102.439 && Y >=12.411 && Y <=13.682         %desni balkonček
            Z = 86.189;
        end

        if X >=94.427 && X <=102.824 && Y >=8.344 && Y <=12.023           %cela siva fasada
            Z = 82.033;
        end

        if X >=99.059 && X <=101.899 && Y >=8.344 && Y <=11.065         %vhod
            Z = 79.531;
        end

        alfa=atan(d/(Z0-Z));

        if alfa < alfa_korak_1           %odkrije prvi zakriti piksel na poti iskanja
            alfa_maks=alfa_korak_1;
            OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),1)=0; %pretvorba iz prostorskega
```

```
        OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),2)=0; %(XY) v KS podobe in
        OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),3)=0; %interpolacija z metodo
                                                %najbližjega sosedstva
        vidnost(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)))=0;
    end

    if alfa <= alfa_maks          %odkriva preostale zakrite piklase na poti iskanja do roba
                                %zakritega območja
        OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),1)=0;
        OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),2)=0;
        OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),3)=0;

        vidnost(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)))=0;
    end

    alfa_korak_1=alfa;
end
end

%Zapis izhodnih podob
imwrite(OF,'OF_54.tif','tif');
imwrite(vidnost,'vidnost_54.tif','tif');

clear
```

Algoritem za srednji posnetek:

```
%%%%%%ORTO REKTIFIKACIJA

%%VHODNI PODATKI
%Uvoz podobe
vhodna=imread('DSC_0055_r.tif');

%Notranja orientacija
c= 3622.1;          %nota je piksel
x0= 0;             %nota je piksel, pretvorba iz KSa podobe v slikovni KS
y0= 0;

%Zunanja orientacija
X0= 98.677;
Y0= 10.018;
Z0= 100.969;
o= (5+22/60+45/3600)*pi/180;
fi= (27/60+40/3600)*pi/180;
k= (43/60+26/3600)*pi/180;

%IZRAČUN

%Izračun rotacijske matrike
Ro = [1, 0, 0;
      0, cos(o), -sin(o);
      0, sin(o), cos(o)];
Rfi = [cos(fi), 0, sin(fi)
       0, 1, 0
       -sin(fi), 0, cos(fi)];
Rk = [ cos(k), -sin(k), 0
      sin(k), cos(k), 0
      0, 0, 1 ];

R = Ro*Rfi*Rk;
%Projekcija žarkov iz DMP na slikovno ravnino

p=0;                %indeks piksla OF
r=0;

for Y=15.255:-0.01:8.344
    p=p+1;
    r=0;
    for X=94.427:0.01:102.824
```



```
if X >= 94.427 && X <=102.824 && Y >= 12.023 && Y <= 15.255      %cela bela fasada
    Z = 85.004;
end

if X >=94.821 && X <=95.987 && Y >=12.411 && Y <=13.667          %levi balkonček
    Z = 86.169;
end

if X >=101.283 && X <=102.439 && Y >=12.411 && Y <=13.682        %desni balkonček
    Z = 86.189;
end

if X >=94.427 && X <=102.824 && Y >=8.344 && Y <=12.023          %cela siva fasada
    Z = 82.033;
end

if X >=99.059 && X <=101.899 && Y >=8.344 && Y <=11.065        %vhod
    Z = 79.531;
end

x=x0-c*(R(1,1)*(X-X0)+R(2,1)*(Y-Y0)+R(3,1)*(Z-Z0))/(R(1,3)*(X-X0)+R(2,3)*...
    (Y-Y0)+R(3,3)*(Z-Z0));
y=y0-c*(R(1,2)*(X-X0)+R(2,2)*(Y-Y0)+R(3,2)*(Z-Z0))/(R(1,3)*(X-X0)+R(2,3)*...
    (Y-Y0)+R(3,3)*(Z-Z0));

x=round(x+((size(vhodna,2))/2+0.5)); %pretvorba v KS podobe in interpolacija z metodo
y=round(-y+((size(vhodna,1))/2+0.5)); %najbližjega sosedstva

r=r+1;

OF(p,r,1)=vhodna(y,x,1);
OF(p,r,2)=vhodna(y,x,2);
OF(p,r,3)=vhodna(y,x,3);

end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ISKANJE ZAKRITIH OBMOČIJ OZ. VIDNOSTI (METODA KOTOV)

vidnost = 255*ones(size(OF,1),size(OF,2));

for delta=0:2:21599      %rotacijski korak je korak 2'
    delta=delta*pi/180/60;
    alfa_korak_1=-pi/2;  %začetni vrednosti - if stavek bo v prvem koraku sigurno zavržen
    alfa_maks=-pi/2;

    for d=0:0.005:11      %vzdolž radialne smeri je korak 0.5cm;
        %11m, da je sigurno zajeta cela fasada (meje so določene v zanki
        %z X in Y koordinato)

