

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Balek, V., 2013. Izdelava računalniškega programa za orientacijo stereopara. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M., somentor Grigillo, D.): 77 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Balek, V., 2013. Izdelava računalniškega programa za orientacijo stereopara. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M., co-supervisor Grigillo, D.): 77 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GEODEZIJE
SMER GEODEZIJA

Kandidat:

VID BALEK

**IZDELAVA RAČUNALNIŠKEGA PROGRAMA ZA
ORIENTACIJO STEREOPARA**

Diplomska naloga št.: 936/G

**DEVELOPMENT OF A COMPUTER PROGRAM FOR
COMPUTATION OF ORIENTATION OF A STEREO
PAIR**

Graduation thesis No.: 936/G

Mentorica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Predsednica komisije:

doc. dr. Alma Zavodnik Lamovšek

Somentor:

asist. dr. Dejan Grigillo

Članica komisije:

doc. dr. Anka Lisec

Ljubljana, 25. 10. 2013

Stran za popravke, Errata

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA

Podpisani Vid Balek izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Izdelava računalniškega programa za orientacijo stereopara«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 30.8.2013

Vid Balek

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:

Avtor: Vid Balek

Mentor: doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Somentor: asist. dr. Dejan Grigillo

Naslov: Izdelava računalniškega programa za orientacijo stereopara

Tip dokumenta: Diplomaska naloga - univerzitetni študij

Obseg in oprema: 77 str., 12 pregl., 42 sl., 5 pril.

Ključna besede: orientacija stereopara, relativna orientacija, absolutna orientacija, zunanja orientacija

Izvleček:

V diplomski nalogi je predstavljena izdelava računalniškega programa za izvedbo postopka orientacije stereopara. Opredelili smo osnovne pojme in predstavili področje bližnjelikovne fotogrametrije. Na kratko smo opisali zgodovinski razvoj in instrumentarij ter metode za zajem stereopara. Za orientacijo stereopara smo uporabili več metod: dvostopenjsko metodo orientacije stereopara, metodo notranjega ureza in metodo direktne linearne transformacije. Za te metode smo opisali teorijo in enačbe, ki so potrebne za izdelavo programa.

V praktičnem delu naloge smo predstavili izdelan računalniški program. Zajeli smo celoten postopek, v katerem smo preučili vhodne podatke, pisali računalniško kodo za izvajanje algoritmov, oblikovali grafični vmesnik, združevali algoritme z grafičnim vmesnikom in ustvarili izhodne datoteke. Prikazali smo tudi področja uporabe, sestavo, omejitve in navodila izdelanega programa.

Postopek izračuna orientacije stereopara smo prikazali tudi na praktičnem primeru ter komentirali in interpretirali pridobljene rezultate.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**UDC:****Author:** Vid Balek**Supervisor:** Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph. D.**Cosupervisor:** Assist. Dejan Grigillo, Ph. D.**Title:** Development of a computer program for computation of orientation of a stereo pair**Document type:** Graduation Thesis - University studies**Scope and tools:** 77 p., 12 tab., 42 fig., 5 ann.**Keywords:** stereo pair orientation, relative orientation, absolute orientation, exterior orientation**Abstract:**

The graduation thesis presents the development of a computer program for computing orientation of a stereo pair. Basic terminology was defined and close range photogrammetry was presented. A brief historical overview, instrumentation and methods for capturing the stereo pair were described. Suitable methods for the stereo pair's orientation were selected: the two-step method, the space resection method, and the method of direct linear transformation. For all the methods, theory as well as equations, necessary for the program development, were described.

The practical part of the graduation thesis presents the computer program itself. The entire procedure was taken into consideration: from studying the input data, writing the computer code for implementing the algorithms, designing the graphical interface, combining the algorithms with the graphical interface, and creating an output file. Here we also presented the program's scope of use, its structure, limits, and the manual for it.

The calculation of the stereo pair's orientation is presented also in practice where we commented on and interpreted the results.

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so kakorkoli pripomogli k nastanku moje diplomske naloge.

Za vse strokovne pripombe in koristne nasvete se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras.

Posebna zahvala gre somentorju diplomske naloge asist. dr. Dejanu Grigillu, za ves čas in trud ter za vse koristne informacije.

Zahvaljujem se tudi staršem, ki so mi stali ob strani, me podpirali pri odločitvah in spodbujali med študijem.

Hvala tudi Tini za spodbudo, razumevanje in potrpežljivost v času pisanja diplomske naloge.

KAZALO VSEBINE

IZJAVA.....	II
BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA.....	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC.....	VIII
KAZALO SLIK.....	IX
SEZNAM PRILOG	XI
 1 UVOD	 1
 2 TEORETIČNE OSNOVE ORIENTACIJE STEREOPARA	 2
2.1 Opredelitev pojmov, povezanih z orientacijo stereopara.....	2
2.2 Koordinatni sistemi, povezani z orientacijo stereopara.....	4
2.3 Bližnjefotogrametrija in ostala zanimiva področja za orientacijo stereopara	6
2.4 Pregled instrumentarija in metod skozi čas.....	9
2.5 Namen orientacije stereopara	12
2.6 Notranja orientacija posnetka	13
2.7 Zunanja orientacija posnetka.....	17
2.7.1. Metoda notranjega ureza.....	20
2.7.2. Metoda direktne linearne transformacije (metoda DLT).....	22
2.8 Dvostopenjska metoda orientacije stereopara	26
2.8.1 Relativna orientacija stereopara.....	28
2.8.2 Izračun modelnih koordinat	32
2.8.3 Absolutna orientacija stereopara	34
2.9 Izračun parametrov zunanje orientacije posnetkov stereopara iz parametrov dvostopenjske metode	36
2.10 Posredna izravnava po metodi najmanjših kvadratov	37
 3 PROGRAM OR/S - ORIENTACIJA STEREOPARA.....	 38
3.1 Metodologija.....	38
3.1.1 Shematski načrt delovanja programa	39
3.1.2 Prezem vhodnih podatkov	40
3.1.3 Programiranje algoritmov v programskem okolju <i>Matlab</i>	45

3.1.4 Izdelava uporabniškega vmesnika v programskem okolju <i>Matlab</i>	48
3.1.5 Združitev programske kode algoritmov in uporabniškega vmesnika v delujoč program	50
3.1.6 Priprava izhodnih podatkov.....	51
3.2 Sestava programa in navodila za uporabo	59
3.3 Področje uporabe	62
3.4 Omejitve programa	63
 4 PRAKTIČEN PRIMER UPORABE PROGRAMA	65
4.1 Pregled vhodnih podatkov praktičnega primera	65
4.2 Izračun orientacije stereopara s programom OriS	68
 5 ZAKLJUČEK	75
 VIRI	76

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Relativna orientacija obeh posnetkov	69
Preglednica 2: Parametri absolutne orientacije	70
Preglednica 3: Primerjava podanih in izr. koordinat oslonilnih točk po absolutni orientaciji	70
Preglednica 4: Primerjava podanih in izračunanih kontrolnih točk po absolutni orientaciji	71
Preglednica 5: Parametri zunanje orientacije po dvostopenjski metodi	71
Preglednica 6: Parametri zunanje orientacije po metodi notranjega ureza	72
Preglednica 7: Primerjava podanih in izračunanih oslonilnih točk - metoda notranjega ureza	72
Preglednica 8: Primerjava podanih in izračunanih kontrolnih točk - metoda notranjega ureza	72
Preglednica 9: Zunanja orientacija obeh posnetkov po metodi DLT	73
Preglednica 10: Primerjava podanih in izračunanih oslonilnih točk - metoda DLT	73
Preglednica 11: Primerjava podanih in izračunanih kontrolnih točk - metoda DLT	73
Preglednica 12: Izpis parametrov zunanje orientacije najtočnejše metode	74

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz stereopara.....	2
Slika 2: Prekritje stereopara (stereo-območje)	3
Slika 3: Prikaz uporabe fotogrametrije v medicini (ScienceDirect, 2013)	7
Slika 4: Prikaz zajema pri aerofotogrametriji (Sergis engineering systems, 2013)	8
Slika 5: Primer Zeissovih merskih fotoaparotov (Foto. erikoissovellutukset, 2013)	11
Slika 6: Notranja orientacija posnetka (Luhmann, 2011).....	14
Slika 7: Prikaz popravka slike za radialno distorzijo (Texturemate, 2013).....	16
Slika 8: Zunanja orientacija posnetka (Luhmann, 2011)	17
Slika 9: Metoda notranjega ureza (Luhmann, 2011)	20
Slika 10: Prikaz dvostopenjske orientacije para fotografij (Kraus, 2007)	26
Slika 11: Prikaz relativne orientacije neodvisnih modelov (Kraus, 2007)	29
Slika 12: Dobra (polni krogi) in slaba (prazni krogi) razporeditev homolognih točk (Luhmann, 2011)	32
Slika 13: Primeri razporeditev oslonilnih točk pri absolutni orientaciji (Kraus, 2007) ..	35
Slika 14: Shematski prikaz delovanja programa.....	39
Slika 15: Prikaz programskega okolja Socet Set	41
Slika 16: Primer datoteke z izmerjenimi slikovnimi koordinatami točk.....	42
Slika 17: Primer datoteke z objektnimi koordinatami oslonilnih in kontrolnih točk.....	43
Slika 18: Primer vhodne datoteke s kalibracijskimi parametri fotoaparata	44
Slika 19: Prikaz programskega okolja Matlab	45
Slika 20: Prikaz <i>Matlabovega</i> vmesnika <i>Matlab GUIDE</i>.....	49
Slika 21: Izhodna datoteka - prikaz glave izhodne datoteke	51
Slika 22: Izhodna datoteka - prebrane slikovne koordinate	52
Slika 23: Izhodna datoteka - prebrane koordinate oslonilnih in kontrolnih točk.....	52
Slika 24: Izhodna datoteka - prebrani podatki o kalibraciji fotoaparata	53
Slika 25: Izhodna datoteka - premik za glavno točko	53
Slika 26: Izhodna datoteka - popravek za distorzijo	54
Slika 27: Izhodna datoteka - izračunana relativna orientacija.....	54
Slika 28: Izhodna datoteka - izračunana absolutna orientacija	55
Slika 29: Izhodna datoteka - izračunane objektnne koordinate	55
Slika 30: Izhodna datoteka - parametri ZO, izračunani po dvostopenjski metodi	56
Slika 31: Izhodna datoteka - dvostopenjska metoda: izračun vrednosti RMS.....	56
Slika 32: Izhodna datoteka - parametri ZO po metodi notranjega ureza	57
Slika 33: Izhodna datoteka - metoda notranjega ureza: izračun vrednosti RMS	57
Slika 34: Izhodna datoteka - parametri ZO po metodi DLT	58

Slika 35: Izhodna datoteka - metoda DLT: izračun vrednosti RMS.....	58
Slika 36: Izhodna datoteka - izhodna datoteka s parametri zunanje orientacije.....	59
Slika 37: Prikaz grafičnega vmesnika z oznako posameznih delov	60
Slika 38: Prikaz fotogrametričnega zajemanja fasade (Crc-si, 2013).....	63
Slika 39: Levi posnetek stereopara.....	66
Slika 40: Desni posnetek stereopara	66
Slika 41: Stereo območje praktičnega primera	67
Slika 42: Prikaz grafičnega vmesnika ob izvedbi orientacije stereopara	68

SEZNAM PRILOG

Priloga A: Vhodna datoteka slikovnih koordinat.....	A1
Priloga B: Vhodna datoteka oslonilnih in kontrolnih točk	B1
Priloga C: Vhodna datoteka kalibracije fotoaparata.....	C1
Priloga D: Izhodna datoteka poročila orientacije stereopara	D1
Priloga E: Izhodna datoteka parametrov zunanje orientacije	E1

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Fotogrametrija je z napredkom tehnike v zadnjem obdobju doživela pravi razcvet. S pojavom novih in zmogljivejših instrumentov postajajo postopki hitrejši, programska oprema pa vedno bolj kompleksna. Prav zato se srečujemo s terminom črne škatle (ang. black box), ki predstavlja pomanjkljivo razumevanje postopkov in algoritmov, ki potekajo v ozadju in se jih niti ne zavedamo. Zaradi takega trenda v zadnjem obdobju smo se odločili, da si za cilj diplomskega dela zastavimo izdelavo računalniškega programa, za katerega jasno predstavimo vse postopke in uporabniku omogočimo razumevanje poteka izračuna.

Jasno zastavljen cilj je bil prvi korak, nato pa smo morali poiskati primerno področje za njegovo uresničitev. Na naši fakulteti se je pojavila potreba za izdelavo računalniškega programa, ki opravi orientacijo stereopara. Razpoložljiva programska oprema na fakulteti te postopke sicer omogoča, a je za uspešno izvedbo postopka potrebno vložiti precej časa in truda. Medsebojna slaba povezljivost programske opreme predstavlja oviro, ki smo jo hoteli preseči. Namen diplomskega dela je torej premostitev tovrstnih ovir in vzpostavitev jasnega postopka pri obdelavi stereopara.

S stereopari se srečujemo v fotogrametriji, enem izmed pomembnih področij geodezije. Stereopar zajamemo tako, da posnamemo dva med seboj zamaknjena posnetka. S parom teh posnetkov je mogoče ustvariti virtualni 3D model stereo-območja. V grobem je pomen stereopara transformacija dveh 2D posnetkov v en 3D model. V zadnjem času priljubljenost večrazsežnih pogledov narašča, zato je kljub tradicionalnosti tematike ta zelo aktualna.

Vsebina diplomskega dela je sestavljena iz petih poglavij. Poleg prvega, uvodnega poglavja, smo v drugem poglavju predstavili teoretične osnove. Začeli smo s temelji kot so: predstavitev terminov, vpogled v področja, ki so zanimiva za orientacijo stereopara in pregled instrumentarija ter metod. Osnove smo nato nadgradili z opisom samih postopkov orientacije stereopara. Tretje poglavje diplomskega dela predstavlja opis praktičnega dela zastavljene naloge. V njem je podrobno opisana sama izdelava računalniškega programa. Poudarek je predvsem na metodologiji izdelave programa, nekaj pozornosti pa smo posvetili tudi samim navodilom uporabe, področjem uporabe in omejitvam izdelanega programa. V četrtem poglavju se ukvarjamo z izvedbo praktičnega primera in preizkusa delovanja programa z dodanim komentarjem pridobljenih rezultatov. Sledi zaključek v petem poglavju.

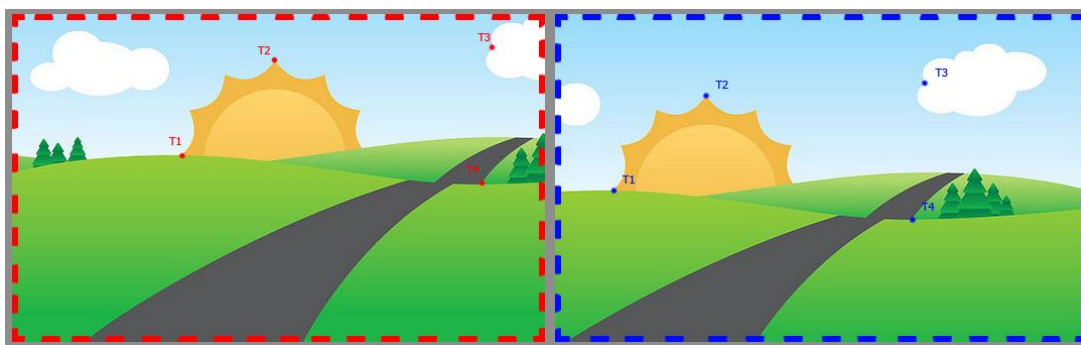
2 TEORETIČNE OSNOVE ORIENTACIJE STEREOPARA

V teoretičnem sklopu diplomske naloge bo predstavljena teorija, ki v ozadju delovanja programa omogoča izvedbo orientacije stereopara. Teoretičen del je razdeljen na 10 podpoglavij, v katerih obravnavamo naslednja teme:

- opredelitev pojmov, povezanih z orientacijo stereopara,
- koordinatni sistemi, povezani z orientacijo stereopara,
- bližnjelikovna fotogrametrija in ostala zanimiva področja za orientacijo stereopara (kratka predstavitev področij, s katerimi se tematsko povezuje diplomska naloga),
- pregled instrumentarija in metod skozi čas (kratek pregled primernih instrumentov za zajem podatkov in metod, ki so potrebne za izvedbo postopka),
- namen orientacije stereopara (kratek pregled osnov orientacije stereopara),
- postopek orientacije stereopara (opis in matematična opredelitev notranje in zunanje orientacije, pregled in predstavitev posameznih metod ter opredelitev stohastičnih modelov posameznih metod).

2.1 Opredelitev pojmov, povezanih z orientacijo stereopara

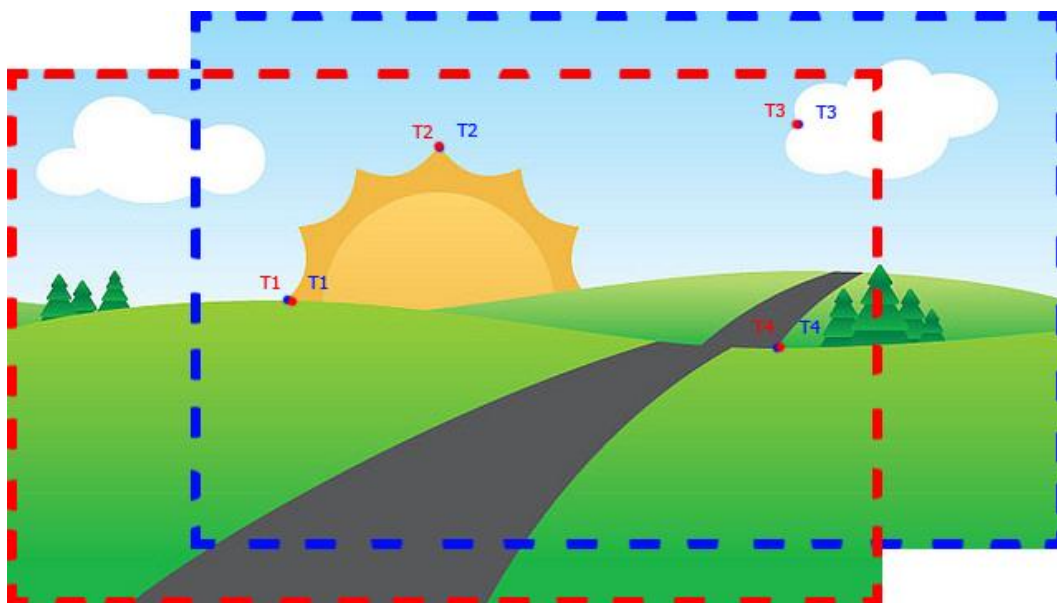
Da bo diplomska naloga bolj razumljiva, bomo najprej opredelili pojme, ki so bistveni pri izdelavi naloge, in sicer so to: stereopar, notranja orientacija posnetka, zunanja orientacija posnetka, relativna orientacija in absolutna orientacija stereopara.



Slika 1: Prikaz stereopara

Stereopar sestavljata dve fotografiji, ki prikazujeta del istega območja, položaj zajema pa je nekoliko zamaknjen (slika 1). Gre za posnemanje zaznave, kako človek fiziološko zazna prostor z levim in desnim očesom. Človeški možgani samodejno obdelajo obe sliki in ustvarijo 3D zaznavo. Po podobnem principu leva fotografija stereopara predstavlja sliko, ki

jo vidimo z levim očesom, desna fotografija pa sliko, ki jo vidimo z desnim očesom. Ko obe fotografiji prekrijemo tako, da isti detajli sovpadajo, dobimo stereo-območje (slika 2). Za to območje lahko z ustreznimi pripomočki, ki omogočajo ločeno usmerjanje slik v levo in desno oko, ustvarimo virtualni 3D model. Ti postopki spadajo v področje stereoskopije, ki se je začela razvijati vzporedno z iznajdbo stereoskopskih merjenj, z iznajdbo letal in z začetkom razvoja analognih naprav (Kraus, 2007).



Slika 2: Prekritje stereopara (stereo-območje)

Termin orientacija ima v fotogrametriji različne pomeni, najbolj pogosto pa ga uporabljamo v naslednjih zvezah: notranja orientacija posnetka, zunanja orientacija posnetka, relativna orientacija in absolutna orientacija stereopara.

Notranjo orientacijo posnetka predstavljajo parametri, ki opisujejo geometrični model fotoaparata. Gre za opis notranjega odnosa med slikovno ravnino (posnetkom) in centrom preslikave, ki se nahaja v objektivu fotoaparata. S parametri notranje orientacije lahko vzpostavimo slikovni koordinatni sistem, v katerem podajamo fotogrametrične slikovne meritve (slikovne koordinate). Z vidika matematične definicije slikovnega koordinatnega sistema so osnovni parametri notranje orientacije trije: dve koordinati glavne točke in konstanta fotoaparata (goriščna razdalja objektiva). Zaradi fizikalnih vplivov (nepopolnost brušenja leč in konstrukcije fotoaparata), ki sliko glede na idealiziran matematični model preslikave popačijo, pa moramo upoštevati še optično distorzijo objektiva (vsaj radialno

komponento) in tudi druge nepravilnosti, če le-te sistematično in v dovolj veliki meri vplivajo na pravilnost preslikave (npr. nepravokotnost razvrstitve pikslov v senzorju).

Zunanja orientacija posnetka opisuje prostorski položaj in orientacijo posameznega posnetka v trenutku ekspozicije. Določa odnos med slikovnim in objektnim koordinatnim sistemom. Zunanjo orientacijo določa šest parametrov, to so prostorske koordinate projekcijskega centra (tri koordinate) in trije zasuki slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni koordinatni sistem (rotacije ω , ϕ , κ).

Relativna orientacija je prvi del dvostopenjske orientacije stereopara. Gre za opis pravilnega medsebojnega razmerja obeh posnetkov stereopara. Medsebojni položaj obeh posnetkov predstavimo s petimi neodvisnimi parametri (dve translaciji in tri rotacije oz. pet rotacij), ki se nanašajo na modelni koordinatni sistem. S pomočjo parametrov relativne orientacije lahko vzpostavimo virtualni 3D model stereo-območja in posamezne detajle tega modela merimo v modelnem koordinatnem sistemu.

Absolutna orientacija je drugi del dvostopenjske orientacije stereopara. Gre za transformacijo modelnega koordinatnega sistema v objektni koordinatni sistem s pomočjo oslonilnih točk. To je prostorska podobnostna (sedem-parametrična) transformacija, ki jo določajo tri translacije, tri rotacije in sprememba merila (Luhmann, 2011).

2.2 Koordinatni sistemi, povezani z orientacijo stereopara

Za boljše razumevanje obravnavane tematike je potrebno predstaviti koordinatne sisteme, ki jih uporabljamo v postopkih orientacije stereopara. Predstavili bomo naslednje koordinatne sisteme: slikovni koordinatni sistem, objektni koordinatni sistem, referenčni koordinatni sistem in modelni koordinatni sistem.

Slikovni koordinatni se nanaša na slikovno ravnino analogne ali digitalne fotografije, v kateri izvajamo osnovne fotogrametrične meritve (merimo slikovne koordinate). Slikovni koordinatni sistem vzpostavimo za konkretno snemalno napravo (fotoaparat) na osnovi parametrov notranje orientacije. Izhodišče koordinatnega sistema v slikovni ravnini imenujemo glavna točka. Pri analogni merski fotografiji položaj glavne točke določimo s pomočjo robnih mark. Pri digitalni fotografiji položaj glavne točke opredelimo glede na njen

položaj v slikovni matriki, ki jo sestavljajo piksli slike (potek pikslov v vrsticah in stolpcih definira pikselni koordinatni sistem). Ker pri nastanku fotografije vsi slikovni žarki iz prostora potekajo skozi projekcijski center, ki se nahaja v objektivu, izhodišče slikovnega koordinatnega sistema iz glavne točke prenesemo v projekcijski center. Ta je od slikovne ravnine pravokotno odmaknjen za konstanto fotoaparata (goriščno razdaljo). S tem slikovni koordinatni sistem pridobi tretjo dimenzijo (os z). Usmerjenost osi z je takšna, da dobimo desnosučni kartezični koordinatni sistem. Vse merjene slikovne koordinate na sliki tako dobijo negativno vrednost konstante fotoaparata.

Objektni koordinatni sistem je 3D prostorski kartezični koordinatni sistem. To je lahko katerikoli 3D lokalni ali referenčni koordinatni sistem. Z izrazom »objektni« želimo poudariti, da je to koordinatni sistem, v katerem so podane koordinate opazovanega oz. merjenega prostorskega objekta. Takšna splošna oznaka prostorskega koordinatnega sistema je specifična za fotogrametrijo, saj se tako pri razlagah matematičnih modelov in transformacij izognemo natančni opredelitvi vrste prostorskega koordinatnega sistema. V fotogrametriji, predvsem v bližnjieslikovnih aplikacijah, namreč zelo pogosto uporabljamo lokalne objektne koordinatne sisteme. Koordinatne osi XYZ so definirane glede na objekt, ki ga v koordinatnem sistemu upodabljamo. Pri stavbi je npr. najbolj smiselno, da izhodišče postavimo v vznožje stavbe na vogalu, osi pa definiramo tako, da predstavljajo višino širino in dolžino stavbe. Seveda je definicija koordinatnih osi odvisna od vsakega primera posebej (Luhmann, 2011).

Referenčni koordinatni sistem je koordinatni sistem, ki se nanaša na državni referenčni koordinatni sistem (lahko tudi koordinatni sistem višje kategorije npr. svetovni referenčni sistem). Koordinatne osi so določene z definicijo referenčnega sistema. Navadno državni referenčni sistemi temeljijo na ustreznem referenčnem elipsoidu. Objektne koordinatni sistem z referenčnim povežemo preko referenčnih točk, ki jih najlažje določimo z GNSS meritvami.

Modelni koordinatni sistem je 3D koordinatni sistem, v katerem predstavimo 3D model objekta, pridobljen po relativni orientaciji stereopara. Določen je z odnosom med obema posnetkoma stereopara. Izhodišče modelnega koordinatnega sistema je v projekcijskem centru prvega posnetka. V sklopu diplomske naloge se uporablja kot vmesna stopnja dvostopenjske orientacije stereopara.

2.3 Bližnjelikovna fotogrametrija in ostala zanimiva področja za orientacijo stereopara

V tem poglavju so na kratko predstavljene osnove fotogrametrije in področja fotogrametrije, ki so zanimiva za naš projekt. Tu imamo v mislih predvsem področje bližnjelikovne fotogrametrije (ang. close range photogrammetry), kjer imamo največ opravka z zajemom podatkov iz stereoparov, nekaj pa je tudi področij, ki se le delno nanašajo na preučevano področje.

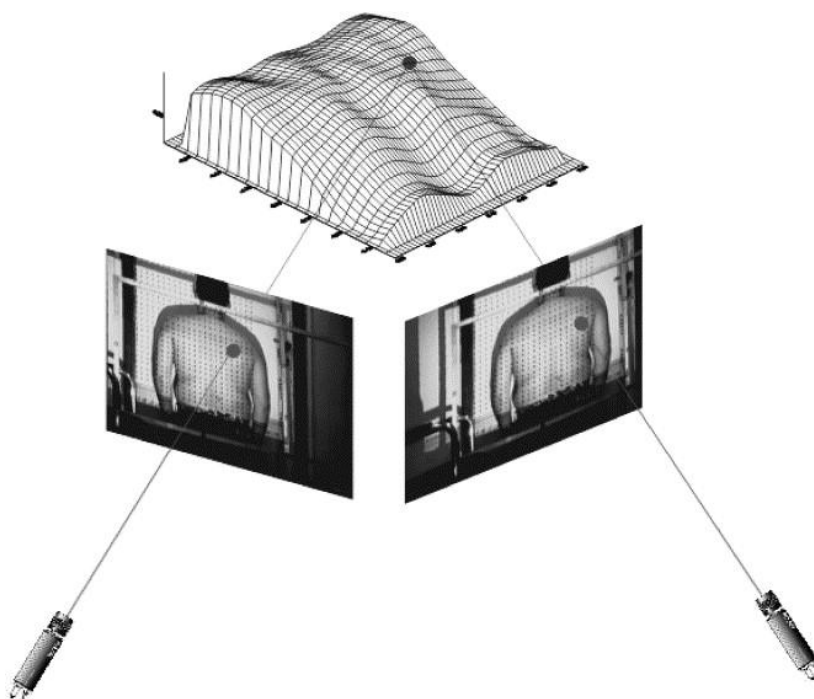
Fotogrametrija je področje geodezije, ki se, če posplošimo, ukvarja z zajemom podatkov iz slik. V mednarodnem združenju za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje je predstavljena naslednja definicija fotogrametrije: »Fotogrametrija in daljinsko zaznavanje obsegata vede, znanosti in tehnologije pridobivanja zanesljivih informacij iz brez-kontaktnih fotografij/podob in medijev drugih senzorskih sistemov o Zemlji, njenem okolju in drugih fizičnih objektih in procesih z beleženjem, merjenjem, analiziranjem in predstavljanjem« (Statut ISPRS, 2012).

Področje fotogrametrije je zelo široko, zato jo lahko delimo na različne načine. Glede na način snemanja delimo fotogrametrijo na področje, kjer posnetke zajemamo iz zraka - aerofotogrametrija (ang. aerial photogrammetry) in na področje, kjer podatke zajemamo iz tal - terestrična fotogrametrija (ang. terrestrial photogrammetry). Fotogrametrija se je uveljavila predvsem zaradi prednosti, ki jih ta znanost zagotavlja. Prednosti najdemo predvsem v veliki količini zajetih podatkov, v hitrem in relativno cenovno ugodnem zajemu podatkov, v prilagodljivosti vremenskim razmeram (večino dela se opravlja v pisarni, terenski del pa je načeloma opravljen hitro) in v možnosti brezkontaktnega merjenja, kar pomeni, da lahko objekt zajamemo od daleč in ni potrebno, da pridemo v stik z njim.

