

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Geodezija,
smer Geodezija

Kandidat:

Tadej Kvaternik

Test stabilnosti parametrov notranje orientacije digitalnega fotoaparata

Diplomska naloga št.: 728

Mentor:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Somentor:

asist. dr. Dejan Grigillo

Ljubljana, 9. 11. 2007

STRAN ZA POPRAVKE, ERATTA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **TADEJ KVATERNIK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»TEST STABILNOSTI ELEMENTOV NOTRANJE ORIENTACIJE DIGITALNEGA FOTOAPARATA«

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

Ljubljana, 01.10.2007

Tadej Kvaternik

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 528.7(043.2)
- Avtor:** Tadej Kvaternik
- Mentor:** doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
- Somentor:** asist. mag. Dejan Grigillo
- Naslov:** Test stabilnosti parametrov notranje orientacije digitalnega fotoaparata
- Obseg in oprema:** 58 str., 8 pregl., 39 sl., 25 en., 6 pril.
- Ključne besede:** notranja orientacija, digitalni fotoaparati, kalibracija fotoaparata, stabilnost notranje orientacije

Izvodček

Amaterski digitalni fotoaparati lahko predstavljajo povsem uporabno orodje za določene fotogrametrične namene. Za takšno uporabo je treba poznati elemente notranje orientacije fotoaparata. Postopek, s katerim jih pridobimo, imenujemo kalibracija. Obstaja veliko različnih metod kalibracije. Zaradi nestabilnosti notranje orientacije amaterskih fotoaparatorov, je za njihovo kalibracijo zelo primerna metoda z uporabo ravninskega testnega polja. Metoda nam omogoča kalibracijo praktično kjerkoli in kadarkoli na terenu. V nalogi sem uporabljal metodo ravninskega testnega polja, ki jo je razvil Zhang (1998) in je osnova za kalibracijo v programskem paketu Modifoto (Grigillo, 2003). Metoda omogoča izračun parametrov notranje orientacije na podlagi perspektivno različnih posnetkov testnega polja, katerega predstavlja na ploščo (velikost A2) nanešena mreža točk z znanimi koordinatami. Testiral sem digitalni zrcalno refleksni fotoaparati Nikon D70 z objektivom s spremenljivo goriščnico. Želel sem ugotoviti minimalno število ter ustrezno orientacijo posnetkov za zanesljivo določitev parametrov notranje orientacije. Ob primerjavi rezultatov kalibracije dobljenih z različnimi kombinacijami posnetkov testnega polja ugotovimo, da ob strogem upoštevanju orientacije posnetkov, za zanesljivo kalibracijo zadostujejo štiri posnetki. V drugem delu sem ob simulaciji terenskih pogojev (vplivov) prišel do ugotovitve, da so časovne spremembe elementov notranje orientacije minimalne. V tretjem delu pa sem ugotavljal vpliv sprememb notranje orientacije na rezultate fotogrametričnega izrednotenja. Rezultati so pokazali, da ob pazljivem ravnanju s fotoaparatom in ustrezni izvedbi kalibracije, morebitne spremembe notranje orientacije, pri uporabljeni metodi in fotoaparatu, bistveno ne vplivajo na rezultat .

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 528.7(043.2)
Author: Tadej Kvaternik
Supervisor: doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Cosupervisor: asist. mag. Dejan Grigillo
Title: Stability test of digital camera inner orientation parameters
Notes: 58 p., 8 tab., 39 fig., 25 eq., 6 ann.
Key words: inner orientation, digital camera, camera calibration, inner orientation stability

Abstract

Consumer grade digital cameras can be fully suitable for some of the photogrammetric tasks. To use this kind of cameras in photogrammetry, you need to know their inner orientation parameters. Procedure that gives us this information, is called calibration. There is a lot of different camera calibration methods. Regarding to their inner orientation being unstable, the calibration method using 2D test field, is very appropriate to calibrate consumer grade digital cameras. This method enables us to calibrate camera almost every time and everywhere. I used 2D test field calibration method developed by Zhang (1998) that is basic for calibration computation in Modifoto software (Grigillo, 2003). This method needs at least three photos of test field that must not be perspective the same. Test field is made of flat plate (A2 size) with grid of dots with known coordinates. I tested digital SLR camera Nikon D70 with zoom lenses. I tried to find out the minimal number of images, including their proper orientation, that is needed to reliably compute inner orientation parameters. I compared results computed from different image combinations. Considering right images orientation, four images are enough to get reliable results. In second analysis i tried to simulate conditions that can affect camera during fieldwork. I find out that changes of inner orientation parameters through time are minimal. I also made an analysis about influence of inner orientation parameters changes on photogrammetric restitution results. With careful use of properly calibrated camera, changes of parameters that can appear (talking for used camera and method) don't have significant influence on the results.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras ter somentorju asist. mag. Dejanu Grigillu.