        X=X0+d*sin(delta);
        Y=Y0+d*cos(delta);

        if X < 94.427 || X > 102.824 || Y < 8.344 || Y > 15.255      %meje objekta
            break
        end
        if X >= 94.427 && X <=102.824 && Y >= 12.023 && Y <= 15.255      %cela bela fasada
            Z = 85.004;
        end

        if X >=94.821 && X <=95.987 && Y >=12.411 && Y <=13.667          %levi balkonček
            Z = 86.169;
        end

        if X >=101.283 && X <=102.439 && Y >=12.411 && Y <=13.682        %desni balkonček
            Z = 86.189;
        end

        if X >=94.427 && X <=102.824 && Y >=8.344 && Y <=12.023          %cela siva fasada
            Z = 82.033;
        end
    end
end
```

```
if X >=99.059 && X <=101.899 && Y >=8.344 && Y <=11.065      %vhod
    Z = 79.531;
end

alfa=atan(d/(Z0-Z));

if alfa < alfa_korak_1      %odkrije prvi zakriti piksel na poti iskanja
    alfa_maks=alfa_korak_1;
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),1)=0; %pretvorba iz prostorskega
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),2)=0; %(XY) v KS podobe in
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),3)=0; % interpolacija z metodo
        %najbližjega sosredstva
    vidnost(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)))=0;

end

if alfa <= alfa_maks      %odkriva preostale zakrite piklase na poti iskanja do
    %roba zakritega območja
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),1)=0;
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),2)=0;
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)),3)=0;

    vidnost(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-94.417)))=0;

end

alfa_korak_1=alfa;
end
end

%Zapis izhodnih podob
imwrite(OF,'OF_55.tif','tif');
imwrite(vidnost,'vidnost_55.tif','tif');

clear
```

Algoritem za desni posnetek:

```
%%%%%%%%%ORTO REKTIFIKACIJA

%VHODNI PODATKI
%Uvoz podobe
vhodna=imread('DSC_0056_r.tif');

%Notranja orientacija
c= 3622.1;      %enota je piksel
x0= 0;        %enota je piksel, pretvorba iz KSA podobe v slikovni KS
y0= 0;

%Zunanja orientacija
X0= 103.093;
Y0= 10.011;
Z0= 101.002;
o= (7+6/60+24/3600)*pi/180;
fi= (2+20/60+7/3600)*pi/180;
k= (359+42/60+26/3600)*pi/180;

%IZRAČUN

%Izračun rotacijske matrike
Ro = [1, 0, 0;
      0, cos(o), -sin(o);
      0, sin(o), cos(o)];
Rfi = [cos(fi), 0, sin(fi)
       0, 1, 0
       -sin(fi), 0, cos(fi)];
```

```
Rk = [ cos(k), -sin(k), 0
      sin(k), cos(k), 0
      0, 0, 1 ];

R = Ro*Rfi*Rk;

%Projekcija žarkov iz DMP na slikovno ravnino

p=0; %indeks piksla OF
r=0;

for Y=15.255:-0.01:8.344
    p=p+1;
    r=0;
    for X=95.988:0.01:102.824

        if X >= 94.427 & X <=102.824 & Y >= 12.023 & Y <= 15.255 %cela bela fasada
            Z = 85.004;
        end

        if X >=94.821 & X <=95.987 & Y >=12.411 & Y <=13.667 %levi balkonček
            Z = 86.169;
        end

        if X >=101.283 & X <=102.439 & Y >=12.411 & Y <=13.682 %desni balkonček
            Z = 86.189;
        end

        if X >=94.427 & X <=102.824 & Y >=8.344 & Y <=12.023 %cela siva fasada
            Z = 82.033;
        end

        if X >=99.059 & X <=101.899 & Y >=8.344 & Y <=11.065 %vhod
            Z = 79.531;
        end

        x=x0-c*(R(1,1)*(X-X0)+R(2,1)*(Y-Y0)+R(3,1)*(Z-Z0))/(R(1,3)*(X-X0)+R(2,3)*...
            (Y-Y0)+R(3,3)*(Z-Z0));
        y=y0-c*(R(1,2)*(X-X0)+R(2,2)*(Y-Y0)+R(3,2)*(Z-Z0))/(R(1,3)*(X-X0)+R(2,3)*...
            (Y-Y0)+R(3,3)*(Z-Z0));

        x=round(x+((size(vhodna,2))/2+0.5)); %pretvorba v KS podobe in interpolacija z
        y=round(-y+((size(vhodna,1))/2+0.5)); %metodo najbližjega sosedstva

        r=r+1;