Za bližnjelikovno fotogrametrijo je značilno, da podatke zajemamo iz krajših razdalj (okvirno manj kot 300 m), vendar je bolj kot sama razdalja snemanja do objekta pomembna vrsta aplikacije, ki praviloma ni topografska (včasih se je za to področje uporabljal tudi izraz netopografska fotogrametrija). Pri bližnjelikovni fotogrametriji navadno ne zajemamo podatkov za namene izdelave klasičnih topografskih in kartografskih izdelkov (običajnih državnih izdelkov), ampak nas zanimajo bolj specifične naloge na naslednjih področjih:

- avtomobilska, strojna, ladjedelniška industrija,
- vesoljska industrija,

- arhitektura, arheologija, ohranjanje kulturne dediščine,
- gradbeništvo,
- medicina in psihologija (slika 3),
- forenzika,
- informacijski sistemi,
- naravoslovne znanosti (Luhmann, 2011).



Slika 3: Prikaz uporabe fotogrametrije v medicini (ScienceDirect, 2013)

Zajem podatkov se lahko izvaja s posebnimi merskimi fotoaparati, ki so opisani v poglavju 2.4. S kompleksnimi algoritmi in zmogljivo programsko opremo lahko pridobimo zelo natančne rezultate. Z napredkom algoritmov in digitalnih fotoaparotov je mogoča tudi uporaba nemerskih posnetkov. Področje uporabe te tehnologije in število uporabnikov se širi, saj so v današnjem času računalniki in dobri fotoaparati dostopni vsakomur. Poleg tega je z dobrimi fotoaparati možno dosegati dobro kakovost zajetih slik. Z različnimi tehnikami obdelave je mogoče manipulirati tudi z zajetimi barvami (Kraus, 2007).

Druga veja fotogrametrije, za katero je prav tako zanimiv postopek orientacije stereopara, je aerofotogrametrija. Pri tem načinu podatke zajemamo iz zraka (slika 4). Instrumentarij je lahko nameščen na letalu, helikopterju, balonu... Namen zajemanja teh podatkov je

preučevanje terena. Iz podatkov lahko ustvarjamo ortofoto, digitalne modele reliefa, 3D modele stavb itd. Pri aerofotogrametriji so podatki običajno umeščeni v referenčni koordinatni sistem. Pri tem nam pomagajo GNSS¹ in INS sistemi², ki so nameščeni na letalu, helikopterju. Prvi določajo položaj s pomočjo satelitov, INS sistemi pa delujejo na podlagi žiroskopov in pospeškomerov. Z njimi beležijo premike in zasuke, ki v kombinaciji s podatki GNSS-ja podajo dokaj natančen položaj fotoaparata v trenutku zajetja posnetka. Kakovost rezultatov je odvisna od različnih faktorjev:

- oblike in kakovosti optičnega sistema v fotoaparatu,
- konstrukcije samega fotoaparata,
- oblike medija, na katerega se zapisujejo podatki,
- načina obdelave podatkov,
- vremenskih razmer v času zajema podatkov (Schenk, 2005).

Pri zajemu podatkov iz zraka se navadno posname blok posnetkov. Gre za zaporedje slik, ki skupaj pokrivajo neko območje. V diplomski nalogi smo se usmerili na orientacijo stereopara, torej na orientacijo dveh zaporednih slik. Za opisane postopke v diplomski nalogi lahko iz bloka posnetkov vzamemo dve sosednji slike.



Slika 4: Prikaz zajema pri aerofotogrametriji (Sergis engineering systems, 2013)

¹ GNSS je kratica za globalni navigacijski satelitski sistem (ang. global navigation satellite system).

² INS je kratica za inercialni navigacijski sistem (ang. inertial navigation system).

Uporaba orientacije stereopara ni omejena le na zgoraj navedena področja. Postopek je možno uporabiti tudi na področjih izven fotogrametrije, npr. na področju računalniškega in robotskega vida (angl. computer vision, robot vision). Stereoskopija kot način 3D gledanja slik pa dobiva velik pomen v kinematografiji, pri kateri so v zadnjem času zelo popularni filmi, posneti v 3D tehniki, in v računalniški zabavni industriji (uporaba 3D zaslonov, 3D igrice).

2.4 Pregled instrumentarija in metod skozi čas

Pri bližnjefotogrametriji se kot instrument za zajem podatkov uporablja fotoaparatus. Izraz fotoaparatus, v žargonu profesionalne fotografije tudi kamera (ang. camera), izhaja iz izraza »camera obscura« (izraz prihaja iz latinščine in pomeni temna soba), ki je zgodnji mehanizem za projiciranje slike iz prostora na ravnino. Z razvojem fotoaparatusov so se s časoma pojavili tudi merski fotoaparatusi, ki so konstruirani posebej za fotogrametrične namene.

V sredini 19. stoletja je arhitekt Albrecht Meydenbauer dobil idejo, da bi za dokumentiranje stavb uporabil fotografije. Najpomembnejše objekte kulturne dediščine je želel fotografirati tako, da bi jih v primeru uničenja lahko rekonstruirali. Fotogrametrične slike so bile najprimernejši način za doseg tega cilja.

Njegova prva zamisel je bila, da bi za zajem lahko uporabil vsak razpoložljiv fotoaparatus. Po nekaj poskusih je spoznal, da komercialni fotoaparatusi ne bodo izpolnili vseh zahtev in da bo potrebno razviti poseben fotoaparatus.

Največji problem je predstavljala kombinacija fotoaparatusa in merskega instrumenta v enem sistemu. Meydenbauer je ugotovil tudi, da je za zajem arhitekturnih objektov potrebno uporabiti širokokotne objektivne. Po vseh zaključkih je izdelal prvi instrument, s konstanto fotoaparatusa 25 cm in formatom slike 30 cm x 30 cm. Instrument je izpolnjeval glavne pogoje merskih fotoaparatusov:

- slikovna ravnina merskega fotoaparatusa je bila definirana pred zajemom fotografij,
- slikovni koordinatni sistem je bil določen z robnimi markami, ki so se preslikale na medij,
- kompaktna oblika fotoaparatusa
- ni povečave, kar pomeni preprosto določitev konstante fotoaparatusa, saj se ta ne spreminja,
- pritrditev na trinožnik, ki je omogočala horizontalno postavitev instrumenta.

Meydenbauer je v opisu svojih raziskav v letu 1867, v okviru članka prvič uporabil termin fotogrametrija, ki se še danes uporablja za poimenovanje dotične znanosti po vsem svetu.

Metode, ki jih je uporabil Meydenbauer, so temeljile na opisni geometriji. To mu je omogočila vertikalna postavitev slikovne ravnine. Med merjenji ni meril azimutov, ampak je orientacijo fotografij pridobil preko kontrolne točke na objektu. Za rekonstrukcijo točk s fotografije je uporabil dve različni metodi. Prva metoda sloni na perspektivni projekciji in izkorišča geometrična pravila bežišča. Bežišče je projekcija točke, v kateri se navidezno sekajo premice, ki so v resničnosti (oz. v drugi projekciji) vzporednice. Druga metoda temelji na preseku dveh žarkov, ki potekata iz slikovne ravnine skozi lečo fotoaparata do objekta. Če uporabimo taka žarka do iste točke na objektu iz dveh zamaknjenih fotografij, lahko določimo položaj točke (Albertz, 2001).

Kmalu je izšla naslednja serija fotoaparatorov. Na volji so bili modeli z različnimi konstantami fotoaparata, format slike pa se je povečal na 40 cm x 40 cm. Največja novost teh fotoaparatorov je bil vertikalni premik optičnega sistema, ki je omogočal boljšo prilagoditev zajetim objektom.

Meydenbauer je v svojem delu izpopolnjeval instrumentarij in fotogrametrične metode. Njegovo delo so kmalu opazili na pruskem kulturnem ministrstvu. Z nekaj predstavitvami so Meydenbauerja razglasili za vodjo prvega fotogrametričnega inštituta. Naloga inštituta je bila zajem objektov kulturne dediščine. V okviru inštituta je razvil tudi nov instrument, ki je bil lažje prenosljiv, bil pa je tudi prilagodljiv za različne slikovne formate.

V času svojega delovanja je Meydenbauer opozarjal na pomen zavarovanja kulturne dediščine. Že takrat je izpostavljал dejavnike, ki škodujejo zgodovinskim objektom. Zanimivo je, da je izpostavil tudi vpliv onesnaževanja avtomobilov, čeprav so se ti šele začeli pojavljati na trgu. Njegova opozorila so padla na plodna tla le v Prusiji, medtem ko predstavitev v nemškem parlamentu ni obrodila sadov.

Posnetke objektov kulturne dediščine, ki jih je inštitut zajel na območju Prusije, so shranjevali v arhiv. Med drugo svetovno vojno so jih pred uničenjem zavarovali tako, da so jih shranili v Moskvi. Po vojni so fotografije vrnili v Nemčijo, kjer so bile shranjene v različnih arhivih. Da bi

posnetke zavarovali pred staranjem, so v drugi polovici 19. stoletja naredili kopije originalov (Albertz, 2001).

Čeprav Meydenbauer velja za pionirja bližjeslikovne fotogrametrije, pa ni bil edini, ki se je ukvarjal z razvojem instrumentarija.

V začetnih letih fotogrametrije so bili merski fotoaparati namenjeni le bližnjieslikovni fotogrametriji, saj snemanje iz zraka še ni bilo možno, z razvojem zračnih plovil (balon, letalo) pa so se začeli pojavljati tudi merski fotoaparati za zajem aeroposnetkov. Fotoaparate delimo na analogne in digitalne. Analogni fotoaparati zajete podatke zapišejo na film oz. na steklo, digitalni pa za zajem uporabljajo slikovne (CCD ali CMOS) senzorje, ki podatke shranjujejo v digitalni obliki. Prednost analognih fotografij je, da ločljivost skoraj ni omejena, prednost digitalnih pa je časovna dosegljivost posnetkov, saj so podatki dosegljivi takoj, razvoj fotografij v temnici pa ni več potreben.

Za doseganje boljših rezultatov so včasih merski fotoaparati pogosto uporabljali v kombinaciji s teodolitom (slika 5). V stereometričnih fotoaparatih so povezali dva merska fotoaparata na stabilnem nosilcu, ki sta tako sočasno zajemali stereopar. Instrument se za natančna merjenja postavi na stativ.



Slika 5: Primer Zeissovih merskih fotoaparatorov (Foto. erikoissovellutukset, 2013)

Bistvo merskega fotoaparata sta kakovosten optični sistem in stabilna zgradba fotoaparata, ki omogočata zajem podatkov z visoko natančnostjo. Dobro kalibrirani merski fotoaparati (zelo natančna kalibracija se izvede v posebnem laboratoriju) so seveda dražji, ob tem pa razvoj programske opreme omogoča več možnosti za obdelavo podatkov tudi s cenovno bolj dostopnimi fotoaparati (Mikhail, 2001).

2.5 Namen orientacije stereopara

Preden začnemo s pregledom teorije orientacije stereopara, se je potrebno vprašati, kaj je pravzaprav cilj obravnavanih fotogrametričnih postopkov. Ugotovimo lahko, da se postopki izvajajo, ker želimo digitalno zajeti in prikazati objekt ter želimo o njem pridobiti čim več informacij (koordinate, geometrične elemente in attribute). Metode, ki nam to omogočajo, v glavnem temeljijo na merjenih slikovnih koordinatah tako iz analognih kot tudi iz digitalnih posnetkov.

V praksi se ti postopki delijo glede na število posnetkov kot osnovne enote za zajem, vključenih v obdelavo. Vsem metodam je skupno to, da se odnos med zajetimi posnetki in geometrijo objekta vzpostavi preko parametrov notranje in zunanje orientacije. Postopki ponavadi potekajo po sledečem vrstnem redu:

- pridobitev informacij o opazovanem objektu (referenčne točke, dolžine, geometrični elementi),
- merjenje točk na slikah za potrebe orientacije (slikovne koordinate),
- izračun parametrov notranje in zunanje orientacije,
- zajem objekta iz orientiranih slik (merjenje točk, geometričnih elementov, izgradnja topologije).

Glede na število posnetkov kot osnovne enote v obdelavi lahko metode delimo v tri skupine:

- obdelava posameznega posnetka (v obdelavi nastopa le en posnetek naenkrat),
- stereoskopska obdelava (naenkrat obdelujemo stereopar, metode pa temeljijo na principu stereoskopije),
- večslikovna obdelava (gre za hkratno obdelavo dveh ali več posnetkov z analitičnimi metodami, torej brez uporabe stereoskopije).

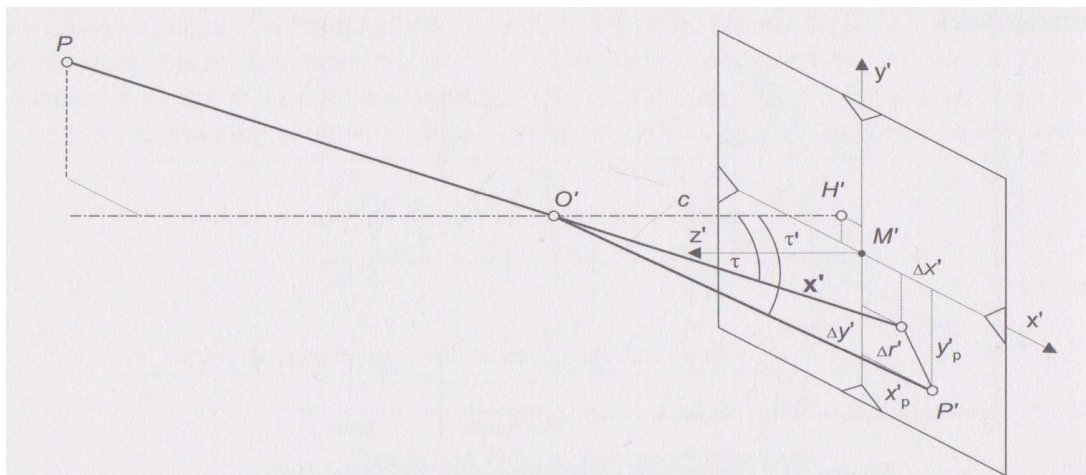
Če povzamemo bistvo, je cilj obravnavanih postopkov v splošnem mogoče doseči le s pravilno določitvijo parametrov notranje in zunanje orientacije. V primeru obdelave stereopara pa zunanjo orientacijo lahko nadomestimo z dvostopenjskim postopkom določitve parametrov relativne in absolutne orientacije. Na ta način lahko objekt primerno pozicioniramo in orientiramo v prostoru (Luhmann, 2011).

V podpoglavjih od 2.6 do 2.10 so opisani teoretični postopki orientacije. Najprej se posvetimo obravnavi notranje orientacije, nato pa sledi še opis zunanje orientacije (več različnih metod izračuna, ki smo jih uporabili v praktičnem delu diplomske naloge) ter dvostopenjske metode orientacije stereopara. Poleg tega so opisane tudi teoretične osnove posredne izravnave po metodi najmanjših kvadratov, saj smo to metodo uporabili za izračun parametrov v vseh računskih primerih.

2.6 Notranja orientacija posnetka

Ponovimo, da gre pri notranji orientaciji za opis notranjih geometrijskih odnosov v konkretnem fotoaparatu, ki vplivajo na preslikavo in na osnovi katerih lahko vzpostavimo slikovni koordinatni sistem. Notranjo orientacijo torej predstavljajo parametri, ki opisujejo geometrični model fotoaparata.

Predpostavimo, da je fotoaparat fizični sistem v prostoru. Sistem sestoji iz ravnine, na katero se preslika slikani objekt (pri analognih instrumentih je to fotografski film, pri digitalnih pa senzor) in iz leče (objektiva) s projekcijskim centrom, preko katerega potujejo vsi slikovni žarki. Parametri notranje orientacije določajo položaj projekcijskega centra glede na obravnavano ravnino, konstanto fotoaparata (goriščno razdaljo), položaj glavne točke in druge sistematične vplive na popačenje slike.



Slika 6: Notranja orientacija posnetka (Luhmann, 2011)

Slika 6 predstavlja shematski prikaz parametrov notranje orientacije posnetka. Parametri, glede na sliko 6, so naslednji:

- glavna točka H':

Nadir glavne točke je projekcijski center O'. Glavna točka ima koordinate x'_0 in y'_0 . Pri dobrih fotoaparatih glavna točka približno sovпада s centrom fotografije ($H' \approx M'$), ki ga pri analognih merskih fotoaparatih določa presek robnih mark.

- konstanta fotoaparata c:

To je pravokotna razdalja med projekcijskim centrom in ravnino slike. Pri nastavitvi fokusiranja na fotografsko neskončnost je to goriščna razdalja objektiv.

- parametri, ki opisujejo sistematične napake pri nastanku fotografije:

To so predvsem parametri, ki opisujejo popačenje fotografije zaradi optičnih lastnosti leče oziroma objektiv. Najbolj pomembni so parametri, ki opisujejo radialno distorzijo, saj ima ta običajno največji vpliv. Na sliki 6 je popravek označen z vektorjem $\Delta \mathbf{r}'$.

V kolikor so ti parametri znani, lahko določimo vektor \mathbf{x}' , ki po Luhmannu (2011) definira odnos med slikovnim koordinatnim sistemom in projekcijskim centrom:

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_p - x'_0 - \Delta x' \\ y'_p - y'_0 - \Delta y' \\ -c \end{bmatrix} \quad (1)$$

V enačbi (1) predstavljajo:

x'_p, y'_p

merjene slikovne koordinate P'

x'_0, y'_0	koordinate glavne točke H'
$\Delta x', \Delta y'$	popravki zaradi vpliva radialne distorzije po oseh

Parametre notranje orientacije določamo s kalibracijo fotoaparata. Poznamo več različnih metod kalibracije. Merske fotoaparate lahko kalibriramo v laboratorijih, ki so za to pooblaščen, kalibracijo pa izvajajo s pomočjo posebnih instrumentov (goniometer, kolimator in drugi instrumenti, s katerimi lahko preverjamo optiko merskega fotoaparata). Kalibracijo lahko opravimo tudi na terenu, s pomočjo testnih polj ali drugih objektov z znanimi koordinatami ali dolžinami (Luhmann, 2011).

Prvi popravek, ki se mu bomo podrobneje posvetili, je premik za glavno točko. V idealnih pogojih se črte, ki povezujejo nasprotne robne marke, sekajo na sredini slike. Pri digitalnih fotoaparatih je v idealnem pogoju glavna točka povsem na sredini slike. Ta pogoj v praksi zaradi fizične izdelave fotoaparata ni možno popolnoma izpolniti, zato se s kalibracijo pridobi odstopanja glavne točke od idealne sredine. Popravek se določi z naslednjimi enačbami (Socet Set, 2009):

$$\begin{aligned}x_p &= x'_p - x'_0 \\ y_p &= y'_p - y'_0\end{aligned}\tag{2}$$

V enačbah (2) predstavljajo:

x'_p, y'_p	merjene slikovne koordinate P' v koordinatnem sistemu robnih mark
x'_0, y'_0	koordinate glavne točke H'
x_p, y_p	slikovne koordinate merjene točke, popravljene za položaj glavne točke

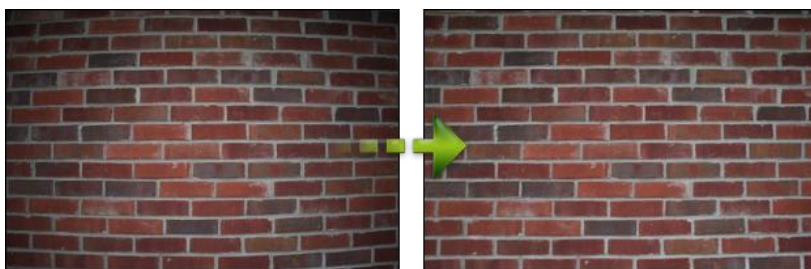
Naslednji popravek odpravlja napako fotografije zaradi optičnega sistema. To je popravek za optično distorzijo. Distorzija nastane zaradi nepravilnosti leč v objektivu fotoaparata in se spreminja v radialni smeri, z izhodiščem v točki simetrije (slika 7). Točka simetrije se nekoliko razlikuje od glavne točke, pridobimo pa jo iz podatkov kalibracije fotoaparata. Popravek radialne distorzije lahko opišemo s polinomom. Koeficiente distorzije pridobimo s kalibracijo fotoaparata. V izračun lahko vključimo tudi popravek tangencialne distorzije, katere vpliv se izraža v pravokotni smeri glede na radialno distorzijo. To je distorzija, ki se pojavi zaradi

nepravilnega položaja leč v optičnem sistemu. Radialna distorzija torej predstavlja napako, ki nastane zaradi oblike leč, tangencialna distorzija pa napako zaradi napačnega položaja leč. Popravek distorzije se izračuna kot (Socet Set, 2009):

$$\begin{aligned}
 r &= \sqrt{(x_p^2 + y_p^2)} \\
 dx_r &= x_p * (K0 + K1 * r^2 + K2 * r^4 + K3 * r^6) \\
 dy_r &= y_p * (K0 + K1 * r^2 + K2 * r^4 + K3 * r^6) \\
 dx_c &= P1 * (r^2 + 2 * x_p^2) + 2 * P2 * x_p * y_p \\
 dy_c &= P2 * (r^2 + 2 * y_p^2) + 2 * P1 * x_p * y_p \\
 x_c &= x_p + dx_r + dx_c \\
 y_c &= y_p + dy_r + dy_c
 \end{aligned} \tag{3}$$

V enačbah (3) predstavljajo:

r	radialna oddaljenost slikovnih koordinat od točke simetrije
dx_r, dy_r	popravek radialne distorzije po posamezni koordinatni osi
$K0, K1, K2, K3$	koeficienti radialne distorzije
dx_c, dy_c	popravek tangencialne distorzije po posamezni koordinatni osi
$P1, P2$	koeficienti tangencialne distorzije
x_c, y_c	slikovne koordinate merjenih točk, popravljene za distorzijo



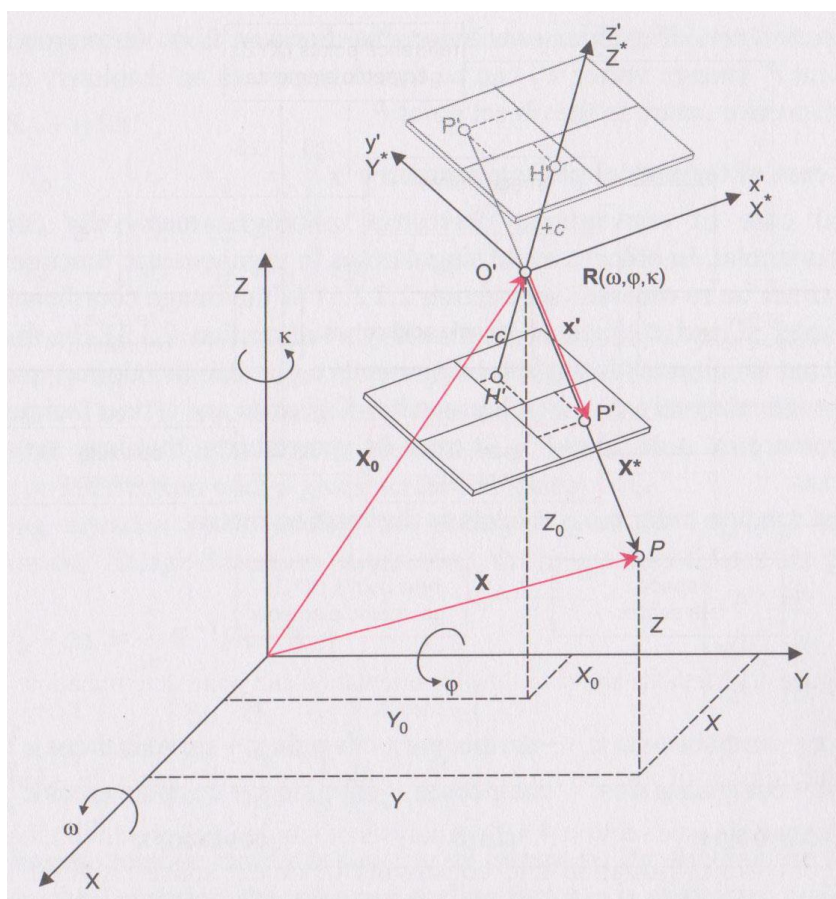
Slika 7: Prikaz popravka slike za radialno distorzijo (Texturemate, 2013)

Obstajajo tudi drugi popravki, ki odpravljajo geometrične napake fotografije npr. popravki zaradi vpliva atmosfarske refrakcije in popravki zaradi vpliva ukrivljenosti zemlje. Glede na to, da so razdalje med stojiščem in zajetim objektom pri bližnjefotogrametriji majhne, te popravke lahko zanemarimo. S temi postopki je posnetek notranje orientiran in pripravljen za nadaljnjo obdelavo. Sledi zunanja orientacija posnetka.

2.7 Zunanja orientacija posnetka

Zunanjo orientacijo posnetka sestavlja šest parametrov, ki opredelijo lego in orientacijo slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni koordinatni sistem.

S pomočjo notranje orientacije, opisane v poglavju 2.6, najprej vzpostavimo slikovni koordinatni sistem. Ko je slikovni koordinatni sistem določen, je posnetek potrebno pravilno umestiti v prostor. Ta postopek imenujemo zunanja orientacija. Postopek je ponazorjen na sliki 8.



Slika 8: Zunanja orientacija posnetka (Luhmann, 2011)

Prostorski položaj izhodišča slikovnega koordinatnega sistema je definiran z vektorjem \mathbf{X}_0 , ki poteka iz izhodišča objektnega koordinatnega sistema do projekcijskega centra O' . Rotacijska matrika definira zasuke slikovnega koordinatnega sistema glede na objektni koordinatni sistem. Rotacijsko matriko določajo neodvisne rotacije ω , φ in κ , ki predstavljajo zasuke okoli koordinatnih osi X, Y in Z. Po Luhmannu (2011) lahko zapišemo enačbe:

$$\begin{aligned}
\mathbf{X}_0 &= \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{R} &= \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\kappa \\
\mathbf{R} &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\
\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} &= \begin{bmatrix} c_\varphi c_\kappa & -c_\varphi s_\kappa & s_\varphi \\ c_\omega s_\kappa + s_\omega s_\varphi c_\kappa & c_\omega c_\kappa - s_\omega s_\varphi s_\kappa & -s_\omega c_\varphi \\ s_\omega s_\kappa - c_\omega s_\varphi c_\kappa & s_\omega c_\kappa + c_\omega s_\varphi s_\kappa & c_\omega c_\varphi \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4}$$

V enačbah (4) predstavljajo:

\mathbf{X}_0	položaj projekcijskega centra
\mathbf{R}	rotacijska matrika
c, s	c predstavlja funkcijo kosinus, s pa funkcijo sinus kota

Če poznamo parametre zunanje orientacije, potem lahko pot slikovnega žarka od točke P' v slikovnem koordinatnem sistemu do projekcijskega centra O' (vektor $\mathbf{O}'P' = \mathbf{x}'$ na sliki 8) podaljšamo do točke P v objektnem koordinatnem sistemu (vektor $\mathbf{O}'P = \mathbf{x}' + \mathbf{X}^*$ na sliki 8).

Preden opišemo same postopke zunanje orientacije je potrebno obrazložiti osnove. Temelj večine postopkov zunanje orientacije je matematični model centralne projekcije, ki ga izrazimo s kolinearno enačbo, katere izpeljavo razložimo v nadaljevanju.

Objektne koordinate točke P lahko pridobimo iz vektorja od izhodišča objektnega koordinatnega sistema do projekcijskega centra \mathbf{X}_0 in vektorja od projekcijskega centra do točke P v objektnem koordinatnem sistemu \mathbf{X}^* (Luhmann, 2011):

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \mathbf{X}^* \tag{5}$$

Vektor \mathbf{X}^* je podan v objektnem koordinatnem sistemu. Vektor \mathbf{x}' lahko transformiramo v objektni koordinatni sistem z rotacijsko matriko \mathbf{R} in faktorjem merila m . Glede na to, da ima enako smer kot vektor \mathbf{X}^* lahko zapišemo (Luhmann, 2011):

$$\mathbf{X}^* = m\mathbf{R}\mathbf{x}' \tag{6}$$

Iz tega sledi, da je projekcija točke v slikovnem koordinatnem sistemu na objektni koordinatni sistem definirana kot (Luhmann, 2011):

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + m\mathbf{R}\mathbf{x}'$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Z obračunom enačbe, upoštevanjem glavne točke H' (x'_0, y'_0) in popravkom zaradi radialne optične distorzije $\Delta x'$ lahko slikovne koordinate določimo kot (Luhmann, 2011):

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' - \mathbf{x}'_0 - \Delta \mathbf{x}' &= \frac{1}{m} \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \\ \begin{bmatrix} x' - x'_0 - \Delta x' \\ y' - y'_0 - \Delta y' \\ -c \end{bmatrix} &= \frac{1}{m} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Če prvo in drugo vrstico matrike delimo s tretjo vrstico in pokrajšamo merilo, po Luhmannu (2011) dobimo kolinearne enačbe (9):

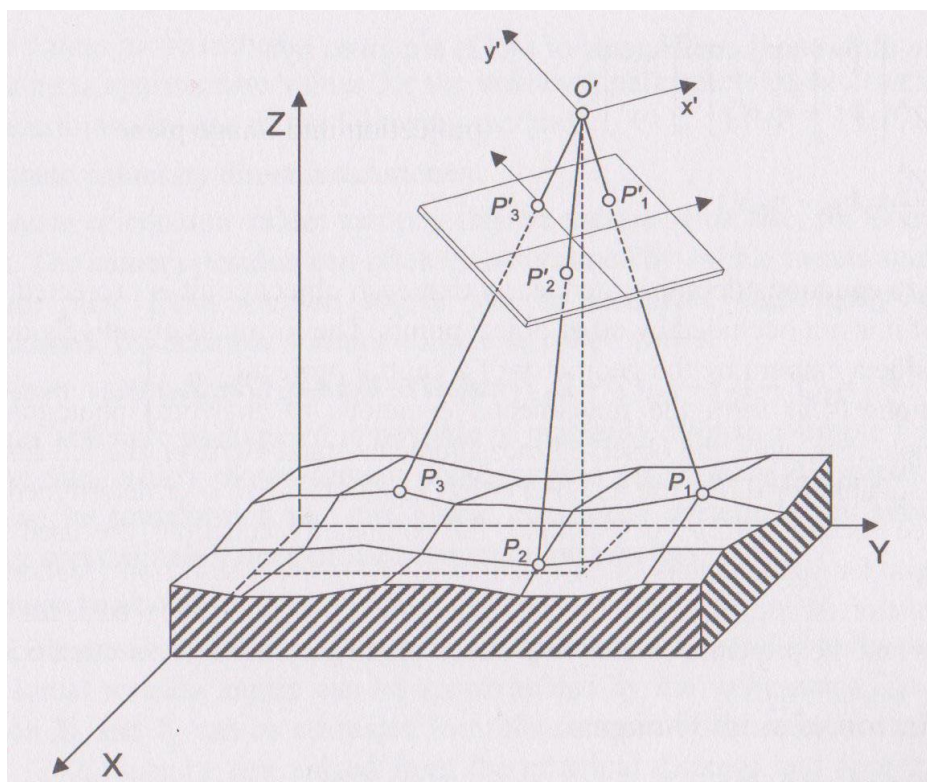
$$\begin{aligned} x' &= x'_0 - c \frac{r_{11}(X-X_0)+r_{21}(Y-Y_0)+r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 - c \frac{r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (9)$$

Enačbi (9) predstavljata povezavo objektnih koordinat (X, Y, Z) in pripadajočih slikovnih koordinat (x', y') preko parametrov notranje orientacije ($x'_0, y'_0, c, \Delta x', \Delta y'$) in parametrov zunanje orientacije ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$). Omenili smo že, da je to ena izmed najbolj temeljnih enačb v analitični fotogrametriji (Luhmann, 2011).