Prav tako bi se rad zahvalil vsem, ki so v teku mojega šolanja ter študija kakorkoli sodelovali ter prispevali h končnemu uspehu!

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	TEORETIČNE OSNOVE	3
2.1	Centralna projekcija	3
2.2	Fotografski objektiv	5
2.3	Distorzija objektiva	8
2.3.1	Simetrična radialna distorzija.....	8
2.3.2	Nesimetrična distorzija	9
2.3.3	Poprava slikovnih koordinat	9
2.4	Svetlobna tipala	10
2.4.1	Različni tipi svetlobnih tipal	10
2.4.2	Svetlobno tipalo ter slikovni koordinatni sistem.....	13
2.5	Metode kalibracije	15
2.5.1	Laboratorijska kalibracija z uporabo goniometra	15
2.5.2	Kalibracija s testnim poljem točk z znanimi prostorskimi koordinatami	15
2.5.3	Kalibracija na podlagi poznanih oblik v prostoru.....	17
2.5.4	Samokalibracija (angl. self-calibration).....	18
2.5.5	Metoda kalibracije s ravninskim testnim poljem (Zhang, 1998)	19
2.6	Stereo izvrednoteje	23
2.6.1	Dvostopenjski postopek orientacije stereopara.....	24
3	PRAKTIČNA IZVEDBA IN MERITVE	26
3.1	Uvod	26
3.2	Fotoaparat Nikon D70	26
3.3	Kalibracija fotoaparata	27
3.3.1	Programska modula Fotoanalist in FA_Kalibracija.....	29
3.4	Stereofotogrametrično snemanje objekta	31
3.4.1	Oslonilne in kontrolne točke	31
3.4.2	Fotografiranje objekta	33
3.4.3	Obdelava stereopara na digitalni fotogrametrični postaji	34
3.5	1. DEL: Kalibracija s testnim poljem (minimalno število posnetkov in njihova orientacija)	36

3.5.1	Vpliv centralnega posnetka	38
3.6	2. DEL: Časovna stabilnost parametrov notranje orientacije	40
3.7	3 DEL: Vpliv sprememb notranje orientacije na rezultate izrednotenja.....	42
4	REZULTATI IN ANALIZA.....	43
4.1	1. DEL	43
4.1.1	Centralni posnetek	46
4.2	2. DEL	47
4.3	3. DEL	48
4.3.1	Določitev koordinat oslonilnih ter kontrolnih točk	48
4.3.2	Kalibracija fotoaparata	48
4.3.3	Orientacije stereopara	50
4.3.4	Primerjava rezultatov meritev na kontrolnih točkah	50
4.4	Napotki za kalibracijo digitalnega fotoaparata.	53
5	ZAKLJUČEK	54
VIRI	56

KAZALO SLIK

Slika 1: Osnovna slika centralne projekcije.....	3
Slika 2: Zveza med slikovnimi in prostorskimi koordinatami.....	4
Slika 3: Primer sestave fotografskega objektiv.....	5
Slika 4: Idealiziran prikaz preslikave skozi objektiv.....	6
Slika 5: Prikaz dejanskega poteka preslikave.....	7
Slika 6: Fizični izgled svetlobnega tipala s fotoelementi ter podporno elektroniko.....	10
Slika 7: Shema senzorja CCD.....	11
Slika 8: Shema senzorja CMOS.....	11
Slika 9: Razporeditev fotoelementov na različnih CCD tipalih.....	12
Slika 10: Primerjava različnih načinov zaznavanja barvne informacije.....	13
Slika 11: Slikovni koordinatni sistem podobe.....	14
Slika 12: Modificiran koordinatni sistem.....	14
Slika 13: Shema goniometra.....	15
Slika 14: Primer razporeditve točk v testnem polju.....	16
Slika 15: Ravninska testna polja.....	16
Slika 16: Centralna projekcija.....	20
Slika 17: Pogoji koplanarnosti.....	24
Slika 18: Fotoaparat Nikon D70.....	27
Slika 19: Testno polje.....	28
Slika 20: Modul FA_Kalibracija ter grafični prikaz simetrične radialne distorzije.....	30
Slika 21: Primer tarče s podlago.....	32
Slika 22: Razporeditev in oštevilčenje oslonilnih ter kontrolnih točk.....	32
Slika 23: Stereopar ter območje preklopa.....	33
Slika 24: Razporeditev Gruberjevih območij.....	35
Slika 25: Položaj posnetkov testnega polja.....	36
Slika 26: Kombinacije treh posnetkov.....	36
Slika 27: Kombinacije štirih posnetkov.....	37
Slika 28: Kombinacije petih posnetkov.....	37
Slika 29: Kombinacije šestih posnetkov.....	37
Slika 30: Kombinacije sedmih posnetkov.....	38