        OF(p,r,1)=vhodna(y,x,1);
        OF(p,r,2)=vhodna(y,x,2);
        OF(p,r,3)=vhodna(y,x,3);
    end
end

%%%%%%ISKANJE ZAKRITIH OBMOČIJ OZ. VIDNOSTI (METODA KOTOV)

vidnost = 255*ones(size(OF,1),size(OF,2));

for delta=10800:2:21599 %rotacijski korak je korak 2'
    delta=delta*pi/180/60;
    alfa_korak_1=-pi/2; %začetni vrednosti - if stavek bo v prvem koraku sigurno zavržen
    alfa_maks=-pi/2;

    for d=0:0.005:11 %vzdolž radialne smeri je korak 0.5cm;
        %11m, da je sigurno zajeta cela fasada (meje so določene v zanki
        %z X in Y koordinato)
        X=X0+d*sin(delta); %začetna točka iskanja
        Y=Y0+d*cos(delta);
    end
end
```

```
if X < 95.99 || X > 103.093 || Y < 8.344 || Y > 15.255      %meje objekta + začetna
    break                                                  %točka iskanja (izven DMP)
end
if X >= 94.427 && X <=103.093 && Y >= 12.023 && Y <= 15.255  %cela bela fasada +
    Z = 85.004;                                           %začetna točka iskanja
end

if X >=94.821 && X <=95.987 && Y >=12.411 && Y <=13.667      %levi balkonček
    Z = 86.169;
end

if X >=101.283 && X <=102.439 && Y >=12.411 && Y <=13.682    %desni balkonček
    Z = 86.189;
end

if X >=94.427 && X <=103.093 && Y >=8.344 && Y <=12.023      %cela siva fasada +
    Z = 82.033;                                           %začetna točka iskanja
end

if X >=99.059 && X <=101.899 && Y >=8.344 && Y <=11.065      %vhod
    Z = 79.531;
end

alfa=atan(d/(Z0-Z));

if alfa < alfa_korak_1      %odkrije prvi zakriti piksel na poti iskanja
    alfa_maks=alfa_korak_1;
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-95.978)),1)=0; %pretvorba iz prostorskega
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-95.978)),2)=0; % (XY) v KS podobe in
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-95.978)),3)=0; %interpolacija z metodo
    %najbližjega sosredstva
    vidnost(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-95.978)))=0;
end

if alfa <= alfa_maks      %odkriva preostale zakrite piksele na poti iskanja do
    %roba zakritega območja
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-95.978)),1)=0;
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-95.978)),2)=0;
    OF(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-95.978)),3)=0;

    vidnost(round(100*(-Y+15.265)),round(100*(X-95.978)))=0;
end

alfa_korak_1=alfa;
end
end

%Zapis izhodnih podob
imwrite(OF,'OF_56.tif','tif');
imwrite(vidnost,'vidnost_56.tif','tif');

clear
```

Priloga D2: Algoritem mozaičenja

```
%%%%%%%%%% MOZAIKING %%%%%%%%%%%
```

```
%VHODNI PODATKI
izhodusca=[98.677, 10.018      %!!!vrstni red podob (v celotnem programčku) je 55, 54, 56 -
          94.498, 10.006      %ob vrstnem redu 54,55,56 se v for zanki za TOF v primeru
          103.093, 10.011];   %piksla ki je zakrit na vseh treh podobah (utez 0) izbere na
                                %podobi 54, ki je lahko izven njenega obsega (desni balkon),
                                %saj funkcija max med tremi enakimi vrednostmi izbere prvo
```

```
vhodna1=imread('OF_55.tif');           %vhodne podobe
vhodna2=imread('OF_54.tif');
vhodna3=imread('OF_56.tif');

vidnost1=imread('vidnost_55.tif');     %podobe vidnosti
vidnost2=imread('vidnost_54.tif');
vidnost3=imread('vidnost_56.tif');

%IZRAČUN

%Izračun uteži pikselov
utezi=zeros(size(vhodna1,1),size(vhodna1,2),3);   %matrika pokriva celoten DMP