Sledi opis posameznih postopkov izračuna parametrov zunanje orientacije posnetka. Omejili se bomo na tri metode, od katerih dve obravnavata vsak posnetek posebej (metoda notranjega ureza in metoda direktne linearne transformacija), tretja pa kot delovno enoto obravnava stereopar (postopek dvostopenjske orientacije).

2.7.1. Metoda notranjega ureza

Z metodo notranjega ureza (angl. space resection) izračunamo parametre zunanje orientacije posamezne fotografije. Postopek zahteva, da so dane vsaj tri oslonilne točke v objektnem koordinatnem sistemu, ki ne smejo ležati na skupni premici. Za te točke na sliki izmerimo tudi njihove slikovne koordinate. Da potrebujemo najmanj tri točke, se da razložiti s pomočjo kolinearne enačbe (9). Za vsako slikovno točko lahko zapišemo dve enačbi, razrešiti pa moramo šest neznank. Potrebujemo torej šest enačb, ki jih pridobimo s tremi slikovnimi točkami. Snop najmanj treh žarkov, ki povezujejo projekcijski center, slikovne točke in njihove pripadajoče objektne točke določi nedvoumno lego ter orientacijo obravnavane fotografije (slika 9).



Slika 9: Metoda notranjega ureza (Luhmann, 2011)

Če uporabimo merjene slikovne koordinate oslonilnih točk in znane parametre notranje orientacije, lahko kolinearno enačbo zapišemo v naslednji obliki (Luhmann, 2011):

$$\begin{aligned}x' + vx' &= f(\underline{X_0}, \underline{Y_0}, \underline{Z_0}, \underline{\omega}, \underline{\varphi}, \underline{\kappa}, x'_0, z', \Delta x', X, Y, Z) \\y' + vy' &= f(\underline{X_0}, \underline{Y_0}, \underline{Z_0}, \underline{\omega}, \underline{\varphi}, \underline{\kappa}, y'_0, z', \Delta y', X, Y, Z)\end{aligned}\quad (10)$$

V enačbi (10) predstavljata vx' in vy' popravek opazovanj x' in y' , funkcija f pa predstavlja desno stran kolinearne enačbe. V zapisu so podčrtane vrednosti neznank. Funkcija ni linearna, zato moramo sistem enačb linearizirati, pri čemer običajno uporabimo razvoj funkcije v Taylorjevo vrsto in enačbe rešimo po posredni metodi najmanjših kvadratov, ki je predstavljena v poglavju 2.10.

Vsaki merjeni slikovni točki pripadata dve linearizirani enačbi (Luhmann, 2011):

$$\begin{aligned}vx'_i &= \left(\frac{\partial x'}{\partial X_0}\right)^0 dX_0 + \left(\frac{\partial x'}{\partial Y_0}\right)^0 dY_0 + \left(\frac{\partial x'}{\partial Z_0}\right)^0 dZ_0 + \left(\frac{\partial x'}{\partial \omega}\right)^0 d\omega + \left(\frac{\partial x'}{\partial \varphi}\right)^0 d\varphi + \left(\frac{\partial x'}{\partial \kappa}\right)^0 d\kappa - (x'_i - x'^0_i) \\vy'_i &= \left(\frac{\partial y'}{\partial X_0}\right)^0 dX_0 + \left(\frac{\partial y'}{\partial Y_0}\right)^0 dY_0 + \left(\frac{\partial y'}{\partial Z_0}\right)^0 dZ_0 + \left(\frac{\partial y'}{\partial \omega}\right)^0 d\omega + \left(\frac{\partial y'}{\partial \varphi}\right)^0 d\varphi + \left(\frac{\partial y'}{\partial \kappa}\right)^0 d\kappa - (y'_i - y'^0_i)\end{aligned}\quad (11)$$

Zaradi linearizacije je potrebno določiti približne vrednosti parametrov zunanje orientacije. V enačbi (11) predstavljata x'_i in y'_i merjene slikovne koordinate, x'^0_i in y'^0_i pa vrednosti funkcije, izračunane s približnimi vrednostmi parametrov zunanje orientacije. Enačbo parcialno odvajamo po iskanih parametrih (dX_0 , dY_0 , dZ_0 , $d\omega$, $d\varphi$, $d\kappa$ predstavljajo prirastke neznank).

Kolinearno enačbo (9) poenostavimo tako, da števca zapišemo kot k_x in k_y , imenovalc pa kot N (Luhmann, 2011):

$$\begin{aligned}x' &= x'_0 + c \frac{k_x}{N} + \Delta x' \\y' &= y'_0 + c \frac{k_y}{N} + \Delta y'\end{aligned}\quad (12)$$

Pri tem parcialne odvode izračunamo po Luhmannu (2011) kot:

$$\begin{aligned}\frac{\partial x'}{\partial X_0} &= \frac{z'}{N^2} (r_{13}k_x - r_{11}N) \\ \frac{\partial x'}{\partial Y_0} &= \frac{z'}{N^2} (r_{23}k_x - r_{21}N) \\ \frac{\partial x'}{\partial Z_0} &= \frac{z'}{N^2} (r_{33}k_x - r_{31}N)\end{aligned}\quad (13)$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \omega} = \frac{z'}{N} \left(\frac{k_x}{N} (r_{33}(Y - Y_0) - r_{23}(Z - Z_0)) - r_{31}(Y - Y_0) + r_{21}(Z - Z_0) \right)$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \varphi} = \frac{z'}{N} \left(\frac{k_x}{N} - (k_y \sin \kappa + k_x \cos \kappa) + N \cos \kappa \right)$$

$$\frac{\partial x'}{\partial \kappa} = \frac{z'}{N} k_y$$

$$\frac{\partial y'}{\partial X_0} = \frac{z'}{N^2} (r_{13}k_y - r_{12}N)$$

$$\frac{\partial y'}{\partial Y_0} = \frac{z'}{N^2} (r_{23}k_y - r_{22}N)$$

$$\frac{\partial y'}{\partial Z_0} = \frac{z'}{N^2} (r_{33}k_y - r_{32}N)$$

$$\frac{\partial y'}{\partial \omega} = \frac{z'}{N} \left(\frac{k_y}{N} (r_{33}(Y - Y_0) - r_{23}(Z - Z_0)) - r_{32}(Y - Y_0) + r_{22}(Z - Z_0) \right)$$

$$\frac{\partial y'}{\partial \varphi} = \frac{z'}{N} \left(\frac{k_y}{N} - (k_x \cos \kappa + k_y \sin \kappa) + N \sin \kappa \right)$$

$$\frac{\partial y'}{\partial \kappa} = -\frac{z'}{N} k_x$$

Po izravnavi pridobimo popravke parametrov zunanje orientacije, ki jih prištejemo k predhodnim približkom parametrov. Postopek je iterativen in ga ponavljamo toliko časa, dokler ne zadovoljimo zahtevane natančnosti in se parametri bistveno ne spreminjajo več (Luhmann, 2011).

2.7.2. Metoda direktne linearne transformacije (metoda DLT)

Parametre zunanje orientacije posameznega posnetka lahko namesto s kolinearno enačbo izračunamo z direktno linearno transformacijo (metoda DLT). Direktna linearna transformacija sicer temelji na kolinearni enačbi, pri čemer pa so koordinate, merjene v ravnini posnetka, lahko podane v poljubnem ravninskem koordinatnem sistemu (torej ni potrebno poznati položaja glavne točke).

Enačbo transformacije DLT zapišemo kot (Luhmann, 2011):

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4}{c_1X + c_2Y + c_3Z + 1} \\ y &= \frac{b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4}{c_1X + c_2Y + c_3Z + 1} \end{aligned} \tag{14}$$

V enačbah DLT je enajst neznank, ki implicitno vsebujejo parametre zunanje in notranje orientacije. Za uspešno izvedbo te metode je potrebno poznati vsaj šest oslonilnih točk v objektnem koordinatnem sistemu, ki pa ne smejo biti razporejene v isti ravnini (Luhmann, 2011).

V postopku lahko upoštevamo tudi višino in širino zajetega posnetka, ki se odraža v spreminjanju merila konstante fotoaparata (Mikhail, 2001):

$$\begin{aligned} c_x &= c \lambda_x \\ c_y &= c \lambda_y \end{aligned} \quad (15)$$

Pri tem sta lahko faktorja λ_x in λ_y različna.

Pred izravnavo nastavimo enačbe opazovanj. Vsaka slikovna točka nam poda dve enačbi, ki imata obliko (Kraus, 1997):

$$\begin{aligned} \bar{x} + \tilde{v}_x &= Xa_1 + Ya_2 + Za_3 + a_4 - xXc_1 - xYc_2 - xZc_3 \\ \bar{y} + \tilde{v}_y &= Xb_1 + Yb_2 + Zb_3 + b_4 - yXc_1 - yYc_2 - yZc_3 \end{aligned} \quad (16)$$

S pomočjo teh enačb lahko nastavimo matrični sistem (Kraus, 1997):

$$\begin{bmatrix} \tilde{v}_{x_1} \\ \tilde{v}_{y_1} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{x_i} \\ \tilde{v}_{y_i} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{x_n} \\ \tilde{v}_{y_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & X_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 & -x_1Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 & -y_1Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_iX_i & -x_iY_i & -x_iZ_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -y_iX_i & -y_iY_i & -y_iZ_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_nX_n & -x_nY_n & -x_nZ_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -y_nX_n & -y_nY_n & -y_nZ_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{y}_1 \\ \vdots \\ \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \\ \vdots \\ \bar{x}_n \\ \bar{y}_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

S posredno izravnavo matričnega sistema pridobimo vseh enajst iskanih neznank. V izravnavi tudi izračunamo popravke opazovanj. Opazovanja, torej ravninske koordinate na sliki, iterativno popravljamo toliko časa, dokler se neznanke bistveno ne spreminjajo več.

Rezultat izravnave so torej vrednosti enajstih neznank, ki implicitno vsebujejo vrednosti parametrov notranje in zunanje orientacije. Le-te moramo torej izračunati iz parametrov transformacije, pri čemer uporabimo naslednje enačbe (Mikhail, 2001):

$$\begin{aligned}
 L^2 &= c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 \\
 x'_0 &= \frac{a_1 c_1 + a_2 c_2 + a_3 c_3}{L^2} \\
 y'_0 &= \frac{b_1 c_1 + b_2 c_2 + b_3 c_3}{L^2} \\
 c_x^2 &= \frac{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}{L^2} - x'^2_0 \\
 c_y^2 &= \frac{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2}{L^2} - y'^2_0 \\
 r_{31} &= \frac{c_1}{L} \\
 r_{32} &= \frac{c_2}{L} \\
 r_{33} &= \frac{c_3}{L} \\
 r_{11} &= \frac{x'_0 r_{31} - \frac{a_1}{L}}{c_x} \\
 r_{12} &= \frac{x'_0 r_{32} - \frac{a_2}{L}}{c_x} \\
 r_{13} &= \frac{x'_0 r_{33} - \frac{a_3}{L}}{c_x} \\
 r_{21} &= \frac{y'_0 r_{31} - \frac{b_1}{L}}{c_y} \\
 r_{22} &= \frac{y'_0 r_{32} - \frac{b_2}{L}}{c_y} \\
 r_{23} &= \frac{y'_0 r_{33} - \frac{b_3}{L}}{c_y}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Pri tem predstavljajo rezultati r_{ij} elemente rotacijske matrike $R_{\kappa\varphi\omega}$. Matriko lahko po Mikhailu (2001) zapišemo kot:

$$\mathbf{R}_{\kappa\varphi\omega} = \begin{bmatrix} c_\varphi c_\kappa & c_\omega s_\kappa + s_\omega s_\varphi c_\kappa & s_\omega s_\kappa - c_\omega s_\varphi c_\kappa \\ -c_\varphi s_\kappa & c_\omega c_\kappa - s_\omega s_\varphi s_\kappa & s_\omega c_\kappa + c_\omega s_\varphi s_\kappa \\ s_\varphi & -s_\omega c_\varphi & c_\omega c_\varphi \end{bmatrix} \tag{19}$$

V enačbi (19) predstavlja črka s funkcijo sinus, črka c pa funkcijo kosinus navedenega kota.

Iz rotacijske matrike je mogoče določiti rotacije zunanje orientacije ω , φ in κ . Najprej preverimo determinanto. V kolikor je determinanta rotacijske matrike negativna, matriko pomnožimo s faktorjem -1 in s tem uredimo sučnost matrike (Young-Hoo Kwon, 1998).

Če preučimo rotacijsko matriko, lahko kote iz nje izračunamo na naslednji način (Slabaugh, s.a.):

$$\begin{aligned}\tan \omega &= \frac{-r_{32}}{r_{33}} \\ \sin \varphi &= r_{31} \\ \tan \kappa &= \frac{-r_{21}}{r_{11}}\end{aligned}\tag{20}$$

Pri tem je seveda potrebno kot umestiti v primeren kvadrant. Programsko okolje *Matlab* vsebuje funkcijo *atan2*, ki avtomatsko poskrbi za pravilno razvrstitev kotov ω in κ . Nekoliko drugače je pri kotu φ , za katerega je potrebno to določiti ročno s funkcijo. Na ta način izračunamo rotacije zunanje orientacije.

Potrebujemo še koordinate projekcijskega centra. Te manjkajoče tri parametre zunanje orientacije pridobimo z naslednjim izrazom (Mikhail, 2001):

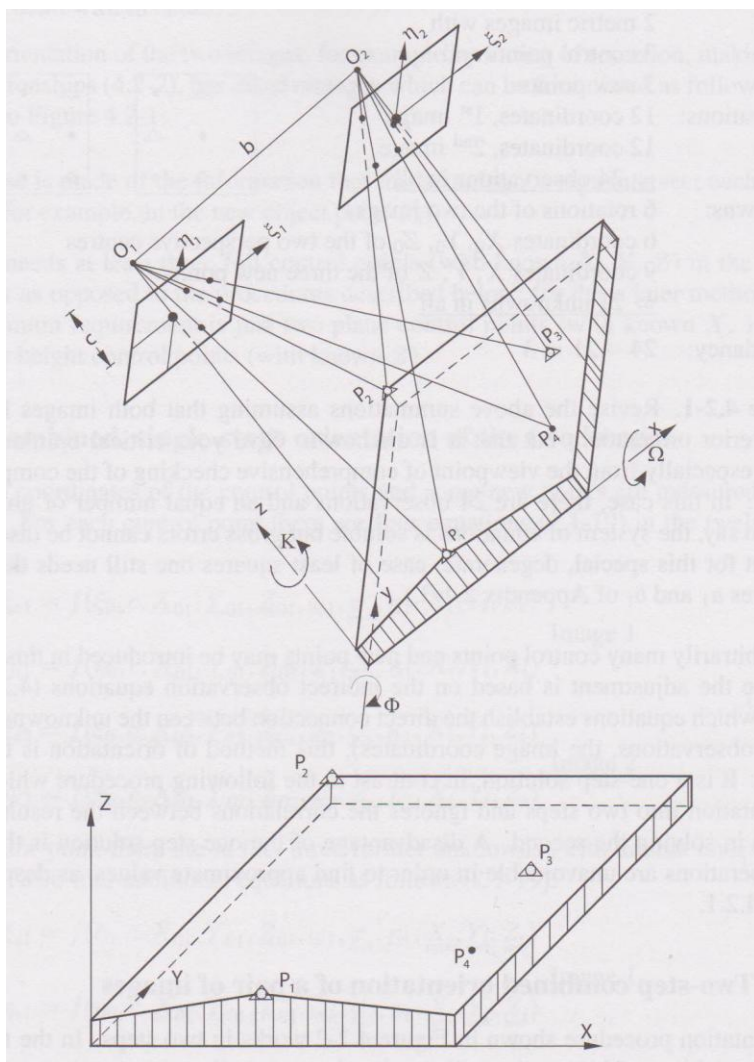
$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_4 \\ b_4 \\ 1 \end{bmatrix}\tag{21}$$

Potrebno je poudariti tudi slabosti metode DLT. Glavna slabost je singularnost sistema, v primeru, ko oslonilne točke ležijo na isti ravnini. V pripravi podatkov je potrebno biti pozoren na to, da se temu izognemo. Druga slabost metode je minimalno število oslonilnih točk. Čeprav se v moderni fotogrametriji zajema velike količine podatkov, včasih naletimo na primer, ko ne moremo zagotoviti najmanj šest oslonilnih točk, metode pa zato ni mogoče izvesti.

2.8 Dvostopenjska metoda orientacije stereopara

Pri dvostopenjski metodi se skupaj obravnavata obe fotografiji stereopara. Sliki se morata prekrivati za vsaj 60%.

Ta orientacija deluje v dveh korakih (slika 10). V prvem koraku se določi medsebojni odnos med obema posnetkoma stereopara (relativna orientacija). Za potrebe nadaljnje obdelave se določi model zajetega objekta v modelnem koordinatnem sistemu (x, y, z). V drugem koraku ta model transformiramo v X, Y, Z objektni koordinatni sistem (absolutna orientacija).



Slika 10: Prikaz dvostopenjske orientacije para fotografij (Kraus, 2007)

Prvi korak torej predstavlja relativna orientacija. Z njo določamo pet neznanih parametrov. Relativno orientacijo izvajamo le s podatki, pridobljenimi z merjenjem slikovnih koordinat. Na vsakem posnetku definiramo svoj slikovni koordinatni sistem, z relativno orientacijo pa določamo odnos teh dveh koordinatnih sistemov. Vsakemu slikovnemu koordinatnemu sistemu določimo po tri zasuke okoli osi (ω , φ in κ), vektor med obema projekcijskima centroma, ki vsebuje tri komponente, pa imenujemo baza b . Če seštejemo dvakrat po tri rotacijske kote in tri komponente baze b ugotovimo, da relativno orientacijo lahko opišemo z devetimi parametri, od teh pa jih je le pet neodvisnih, kar se lahko dokaže z matematično obravnavo problema. V fotogrametrični praksi se jih za opis uporablja le osem, saj abscisno komponento baznega vektorja b_x ne obravnavamo kot parameter ampak kot poljubno izbrano vrednost (b_x določa merilo modela, ki pa je v tej fazi orientacije poljubno) (Vezočnik, 2006).

Čeprav je možnosti več, se za izvedbo relativne orientacije v praksi po večini uporabljata le dve metodi, ki se po Vezočniku (2006) razlikujeta v iskanih parametrih:

- relativna orientacija neodvisnih modelov (iščemo φ' , κ' , ω'' , φ'' , κ''),
- relativna orientacija s priorientacijo (iščemo b_y , b_z , ω'' , φ'' , κ'').

Drugi korak dvostopenjske orientacije stereopara predstavlja odnos med modelnimi koordinatami x , y , z in med objektnimi koordinatami X , Y , Z . Izrazimo jih s sedem-parametrično transformacijo (Kraus, 2007):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ Z_u \end{bmatrix} + m\mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (22)$$

V enačbi (22) predstavljajo:

X_u, Y_u, Z_u	objektne koordinate projekcijskega centra
m	merilo modela
R	3 x 3 rotacijska matrika med modelnim in objektnim koordinatnim sistemom, ki je definirana z rotacijskimi koti Ω , Φ in K

Sedem parametrov, X_u , Y_u , Z_u , m , Ω , Φ , K imenujemo parametri absolutne orientacije. Za izračun sedmih neznank je potrebno poznati vsaj tri oslonilne točke v objektnem koordinatnem sistemu (Kraus, 2007).

2.8.1 Relativna orientacija stereopara

Relativna orientacija stereopara opisuje translacijo in rotacijo fotografije glede na njen stereopar v skupnem, modelnem koordinatnem sistemu. Kot je že bilo omenjeno, v praksi največkrat uporabljamo dva postopka: relativno orientacijo s priorientacijo ali pa relativno orientacijo neodvisnih modelov.

Pri relativni orientaciji s priorientacijo fiksiramo en posnetek stereopara. To pomeni, da vse rotacijske kote tega posnetka nastavimo na 0, projekcijski center pa postavimo v izhodišče modelnega koordinatnega sistema (koordinate so enake 0, 0, 0). Lega in orientacijo drugega posnetka stereopara (glede na prvi posnetek stereopara) določajo tri translacije in tri rotacije. Tri translacije predstavlja bazni vektor. Abscisno komponento baznega vektorja b_x lahko obravnavamo kot poljubno izbrano vrednost in jo ponavadi nastavimo na vrednost 1. Na ta način nam za določitev ostane le še 5 parametrov relativne orientacije (b_y , b_z , ω'' , φ'' , κ'').

Drug postopek relativne orientacije je metoda neodvisnih modelov. Izhodišče modelnega koordinatnega sistema je postavljeno v projekcijski center prve fotografije stereopara. Komponenti baznega vektorja b_y in b_z sta nastavljeni na 0. Abscisno komponento baznega vektorja b_x lahko obravnavamo kot poljubno izbrano vrednost in jo običajno nastavimo na vrednost 1. Fiksiramo tudi en rotacijski kot ω in ga nastavimo na 0. Tako nam za določitev ostane še pet parametrov relativne orientacije (φ' , κ' , ω'' , φ'' , κ''). Tej metodi se bomo podrobneje posvetil v nadaljevanju.

Relativno orientacijo računamo na podlagi homolognih točk. Homologna točka je točka, ki na obeh posnetkih stereopara predstavlja isto točko v objektnem koordinatnem sistemu. Homologne točke lahko določamo ročno. V tem primeru je potrebno izbirati značilne točke (npr. rob okna, vrh strehe ...), ki jih dobro lahko določimo na obeh posnetkih. Obstaja tudi avtomatsko določanje homolognih točk s postopkom slikovnega ujemanja (ang. image matching) (Luhmann, 2011).

Relativno orientacijo neodvisnih modelov lahko izračunamo na dva načina. Prvi postopek določa relativno orientacijo skoraj navpičnih posnetkov. To so posnetki, katerih optična os je skoraj navpična. Izračun temelji na pogoju komplanarnosti. Parametre izračunamo s pomočjo paralaksne enačbe. Postopek izvedemo s pomočjo posredne izravnave po metodi

najmanjših kvadratov. Enačbe opazovanj so po Krausu (2007) za vsako homologno točko naslednje:

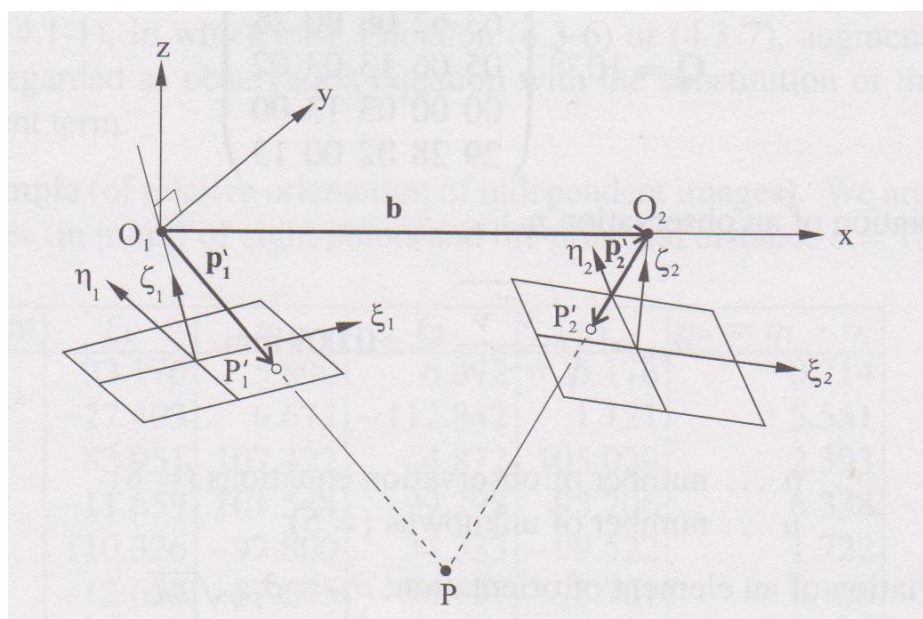
$$v_{p_\eta} = -\xi_1 d\hat{\kappa}_1 + \xi_2 d\hat{\kappa}_2 + \frac{\xi_1 \eta_1}{c} d\hat{\varphi}_1 - \frac{\xi_2 \eta_2}{c} d\hat{\varphi}_2 + \left(c + \frac{\eta_2^2}{c}\right) d\hat{\omega}_2 - p_\eta \quad (23)$$

V enačbi (23) predstavljajo:

c	konstanta fotoaparata
$\varphi_1, \kappa_1, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2$	približne vrednosti neznank relativne orientacije
$\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2$	slikovne koordinate prvega in drugega posnetka
p_η	razlika med koordinatami η_1 in η_2 , ki jo imenujemo paralaksa y

Opozarjamo, da so oznake osi slikovnega koordinatnega sistema nekoliko drugačne kot pri prejšnjih metodah. Oznake so spremenjene zato, ker se pri dvostopenjski metodi pojavi modelni koordinatni sistem, katerega koordinatne osi so v splošnem poimenovane kot x , y in z . Zato smo pri dvostopenjski metodi osi slikovnega koordinatnega sistema določali kot ξ (za absciso) in η (za ordinato).

Postopek relativne orientacije skoraj navpičnih posnetkov ni univerzalen, saj mora biti izpolnjen pogoj, da sta optični osi posnetka v skoraj vertikalnem položaju. Bolj primerna rešitev je izračun relativne orientacije za poljuben položaj posnetkov.



Slika 11: Prikaz relativne orientacije neodvisnih modelov (Kraus, 2007)

Pri izračunu relativne orientacije za poljubne posnetke je potrebno izpolniti pogoj komplanarnosti med vektorji \mathbf{b} , \mathbf{p}_1 in \mathbf{p}_2 (slika 11). Za izračun je potrebno poznati približne vrednosti parametrov (lahko jih določimo s postopkom relativne orientacije skoraj navpičnih posnetkov) in vsaj pet homolognih točk.