Slika 31: Kombinaciji štirih posnetkov	39
Slika 32: Kombinacije petih posnetkov	39
Slika 33: Časovni potek kalibracij	41
Slika 34: Prikaz odstopanj goriščne razdalje (srednja vrednost) za posamezne kombinacije..	45
Slika 35: Prikaz odstopanj x koordinate glavne točke za posamezne kombinacije.....	45
Slika 36: Prikaz odstopanj y koordinate glavne točke za posamezne kombinacije.....	46
Slika 37: Prikaz simetrične radialne distorzije fotoaparata Nikon D70 (f_{\min})	49
Slika 38: Grafični prikaz odstopanj na kontrolnih točkah (kalibracija pred snemanjem).....	52
Slika 39: Grafični prikaz odstopanj na kontrolnih točkah (kalibracija s tremi posnetki).....	52

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Tehnične karakteristike fotoaparata Nikon D70	26
Preglednica 2: Rezultati za različne kombinacije posnetkov (enota: piksel) (f_{\min} , 1.serija)....	44
Preglednica 3: Odstopanja nekaterih značilnih kombinacij glede na 0801 (enota: piksel)	44
Preglednica 4: Rezultati kalibracije pri uporabi devetega posnetka (enota: piksel) (f_{\min})	47
Preglednica 5: Rezultati kalibracij v časovnih presledkih (enota: piksel) (f_{\min} , 1.serija)	47
Preglednica 6: Rezultati kalibracij uporabljenih za izrednotenje stereopara (enota: piksel) .	48
Preglednica 7: Natančnost absolutne orientacije	50
Preglednica 8: Primerjava natančnosti izmerjenih kontrolnih točk	51

KAZALO PRILOG

- Priloga A: Rezultati kalibracij za različne kombinacije posnetkov**
- Priloga B: Rezultati kalibracij ob uporabi centralnega posnetka**
- Priloga C: Rezultati kalibracij v časovnih presledkih**
- Priloga D: Rezultati izravnave (določitev oslonilnih ter kontrolnih točk)**
- Priloga E: Rezultati orientacije stereopara**
- Priloga F: Seznam koordinat ter odstopanj na kontrolnih točkah**

1 UVOD

Fotogrametrija je veda, ki se ukvarja s tehnikami in metodami pridobivanja metričnih in semantičnih informacij o trirazsežnih objektih v prostoru na podlagi (dvorazsežnih) fotografij teh objektov. Glavno orodje za pridobivanje podatkov v fotogrametriji je torej fotoaparatus. Fotoaparatus lahko razdelimo glede na tehnologijo zajema slike na analogne in digitalne. V analognih se posnetek (fotografija) zapiše na fotografski film, v digitalnih pa se podatki, ki jih zazna svetlobno tipalo, shranijo neposredno v digitalni obliki kot digitalna fotografija - podoba. Za digitalno obdelavo posnetkov moramo analogni film najprej skenirati, medtem ko imamo pri digitalnih fotoaparatusih podobo takoj na voljo za nadaljnjo obdelavo. Fotoaparatus delimo tudi na metrične in nemetrične. Metrični fotoaparatus je tisti, za katerega natančno poznamo elemente, ki opisujejo njegove geometrijske lastnosti, ter odstopanja od matematično idealne konstrukcije fotoaparatusa. Te elemente imenujemo elementi notranje orientacije. Elementi notranje orientacije se določijo s postopkom kalibracije fotoaparatusa. Fotoaparatusi, ki so izrecno namenjeni fotogrametrični uporabi, so običajno laboratorijsko kalibrirani in je njihova notranja orientacija zanesljivo znana. Če želimo za fotogrametrične namene uporabiti običajen, nemetričen fotoaparatus, ga je potrebno predhodno kalibrirati.