%Podoba 55
p=0;
r=0;

for Y=15.255:-0.01:8.344
    p=p+1;
    r=0;
    for X=94.427:0.01:102.824

        d=sqrt((X-izhodisca(1,1))^2+(Y-izhodisca(1,2))^2);

        r=r+1;
        utezi(p,r,1)=1/d;

        if vidnost1(p,r)==0
            utezi(p,r,1)=0;
        end

    end
end

%Podoba 54
p=0;
r=0;

for Y=15.255:-0.01:8.344
    p=p+1;
    r=0;
    for X=94.427:0.01:101.285

        d=sqrt((X-izhodisca(2,1))^2+(Y-izhodisca(2,2))^2);

        r=r+1;
        utezi(p,r,2)=1/d;

        if vidnost2(p,r)==0
            utezi(p,r,2)=0;
        end

    end
end

%Podoba 56
p=0;
r=156;           %OF_56 se začne 1.56m desno od začetka DMP

for Y=15.255:-0.01:8.344
    p=p+1;
    r=156;
    for X=95.988:0.01:102.824

        d=sqrt((X-izhodisca(3,1))^2+(Y-izhodisca(3,2))^2);

        r=r+1;
        utezi(p,r,3)=1/d;
```

```
        if vidnost3(p,r-156)==0      %OF_56 se začne 156cm desno od začetka DMP
            utezi(p,r,3)=0;
        end

    end
end

%Izbira piklsov glede na uteži
mozaik=zeros(size(vhodnal,1),size(vhodnal,2),3); %prikazuje iz katerih posnetkov so vzeti
                                                %posamezni deli mozaika

[max_utezi,indeksi]=max(utezi,[],3);

for p = 1:size(vhodnal,1)

    for r = 1:size(vhodnal,2)

        if (indeksi(p,r))==1
            TOF(p,r,1)=vhodnal(p,r,1);
            TOF(p,r,2)=vhodnal(p,r,2);
            TOF(p,r,3)=vhodnal(p,r,3);

            mozaik(p,r,2)=255;
            if vidnost1(p,r)==0
                mozaik(p,r,2)=0;
            end
        end

        if (indeksi(p,r))==2
            TOF(p,r,1)=vhodna2(p,r,1);
            TOF(p,r,2)=vhodna2(p,r,2);
            TOF(p,r,3)=vhodna2(p,r,3);

            mozaik(p,r,1)=255;
            if vidnost2(p,r)==0
                mozaik(p,r,1)=0;
            end
        end

        if (indeksi(p,r))==3
            TOF(p,r,1)=vhodna3(p,r-156,1);
            TOF(p,r,2)=vhodna3(p,r-156,2);
            TOF(p,r,3)=vhodna3(p,r-156,3);

            mozaik(p,r,3)=255;
            if vidnost3(p,r-156)==0
                mozaik(p,r,3)=0;
            end
        end

    end

end

%Zapis izhodnih podob
imwrite(TOF,'TOF.tif','tif');
imwrite(mozaik,'mozaik.tif','tif');
clear
```

Priloga E: Vmesni in končni izdelki

Priloga E1: Ortoposnetki

Levi ortoposnetek



Srednji ortoposnetek

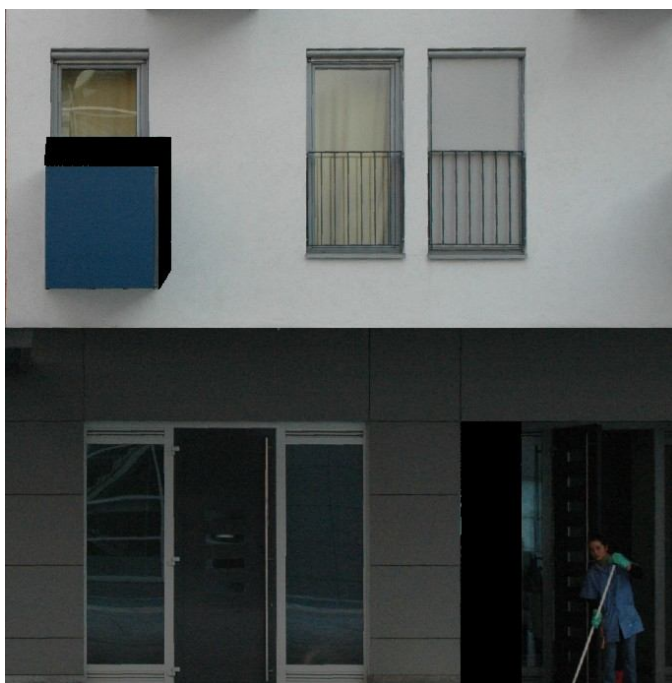


Desni ortoposnetek



Priloga E2: Ortoposnetki z lociranimi zakritimi (črnimi) območji

Levi ortoposnetek



Srednji ortoposnetek



Desni ortoposnetek



Priloga E3: Popolni ortofoto v merilu 1:600

S črno barvo sta označeni območji, ki nista vidni na nobenem vhodnem posnetku.