Če upoštevamo, da ima vsak posnetek svoj slikovni koordinatni sistem, lahko določimo, da imata vektorja \mathbf{p}_1 in \mathbf{p}_2 komponente (Kraus, 2007):

$$\begin{aligned}\mathbf{p}'_1 &= \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ -c \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}'_2 &= \begin{bmatrix} \xi_2 \\ \eta_2 \\ -c \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{24}$$

Če te vektorje s pomočjo rotacijskih matrik pretvorimo v skupni, modelni koordinatni sistem x , y , z , lahko zapišemo (Kraus, 2007):

$$\begin{aligned}\mathbf{p}_1 &= \mathbf{R}_1(\omega_1 = 0, \varphi_1, \kappa_1) \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ -c \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_2 &= \mathbf{R}_2(\omega_2, \varphi_2, \kappa_2) \begin{bmatrix} \xi_2 \\ \eta_2 \\ -c \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{25}$$

Vsako od matrik lahko zapišemo kot produkt z matriko \mathbf{R}_0 , ki je izračunana s pomočjo približnih vrednosti kotov. Tretji vektor je bazni vektor \mathbf{b} (Kraus, 2007):

$$\begin{aligned}\mathbf{p}_1 &= d\mathbf{R}_1 \mathbf{R}_1^0 \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ -c \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_2 &= d\mathbf{R}_2 \mathbf{R}_2^0 \begin{bmatrix} \xi_2 \\ \eta_2 \\ -c \end{bmatrix} \\ \mathbf{b} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{26}$$

Iz enačbe komplanarnosti vektorjev \mathbf{b} , \mathbf{p}_1 in \mathbf{p}_2 lahko za vsako točko določimo izraz (Kraus, 2007):

$$D = \begin{vmatrix} 1 & p_{1,x} & p_{2,x} \\ 0 & p_{1,y} & p_{2,y} \\ 0 & p_{1,z} & p_{2,z} \end{vmatrix} = p_{1,y}p_{2,z} - p_{1,z}p_{2,y} = 0 \quad (27)$$

Iz izraza (27) lahko izpeljemo enačbo, ki določa elemente relativne orientacije (Kraus, 2007):

$$v_D = \left(\frac{\partial D}{\partial \varphi_1}\right)^0 d\varphi_1 + \left(\frac{\partial D}{\partial \kappa_1}\right)^0 d\kappa_1 + \left(\frac{\partial D}{\partial \omega_2}\right)^0 d\omega_2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \varphi_2}\right)^0 d\varphi_2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \kappa_2}\right)^0 d\kappa_2 + D^0 \quad (28)$$

Pri tem so odvodi po posameznih neznankah $()^0$ sledeči (Kraus, 2007):

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial \omega_2} &= p_{2,y}p_{1,y} + p_{2,z}p_{1,z} \\ \frac{\partial D}{\partial \varphi_2} &= -\cos \omega_2 p_{2,x}p_{1,y} - \sin \omega_2 p_{2,x}p_{1,z} \\ \frac{\partial D}{\partial \kappa_2} &= (\xi_2 r_{2,32} - \eta_2 r_{2,31})p_{1,y} - (\xi_2 r_{2,22} - \eta_2 r_{2,21})p_{1,z} \\ \frac{\partial D}{\partial \varphi_1} &= p_{1,x}p_{2,y} \\ \frac{\partial D}{\partial \kappa_1} &= (\xi_1 r_{1,22} - \eta_1 r_{1,21})p_{2,z} - (\xi_1 r_{1,32} - \eta_1 r_{1,31})p_{2,y} \end{aligned} \quad (29)$$

S pomočjo enačb lahko izvedemo posredno izravnavo in izračunamo vektor neznank Δ . Postopek je iterativen in ga ponavljamo dokler popravki niso zanemarljivi. Pogoji, ki jih je potrebno upoštevati pri izračunu, pa so naslednji:

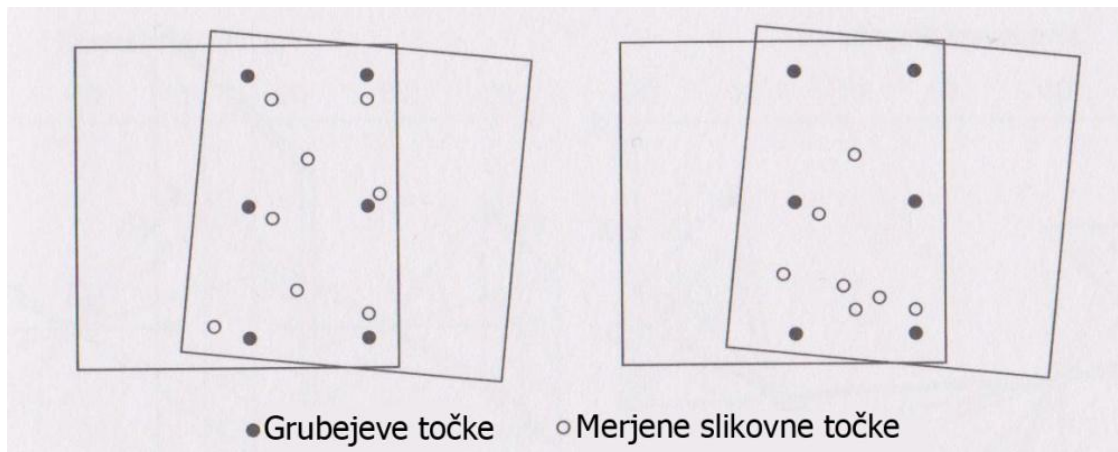
- rotaciji \mathbf{R}_1^0 in \mathbf{R}_2^0 sta določeni s pomočjo približnih vrednosti kotov $\varphi_1^0, \kappa_1^0, \omega_2^0, \varphi_2^0, \kappa_2^0$,
- za izračun komponent vektorjev \mathbf{p}_1^0 in \mathbf{p}_2^0 uporabimo merjene slikovne koordinate homolognih točk na obeh posnetkih, konstanto fotoaparata c in rotacijski matriki \mathbf{R}_1^0 in \mathbf{R}_2^0 ,
- determinanto določimo kot $D^0 = p_{1,y}^0 p_{2,z}^0 - p_{2,y}^0 p_{1,z}^0$ (Kraus, 2007).

Kakovost določitve relativne orientacije je odvisna od naslednjih kriterijev:

- natančnosti slikovnih koordinat,
- števila in razporeditve homolognih točk v modelnem koordinatnem sistemu.

Pomen prvega kriterija je jasen. Slabo določene slikovne koordinate posledično preko prenosa varianc in kovarianc vodijo k slabo določenim parametrom relativne orientacije.

Bolj zanimiv je pogled na razporeditev homolognih točk. Najbolj idealno razporeditev je predlagal že Otto von Gruber (slika 12). Stremimo k temu, da bi imeli štiri homologne točke v vogalih in po eno v sredini na levi in na desni strani stereo-območja. Če vse homologne točke ležijo na premici, sistem postane singularen. Za boljšo natančnost naj bo podanih vsaj 8-10 dobro določenih homolognih točk (Luhmann, 2011).



Slika 12: Dobra (polni krogi) in slaba (prazni krogi) razporeditev homolognih točk (Luhmann, 2011)

2.8.2 Izračun modelnih koordinat

Naslednji korak izbrane metode orientacije stereopara je izračun modelnih koordinat. Gre za vzpostavitev modelnega koordinatnega sistema x, y, z iz dveh slikovnih koordinatnih sistemov ξ_1, η_1 in ξ_2, η_2 .

Pri postopku izračuna modelnih koordinat obravnavamo vsako točko posebej. To pomeni, da se koordinate točke v modelnem koordinatnem sistemu določajo le na podlagi slikovnih koordinat te točke. Za izračun potrebujemo slikovne koordinate homologne točke na obeh posnetkih, konstanto fotoaparata c , izračunane parametre relativne orientacije in podatek o bazi b . Podatek o dolžini baze b je nastavljen na 1 in služi le za določitev približnih koordinat. Kasneje podatek skozi izravnavo in iteracije postane nepomemben.

Prvi del določitve modelnih koordinat je določitev približnih koordinat. Izračunamo jih na podlagi izrazov (Kraus, 2007):

$$\begin{aligned}
 -z &= \frac{cb}{\xi_1 - \xi_2} = \frac{cb}{p\xi} \\
 y &= -z \frac{\eta_1}{c} = -z \frac{\eta_2}{c} \\
 x &= -z \frac{\xi_1}{c}
 \end{aligned} \tag{30}$$

Pri tem določamo koordinato y na dva načina, za nadaljnji postopek pa uporabimo aritmetično sredino.

Podlaga za izračun modelnih koordinat je kolinearna enačba (9). Ko enačbe lineariziramo, pridobimo štiri enačbe za vsako homologno točko. Vsaka enačba služi enemu opazovanju, ki je v tem primeru slikovna koordinata na prvem ali drugem posnetku (Kraus, 2007):

$$\begin{aligned}
 v_{\xi_1} &= \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial x} \right)^0 dx + \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial y} \right)^0 dy + \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial z} \right)^0 dz - (\bar{\xi}_1 - \xi_1^0) \\
 v_{\eta_1} &= \left(\frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right)^0 dx + \left(\frac{\partial \eta_1}{\partial y} \right)^0 dy + \left(\frac{\partial \eta_1}{\partial z} \right)^0 dz - (\bar{\eta}_1 - \eta_1^0) \\
 v_{\xi_2} &= \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial x} \right)^0 dx + \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial y} \right)^0 dy + \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial z} \right)^0 dz - (\bar{\xi}_2 - \xi_2^0) \\
 v_{\eta_2} &= \left(\frac{\partial \eta_2}{\partial x} \right)^0 dx + \left(\frac{\partial \eta_2}{\partial y} \right)^0 dy + \left(\frac{\partial \eta_2}{\partial z} \right)^0 dz - (\bar{\eta}_2 - \eta_2^0)
 \end{aligned} \tag{31}$$

Pri tem so odvodi $()^0$ sledeči (Kraus, 2007):

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \xi}{\partial x} &= -\frac{c}{N^2} (Nr_{11} - k_x r_{13}) \\
 \frac{\partial \eta}{\partial x} &= -\frac{c}{N^2} (Nr_{12} - k_y r_{13}) \\
 \frac{\partial \xi}{\partial y} &= -\frac{c}{N^2} (Nr_{21} - k_x r_{23}) \\
 \frac{\partial \eta}{\partial y} &= -\frac{c}{N^2} (Nr_{22} - k_y r_{23}) \\
 \frac{\partial \xi}{\partial z} &= -\frac{c}{N^2} (Nr_{31} - k_x r_{33}) \\
 \frac{\partial \eta}{\partial z} &= -\frac{c}{N^2} (Nr_{32} - k_y r_{33})
 \end{aligned} \tag{32}$$

S pomočjo posredne izravnave po metodi najmanjših kvadratov izračunamo modelne koordinate točke. Postopek je iterativen in ga ponavljamo toliko časa, dokler popravki niso zanemarljivi (Kraus, 2007).

2.8.3 Absolutna orientacija stereopara

Drugi korak dvostopenjske orientacije je absolutna orientacija. Pri tej modelni koordinatni sistem transformiramo v objektni ali referenčni koordinatni sistem. Gre za postopek sedem-parametrične transformacije. Odnos med obema koordinatnima sistemoma določajo oslonilne točke, za katere imamo podane tako objektne koordinate kot tudi določene modelne koordinate (Kraus, 2007).

Sedem-parametrično transformacijo lahko izvedemo s pomočjo različnih modelov. Primer je model Molodensky-Badekas, za katerega lahko zapišemo enačbo (Deakin, 2006):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ Z_u \end{bmatrix} + m \mathbf{R}_{K\Phi\Omega} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (33)$$

V enačbi (33) predstavljajo:

X_u, Y_u, Z_u	objektne koordinate projekcijskega centra
m	merilo modela
Ω, Φ, K	rotacijski koti, ki definirajo 3x3 rotacijsko matriko
X, Y, Z	objektne koordinate točke
x, y, z	modelne koordinate točke

Opazimo lahko, da je enačba sedem-parametrične transformacije (33) na videz zelo podobna kolinearni enačbi (7). Enačba absolutne orientacije ima sedem neznank, kolinearna enačba pa šest neznank. Opozorimo lahko na dve bistveni razliki. Pri kolinearni enačbi imamo dve slikovni koordinati (x' , y'), tretja koordinata je konstanta fotoaparata ($-c$), pri absolutni orientaciji pa računamo z modelnimi koordinatami (x , y , z). Druga razlika se izraža v merilu, ki je v primeru kolinearne enačbe različno za vsako dano točko (z vsako točko se spreminja, zato ni parameter). V primeru absolutne orientacije računamo merilo modela (velja torej za cel model, zato je tudi parameter).

Enačbo (33) lahko drugače po Deakinu (2006) v vektorski obliki zapišemo kot:

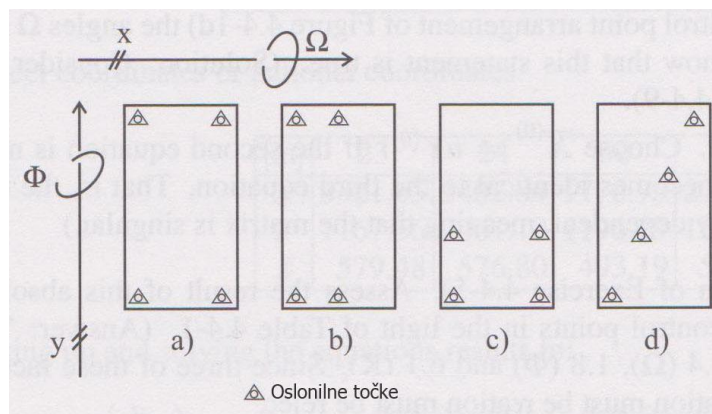
$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_u + m \mathbf{R}_{K\Phi\Omega} \mathbf{x} \quad (34)$$

Iz enačbe (34) lahko izrazimo enačbe opazovanj. Za vsako oslonilno točko pridobimo tri enačbe (Deakin, 2006):

$$\begin{aligned} X &= x + yK - z\Phi + xm + X_u \\ Y &= -xK + y + z\Omega + ym + Y_u \\ Z &= x\Phi - y\Omega + z + zm + Z_u \end{aligned} \quad (35)$$

Po izravnavi določimo vseh sedem parametrov absolutne orientacije (X_0 , Y_0 , Z_0 , m , Ω , Φ , K). Na podlagi teh izračunamo nove objektne koordinate, ki v naslednjo iteracijo vstopajo kot podane objektne koordinate oslonilnih točk. Iterativno se spremembe parametrov spreminjajo. Ko so spremembe parametrov dovolj majhne, se iterativni postopek zaključi.

Za izračun parametrov absolutne orientacije potrebujemo najmanj tri podane oslonilne točke. Za primerno natančnost določitve absolutne orientacije je pomembna tudi dobra razporeditev oslonilnih točk (slika 13).



Slika 13: Primeri razporeditev oslonilnih točk pri absolutni orientaciji (Kraus, 2007)

Iz slike 13 je razvidno, da se kakovost razporeditve oslonilnih točk razlikuje. Različna razporeditev prinese različne posledice:

- primer a) najboljša razporeditev oslonilnih točk,
- primer b) slaba določitev kota Φ ,
- primer c) slaba določitev kota Ω ,
- primer d) če oslonilne točke ležijo povsem v ravni liniji sta kota Ω in Φ nedoločljiva (Kraus, 2007).

2.9 Izračun parametrov zunanje orientacije posnetkov stereopara iz parametrov dvostopenjske metode

Iz parametrov relativne in absolutne orientacije lahko izračunamo parametre zunanje orientacije posameznega posnetka stereopara. S tem dobimo rezultate enakega tipa kot po metodah, predstavljenih v poglavju 2.7. Parametri zunanje orientacije posameznega posnetka so tisti, ki nas v sodobnih postopkih največkrat zanimajo, ko govorimo o orientaciji.

Lego projekcijskega centra X_{0_i} posnetka i izračunamo s pomočjo vektorja do izhodišča modelnega koordinatnega sistema X_u in transformiranih komponent baznega vektorja b (Luhmann, 2011):

$$\mathbf{X}_{0_i} = \mathbf{X}_u + m\mathbf{R}_{\Omega\Phi K}\mathbf{b}_i \quad (36)$$

Pri tem sta bazna vektorja enaka (Luhmann, 2011):

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{b}_2 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (37)$$

Od tu vidimo, da je lega projekcijskega centra prvega posnetka stereopara enaka objektnim koordinatam projekcijskega centra določenih z absolutno orientacijo ($X_{0_1} = X_u$).

Potrebno je določiti še rotacijsko matriko posnetka i glede na objektni koordinatni sistem. Rotacijsko matriko relativne orientacije in rotacijsko matriko absolutne orientacije je potrebno med seboj ustrezno pomnožiti (Luhmann, 2011):

$$\mathbf{R}_{i_{\omega\varphi\kappa}} = \mathbf{R}_{\Omega\Phi K}\mathbf{R}_{\omega_i\varphi_i\kappa_i} \quad (38)$$

Na ta način izračunamo vse parametre zunanje orientacije (Luhmann, 2011).

2.10 Posredna izravnavo po metodi najmanjših kvadratov

Pri vseh opisanih metodah uporabljamo posredno izravnavo, zato smo se odločili, da na kratko predstavimo njen pomen in potek. Posredna izravnavo je ena izmed vrst izravnav po metodi najmanjših kvadratov. Bistvo metode najmanjših kvadratov je, da je vsota kvadratov popravkov opazovanj najmanjša. Značilnost posredne izravnave je, da se v enačbah pojavljajo tako opazovanja kot neznank. Pogoji posredne izravnave je, da je v vsaki nastavljeni enačbi le eno opazovanje, medtem ko je v enačbi poljubno število neznank. Zato je število opazovanj enako številu nastavljenih enačb. Enačbo posredne izravnave zapišemo kot (Mikhail, 1976):

$$v = B\Delta - l \quad (39)$$

V enačbi predstavljajo:

v	vektor popravkov opazovanj
B	matrika koeficientov enačb popravkov
Δ	vektor neznank
l	vektor odstopanj

Z nastavitvijo matričnega sistema lahko z naslednjimi enačbami (40) sistem razrešimo in izračunamo vektor neznank in vektor popravkov opazovanj (Mikhail, 1976):

$$\begin{aligned} N &= B^T B \\ t &= B^T l \\ \Delta &= (N)^{-1} t \\ v &= B\Delta - l \end{aligned} \quad (40)$$

Zanima nas tudi stohastični model izravnavo. Z njim pridobimo referenčno varianco a posteriori ($\hat{\sigma}_0$), matriko kofaktorjev neznank ($Q_{\Delta\Delta}$) in kovariančno matriko neznank ($\Sigma_{\Delta\Delta}$) (Mikhail, 1976):

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_0 &= \sqrt{\frac{v^T v}{n-u}} \\ Q_{\Delta\Delta} &= N^{-1} \\ \Sigma_{\Delta\Delta} &= \hat{\sigma}_0^2 Q_{\Delta\Delta} \end{aligned} \quad (41)$$

3 PROGRAM *ORIS* - ORIENTACIJA STEREOPARA

V tem poglavju je predstavljen potek izdelave programa *OriS*, ki smo jo izdelali v okviru diplomske naloge. Gre za program, ki izračuna orientacijske parametre stereopara. Podpoglavja si sistematično sledijo v naslednjem zaporedju:

- metodologija (predstavitev celotnega postopka, po katerem je izdelan program),
- sestava uporabniškega vmesnika in navodila za uporabo (opisana je sestava uporabniškega vmesnika nato pa so dodana še navodila za uporabo programa),
- področja uporabe (prikaz praktičnih primerov, za katere je program uporaben in kratka predstavitev področja uporabe),
- omejitve programa (opis zmogljivosti programa, opis omejitev programa pri posameznih izračunih, omejitve, ki se navezujejo na vhodne podatke).

3.1 Metodologija

Program *OriS* se je razvil iz ideje, ki se je porodila zaradi omejitev razpoložljivih programskih okolij. Večina programov na fakulteti je namenjena obdelavi letalskih posnetkov, zato se pri izravnavi terestričnih podatkov velikokrat pojavijo težave. Namen programa *OriS* je premostitev navedenih težav.

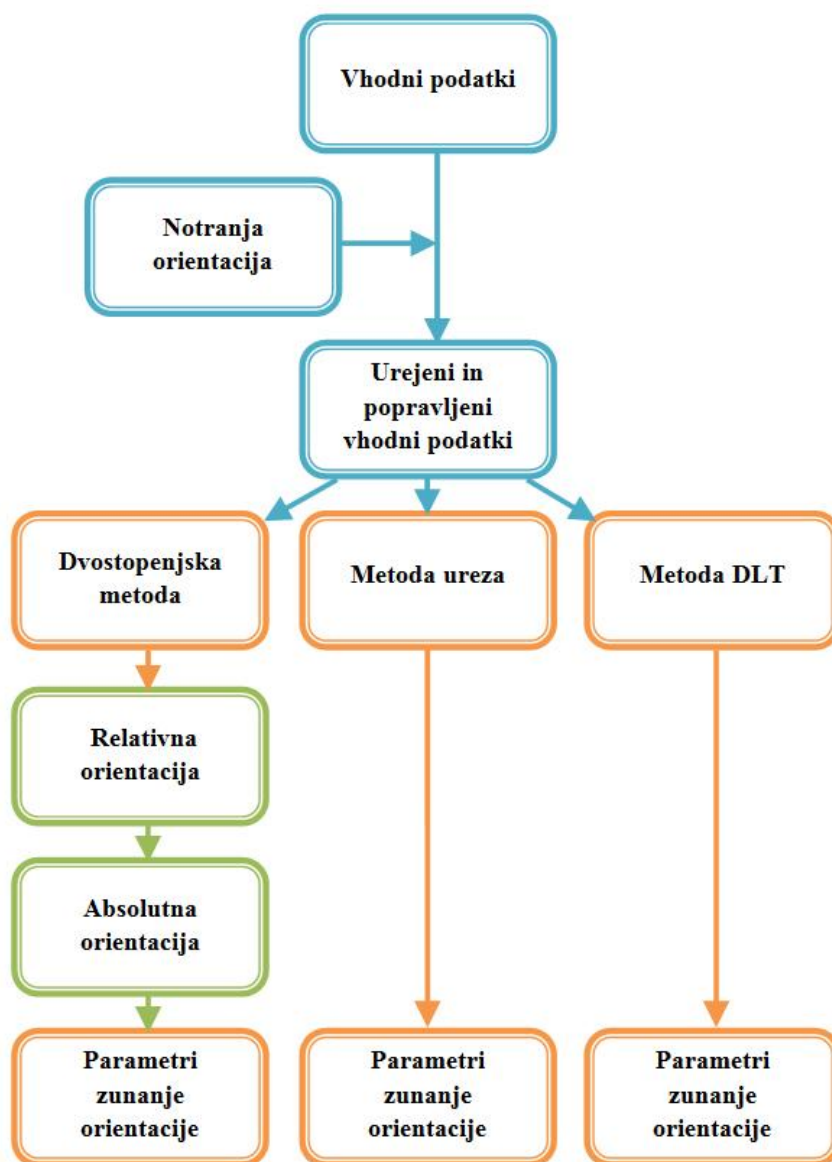
Metodologija, po kateri je izdelan praktičen del diplomske naloge, zajema šest pomembnih korakov:

- shematski načrt delovanja programa,
- prevzem vhodnih podatkov,
- programiranje algoritmov v programskem okolju *Matlab*,
- izdelava oblike uporabniškega vmesnika v programskem okolju *Matlab*,
- združitev programske kode algoritmov in uporabniškega vmesnika v delujoč program,
- priprava izhodnih podatkov.

3.1.1 Shematski načrt delovanja programa

Prvi korak pri izdelavi računalniškega programa je natančna preučitev teorije obravnavane tematike. Najpomembnejša je določitev zastavljenih ciljev. V sklopu diplomske naloge je bil cilj izračunati parametre zunanje orientacije dveh posnetkov, ki tvorita stereopar.

Problema smo se lotili z več različnimi postopki, ki omogočajo medsebojno primerjavo, hkrati pa tudi kontrolo izračunanih parametrov. Shematski prikaz delovanja programa je viden na sliki 14.



Slika 14: Shematski prikaz delovanja programa

Programska koda se začne z branjem vhodnih podatkov: slikovnih koordinat izmerjenih točk, koordinat oslonilnih in kontrolnih točk ter parametrov kalibracije fotoaparata. Natančna obravnava vhodnih podatkov je vidna v poglavju 3.1.2. Med prevzetimi podatki je podana tudi notranja orientacija, s pomočjo katere izračunamo popravke za glavno točko in popravke za distorzijo. Ta del je opcijski, kar pomeni, da se za izračun popravkov lahko odločimo ali pa ga izpustimo. Končne podatke je potrebno urediti tako, da so pripravljeni za nadaljnjo obdelavo. Ta del je enak pri vseh različnih postopkih določanja zunanje orientacije

Sledi drugi, glavni del programa, kjer izračunamo parametre zunanje orientacije. Parametre določamo s tremi različnimi metodami. Prva metoda je dvostopenjska metoda, ki je opisana v poglavju 2.8 in poteka v dveh korakih (relativna orientacija in absolutna orientacija), obravnavata pa se oba posnetka stereopara skupaj. Iz izračunane relativne in absolutne orientacije lahko izračunamo tudi parametre zunanje orientacije za vsak posnetek posebej. Druga metoda je metoda notranjega ureza, ki določa parametre zunanje orientacije ločeno za vsak posnetek stereopara. Natančneje je opisana v poglavju 2.7.1. Zadnja metoda je metoda DLT. Ta metoda določa tako zunanjo kot tudi notranjo orientacijo, ki pa je v našem postopku podana že z vhodnimi podatki in je ni potrebno ponovno določati. Metoda DLT obravnava vsak posnetek ločeno, natančneje pa je opisana v poglavju 2.7.2.

Parametre, določene po treh različnih metodah, smo v okviru diplomske naloge med seboj primerjali. Točnost pridobljenih parametrov, izračunanih po posameznih metodah, ocenimo s kontrolo RMS, ki je predstavljena v poglavju 3.1.3. Najbolj točne rezultate izpišemo v izhodno datoteko, ki služi za nadaljnjo obdelavo.

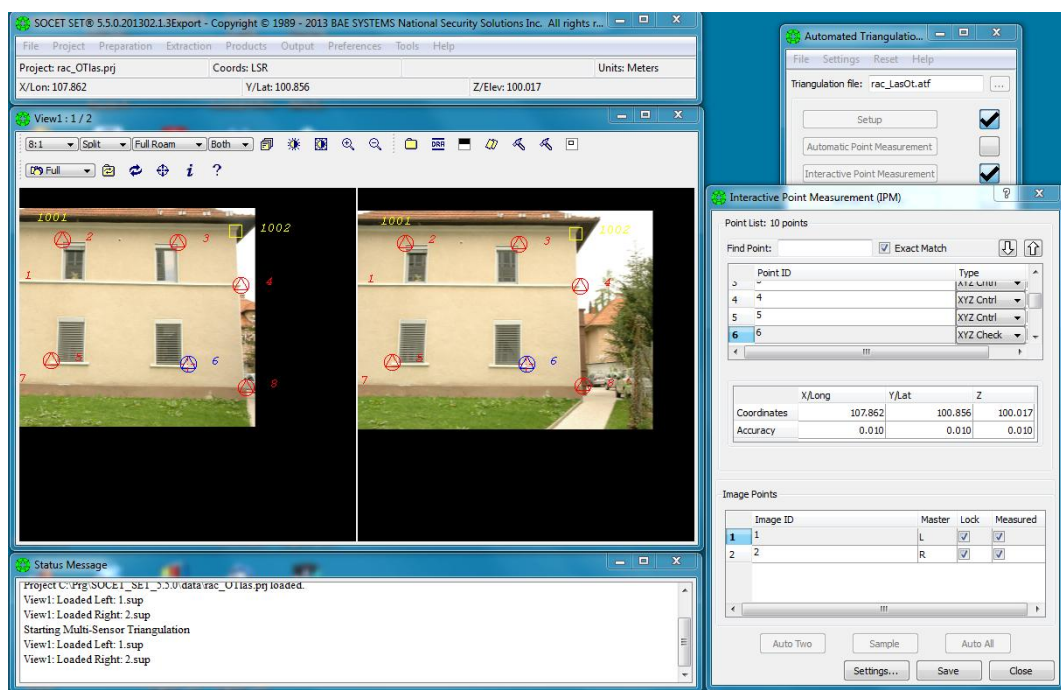
3.1.2 Prezem vhodnih podatkov

Pred samim začetkom programiranja algoritmov, je bilo potrebno natančno preučiti in razumeti vhodne podatke. Da je izračun zunanje orientacije sploh mogoč, potrebujemo podatke o slikovnih koordinatah točk, izmerjenih na stereoparu, podatke o fotoaparatu in koordinate oslonilnih ter kontrolnih točk.

Za izvedbo celotnega postopka je potrebno objekt najprej fotografirati po pravilih za pridobitev stereopara. Stereopar zajamemo tako, da za nek detajl posnamemo dve, med sedoj zamaknjeni fotografiji, ki imata deloma skupno vsebino (prečni preklap posnetkov je

običajno vsaj 60%). Pri tem moramo paziti, da pri drugi fotografiji ohranimo približno isto višino in usmerjenost optične osi. Ti dve fotografiji, vključno s podatki o fotoaparatu in objektnimi koordinatami oslonilnih ter kontrolnih točk, predstavljajo vhodne podatke v program *Socet Set*, v katerem nato izmerimo še slikovne koordinate oslonilnih, kontrolnih in veznih točk (slika 15).

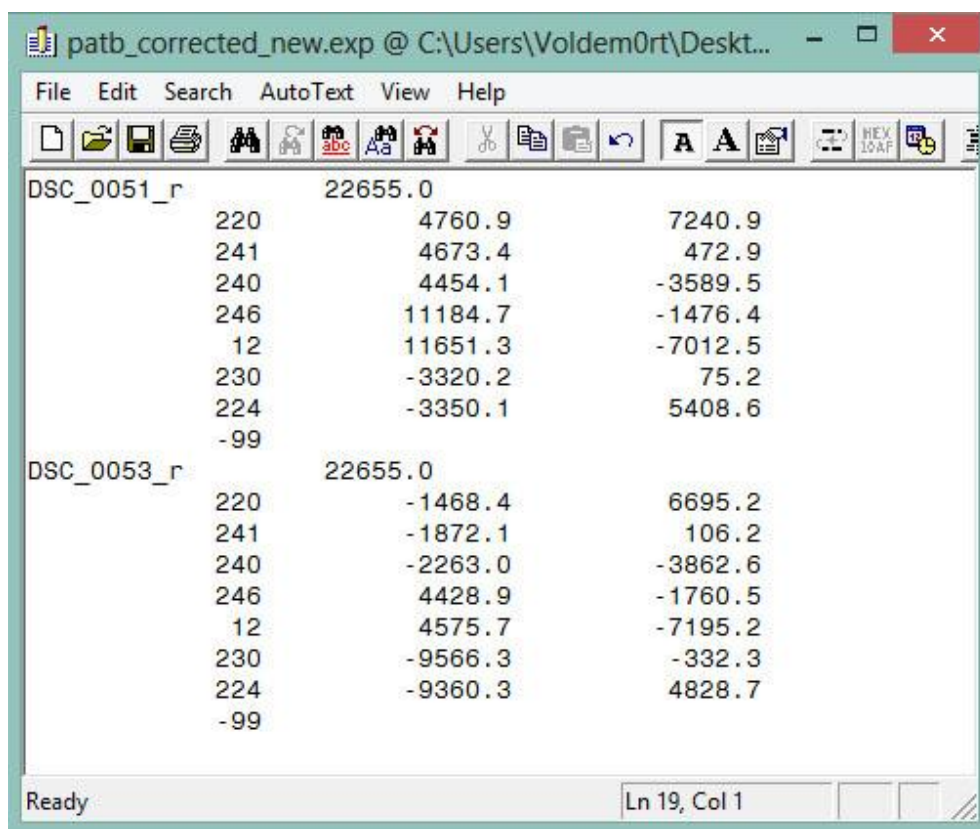
Programsko okolje *Socet Set* je izdelek podjetja BAE Systems. Prva različica programa je izšla leta 2003, trenutno pa je aktualna izdaja 5.6. Program *Socet Set* je namenjen digitalni fotogrametriji in analizi prostorskih podatkov. Program je sposoben hkrati obdelati veliko število posnetkov, prav tako pa so v njem sprogramirane najnovejše metode za zajem podatkov in izvedbo aerotriangulacije. Uporabniki s programskim okoljem *Socet Set* lahko izdelujejo digitalne modele reliefa visokih natančnosti, digitalne modele površja, 3D upodobitve in obdelujejo različne prostorske podatke. V sklopu posameznega projekta je možna obdelava in kombinacija različnih vhodnih podatkov (*Socet Set Brochure*, 2008).



Slika 15: Prikaz programskega okolja Socet Set

V sklopu priprave vhodnih podatkov je potrebno v programu *Socet Set* izmeriti slikovne koordinate veznih, oslonilnih in kontrolnih točk, oslonilne in kontrolne točke v objektnem oz. referenčnem koordinatnem sistemu pa so na terenu izmerjene že predhodno. Potrebno je poznati tudi kalibracijske parametre fotoaparata.

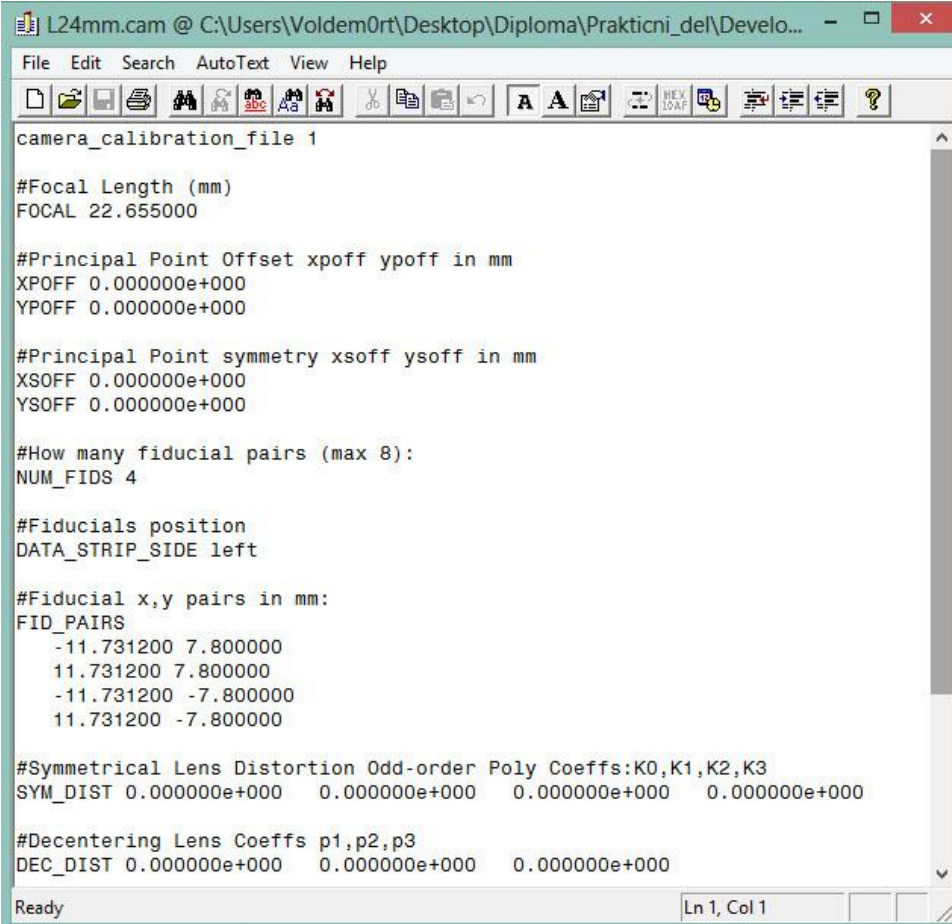
Ob merjenju slikovnih koordinat program zapisuje datoteko slikovnih koordinat (slika 16), katerih enota so mikrometri. Na začetku datoteke se nahaja poimenovanje levega posnetka, sledi pa konstanta fotoaparata, podana v mikrometrih. V naslednjih vrsticah so podatki o slikovnih koordinatah organizirani na način, da si po vrsti sledijo ime točke, njena slikovna koordinata x in slikovna koordinata y. Niz podanih slikovnih koordinat zaključuje dogovorjeni znak -99. Nato se vsi podatki ponovijo v enaki organiziranosti še za desni posnetek. Format datoteke je ASCII s končnico *.exp.



Slika 16: Primer datoteke z izmerjenimi slikovnimi koordinatami točk

Naslednji vhodni podatek so koordinate oslonilnih in kontrolnih točk (slika 17). Te koordinate so izmerjene v objektnem koordinatnem sistemu, ki je lahko državni, lokalni itd. Program zahteva vnos oslonilnih točk, medtem ko vnos kontrolnih točk ni nujno potreben, je pa priporočljiv, saj nam kontrolne točke služijo za kontrolo postopka orientacije. Datoteka oslonilnih in kontrolnih točk se začne s tremi vrsticami komentarjev, ki nam povedo, kako so podatki organizirani. Podatki oslonilnih in kontrolnih točk v programu *Socet Set* so organizirani za vsako točko na enak način. V prvi vrstici si sledijo: identifikator točke, stanje točke in nazadnje oznaka vrste točke. Oznaka oslonilnih točk je 3, kontrolnih točk pa 6.

datoteki so za nas pomembni podatki o konstanti fotoaparata, koordinati x in y glavne točke, koeficienti K1, K2, K3 in K4, ki določajo radialno distorzijo in koeficienti p1, p2 in p3, ki določajo tangencialno distorzijo. Vsi podatki so v milimetrih, format datoteke pa je ASCII s končnico *.cam. Zaradi dveh različnih verzij kalibracijske datoteke, program dovoljuje dve različni obliki tega vhodnega podatka, ki se po sestavi malo razlikujeta.



```

camera_calibration_file 1

#Focal Length (mm)
FOCAL 22.655000

#Principal Point Offset xpoff ypoff in mm
XPOFF 0.000000e+000
YPOFF 0.000000e+000

#Principal Point symmetry xsoff ysoff in mm
XSOFF 0.000000e+000
YSOFF 0.000000e+000

#How many fiducial pairs (max 8):
NUM_FIDS 4

#Fiducials position
DATA_STRIP_SIDE left

#Fiducial x,y pairs in mm:
FID_PAIRS
-11.731200 7.800000
11.731200 7.800000
-11.731200 -7.800000
11.731200 -7.800000

#Symmetrical Lens Distortion Odd-order Poly Coeffs:K0,K1,K2,K3
SYM_DIST 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000

#Decentering Lens Coeffs p1,p2,p3
DEC_DIST 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  
```

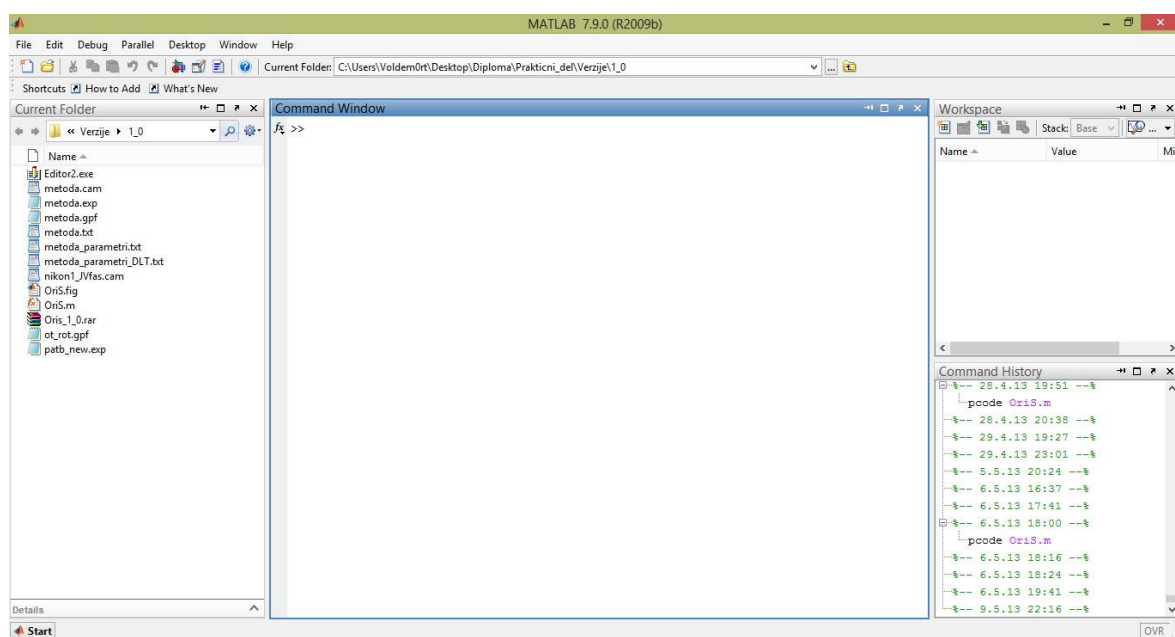
Slika 18: Primer vhodne datoteke s kalibracijskimi parametri fotoaparata

Čeprav so vhodni podatki dokaj podrobno predstavljeni, pa jih v sklopu diplomske naloge nismo zajemali sami. Vsi podatki, ki so bili uporabljeni pri izdelavi programa *OriS*, so bili prevzeti iz drugih projektov. Za uspešen izračun orientacije stereopara pa je razumevanje teh podatkov ključnega pomena.

3.1.3 Programiranje algoritmov v programskem okolju *Matlab*

Druga faza praktičnega dela diplomske naloge je programiranje postopka orientacije stereopara. Predhodno smo pridobili vso potrebno literaturo in znanja, ki jih je bilo potrebno prenesti v programsko kodo. Odločili smo se, da za izvedbo programa uporabimo programsko okolje *Matlab* (slika 19), saj je ta program dosegljiv na fakulteti. Prav tako študentje, katerim je namenjen ta program, *Matlab* poznajo in naj bi bili usposobljeni za programiranje v njem.

Programsko okolje *Matlab* je izdelek podjetja The MathWorks. Program je namenjen tehničnim področjem in omogoča računanje, vizualizacijo in programiranje v nezahtevnem okolju. Program v prvi vrsti rešuje matematične probleme, uporaben pa je na področju matematike in računanja, razvoja algoritmov, modeliranja, simulacij, analize podatkov, inženirske grafike in razvoja grafičnih vmesnikov. *Matlab* omogoča lažje računanje, predvsem z matrikami in vektorji, v njem pa ni potrebno definiranje vseh spremenljivk in kazalnikov. Samo ime *Matlab* izvira iz besed matrika (ang. matrix) in laboratorij (ang. laboratory). *Matlab* se vsako leto nadgrajuje in vsaka nova verzija prinaša uporabne in na podlagi izkušenj pridobljene novosti. *Matlab* je obogaten s knjižnico matematičnih funkcij, kar je pravzaprav tudi največja prednost programa pred konkurenčnimi ponudbami (Matlab Help, 2009).



Slika 19: Prikaz programskega okolja Matlab

Izdelava programa OriS se je začela s programiranjem posameznih delov programa. Pri pisanju algoritmov smo si največ pomagali z delom *Photogrammetry, Geometry from Images and Laser Scans, 2nd edition* avtorja Karla Krausa (2007). Teoretična podlaga je opisana in obrazložena že v teoretičnem delu, zato se v opisu programiranja ne bomo spuščali v podrobnosti. V delu so navedeni tudi numerični primeri, s katerimi smo si pomagali pri programiranju.

Najprej smo se lotili programiranja dvostopenjske metode določitve zunanje orientacije. Prvi del te metode predstavlja določitev relativne orientacije. Pri programiranju postopka smo si pomagali z numeričnim primerom. Za pridobitev rešitve relativne orientacije je potrebno imeti podatke slikovnih koordinat obeh posnetkov in konstanto fotoaparata. V postopku je najprej potrebno pridobiti približne vrednosti za parametre relativne orientacije. Te smo pridobili s posredno izravnavo relativne orientacije skoraj vertikalnih posnetkov. Sledi posredna izravnavo relativne orientacije poljubnih posnetkov. Ta za stereopar zagotovi univerzalno rešitev. Končni rezultat relativne orientacije so parametri relativne orientacije, določeni po metodi neodvisnih modelov. To so koti ω , ϕ in κ tako za levi kot za desni posnetek.

Sledil je izračun modelnih koordinat. Vhodni podatki za ta postopek so slikovne koordinate točk na obeh posnetkih, konstanta fotoaparata in parametri relativne orientacije stereopara, pridobljeni s predhodnim postopkom. Tudi tu smo si najprej za programiranje postopka pomagali z numeričnim primerom, nato pa smo rešitev izvedli še s podatki iz *Socet Set*. Po postopku posredne izravnave kot rešitev dobimo matriko modelnih koordinat, v kateri si po vrsti sledijo: identifikator točke, koordinata x , koordinata y in koordinata z .

Naslednja faza programiranja je bil izračun absolutne orientacije. Gre za sedemparametrično transformacijo po modelu Molodensky-Badekas. Vhodni podatki za postopek absolutne orientacije so: matrika modelnih koordinat, matrika oslonilnih točk in konstanta fotoaparata. Približne vrednosti parametrov zunanje orientacije smo lahko poljubno izbrali, nato pa smo zaradi skladnosti podatkov normalizirali koordinate oslonilnih točk. Podatke smo normalizirali le s translacijo modela za težišče modela in sicer tako, da so točke razporejene okoli koordinatnega izhodišča. Sledila je posredna izravnavo v iteracijah, po katerih smo določili parametre absolutne orientacije. Z njimi smo izračunali objektne koordinate vseh obravnavanih točk. Izhodni podatek so torej parametri absolutne orientacije (X , Y , Z , m , Ω , Φ , K) in matrika objektnih koordinat, v kateri si po vrsti sledijo: identifikator točke, koordinata

X (abscisa), koordinata Y (ordinata) in koordinata Z (aplikata). Objektne koordinate so potrebne v nadaljnjih izračunih pri metodi DLT.

Po postopku, ki je opisan v poglavju 2.9, smo izračunali šest parametrov zunanje orientacije posameznega posnetka (X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , φ , κ). To so tri translacije in tri rotacije. Tri translacije predstavljajo koordinate projekcijskega centra v objektne koordinatnem sistemu, tri rotacije pa kote zasuka posnetka φ , ω in κ okoli osi X, Y in Z.

Sledil je postopek določitve parametrov zunanje orientacije posameznega posnetka, kjer smo parametre določali z metodo notranjega ureza. Zunanjo orientacijo smo določili iz podatkov *Socet Seta*. Rešitev smo pridobili s pomočjo posredne izravnave, kjer smo se držali postopka, opisanega v poglavju 2.7.1. Izhodni podatki postopka so parametri zunanje orientacije za vsak posnetek posebej.

Nazadnje je bila na vrsti še metoda DLT (poglavje 2.7.2). Vhodni podatki za to metodo so podane slikovne koordinate in koordinate oslonilnih točk. Glede na to, da je minimalno število potrebnih oslonilnih točk razmeroma veliko (šest), se v primeru nezadostnega števila oslonilnih točk v skrajnem primeru uporabijo objektne koordinate veznih točk, izračunane po dvostopenjski metodi. S tem je bil algoritem za zahtevano nalogo napisan.

Vse pridobljene rezultate je bilo potrebno oceniti na podlagi primerjave s koordinatami kontrolnih točk. Na ta način smo preverjali točnost rezultatov. Z določenimi parametri zunanje orientacije in s podanimi slikovnimi koordinatami točk smo izračunali objektne koordinate točk. Izračunali smo koordinatne razlike (Δx_1 , Δx_2 , ... Δx_n) in iz njih določili srednji kvadratni pogrešek (ang. Root Mean Square, RMS), ki ga izračunamo po enačbi (42):

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} (\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2)} \quad (42)$$

Vrednost RMS smo izračunali posebej za koordinato X, koordinato Y in koordinato Z. Postopek izvedemo za kontrolne in za oslonilne točke. V kolikor kontrolne točke ne obstajajo, pridobimo le vrednosti RMS za oslonilne točke.

Ko so bili algoritmi za izračun orientacije napisani, jih je bilo potrebno povezati v smiselno celoto in postopek čimbolj avtomatizirati. Avtomatizacijo smo lahko izvedli pri branju vhodnih

podatkov. Najprej smo določili avtomatsko branje vseh treh vhodnih datotek, nato pa smo te podatke organizirali v primerne matrike. V tem delu smo izločali odvečne podatke kot so na primer merjene točke, ki niso na obeh posnetkih, oslonilne točke, ki niso med slikovnimi koordinatami in podobno.

V naslednjem koraku smo dodali še popravke slikovnih koordinat glede na parametre notranje orientacije. Slikovne koordinate najprej premaknemo glede na položaj glavne točke (koordinate glavne točke pridobimo iz kalibracijske datoteke). Premiki so navadno majhni, a potrebni za doseganje večjih natančnosti. Nato smo dodali popravek slikovnih koordinat za radialno distorzijo. Pri izračunu smo za izhodiščno točko radialne distorzije uporabili kar glavno točko, saj upoštevanje točke simetrije prinese zanemarljive razlike. Popravki se določajo na podlagi parametrov radialne distorzije iz kalibracijske datoteke. Ti popravki določajo končne slikovne koordinate, ki kasneje vstopajo v postopek določitve zunanje orientacije.

V naslednjem koraku smo v program vključili tudi stohastični model. Natančnost smo določal pri vsaki izravnavi. Gre za natančnost izračunanih koordinat in parametrov orientacij.

Povsem na koncu smo dodali še izpise. Najprej smo določili izpis na ekranu, nato pa še izpis v datoteki. Izpise smo določali za vsak korak posebej. Vse izpise smo navedli v poročilu izravnav, kjer je lahko slediti celotnemu postopku. Na koncu smo dodali še izpis zunanje orientacije, ki služi kot vhodni podatek za nadaljnje postopke. V izhodno datoteko se izpišejo parametri tiste metode, ki je po kriteriju točnosti najboljša.

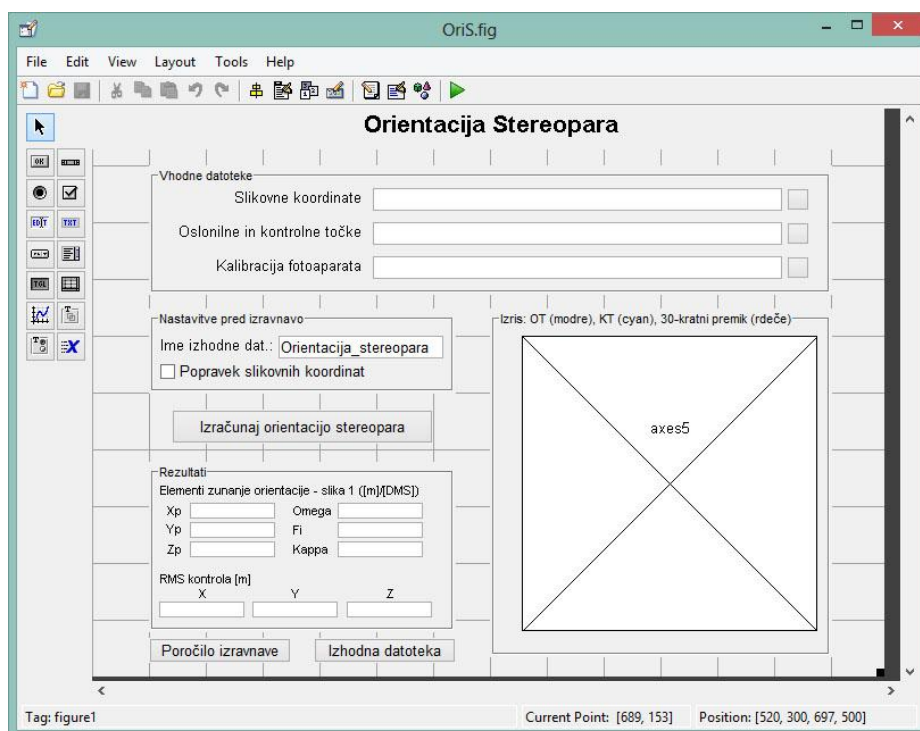
S tem je bil algoritem dokončan. Ves postopek smo organizirali v funkcije in jih zbrali v glavni datoteki. Drevo funkcij je precej razvejano, vendar smiselno organizirano. Optimizirati je bilo potrebno celotno kodo, dodali pa smo tudi nekaj komentarjev za lažje razumevanje programske kode.

3.1.4 Izdelava uporabniškega vmesnika v programskem okolju *Matlab*

Tretja faza projekta izdelave praktičnega dela diplomske naloge je bila oblikovanje uporabniškega vmesnika. Za oblikovanje uporabniškega vmesnika smo uporabili *Matlab*ov vmesnik *Matlab GUIDE*.

Matlab GUIDE je uporabniški vmesnik, ki podpira izdelavo grafičnega vmesnika. Z njim lahko na preprost način ustvarjamo uporabniške vmesnike, s katerimi lahko uporabnik komunicira z napisano programsko kodo. V *Matlab GUIDE* se izdelava oblike uporabniškega vmesnika začne s praznim prostorom, ki ga shranimo kot *.fig datoteko. Preko vmesnika lahko v prostor umeščamo različne elemente kot so interaktivni gumbi, grafi, spustne tabele, statičen tekst, dinamičen tekst itd. Vsakemu elementu, ki ga vključimo v obliko, lahko določamo oznake, preko katerih kasneje komunicirata programska koda in oblika. V *.fig datoteko se shranjuje samo oblika uporabniškega vmesnika, ne pa tudi sama izvedba ob posameznih akcijah.

Ustvarili smo obliko z naslovom *Orientacija stereopara*. Vsebina je razdeljena na pet različnih delov. Prvi del služi za nalaganje vhodnih podatkov in je sestavljen iz treh statičnih tekstov, iz treh dinamičnih tekstov in iz treh interaktivnih gumbov. Drugi del je namenjen nastavitvam pred izravnavo. Sestavljen je iz statičnega in dinamičnega teksta ter iz elementa »potrditveno polje«, ki omogoča vklop oz. izklop določenih funkcij. V tretjem delu sta le statični in dinamični tekst, ki služita za prikaz rezultatov. Četrty del sestavlja graf, peti del pa so interaktivni gumbi, ki sprožijo določene ukaze. Oblika vmesnika, sestava oblike ter sami pomeni oblike so vidni na sliki 20.



Slika 20: Prikaz *Matlabovega* vmesnika *Matlab GUIDE*

3.1.5 Združitev programske kode algoritmov in uporabniškega vmesnika v delujoč program

Po programiranju algoritmov in uporabniškega vmesnika je potrebno vse skupaj združiti v smiselno celoto. Ob shranjevanju oblike se ustvari tudi *Matlab *.m* datoteka, ki povezuje obliko z algoritmi. Na začetku je datoteka polna funkcij, saj se za vsak ustvarjen element ustvari svoja funkcija, poleg tega pa je tudi nekaj funkcij celotnega uporabniškega vmesnika, ki npr. omogočajo naložitev slik oz. podatkov ob zagonu. Datoteka je polna komentarjev, zato je programska koda v zelo neurejenem stanju. Potrebno je organizirano urejanje programske kode, da dobimo primeren izdelek.

Uporabniški vmesnik je slonel na izvedbi akcij preko interaktivnih gumbov, zato je pod funkcije posameznih gumbov napisana programska koda, ki definira, katero akcijo izvede pritisk na posamezni gumb.

Prve tri gumbе, ki omogočajo nalaganje vhodnih datotek s podatki, smo opremili tudi s slikami. Pritisk na njih sproži posebno akcijo, ki odpre okno za pregled in izbiro datotek, podobno kot v *Windows* programu *Raziskovalec*. Potrebno je bilo tudi programiranje prevzema podatkov s tako imenovanega »potrditvenega polja«. To je element, pri katerem se uporabnik s kljukico odloča o upoštevanju oz. neupoštevanju določenega dela postopka. Kljukica oz. prazen prostorček vrneta v programu 1 oz. 0. Pomemben je tudi prevzem podatkov iz dinamičnih tekstov. Pri prvih treh gre za prevzem poti do vhodnih datotek, pri četrtem pa za prevzem imena, pod katerim naj se shranjuje izhodna datoteka.

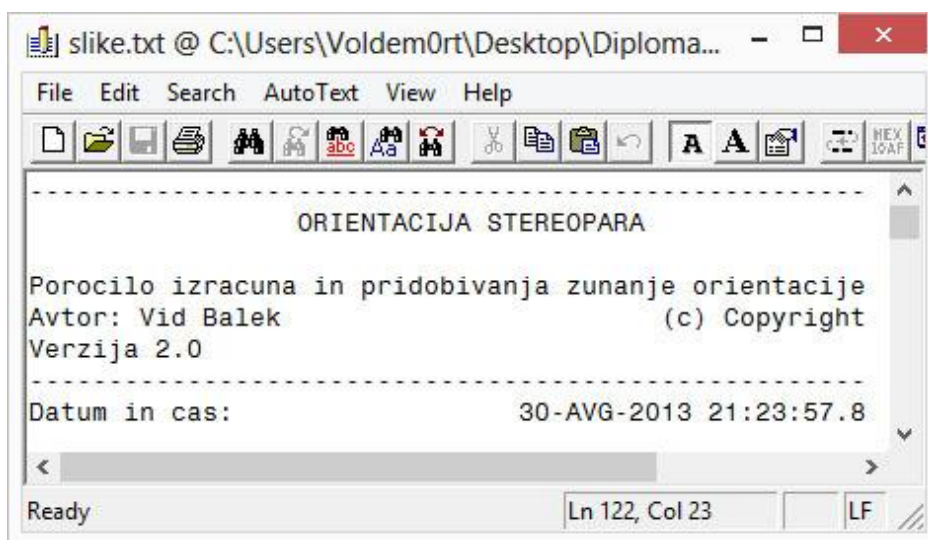
Glavno akcijo sproži pritisk na gumb *Izračunaj orientacijo stereopara*. Za tem gumbom se skriva celoten postopek, ki smo ga programirali pri pisanju algoritmov, v drugem delu izvedbe praktičnega dela, ki je predstavljen v diplomski nalogi. Poleg celotnega izračuna se izvede še nekaj drugih akcij. Na uporabniškem vmesniku se izpišejo najpomembnejši dobljeni rezultati, v prostoru za graf pa se izrišejo oslonilne in kontrolne točke. Izris nam služi za pregled razporeditve, poleg tega pa se po izvedeni orientaciji izriše še vektor premika posameznih točk, ki jih na novo določimo z izračunanimi parametri zunanje orientacije. To nam služi za dodatno kontrolo postopka.

Potrebno je bilo tudi programiranje drugih dveh gumbov. Pri obeh smo uporabili DOS-ov ukaz, ki z določenim programom *Editor2.exe* odpre izhodni datoteki, ki sta se ustvarili z izračunom orientacije stereopara. Pri prvem gumbu gre za poročilo opravljene izravnave, pri drugem pa za pogled izhodne datoteke oz. vhodne datoteke v nadaljnjem postopku.

3.1.6 Priprava izhodnih podatkov

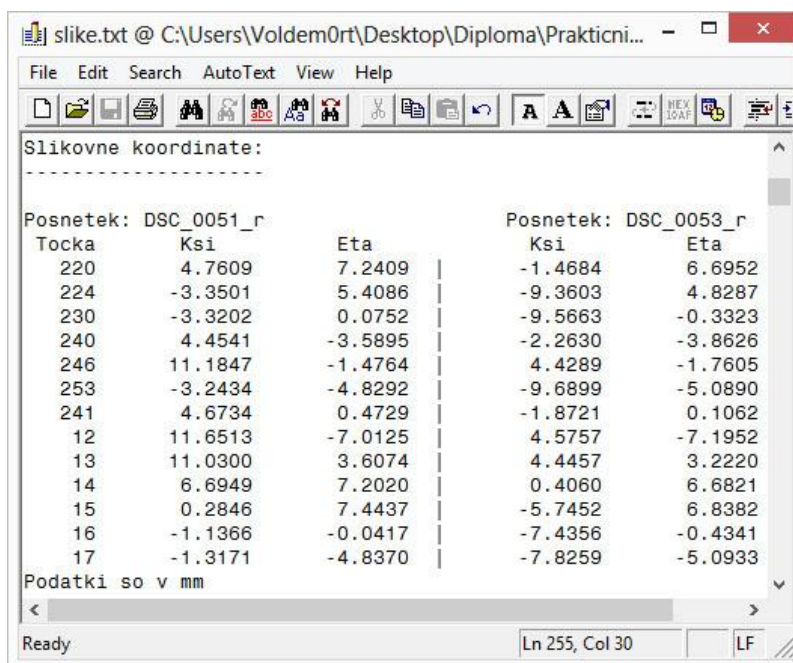
Zadnji del je priprava izhodnih podatkov. Pri izvedbi postopka v programu *OriS* pridobimo dve izhodni datoteki. Datoteki nastaneta že pri izvedbi algoritma. V tem poglavju bom opisal sestavo teh datotek in pomen posameznih delov.

Prva izhodna datoteka je poročilo o izračunu. Ime te izhodne datoteke določamo preko uporabniškega vmesnika. Datoteka je precej obsežna, saj obsega izračune celotnega postopka. Pregled izhodne datoteke se začne z glavo, ki nam predstavi naslov programa, avtorja programa, verzijo programa ter datum in čas, ob katerem je bila obdelava izvedena. Izgled glave je viden na sliki 21.



Slika 21: Izhodna datoteka - prikaz glave izhodne datoteke

Naslednji del izpisa so vhodni podatki. Zapisi v izhodni datoteki si sledijo tako, kot jih izvaja programska koda. Najprej se iz vhodnih podatkov preberejo slikovne koordinate, zato je to prvi podatek izhodne datoteke (slika 22). Podatki so v milimetrih.



Slikovne koordinate:

Posnetek: DSC_0051_r

Tocka	Ksi	Eta
220	4.7609	7.2409
224	-3.3501	5.4086
230	-3.3202	0.0752
240	4.4541	-3.5895
246	11.1847	-1.4764
253	-3.2434	-4.8292
241	4.6734	0.4729
12	11.6513	-7.0125
13	11.0300	3.6074
14	6.6949	7.2020
15	0.2846	7.4437
16	-1.1366	-0.0417
17	-1.3171	-4.8370

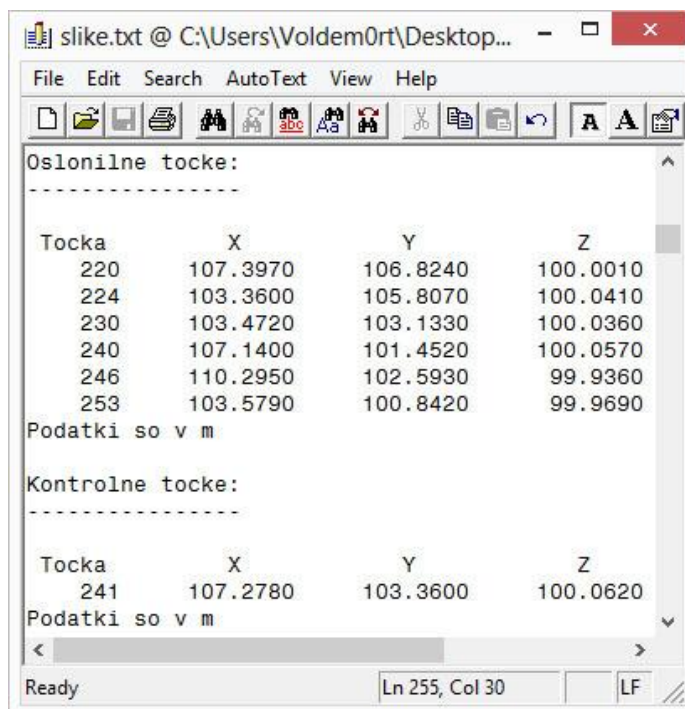
Posnetek: DSC_0053_r

Ksi	Eta
-1.4684	6.6952
-9.3603	4.8287
-9.5663	-0.3323
-2.2630	-3.8626
4.4289	-1.7605
-9.6899	-5.0890
-1.8721	0.1062
4.5757	-7.1952
4.4457	3.2220
0.4060	6.6821
-5.7452	6.8382
-7.4356	-0.4341
-7.8259	-5.0933

Podatki so v mm

Slika 22: Izhodna datoteka - prebrane slikovne koordinate

V izpisu sledi podatek o prebranih koordinatah oslonilnih in kontrolnih točk (slika 23). Program izloči izmerjene oslonilne in kontrolne točke, ki jih ni med podatki slikovnih koordinat. Podatki so v metrih.



Oslonilne tocke:

Tocka	X	Y	Z
220	107.3970	106.8240	100.0010
224	103.3600	105.8070	100.0410
230	103.4720	103.1330	100.0360
240	107.1400	101.4520	100.0570
246	110.2950	102.5930	99.9360
253	103.5790	100.8420	99.9690

Podatki so v m

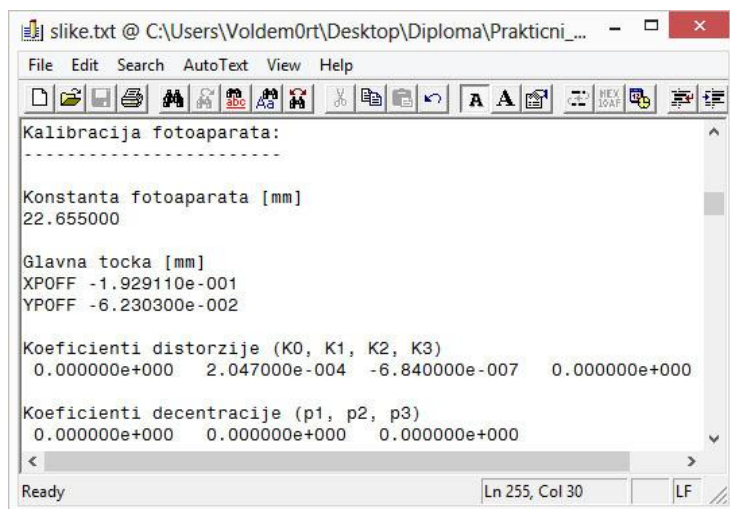
Kontrolne tocke:

Tocka	X	Y	Z
241	107.2780	103.3600	100.0620

Podatki so v m

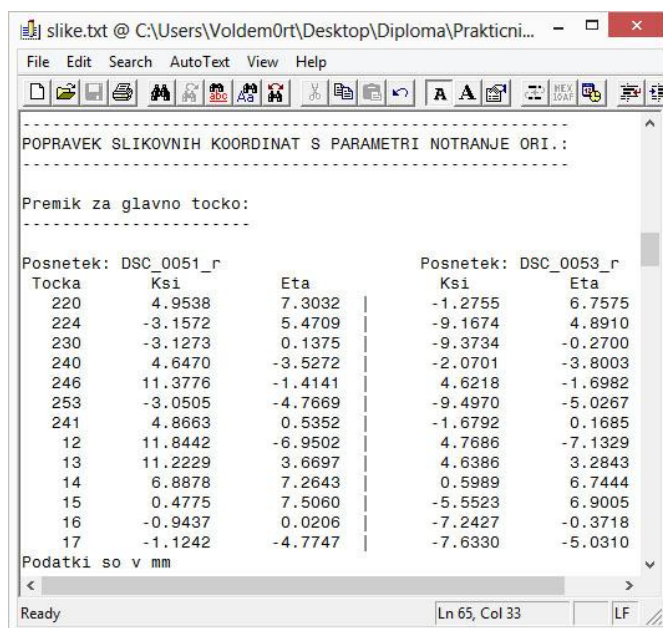
Slika 23: Izhodna datoteka - prebrane koordinate oslonilnih in kontrolnih točk

Tretja v program vnešena datoteka je datoteka s podatki o kalibraciji fotoaparata. Program izloči nepotrebne podatke in shrani vse uporabne podatke iz te datoteke in jih zapiše v obliki, prikazani na sliki 24. Podatki so v milimetrih.



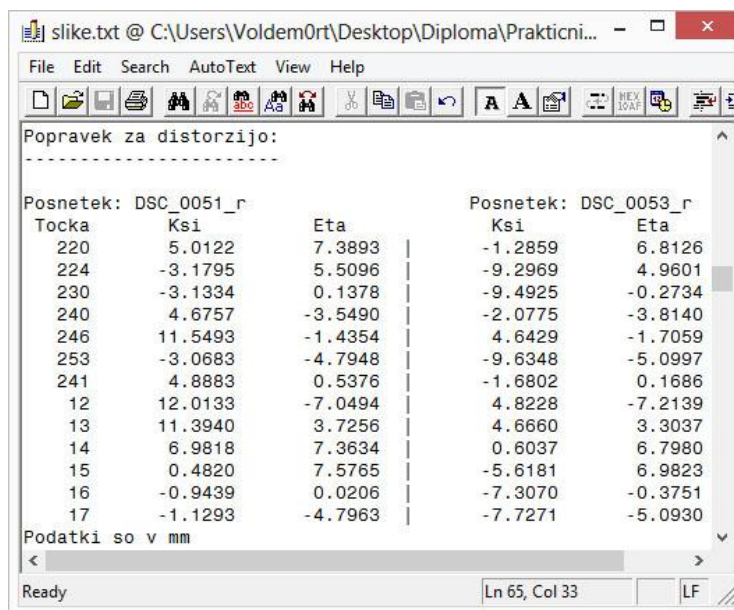
Slika 24: Izhodna datoteka - prebrani podatki o kalibraciji fotoaparata

Izpisu prebranih podatkov sledi opsijski del izpisa. V primeru, da v programu izberemo popravek slikovnih koordinat s parametri notranje orientacije, se postopek izvede in seveda izpiše tudi v izhodno datoteko. Najprej se izpišejo za glavno točko premaknjene slikovne koordinate (slika 25). Podatki so v milimetrih.



Slika 25: Izhodna datoteka - premik za glavno točko

Drugi del izpisa popravka slikovnih koordinat je popravek za distorzijo. Če je popravek odključen v programu, se v izhodno datoteko zapiše tudi izračun distorzije (slika 26). Podatki so v milimetrih.



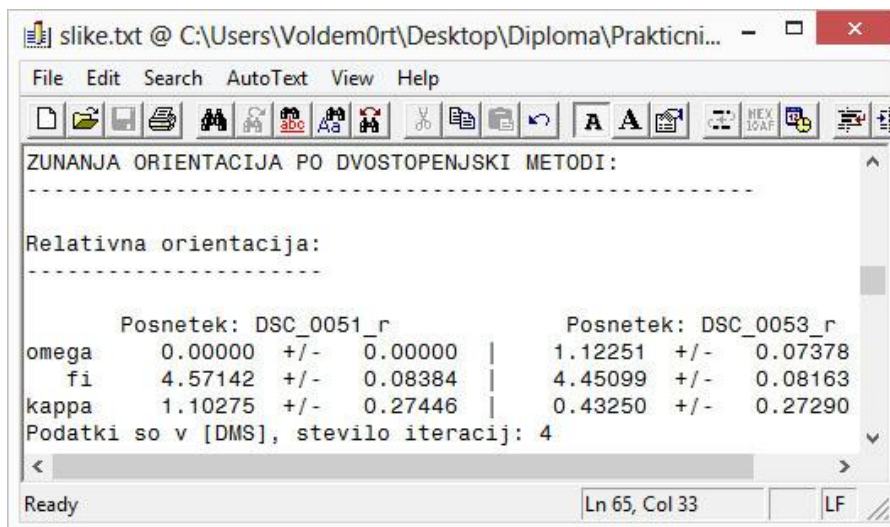
Popravek za distorzijo:

Posnetek: DSC_0051_r			Posnetek: DSC_0053_r		
Tocka	Ksi	Eta	Ksi	Eta	
220	5.0122	7.3893	-1.2859	6.8126	
224	-3.1795	5.5096	-9.2969	4.9601	
230	-3.1334	0.1378	-9.4925	-0.2734	
240	4.6757	-3.5490	-2.0775	-3.8140	
246	11.5493	-1.4354	4.6429	-1.7059	
253	-3.0683	-4.7948	-9.6348	-5.0997	
241	4.8883	0.5376	-1.6802	0.1686	
12	12.0133	-7.0494	4.8228	-7.2139	
13	11.3940	3.7256	4.6660	3.3037	
14	6.9818	7.3634	0.6037	6.7980	
15	0.4820	7.5765	-5.6181	6.9823	
16	-0.9439	0.0206	-7.3070	-0.3751	
17	-1.1293	-4.7963	-7.7271	-5.0930	

Podatki so v mm

Slika 26: Izhodna datoteka - popravek za distorzijo

Sledi del z izpisom rezultatov izračunane orientacije. Najprej se izvede izračun parametrov zunanje orientacije po dvostopenjski metodi. Prvi podatek v izpisu je podatek o relativni orientaciji obeh posnetkov. V izpisu lahko v formatu DMS (ang. degrees, minutes, seconds) razberemo parametre relativne orientacije ω , ϕ in κ za vsak posamezen posnetek (slika 27).



ZUNANJA ORIENTACIJA PO DVOSTOPENJSKI METODI:

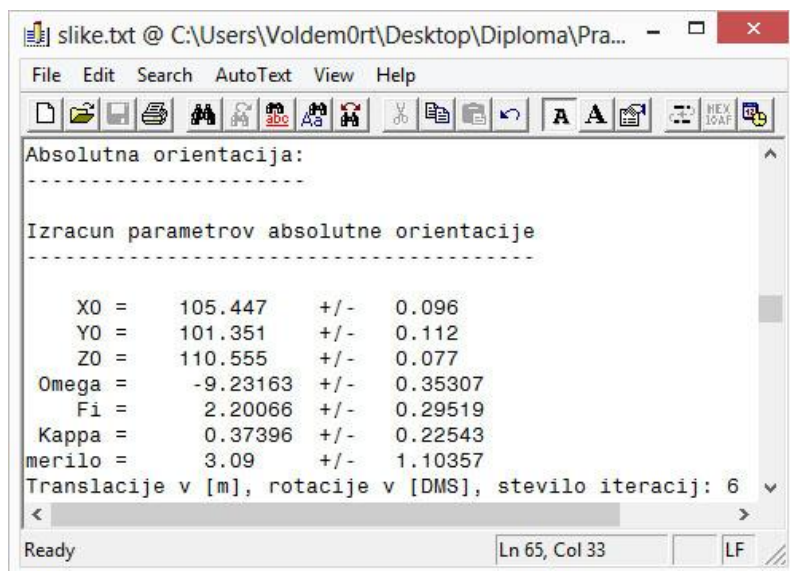
Relativna orientacija:

	Posnetek: DSC_0051_r			Posnetek: DSC_0053_r		
omega	0.00000	+/-	0.00000	1.12251	+/-	0.07378
fi	4.57142	+/-	0.08384	4.45099	+/-	0.08163
kappa	1.10275	+/-	0.27446	0.43250	+/-	0.27290

Podatki so v [DMS], stevilo iteracij: 4

Slika 27: Izhodna datoteka - izračunana relativna orientacija

V izhodni datoteki je naslednja na vrsti absolutna orientacija. V izpisu najdemo podatke o parametrih absolutne orientacije in podatke o natančnosti teh parametrov (slika 28). Rezultati so v formatu DMS in v metrih.



The screenshot shows a text editor window titled 'slike.txt @ C:\Users\Voldem0rt\Desktop\Diploma\Pra...'. The menu bar includes File, Edit, Search, AutoText, View, and Help. The toolbar contains various icons for file operations and text formatting. The text content is as follows:

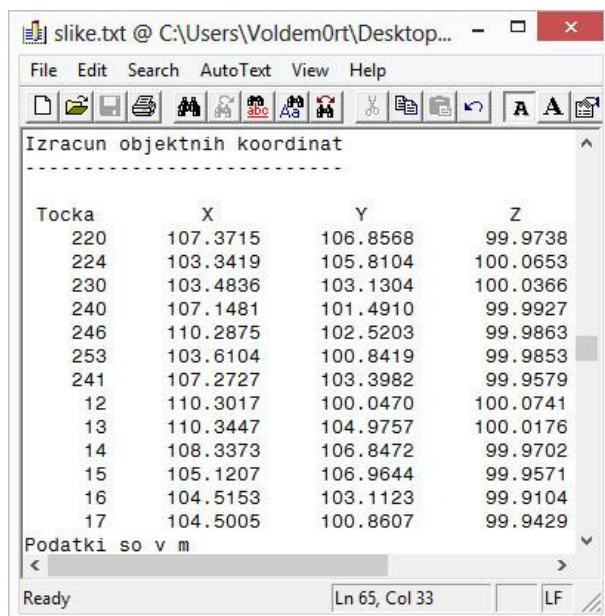
```
Absolutna orientacija:
-----

Izracun parametrov absolutne orientacije
-----

X0 = 105.447 +/- 0.096
Y0 = 101.351 +/- 0.112
Z0 = 110.555 +/- 0.077
Omega = -9.23163 +/- 0.35307
Fi = 2.20066 +/- 0.29519
Kappa = 0.37396 +/- 0.22543
merilo = 3.09 +/- 1.10357
Translacije v [m], rotacije v [DMS], stevilo iteracij: 6
-----
Ready Ln 65, Col 33 LF
```

Slika 28: Izhodna datoteka - izračunana absolutna orientacija

V naslednjem koraku iz parametrov absolutne orientacije izračunamo objektne koordinate oslonilnih, kontrolnih in ostalih veznih točk, ki nam služijo kot vhodni podatek za metodo DLT, (slika 29). Podatki so v metrih.



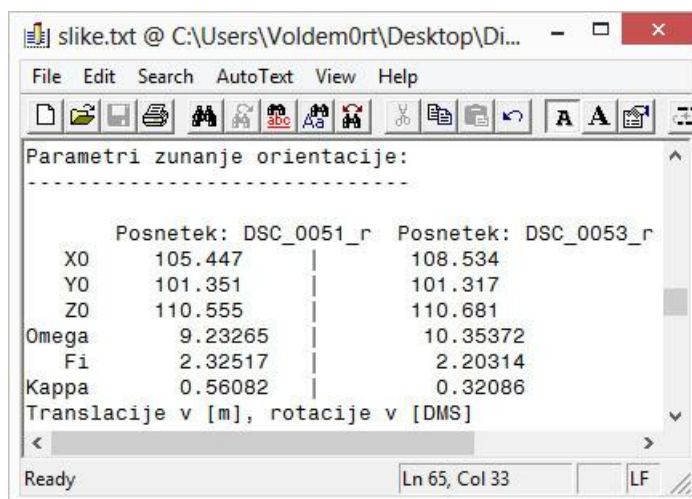
The screenshot shows a text editor window titled 'slike.txt @ C:\Users\Voldem0rt\Desktop...'. The menu bar includes File, Edit, Search, AutoText, View, and Help. The toolbar contains various icons for file operations and text formatting. The text content is as follows:

```
Izracun objektnih koordinat
-----

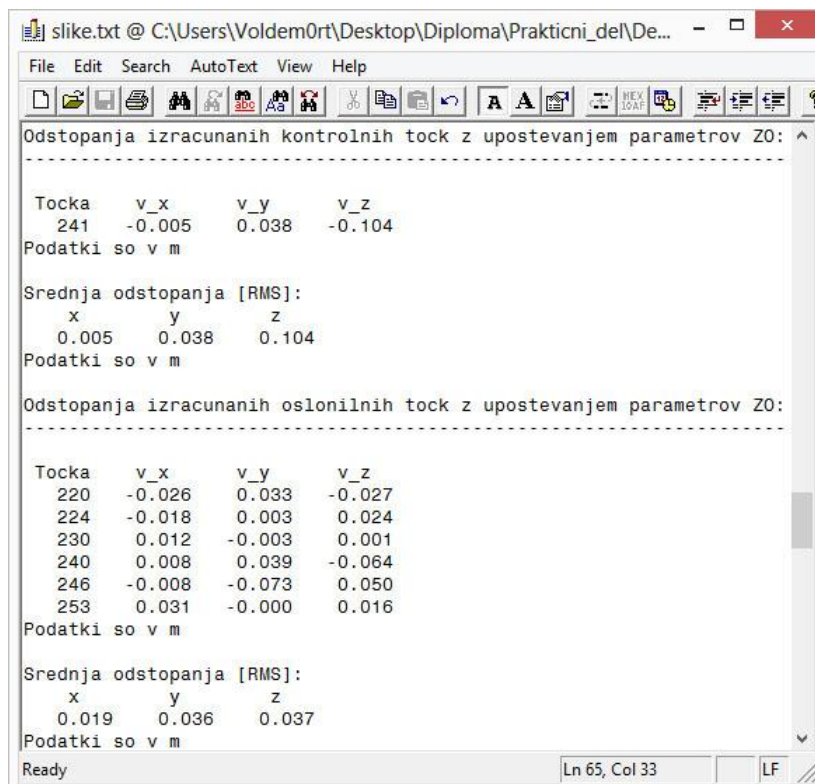
Točka      X      Y      Z
220      107.3715      106.8568      99.9738
224      103.3419      105.8104      100.0653
230      103.4836      103.1304      100.0366
240      107.1481      101.4910      99.9927
246      110.2875      102.5203      99.9863
253      103.6104      100.8419      99.9853
241      107.2727      103.3982      99.9579
12      110.3017      100.0470      100.0741
13      110.3447      104.9757      100.0176
14      108.3373      106.8472      99.9702
15      105.1207      106.9644      99.9571
16      104.5153      103.1123      99.9104
17      104.5005      100.8607      99.9429
-----
Podatki so v m
-----
Ready Ln 65, Col 33 LF
```

Slika 29: Izhodna datoteka - izračunane objektne koordinate

Sledi izračun parametrov zunanje orientacije. Rezultati so v formatu DMS in v metrih (slika 30). Nato je na vrsti kontrola na osnovi izračuna vrednosti RMS, ki primerja podane objektne koordinate kontrolnih točk z izračunanimi iz izmerjenih slikovnih koordinat ter v postopku izračunanih parametrov zunanje orientacije (slika 31). Če kontrolne točke niso na voljo, se izračun RMS izvede le za oslonilne točke. Podatki so v metrih.

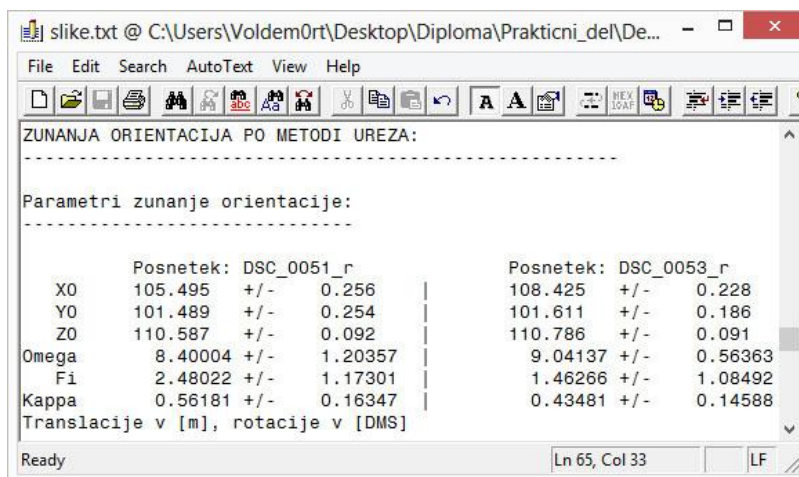


Slika 30: Izhodna datoteka - parametri ZO, izračunani po dvostopenjski metodi



Slika 31: Izhodna datoteka - dvostopenjska metoda: izračun vrednosti RMS

Sledi podatek o izračunu parametrov zunanje orientacije po metodi notranjega ureza. V formatu DMS razberemo parametre rotacije zunanje orientacije ω , ϕ in κ , v metrih pa parametre položaja projekcijskega centra. Parametri so različni za vsak posamezni posnetek (slika 32). S parametri se izračunajo nove koordinate kontrolnih in oslonilnih točk, ki se uporabijo v izračunu vrednosti RMS (slika 33).

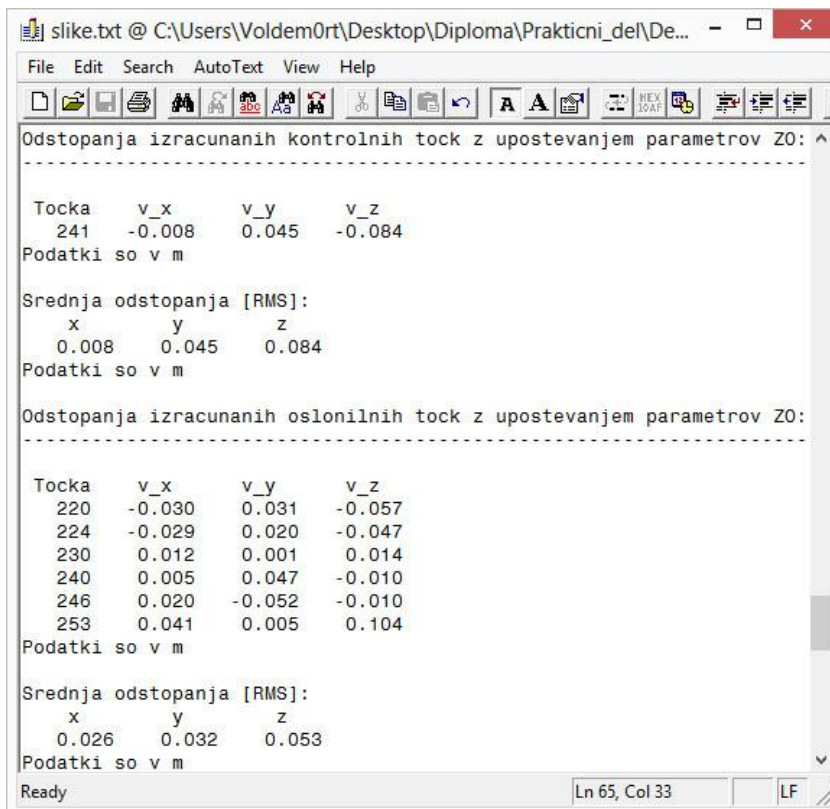


```
ZUNANJA ORIENTACIJA PO METODI UREZA:

Parametri zunanje orientacije:

Posnetek: DSC_0051_r      Posnetek: DSC_0053_r
X0      105.495 +/- 0.256  108.425 +/- 0.228
Y0      101.489 +/- 0.254  101.611 +/- 0.186
Z0      110.587 +/- 0.092  110.786 +/- 0.091
Omega   8.40004 +/- 1.20357 9.04137 +/- 0.56363
Fi      2.48022 +/- 1.17301 1.46266 +/- 1.08492
Kappa   0.56181 +/- 0.16347 0.43481 +/- 0.14588
Translacije v [m], rotacije v [DMS]
```

Slika 32: Izhodna datoteka - parametri ZO po metodi notranjega ureza



```
Odstopanja izracunanih kontrolnih tock z upostevanjem parametrov ZO:

Točka   v_x    v_y    v_z
241     -0.008   0.045  -0.084
Podatki so v m

Srednja odstopanja [RMS]:
x        y        z
0.008    0.045    0.084
Podatki so v m

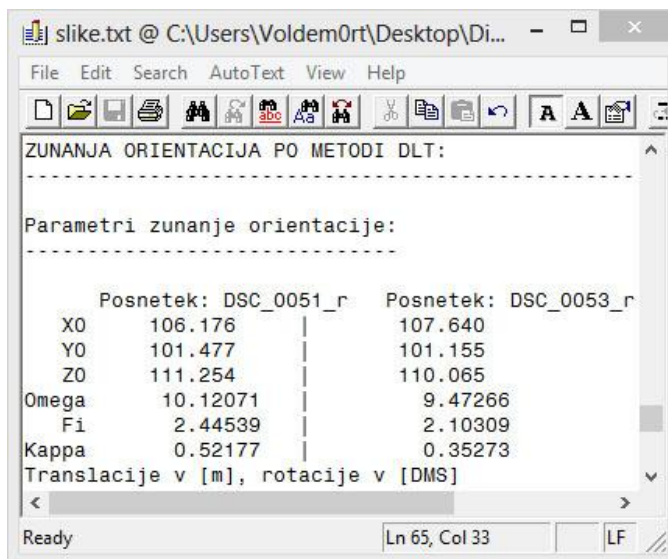
Odstopanja izracunanih oslonilnih tock z upostevanjem parametrov ZO:

Točka   v_x    v_y    v_z
220     -0.030   0.031  -0.057
224     -0.029   0.020  -0.047
230      0.012   0.001   0.014
240      0.005   0.047  -0.010
246      0.020  -0.052  -0.010
253      0.041   0.005   0.104
Podatki so v m

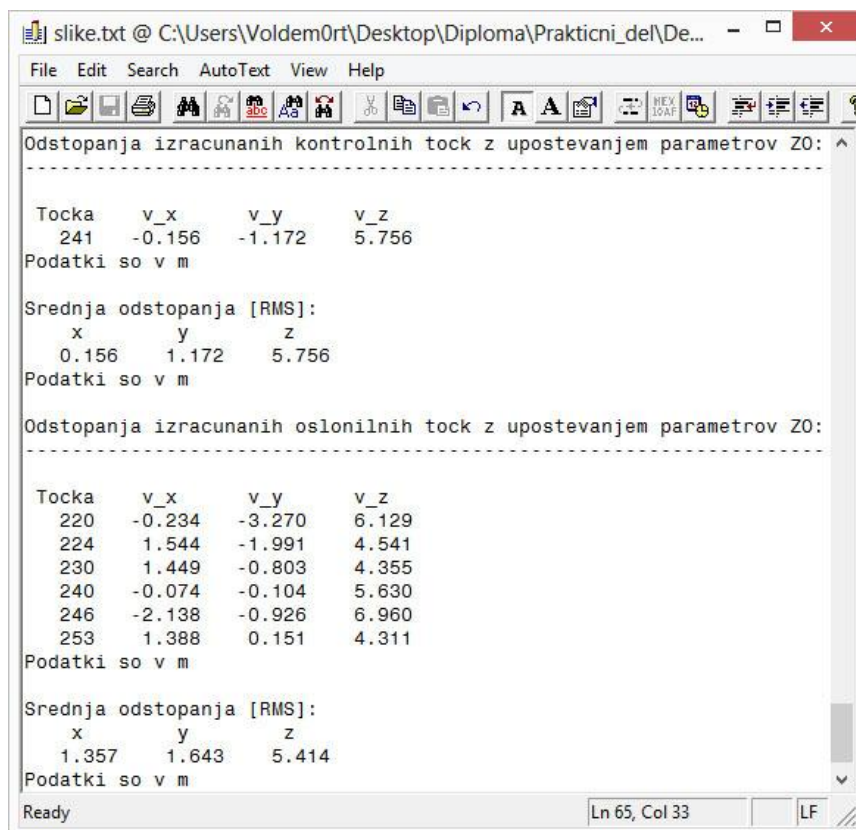
Srednja odstopanja [RMS]:
x        y        z
0.026    0.032    0.053
Podatki so v m
```

Slika 33: Izhodna datoteka - metoda notranjega ureza: izračun vrednosti RMS

Postopek je enak tudi za izračun parametrov zunanje orientacije po metodi DLT (slika 34, slika 35). Oba postopka sta navedena eden za drugim in zaključujeta poročilo o orientaciji stereopara.

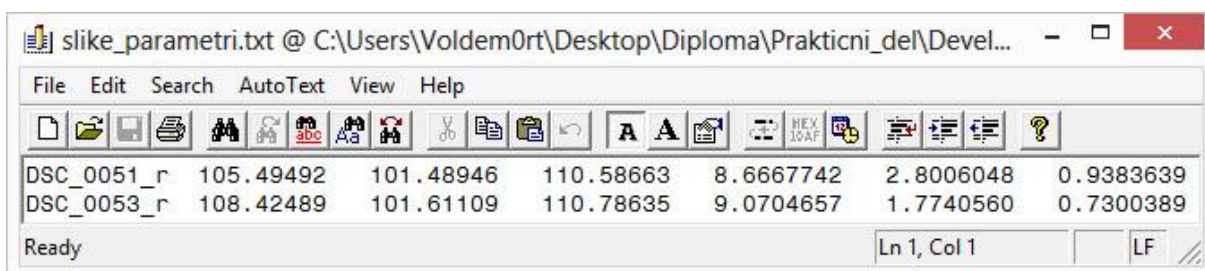


Slika 34: Izhodna datoteka - parametri ZO po metodi DLT



Slika 35: Izhodna datoteka - metoda DLT: izračun vrednosti RMS

Tako v podrobnosti zgleda prvi izhodni podatek. Drugi izhodni podatek pa je izhodna datoteka s parametri zunanje orientacije. S to datoteko vnašamo parametre zunanje orientacije vsakega posameznega posnetka v program Socet Set. V izhodni datoteki so izpisani parametri zunanje orientacije določeni po tisti metodi, ki je najbolj točna. Po vrsti si sledijo podatki: ime fotografije, koordinata X projekcijskega centra, koordinata Y projekcijskega centra, koordinata Z projekcijskega centra ter rotacije posnetka ω , ϕ in κ v decimalnih stopinjah (slika 36).



DSC_0051_r	105.49492	101.48946	110.58663	8.6667742	2.8006048	0.9383639
DSC_0053_r	108.42489	101.61109	110.78635	9.0704657	1.7740560	0.7300389

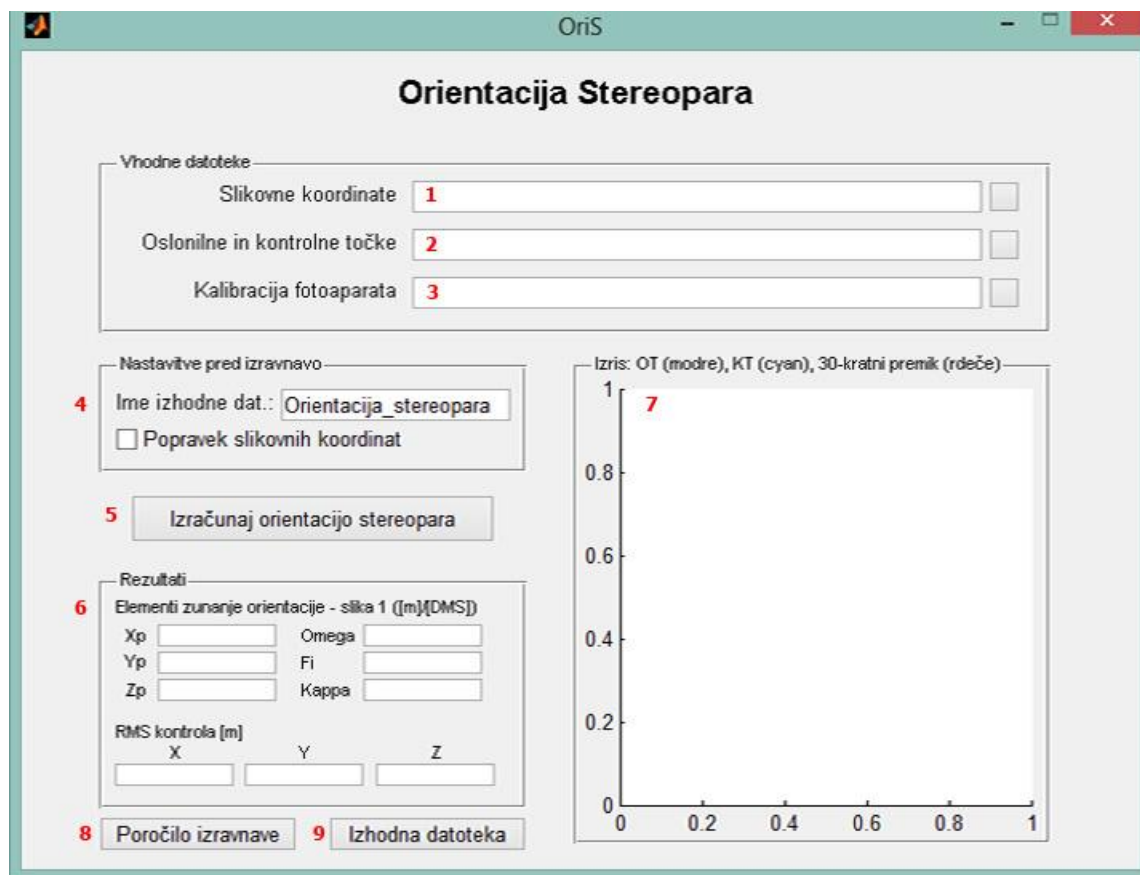
Slika 36: Izhodna datoteka - izhodna datoteka s parametri zunanje orientacije

S tem je zaključen celoten postopek izdelave programa *OriS* od začetka do konca. Navodila za uporabo, področja uporabe in omejitve programa so opisani v naslednjih poglavjih.

3.2 Sestava programa in navodila za uporabo

Program je zasnovan na dokaj enostaven in razumljiv način. Grafični vmesnik je sestavljen iz petih glavnih delov, ki bodo podrobno opisani v nadaljevanju. Poleg tega bomo v to obrazložitev vključili tudi navodila za uporabo programa.

Grafični vmesnik se začne z naslovom programa. Prvi del vmesnika služi za vnos podatkov, drugi del pa je namenjen nastavitvam izvedbe postopka. V tretjem delu so predstavljene numerične rešitve postopka, v četrtem pa so le-te tudi grafično opredeljene. Peti del grafičnega vmesnika so interaktivni gumbi, s katerimi nadziramo potek postopka in nam služijo za komuniciranje s programsko kodo (slika 37).



Slika 37: Prikaz grafičnega vmesnika z oznako posameznih delov

Prvi sestavni del programa je poimenovan *Vhodne datoteke*. V njem so tri vrstice, vsaka pa predstavlja vnos posameznega vhodnega podatka. Vrsto vhodnega podatka lahko razberemo iz statičnega teksta pred vsakim posameznim okencem. V prvo okence (slika 37 - oznaka 1) vnašamo datoteke slikovnih koordinat. To so datoteke s končnico *.exp. Pot do vhodnega podatka lahko preprosto napišemo ali kopiramo v okence. S klikom na ikono, desno od okenca (oblika odprte mape), odpremo standardno okno za odpiranje datotek. V njem lahko brskamo po pomnilniku računalnika in iščemo vhodne datoteke. Prezeta je vrsta datoteke *.exp, lahko pa izberemo tudi pogled na vse datoteke za lažjo orientacijo. Program je zmožen prepoznati tudi druge vrste datotek, pod pogojem, da je vsebina ustrezna vhodni datoteki, opisani v poglavju 3.1.2. Identičen način vnašanja vhodnih datotek je nastavljen tudi pri okencih *Oslonilne in kontrolne točke* (slika 37 - oznaka 2) in *Kalibracija fotoaparata* (slika 37 - oznaka 3). Razlika je le v vrsti vhodne datoteke, ki je za oslonilne in kontrolne točke prevzeta kot *.gpf, pri kalibraciji fotoaparata pa *.cam.

Drugi del programa so nastavitve same orientacije (slika 37 - oznaka 4). Ta del je poimenovan *Nastavitve pred izravnavo*. Tu določamo tri različne parametre. V prvem se določa ime izhodne datoteke, ki je lahko poljubno. Končnica *.txt se doda avtomatsko. S tem poimenovanjem določamo tudi drugo izhodno datoteko. Podanemu imenu se doda še končnica *_parametri.txt. Druga nastavev je vključitev izračuna popravka slikovnih koordinat s parametri notranje orientacije. Ta izračun vključimo oz. izključimo s kljukico.

Tretji del je poimenovan *Rezultati* (slika 37 - oznaka 6). To je prostor, ki je le informativen in vanj ne vpisujemo podatkov. V njem se izpišejo parametri zunanje orientacije prvega posnetka stereopara. To so parametri tiste metode, ki je za dan primer najbolj točna. Gre za informativen izpis, ki prikazuje, v kakšnem rangi se gibljejo rezultati. Za podrobnejše rezultate je potrebno pogledati poročilo izravnave, tam pa so izpisani tudi izračunani parametri drugega posnetka. V spodnji polovici tega dela se izpisujejo še izračunane vrednosti RMS, ki je zadnja opravljena kontrola in primerja koordinate, določene z izračunanimi parametri zunanje orientacije z na terenu izmerjenimi koordinatami.

V četrtem delu (*Izris*) se izrišejo oslonilne in kontrolne točke (slika 37 - oznaka 7). Gre za izris podanih, merjenih koordinat, ki nam primarno služi za kontrolo razporeditve točk. V kolikor je geometrija točk slaba, je to lahko razlog za slabšo orientacijo stereopara. Poleg izrisa oslonilnih točk v modri barvi ter kontrolnih točk v cyan barvi, se z rdečo barvo izrišejo še odstopanja. Gre za odstopanje med podanimi koordinatami in izračunanimi objektnimi koordinatami. Odstopanja se prikažejo tako, da se povečajo za faktor 30 in se zato lažje opazi trend premikov po izravnavi.

Zadnji del sestavljajo interaktivni gumbi, izmed katerih je najpomembnejši gumb *Izračunaj orientacijo stereopara* (slika 37 - oznaka 5). Ko pritisnemo na ta gumb se v ozadju izvede celoten postopek orientacije. Za uspešnost izvedenega postopka mora biti izpolnjenih nekaj pogojev. Za konvergirane izračuna v izravnavi morajo biti predhodno podani ustrezni in dobri podatki. S pritiskom na gumb se izvede izravnavo, ustvarita se dve izhodni datoteki, v programu se izpišejo rezultati in na delu izrisa se izriše slika. Naslednji gumb se imenuje *Poročilo izravnave* (slika 37 - oznaka 8). S pritiskom na ta gumb se odpre datoteka, ustvarjena v sklopu postopka same orientacije stereopara. V programu je določeno, da je privzet program za pregled datoteke *Editor2.exe*, ki je priložen programu. Podobno velja tudi

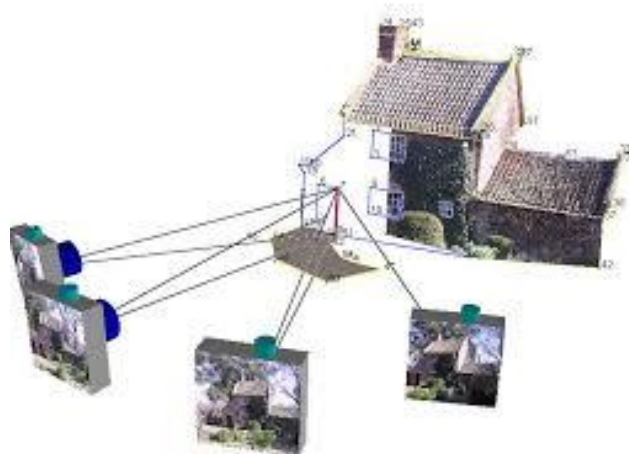
za gumb *Izhodna datoteka* (slika 37 - oznaka 9). Odpre se izhodna datoteka, ki vsebuje najboljše parametre zunanje orientacije med izvedenimi metodami.

3.3 Področje uporabe

Program *OriS* je primarno namenjen opravljanju vaj pri predmetih s področja fotogrametrije. Potrebe po programu so se pojavile zaradi slabe ustreznosti ostale programske opreme na fakulteti. Program je bližnjica postopka za izvedbo vaje, ki na preprost način, s pritiskom na nekaj gumbov, izračuna parametre zunanje orientacije stereopara. Prav zato ni potrebno nobeno urejanje datotek in celoten postopek ne vzame preveč časa. Program je prirejen za izhodne datoteke programskega okolja *Socet Set*. Alternativa programu *OriS* je program *AeroSys*, program za orientacijo aerotriangulacije, pri katerem pa izgubimo ogromno časa z nastavljanjem vseh parametrov, prirejanjem vhodnih in izhodnih datotek. Postopek je bistveno bolj zakompliciran kot s programom *OriS* in zahteva tudi nekaj predznanja o delovanju programa.

Program je uporaben za vse postopke, v katerih je stereopar osnovna fotogrametrična enota za zajem, potrebno pa je določiti zunanjo orientacijo obeh posnetkov stereopara.

Stereopar največkrat uporabljamo v bližnjefotogrametriji. O področju je več napisano v poglavju 2.3. Sam praktični primer uporabe je na primer slika fasade objekta (slika 38). Zajamemo stereopar fasade nekega objekta, na njem izmerimo slikovne koordinate vseh točk in na terenu izmerimo koordinate oslonilnih in kontrolnih točk. S podano zunanjo orientacijo lahko posnetek umestimo v prostor. Na orientiranem posnetku lahko s primerno programsko opremo izvajamo meritve. To je zelo zanimivo za objekte, ki niso fizično dostopni, saj lahko brez dostopa do objekta na njem izvajamo meritve. Pogosto zajemamo objekte kulturne dediščine. Z zajemom stereopara in orientacijo le tega, lahko točno določamo merske in semantične značilnosti objekta kulturne dediščine. V primeru nesreče ali dotrajanosti tega objekta je na podlagi zajetih podatkov možna rekonstrukcija. Zajem pa ni omejen le na objekte. Zajemamo lahko karkoli iz prostora oz. karkoli je zanimivo za ohranjanje oz. obdelavo.



Slika 38: Prikaz fotogrametričnega zajemanja fasade (Crc-si, 2013)

Drugo veliko področje zajema stereoparov so letalski posnetki. Pri fotografiranju se ponavadi posname blok posnetkov, za katere se parametri zunanje orientacije izračunajo s postopkom aerotriangulacije. V kolikor nas zanima le manjše območje, lahko iz bloka vzamemo dva sosednja posnetka, ki tvorita stereopar. Če želimo na tem območju izmeriti detajl oz. določevati koordinate posameznih objektov, je potrebno stereopar najprej orientirati. To lahko storimo s programom *OriS*. Ko je ta postopek izveden, lahko brez težav izvajamo meritve na posnetkih.

Obstajajo tudi drugi primeri, kjer lahko uporabljamo stereopare. Aplikacija *OriS* je izdelana tako, da je primerna za poljuben namen uporabe stereoparov. Program je mogoče prirediti tudi za primere, ko potrebujemo le posamezen del postopka. V mislih imam predvsem zunanjo orientacijo posameznih posnetkov, absolutno orientacijo modela oblaka točk in drugo.

3.4 Omejitve programa

Kot vsi programi ima tudi *OriS* določene omejitve. Omejitve se delijo na tiste, ki se pojavljajo pri samih vhodnih podatkih in na tiste, ki se pojavljajo pri samem postopku.

Omejitve glede vhodnih podatkov se nanašajo na ustreznost le-teh. Oblika vhodnih datotek je omejena na določeno strukturo, ki jo lahko vidimo v poglavju 3.1.2. Potrebno je, da vhodne datoteke vsebujejo podatke slikovnih koordinat obeh posnetkov, koordinate oslonilnih točk in podatke o kalibraciji fotoaparata. Kontrolne točke niso nujno potrebne. Ni pa pomembno le,

da so ti podatki v datotekah, potrebno je tudi, da so med seboj skladni. Podatki o slikovnih koordinatah se morajo ujemati na obeh posnetkih. Program sam poišče homologne točke na obeh posnetkih, če te obstajajo. Enako velja tudi za oslonilne točke, ki morajo imeti pripadajoče slikovne koordinate na obeh posnetkih. Za vsa neskladja v podatkih se pojavljajo opozorilna okna.

Omejitve se pojavljajo tudi pri samem postopku. Da izravna konvergira, morajo biti sami podatki zajeti z ustrezno točnostjo. Iterativni postopki so omejeni na 100 iteracij. Poleg tega se kontrolira tudi singularnost matrik. Če se v postopku pojavi napaka, se ta pokaže z opozorilnim oknom. Med omejitve postopka umeščamo tudi pogoje same izravnave. Da se lahko izračunajo neznanke, je potrebno imeti zadostno število nastavljenih enačb. Pri dvostopenjski metodi je za izračun absolutne orientacije pomembno, da so izmerjene vsaj tri oslonilne točke, ki vsebujejo koordinato x , y in z . Podobno tudi pri metodi notranjega ureza potrebujemo podane tri oslonilne točke. Za potrebe metode DLT je po teoriji potrebno skupno imeti koordinate vsaj šestih oslonilnih točk. Ker smo v izračunu že pridobili objektne koordinate veznih točk, jih lahko uporabimo v izračunu metode DLT. Zato dopuščamo, da je med podatki vsota vseh oslonilnih in veznih točk vsaj šest.

Za vse odkrite težave smo vnesli opozorilna okna, ki nam sporočajo, kaj gre v programu lahko narobe. S tem lažje odpravljamo pomanjkljivosti v podatkih, če je problem v njih. V kolikor postopek izravnave ne konvergira, obstaja velika verjetnost, da meritve niso bile izvedene z ustrezno točnostjo in je potrebna ponovna izmera, ali pa obstaja kakšen drug razlog.

Vse omejitve programa je težko odkriti, saj program ni bil dolgo v uporabi. S preizkušanjem programa na testnih podatkih pa smo odpravili vse tiste pomanjkljivosti, ki smo jih odkrili.

4 PRAKTIČEN PRIMER UPORABE PROGRAMA

V tem poglavju je predstavljena uporaba programa na podlagi praktičnega primera. Podrobno so predstavljeni vhodni podatki in rezultati izračuna orientacije stereopara s programom OriS. Dodani so kratki komentarji dobljenih rezultatov. Za primer, obravnavan v naslednjem poglavju, so vse vhodne in izhodne datoteke predstavljene v prilogah diplomskega dela.

4.1 Pregled vhodnih podatkov praktičnega primera

Pred orientacijo stereopara smo podrobno preučili vhodne podatke. Posvetili smo se instrumentariju, s katerimi so bili zajeti stereopar in oslonilne ter kontrolne točke, programski opremi, s katero so bili obdelani zajeti podatki in rezultatom obdelave zajetih podatkov, ki so hkrati tudi vhodni podatek za program OriS.

Predmet zajema je bila južna fasada stavbe severno od Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Oslonilne in kontrolne točke smo pridobili iz laserskega oblaka točk, ki je bil zajet za celotno stavbo.

Stereopar je bil fotografiran s fotoaparatom Nikon D70, ki je nemerski fotoaparat. To je digitalni fotoaparat s CCD svetlobnim tipalom. Maksimalna ločljivost posnetka je 3008 x 2000 pikslov, pri čemer je velikost piksla 7,8 μm x 7,8 μm . Goriščna razdalja ima razpon med 17mm in 70 mm.

Ker gre za nemerski fotoaparat, ga je bilo potrebno kalibrirati. Kalibracija je bila opravljena s pomočjo programa *PhotoModeler* in z uporabo ustreznih testnih polj. Podatki o kalibracijskih parametrih fotoaparata so vidni v prilogi C.

Fotografije stereopara smo uvozili v programsko okolje *SocetSet*. V programu smo na vsakem posnetku izmerili slikovne koordinate oslonilnih, kontrolnih in veznih točk. Izbrali smo šest oslonilnih točk (rdeče barve), dve kontrolni točki (modre barve) in dve vezni točki (rumene barve). Izbiro točk bi bilo mogoče optimizirati, saj bi bilo za obravnavan postopek bolj smiselno izbrati več veznih in kontrolnih točk, za izračun pa bi teoretično zadoščale le tri oslonilne točke. Najprej se posvetimo razporeditvi točk na posameznih posnetkih (slika 39 in

slika 40). Posamezne posnetke uporabimo pri metodi notranjega ureza in metodi DLT. Pogoji pri metodi notranjega ureza je, da poznamo vsaj tri oslonilne točke. Ta pogoj je izpolnjen, saj je zajetih šest oslonilnih točk. Ob idealni razporeditvi točk bi bile štiri točke blizu vogalov fotografije, ena pa na sredini. V našem primeru so štiri točke na robu objekta, dve pa blizu zgornjega roba objekta. Za doseg idealne razporeditve, bi bili dve točki lahko bližje zgornjima robovoma posnetka, ena pa bi bila lahko na sredini posnetka. Vzrok, da temu ni tako, je v tem, da na sredini objekta ni nobenega značilnega detajla, kjer bi lahko določili točko. Če pokomentiramo razporeditev z vidika metode DLT, je ta slaba, saj vse točke ležijo približno na isti ravnini. To pomeni, da metoda verjetno ne bo prinesla dobrih rezultatov.



Slika 39: Levi posnetek stereopara



Slika 40: Desni posnetek stereopara

Da pokomentiramo razporeditev točk za potrebe dvostopenjske metode, je potrebno pogledati prekrita posnetka - stereo območje (slika 41). Z vidika relativne orientacije predstavljajo točke na robu objekta (1, 4, 7, 8, 1001 in 1002) idealno razporeditev Gruberjevih točk. Prav tako so oslonilne točke za absolutno orientacijo primerno razporejene in bi morale prinesiti dobro določitev orientacijskih parametrov.



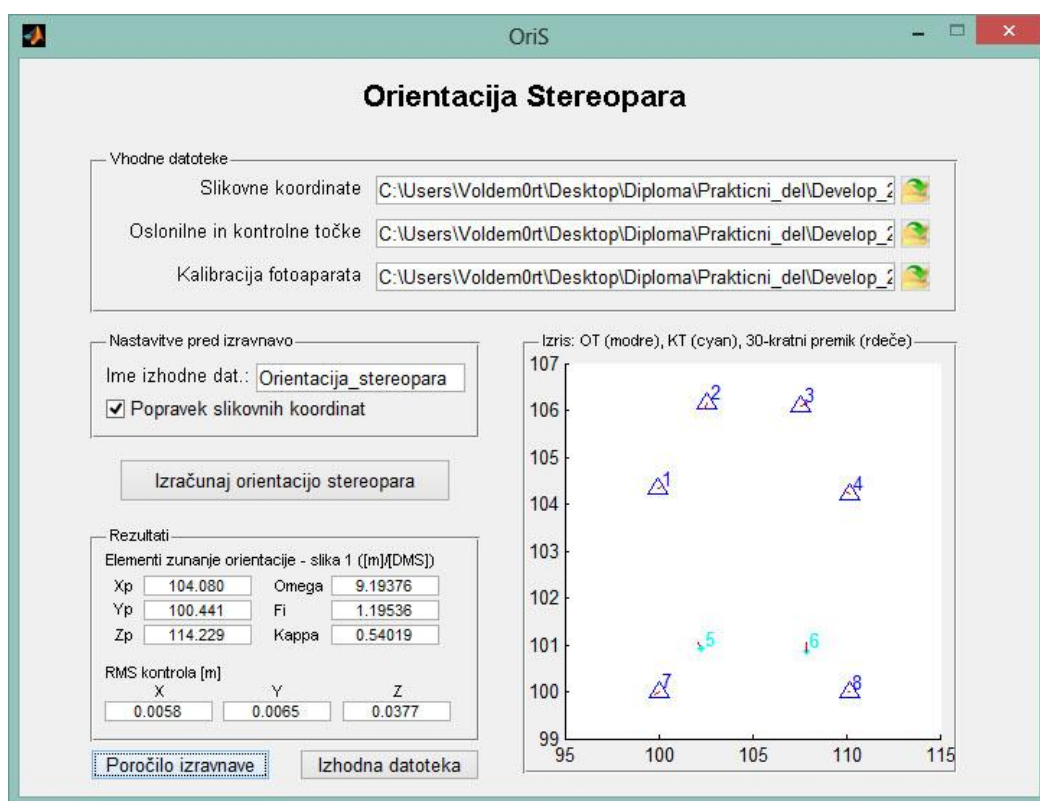
Slika 41: Stereo območje praktičnega primera

Potrebna je tudi ocena natančnosti vhodnih slikovnih koordinat. Točne natančnosti niso znane, lahko pa jo ocenimo glede na velikost piksla. Natančnost slikovnih koordinat lahko ocenimo na velikost polovice piksla, kar v našem primeru prinese 3,9 μm . Podatki o slikovnih koordinatah so vidni v prilogi A.

Ostane nam še pregled vhodnega podatka objektnih koordinat oslonilnih in kontrolnih točk. Ta podatek je bil pridobljen iz georeferenciranega oblaka točk, zajetega z laserskim skenerjem Riegel VZ-400. Pri zajemu točke niso bile signalizirane ampak so bile pridobljene iz dobro vidnih točk detajla. Zajeti podatki so bili obdelani v programskem okolju RiscanPro. Glede na lastnosti laserskega skenerja sklepam, da so natančnosti izmerjenih oslonilnih in kontrolnih točk reda velikosti 5 mm. Podatki o oslonilnih in kontrolnih točkah so vidni v prilogi B.

4.2 Izračun orientacije stereopara s programom OriS

Ko smo podrobno preučili vhodne rezultate, smo lahko začeli z izračunom orientacije stereopara. Najprej smo preko vmesnika v program vnesli datoteke z vhodnimi podatki. Za vnos slikovnih koordinat smo v program vnesli datoteko *patb_new.exp*. Slikovne koordinate še niso bile popravljene glede na podatke notranje orientacije. Naslednji vhodni podatek je predstavljala datoteka oslonilnih in kontrolnih točk *ot_rot.gpf*, v njej pa so podatki o šestih oslonilnih in dveh kontrolnih točkah. Zadnji vhodni podatek je bila datoteka *nikon1_JVfas.cam*, ki vsebuje podatke o kalibraciji fotoaparata.



Slika 42: Prikaz grafičnega vmesnika ob izvedbi orientacije stereopara

Pred izravnavo je bilo potrebno v izbirnem polju *Popravek slikovnih koordinat* označiti, če želimo slikovne koordinate popraviti glede na parametre notranje orientacije. V našem primeru smo ta postopek izbrali s kljukico. Ime izhodne datoteke smo nastavili na *Orientacija_stereopara*.

S pritiskom na gumb *Izračunaj orientacijo stereopara* se izvede izračun. Na zaslonu se pojavi izris oslonilnih in kontrolnih točk, z rdečo pa se izrišejo odstopanja do novih oslonilnih in kontrolnih točk, ki so izračunane z dobljenimi parametri zunanje orientacije (slika 42). V področju *Rezultati* lahko pogledamo elemente zunanje orientacije prve fotografije in RMS odstopanj koordinatnih razlik podanih in izračunanih koordinat kontrolnih točk. Vidimo, da so rezultati RMS pri koordinati X in Y manjši od 1 cm, pri koordinati Z pa manjši od 4 cm. Prvi pogled na rezultate je vzpodbuden.

Za natančnejši pregled poteka izračuna lahko kliknemo na gumb *Poročilo izravnav* in v programu *Editor2* odpremo prvo izhodno datoteko. Datoteka je priložena v prilogi D, vseeno pa lahko v preglednicah predstavimo nekaj rezultatov. V glavi dokumenta so podatki o programu, kateremu sledi poročilo o branju podatkov. Navedene so slikovne koordinate prvega in drugega posnetka, prebrane oslonilne in kontrolne točke ter podatki o kalibraciji fotoaparata. Sledi izpis o popravku slikovnih koordinat s parametri notranje orientacije. Najprej so izpisane slikovne koordinate popravljene za glavno točko (premik koordinati x velik 0,2 milimetra, po koordinati y pa 0,04 milimetra), nato pa še slikovne koordinate, popravljene za distorzijo (popravki so v rangi velikosti 0,1 milimetra).

Na ta način so podatki pripravljeni za orientacijo. Prvi postopek izračuna parametrov zunanje orientacije je dvostopenjska metoda. Najprej se izračuna relativna orientacija posnetkov. Pridobimo parametre relativne orientacije in pripadajoče standardne odklone parametrov (preglednica 1).

Preglednica 1: Relativna orientacija obeh posnetkov

Rotacija	Prvi posnetek		Drugi posnetek	
	Vrednost	St. odklon	Vrednost	St. odklon
ω	0°00'00,0"	0°00'00,0"	-0°30'27,3"	0°08'11,0"
φ	7°14'52,3"	0°11'58,9"	6°20'56,0"	0°12'36,3"
κ	-1°40'06,7"	0°51'14,9"	-2°11'19,4"	0°50'12,6"

Vsi podani koti v izhodni datoteki so v obliki DMS. To pomeni, da so mesta pred decimalno piko stopinje, prvi dve mesti za decimalno piko predstavljata minute, naslednji dve mesti pa sekunde (pravi zapis je viden v preglednici 1). Iz preglednice vidimo, da je kot ω prvega posnetka nastavljen na 0, zato je tudi standardni odklon enak 0. Ostali koti so v skladu s pričakovanji. Rotacije niso prevelike, standardni odkloni pa so primerni.

Naslednji korak je izračun modelnih koordinat. Ta izračun se izvede v ozadju, rezultati pa v poročilu izravnave niso vidni. Sledi izračun absolutne orientacije. V izhodni datoteki so podatki o izračunanih parametrih zunanje orientacije s pripadajočimi natančnostmi (preglednica 2). Koordinate translacij in pripadajoče natančnosti so podane v metrih, rotacije z natančnostmi pa so podane v obliki DMS. Merilo je brez enote. S pomočjo teh parametrov izračunamo objektne koordinate točk. Ko primerjamo izračunane objektne koordinate točk s podanimi oslonilnimi točkami vidimo, da so koordinatne razlike velike nekaj milimetrov, kar je v primeru uporabljene opreme pričakovana vrednost. V primerjalni preglednici 3 so izpisane objektne koordinate oslonilnih točk, koordinate oslonilnih točk, izračunane s pomočjo parametrov absolutne orientacije, nato pa še odstopanje med njima. Na koncu je izračunan še srednji kvadratni pogrešek po koordinatah. Enaka preglednica je predstavljena še za kontrolne točke (preglednica 4).

Preglednica 2: Parametri absolutne orientacije

	Vrednost	St. odklon
X_0	104,036 m	0,034 m
Y_0	100,413 m	0,055 m
Z_0	114,219 m	0,031 m
Ω	-9°32'43,7"	0°13'05,3"
Φ	6°24'42,6"	0°07'36,5"
K	-1°31'52,3"	0°06'42,3"
m	2,19	0,14220

Preglednica 3: Primerjava podanih in izr. koordinat oslonilnih točk po absolutni orientaciji

Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
1 _{OT}	99,985	104,327	99,975
1 _{IZR}	99,989	104,329	99,981
$\Delta(1_{IZR}-1_{OT})$	0,004	0,002	0,006
2 _{OT}	102,572	106,152	99,885
2 _{IZR}	102,563	106,153	99,854
$\Delta(2_{IZR}-2_{OT})$	-0,009	0,001	-0,031
3 _{OT}	107,586	106,105	99,883
3 _{IZR}	107,596	106,104	99,888
$\Delta(3_{IZR}-3_{OT})$	0,010	-0,001	0,005
4 _{OT}	110,200	104,224	99,948
4 _{IZR}	110,189	104,224	99,980
$\Delta(4_{IZR}-4_{OT})$	-0,011	0,000	0,032
7 _{OT}	100,000	100,000	100,000
7 _{IZR}	100,002	100,000	100,016
$\Delta(7_{IZR}-7_{OT})$	0,002	0,000	0,016
8 _{OT}	110,162	99,985	100,000
8 _{IZR}	110,167	99,983	99,972
$\Delta(8_{IZR}-8_{OT})$	0,005	-0,002	-0,028
RMS	0,008	0,001	0,023

Preglednica 4: Primerjava podanih in izračunanih kontrolnih točk po absolutni orientaciji

Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
5 _{OT}	102,273	100,908	100,020
5 _{IZR}	102,262	100,915	99,978
$\Delta(5_{IZR}-5_{OT})$	-0,011	0,007	-0,042
6 _{OT}	107,862	100,856	100,017
6 _{IZR}	107,866	100,863	99,964
$\Delta(6_{IZR}-6_{OT})$	0,004	0,007	-0,053
RMS	0,008	0,007	0,048

Iz izračunanih parametrov relativne in absolutne orientacije lahko izračunamo tudi parametre zunanje orientacije za vsak posamezen posnetek (preglednica 5). Koordinate projekcijskega centra so podane v metrih, rotacije pa v obliki DMS. Koordinatna odstopanja med podanimi in izračunanimi koordinatami oslonilnih ter kontrolnih točk so enaka kot v preglednici 3 in preglednici 4, saj gre načeloma le za obratni izračun in tu ni pričakovati razlik. Odstopanja oslonilnih točk so nekoliko pogojena, saj se na podlagi oslonilnih točk določajo parametri absolutne, posledično pa tudi zunanje orientacije. Bolj merodajna so odstopanja kontrolnih točk, ki so po koordinati X in Y velika okoli 1 cm, po koordinati Z pa okoli 5 cm. Po pričakovanjih je največje odstopanje po koordinati Z.

Preglednica 5: Parametri zunanje orientacije po dvostopenjski metodi

Parameter	Prvi posnetek	Drugi posnetek
X _{PC}	104,036 m	106,210 m
Y _{PC}	100,413 m	100,471 m
Z _{PC}	114,219 m	114,464 m
ω	9°26'31,4"	8°58'42,2"
φ	1°10'31,8"	0°15'18,1"
κ	0°54'12,1"	0°19'43,9"

S tem je postopek dvostopenjske orientacije stereopara končan. Sledita še dve metodi določitve zunanje orientacije. Prva je metoda notranjega ureza, kjer ločeno izračunamo parametre zunanje orientacije za prvi, nato pa še za drugi posnetek (preglednica 6). Koordinate projekcijskega centra in pripadajoče natančnosti so podane v metrih, rotacije z natančnostmi pa v obliki DMS. S pridobljenimi rezultati smo lahko zelo zadovoljni, saj je natančnost projekcijskega centra določena na nekaj centimetrov, natančnost rotacij pa je v rangi desetih minut. Podobno kot pri prejšnjem postopku tudi tu izpišemo preglednico koordinatnih razlik in opravimo primerjavo oslonilnih točk (preglednica 7) in kontrolnih točk (preglednica 8). Oslonilne in kontrolne točke izračunamo s pomočjo parametrov zunanje orientacije, določenih z metodo notranjega ureza. Srednja odstopanja kontrolnih točk po koordinati X in Y sta velika manj kot 1 cm, odstopanje po koordinati Z pa manj kot 4 cm.

Parametri izračunani po tej metodi, so glede na ostale metode najbolj točni, to pa je pričakovano, saj je ta postopek najbolj neposredno povezuje podane in izmerjene količine.

Preglednica 6: Parametri zunanje orientacije po metodi notranjega ureza

Parameter	Prvi posnetek		Drugi posnetek	
X_{PC}	104,080 m	0,058 m	106,234 m	0,055 m
Y_{PC}	100,441 m	0,049 m	100,439 m	0,047 m
Z_{PC}	114,229 m	0,014 m	114,454 m	0,014 m
ω	9°19'37,6"	0°11'26,2"	9°06'18,4"	0°10'52,3"
φ	1°19'53,6"	0°12'27,0"	0°20'14,9"	0°11'49,3"
κ	0°54'01,9"	0°02'04,0"	0°19'33,1"	0°01'56,1"

Preglednica 7: Primerjava podanih in izračunanih oslonilnih točk - metoda notranjega ureza

Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
1 _{OT}	99,985	104,327	99,975
1 _{IZR}	99,991	104,328	99,989
$\Delta(1_{IZR}-1_{OT})$	0,006	0,001	0,014
2 _{OT}	102,572	106,152	99,885
2 _{IZR}	102,567	106,147	99,872
$\Delta(2_{IZR}-2_{OT})$	-0,005	-0,005	-0,013
3 _{OT}	107,586	106,105	99,883
3 _{IZR}	107,598	106,107	99,877
$\Delta(3_{IZR}-3_{OT})$	0,012	0,002	-0,006
4 _{OT}	110,200	104,224	99,948
4 _{IZR}	110,193	104,226	99,965
$\Delta(4_{IZR}-4_{OT})$	-0,007	0,002	0,017
7 _{OT}	100,000	100,000	100,000
7 _{IZR}	99,992	99,997	99,984
$\Delta(7_{IZR}-7_{OT})$	-0,008	-0,003	-0,016
8 _{OT}	110,162	99,985	100,000
8 _{IZR}	110,157	99,986	100,002
$\Delta(8_{IZR}-8_{OT})$	-0,005	0,001	0,002
RMS	0,008	0,003	0,013

Preglednica 8: Primerjava podanih in izračunanih kontrolnih točk - metoda notranjega ureza

Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
5 _{OT}	102,273	100,908	100,020
5 _{IZR}	102,265	100,914	99,976
$\Delta(5_{IZR}-5_{OT})$	-0,008	0,006	-0,044
6 _{OT}	107,862	100,856	100,017
6 _{IZR}	107,864	100,863	99,987
$\Delta(6_{IZR}-6_{OT})$	0,002	0,007	-0,030
RMS	0,006	0,007	0,038

Zadnja metoda za izračun parametrov zunanje orientacije je metoda DLT. Izpis je enake oblike kot pri metodi notranjega ureza. Razlika je le v tem, da pri tej metodi niso določene natančnosti izravnanih parametrov. Določamo parametre obeh posnetkov (preglednica 9) in

sestavimo preglednico koordinatnih razlik oslonilnih točk (preglednica 10) in kontrolnih točk (preglednica 11). Razporeditev točk je za metodo DLT slaba (vse točke ležijo v ravnini), zato se na pridobljene rezultate ne moremo povsem zanesti in služijo zgolj kot dodatna informacija o opravljenem izračunu.

Preglednica 9: Zunanja orientacija obeh posnetkov po metodi DLT

Parameter	Prvi posnetek	Drugi posnetek
X_{PC}	104,016 m	106,219 m
Y_{PC}	100,4429 m	100,455 m
Z_{PC}	114,307 m	114,371 m
ω	9°30'08,1"	8°55'05,1"
φ	1°10'41,5"	0°15'28,3"
κ	0°54'02,4"	0°19'44,2"

Preglednica 10: Primerjava podanih in izračunanih oslonilnih točk - metoda DLT

Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
1 _{OT}	99,985	104,327	99,975
1 _{IZR}	99,790	104,480	99,422
$\Delta(1_{IZR}-1_{OT})$	-0,196	0,153	-0,553
2 _{OT}	102,572	106,152	99,885
2 _{IZR}	102,507	106,279	99,534
$\Delta(2_{IZR}-2_{OT})$	-0,065	0,127	-0,351
3 _{OT}	107,586	106,105	99,883
3 _{IZR}	107,582	106,075	99,961
$\Delta(3_{IZR}-3_{OT})$	-0,004	-0,030	0,078
4 _{OT}	110,200	104,224	99,948
4 _{IZR}	110,101	104,159	100,225
$\Delta(4_{IZR}-4_{OT})$	-0,099	-0,065	0,277
7 _{OT}	100,000	100,000	100,000
7 _{IZR}	99,788	99,982	99,415
$\Delta(7_{IZR}-7_{OT})$	-0,212	-0,018	-0,585
8 _{OT}	110,162	99,985	100,000
8 _{IZR}	110,093	99,990	100,179
$\Delta(8_{IZR}-8_{OT})$	-0,069	0,005	0,179
RMS	0,130	0,087	0,384

Preglednica 11: Primerjava podanih in izračunanih kontrolnih točk - metoda DLT

Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
5 _{OT}	102,273	100,908	100,020
5 _{IZR}	102,181	100,928	99,572
$\Delta(5_{IZR}-5_{OT})$	-0,092	0,020	-0,448
6 _{OT}	107,862	100,856	100,017
6 _{IZR}	107,857	100,862	100,003
$\Delta(6_{IZR}-6_{OT})$	-0,005	0,006	-0,014
RMS	0,065	0,015	0,317

S tem je pregled po poročilu izravnave zaključen. Potreben je še vpogled v preostalo izhodno datoteko. Ta datoteka je po sestavi prilagojena programu *Socet Set*. Gre za izpis parametrov zunanje orientacije, pridobljene po metodi, ki je med tremi uporabljenimi metodami za dotični primer najbolj točna (preglednica 12). Koordinate projekcijskega centra so podane v metrih, rotacije pa v decimalnih stopinjah.

Preglednica 12: Izpis parametrov zunanje orientacije najtočnejše metode

ID posnetka	X_{PC}	Y_{PC}	Z_{PC}	ω	φ	κ
1	104,07977 m	100,44127 m	114,22939 m	9,3271224°	1,3315685°	0,9005307°
2	106,23372 m	100,43905 m	114,45374 m	9,1051009°	0,3374803°	0,3258552°

5 ZAKLJUČEK

Ob začetku izdelave diplomske naloge smo si za cilj zadali izdelavo računalniškega programa z jasno predstavitvijo njegove vsebine. Na podlagi vsega vloženega dela, ki smo ga predstavili v diplomski nalogi, lahko rečemo, da je bil ta cilj dosežen in da vsakdo z nekaj fotogrametričnega predznanja lahko razume, kako poteka postopek orientacije stereopara.

Računalniški program OriS omogoča orientacijo stereopara in je prilagojen programskemu okolju *Socet Set*, v katerem lahko merimo slikovne koordinate, ki jih potrebujemo kot vhodni podatek v postopku. Program OriS omogoča izvedbo orientacije stereopara po treh različnih metodah, in nam tudi omogoča, da med seboj primerjamo tri različne nize izračunanih parametrov. Izvedba samega računalniškega programa je bila precej zahtevna. Program so že preizkusili študenti geodezije v okviru izvedbe vaj (letni semester 2013), tako da smo nekatere odkrite pomanjkljivosti že odpravili. Končni izdelek je skupek algoritmov in grafičnega vmesnika, ki je zajet v približno 2000 vrsticah programske kode.

Z izdelavo diplomskega dela sem bližje spoznal bližnjelikovno fotogrametrijo in predvsem delo s stereopari. S proučevanjem obravnavane tematike sem nadgradili svoje znanje, ki sem ga pridobil v času študija in spoznal tudi nekatere manj znane postopke. S pisanjem diplomske naloge sem tudi razširil svoje splošno znanje, saj sem se veliko naučili tudi o sami fotografiji.

Računalniški program *OriS* ima v prihodnosti veliko prostora za nadgrajevanje. Po izdaji programa je na vrsti faza, ko zbiramo povratne informacije samih uporabnikov. Pojavljajo se še nekatere neodkrite napake in pomanjkljivosti. Z analizo vseh teh podatkov se lahko naredi načrt izvedbe naslednje izdaje programa (če se pojavi potreba po tem), v kateri bodo odpravljene težave prve verzije. Nekaj težav je bilo pri programu *OriS* odpravljenih že v času testiranja. Odpravljanje težav vzame veliko časa, vendar je nujno potrebno, če želimo, da se program izpopolnjuje in posodablja. Poleg tega bi bilo potrebno algoritme v programu prilagoditi tudi za druge postopke in različna programska okolja. Tako bi lahko pridobili univerzalni program za orientacijo posnetkov. Potrebno bi bilo razširiti tudi nabor postopkov in omogočiti več primerjalnih metod. S tem bi verjetno lahko zajeli širši krog uporabnikov, program pa bi bil uporaben tudi pri drugih vajah fotogrametrije, morda tudi pri drugih predmetih.

VIRI

Albertz, J. 2001. Albrecht Meydenbauer - Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. Hasler.net.

<http://www.hasler.net/Meydenb.pdf> (Pridobljeno 31.7.2013.)

BAE Systems. 2008. Socet Set Brochure.

http://www.socetgxp.com/docs/products/socetset/socetset_brochure.pdf (Pridobljeno 9.5.2013.)

BAE Systems. 2009. SOCET SET User's Manual. Version 5.5. London, BAE Systems.

Crc-si. 2013.

<http://www.crcsi.com.au/Research/2-Feature-Extraction/Enhancement-of-Close-Range-Photogrammetry-Technolo> (Pridobljeno 9.5.2013.)

Deakin, R.E. 2006. A note on the Burs-Wolf and Molodensky-Badekas transformations. RMIT University.

<http://user.gs.rmit.edu.au/rod/files/publications/Similarity%20Transforms.pdf> (Pridobljeno 31.7.2013.)

Fotogrammetrian erikoissovellutukset. 2013.

<http://foto.hut.fi/opetus/260/luennot/6/6.html> (Pridobljeno 9.5.2013.)

Kraus, K. 1993. Photogrammetry. Volume 1. Fundamentals and Standard Processes. Rieden, WB - Druck.

Kraus, K. 2007. Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans (2nd edition). Berlin, New York, Walter de Gruyter.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I. 2006. Close range photogrammetry: principles, methods, and applications. Dunbeath, Whittles Publishing.

Mikhail, E. M. 1976. Observations and Least squares. New York, Thomas Y. Crowell Company, Inc.

Mikhail, E. M., Bethel, J. S., McGlone, J. C. 2001. Introduction to Modern Photogrammetry. New York, John Wiley & Sons, Inc.

Schenk, T. 2005. Introduction to Photogrammetry.

<http://www.mat.uc.pt/~gil/downloads/IntroPhoto.pdf> (Pridobljeno 9.5.2013.)

ScienceDirect. 2013

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271602000667> (Pridobljeno 4.7.2013.)

Sergis engineering systems. 2013.

http://sergisengineeringsystems.kbo.co.ke/_item?item_id=014001 (Pridobljeno 9.5.2013.)

Slabaugh, G. G. Computing Euler angles from a rotation matrix.

[https://truesculpt.googlecode.com/hg-](https://truesculpt.googlecode.com/hg-history/38000e9dfece971460473d5788c235fbbe82f31b/Doc/rotation_matrix_to_euler.pdf)

[history/38000e9dfece971460473d5788c235fbbe82f31b/Doc/rotation_matrix_to_euler.pdf](https://truesculpt.googlecode.com/hg-history/38000e9dfece971460473d5788c235fbbe82f31b/Doc/rotation_matrix_to_euler.pdf)

(Pridobljeno 9.5.2013.)

Statut - International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

<http://www.isprs.org/documents/statutes12.aspx> (Pridobljeno 9.5.2013.)

Texturemate. 2013.

<http://www.texturemate.com/content/how-easily-remove-lens-distortion-photos-using-gimp>

(Pridobljeno 9.5.2013.)

The MathWorks, Inc. 2009. Matlab Help.

Vezočnik, R. 2006. Avtomatizacija relativne orientacije stereopara. Diplomski naloga.

Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Young-Hoo Kwon. 1998.

<http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html#dlt> (Pridobljeno 9.5.2013.)

»Ta stran je namenoma prazna.«

Priloga A: Vhodna datoteka slikovnih koordinat

1	25834.9		
	1	-6708.5	2797.6
	2	-2126.9	5686.4
	3	6451.6	5508.3
	4	11126.5	2361.4
	5	-2993.6	-3267.9
	6	7212.2	-3533.0
	7	-7164.2	-4850.3
	8	11501.8	-5233.7
	1001	-5759.1	7075.5
	1002	10730.0	6319.7
	-99		
2	25834.9		
	1	-10754.4	2752.5
	2	-6190.5	5642.6
	3	2236.8	5563.5
	4	6749.2	2494.0
	5	-7180.6	-3165.7
	6	2819.8	-3335.7
	7	-11298.7	-4779.5
	8	6968.8	-4942.9
	1001	-9795.2	7001.2
	1002	6433.1	6382.9
	-99		

»Ta stran je namenoma prazna.«

Priloga B: Vhodna datoteka oslonilnih in kontrolnih točk

GROUND POINT FILE

10

point_id,stat,known,lat_Y_North,long_X_East,ht,sig(3),res(3)

1 1 3

104.32700000000000	99.98500000000000	99.97499999999999
0.010000 0.010000 0.010000		
0.000000 0.000000 0.000000		

2 1 3

106.15200000000000	102.57200000000000	99.88500000000001
0.010000 0.010000 0.010000		
0.000000 0.000000 0.000000		

3 1 3

106.10500000000000	107.58600000000000	99.88300000000000
0.010000 0.010000 0.010000		
0.000000 0.000000 0.000000		

4 1 3

104.22400000000000	110.20000000000000	99.94799999999999
0.010000 0.010000 0.010000		
0.000000 0.000000 0.000000		

5 1 6

100.90800000000000	102.27300000000000	100.02000000000000
0.010000 0.010000 0.010000		
0.000000 0.000000 0.000000		

6 1 6

100.85599999999999	107.86199999999999	100.01700000000000
0.010000 0.010000 0.010000		
0.000000 0.000000 0.000000		

7 1 3

100.00000000000000	100.00000000000000	100.00000000000000
0.010000 0.010000 0.010000		
0.000000 0.000000 0.000000		

8 1 3

99.98500000000000	110.16200000000001	100.00000000000000
0.010000 0.010000 0.010000		
0.000000 0.000000 0.000000		

1001 1 0

97.44574235886265	119.04208921731536	106.29648275885658
0.010000 0.010000 0.010000		
0.000000 0.000000 0.000000		

»Ta stran je namenoma prazna.«

Priloga C: Vhodna datoteka kalibracije fotoaparata

```
camera_calibration_file 1

#Focal Length (mm)
FOCAL 25.834940

#Principal Point Offset xpoff ypoff in mm
XPOFF -2.410500e-001
YPOFF 4.048600e-002

#Principal Point symmetry xsoff ysoff in mm
XSOFF 0.000000e+000
YSOFF 0.000000e+000

#How many fiducial pairs (max 8):
NUM_FIDS 4

#Fiducials position
DATA_STRIP_SIDE left

#Fiducial x,y pairs in mm:
FID_PAIRS
-12.193000 8.108100
12.193000 8.108100
-12.193000 -8.108100
12.193000 -8.108100

#Symmetrical Lens Distortion Odd-order Poly Coeffs:K0,K1,K2,K3
SYM_DIST 0.000000e+000 1.560000e-004 -5.109000e-007 0.000000e+000

#Decentering Lens Coeffs p1,p2,p3
DEC_DIST 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000

#How many distortion pairs (max 20):
NUM_DIST_PAIRS 0

#Distortion Data Units (m=radial dist in mm, d=field angle in deg):
DIST_UNITS m

#Distortion Data Pairs, if any (Radius in mm or deg, Distortion in Microns)
DIST_PAIRS
```

»Ta stran je namenoma prazna.«

Priloga D: Izhodna datoteka poročila orientacije stereopara

ORIENTACIJA STEREOPARA

Porocilo izracuna in pridobivanja zunanje orientacije
Avtor: Vid Balek (c) Copyright
Verzija 2.0

Datum in cas: 30-AVG-2013 21:11:44.1

BRANJE PODATKOV:

Slikovne koordinate:

Posnetek: 1

Tocka	Ksi	Eta	Ksi	Eta
1	-6.7085	2.7976	-10.7544	2.7525
2	-2.1269	5.6864	-6.1905	5.6426
3	6.4516	5.5083	2.2368	5.5635
4	11.1265	2.3614	6.7492	2.4940
7	-7.1642	-4.8503	-11.2987	-4.7795
8	11.5018	-5.2337	6.9688	-4.9429
5	-2.9936	-3.2679	-7.1806	-3.1657
6	7.2122	-3.5330	2.8198	-3.3357
1001	-5.7591	7.0755	-9.7952	7.0012
1002	10.7300	6.3197	6.4331	6.3829

Podatki so v mm

Posnetek: 2

Oslonilne tocke:

Tocka	X	Y	Z
1	99.9850	104.3270	99.9750
2	102.5720	106.1520	99.8850
3	107.5860	106.1050	99.8830
4	110.2000	104.2240	99.9480
7	100.0000	100.0000	100.0000
8	110.1620	99.9850	100.0000

Podatki so v m

Kontrolne tocke:

Tocka	X	Y	Z
5	102.2730	100.9080	100.0200
6	107.8620	100.8560	100.0170

Podatki so v m

Kalibracija fotoaparata:

Konstanta fotoaparata [mm]

25.834940

Glavna točka [mm]

XPOFF -2.410500e-001

YPOFF 4.048600e-002

Koeficienti distorzije (K0, K1, K2, K3)

0.000000e+000 1.560000e-004 -5.109000e-007 0.000000e+000

Koeficienti decentracije (p1, p2, p3)

0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000

POPRAVEK SLIKOVNIH KOORDINAT S PARAMETRI NOTRANJE ORI.:

Premik za glavno točko:

Posnetek: 1

Tocka	Ksi	Eta
1	-6.4674	2.7571
2	-1.8859	5.6459
3	6.6927	5.4678
4	11.3676	2.3209
7	-6.9231	-4.8908
8	11.7428	-5.2742
5	-2.7525	-3.3084
6	7.4533	-3.5735
1001	-5.5181	7.0350
1002	10.9711	6.2792

Posnetek: 2

Ksi	Eta
-10.5134	2.7120
-5.9495	5.6021
2.4779	5.5230
6.9902	2.4535
-11.0577	-4.8200
7.2098	-4.9834
-6.9396	-3.2062
3.0609	-3.3762
-9.5542	6.9607
6.6742	6.3424

Podatki so v mm

Popravek za distorzijo:

Posnetek: 1

Tocka	Ksi	Eta		Ksi	Eta
1	-6.5092	2.7749		-10.6320	2.7426
2	-1.8951	5.6735		-5.9979	5.6477
3	6.7516	5.5159		2.4903	5.5508
4	11.5010	2.3482		7.0393	2.4707
7	-6.9825	-4.9327		-11.1890	-4.8773
8	11.8817	-5.3365		7.2745	-5.0281
5	-2.7600	-3.3174		-6.9907	-3.2298
6	7.5149	-3.6031		3.0701	-3.3864
1001	-5.5688	7.0998		-9.6671	7.0430
1002	11.1014	6.3538		6.7379	6.4030

Posnetek: 2

Podatki so v mm

ZUNANJA ORIENTACIJA:

ZUNANJA ORIENTACIJA PO DVOSTOPENJSKI METODI:

Relativna orientacija:

Posnetek: 1

omega	0.00000	+/-	0.00000		-0.30273	+/-	0.08110
fi	7.14523	+/-	0.11589		6.20560	+/-	0.12363
kappa	-1.40067	+/-	0.51149		-2.11194	+/-	0.50126

Posnetek: 2

Podatki so v [DMS], stevilo iteracij: 4

Absolutna orientacija:

Izracun parametrov absolutne orientacije

X0 = 104.036 +/- 0.034
Y0 = 100.413 +/- 0.055
Z0 = 114.219 +/- 0.031
Omega = -9.32437 +/- 0.13053
Fi = 6.24426 +/- 0.07365
Kappa = -1.31523 +/- 0.06423
merilo = 2.19 +/- 0.14220

Translacije v [m], rotacije v [DMS], stevilo iteracij: 6

Izracun objektnih koordinat

Tocka	X	Y	Z
1	99.9886	104.3291	99.9808
2	102.5632	106.1531	99.8544
3	107.5956	106.1043	99.8875
4	110.1887	104.2237	99.9802
7	100.0020	100.0000	100.0160
8	110.1670	99.9828	99.9721
5	102.2615	100.9145	99.9775
6	107.8656	100.8633	99.9641
1001	100.3999	106.9345	100.0383
1002	110.1138	106.6340	99.9183

Podatki so v m

Parametri zunanje orientacije:

	Posnetek: 1		Posnetek: 2
X0	104.036		106.210
Y0	100.413		100.471
Z0	114.219		114.464
Omega	9.26314		8.58422
Fi	1.10318		0.15181
Kappa	0.54121		0.19439

Translacije v [m], rotacije v [DMS]

Odstopanja izracunanih kontrolnih tock z upostevanjem parametrov ZO:

Tocka	v_x	v_y	v_z
5	-0.011	0.007	-0.042
6	0.004	0.007	-0.053

Podatki so v m

Srednja odstopanja [RMS]:

x	y	z
0.008	0.007	0.048

Podatki so v m

Odstopanja izračunanih oslonilnih točk z upoštevanjem parametrov ZO:

Točka	v_x	v_y	v_z
1	0.004	0.002	0.006
2	-0.009	0.001	-0.031
3	0.010	-0.001	0.005
4	-0.011	-0.000	0.032
7	0.002	0.000	0.016
8	0.005	-0.002	-0.028

Podatki so v m

Srednja odstopanja [RMS]:

x	y	z
0.008	0.001	0.023

Podatki so v m

ZUNANJA ORIENTACIJA PO METODI UREZA:

Parametri zunanje orientacije:

	Posnetek: 1				Posnetek: 2		
X0	104.080	+/-	0.058		106.234	+/-	0.055
Y0	100.441	+/-	0.049		100.439	+/-	0.047
Z0	114.229	+/-	0.014		114.454	+/-	0.014
Omega	9.19376	+/-	0.11262		9.06184	+/-	0.10523
Fi	1.19536	+/-	0.12270		0.20149	+/-	0.11493
Kappa	0.54019	+/-	0.02040		0.19331	+/-	0.01561

Translacije v [m], rotacije v [DMS]

Odstopanja izračunanih kontrolnih točk z upoštevanjem parametrov ZO:

Točka	v_x	v_y	v_z
5	-0.008	0.006	-0.044
6	0.002	0.007	-0.030

Podatki so v m

Srednja odstopanja [RMS]:

x	y	z
0.006	0.007	0.038

Podatki so v m

Odstopanja izracunanih oslonilnih tock z upostevanjem parametrov ZO:

Tocka	v_x	v_y	v_z
1	0.006	0.001	0.014
2	-0.005	-0.005	-0.013
3	0.012	0.002	-0.006
4	-0.007	0.002	0.017
7	-0.008	-0.003	-0.016
8	-0.005	0.000	0.002

Podatki so v m

Srednja odstopanja [RMS]:

x	y	z
0.008	0.003	0.013

Podatki so v m

ZUNANJA ORIENTACIJA PO METODI DLT:

Parametri zunanje orientacije:

	Posnetek: 1		Posnetek: 2
X0	104.016		106.219
Y0	100.429		100.455
Z0	114.307		114.371
Omega	9.30081		8.55051
Fi	1.10415		0.15283
Kappa	0.54024		0.19442

Translacije v [m], rotacije v [DMS]

Odstopanja izracunanih kontrolnih tock z upostevanjem parametrov ZO:

Tocka	v_x	v_y	v_z
5	-0.092	0.020	-0.448
6	-0.005	0.006	-0.014

Podatki so v m

Srednja odstopanja [RMS]:

x	y	z
0.065	0.015	0.317

Podatki so v m

Odstopanja izračunanih oslonilnih točk z upoštevanjem parametrov ZO:

Točka	v_x	v_y	v_z
1	-0.196	0.153	-0.553
2	-0.065	0.127	-0.351
3	-0.004	-0.030	0.078
4	-0.099	-0.065	0.277
7	-0.212	-0.018	-0.585
8	-0.069	0.005	0.179

Podatki so v m

Srednja odstopanja [RMS]:

x	y	z
0.130	0.087	0.384

Podatki so v m

»Ta stran je namenoma prazna.«

Priloga E: Izhodna datoteka parametrov zunanje orientacije

1	104.07977	100.44127	114.22939	9.3271224	1.3315685	0.9005307
2	106.23372	100.43905	114.45374	9.1051009	0.3374803	0.3258552