Obstaja več metod kalibracije fotoaparatusov. Predstavljene so v poglavju 2.5. Podrobneje je opisana za kalibracijo digitalnih fotoaparatusov zelo uporabna metoda kalibracije z ravninskim testnim poljem. Testno polje predstavlja plošča (ravnina) z naneseo mrežo točk z znanimi ravninskimi koordinatami. S fotoaparatusom naredimo ustrezno število posnetkov testnega polja. Na posnetkih izmerimo slikovne koordinate točk testnega polja. Tako imamo podatke o koordinatah točk v objektnem koordinatnem sistemu ter slikovne koordinate istih točk. Z obdelavo podatkov pridobimo vrednosti neznanih elementov notranje orientacije. Metoda je posebno primerna za kalibracijo nemetričnih fotoaparatusov. Ker testno polje ni velikih dimenzij, ga lahko odnesemo s seboj na teren. Tako imamo možnost kalibracije pred oziroma med fotogrametričnim snemanjem, kar omogoča kalibracijo v pogojih enakih pogojem, v katerih nastajajo posnetki. Ker nemetrični fotoaparatusi niso izdelani za namene fotogrametričnih meritev, je njihova konstrukcijska stabilnost slabša kot pri metričnih fotoaparatusih. Posledično se lahko med uporabo spreminjajo vrednosti elementov notranje orientacije. Omenjena metoda nam omogoča večkratno kalibracijo med postopkom

fotogrametričnega snemanja. Tako lahko spremljamo oziroma ugotavljamo spremembe vrednosti parametrov notranje orientacije.

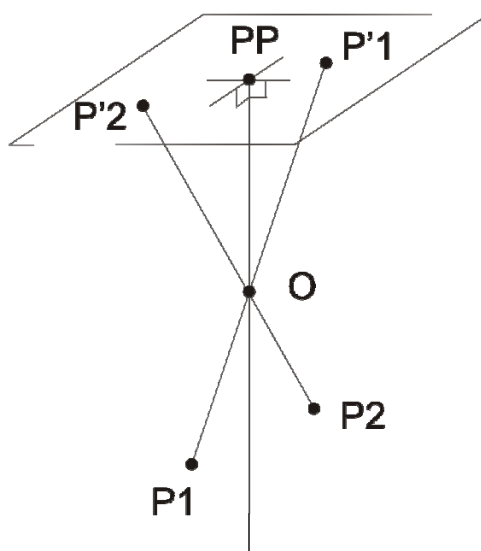
V nalogi je uporabljena metoda kalibracije z ravninskim testnim poljem, ki jo je predstavil Zhang (1998) in je osnova kalibracije v programskem paketu Modifoto, razvitem v okviru magistrske naloge z naslovom "Uporaba digitalnih fotoaparata v enoslikovni arhitekturni fotogrametriji" (Grigillo, 2003). Namen naloge je s pomočjo testiranja določiti pravila oziroma navodila za optimalno izvajanje kalibracije. V prvem delu sem želel ugotoviti potrebno število posnetkov za zanesljivo določitev elementov notranje orientacije. Ugotavljal sem število posnetkov, pri katerem se rezultati ustalijo, ter vpliv različne orientacije posnetkov glede na testno polje. V drugem delu sem ugotavljal časovne spremembe vrednosti elementov notranje orientacije. Nemetrični digitalni fotoaparati niso izdelani za potrebe fotogrametrije. Posledično je njihova konstrukcijska stabilnost slabša. Ker med izvajanjem fotogrametričnega snemanja fotoaparata ne miruje, se zaradi tega lahko spreminjajo vrednosti elementov notranje orientacije. Tretji del pa predstavlja praktični primer fotogrametričnega snemanja, kjer sem ob upoštevanju ugotovitev v prvih dveh delih ugotavljal vpliv sprememb elementov notranje orientacije na rezultate fotogrametričnega izrednotenja t.j. na koordinate detajlnih (objektnih) točk.

V nalogi so najprej opisane teoretične osnove fotografske preslikave oziroma centralna projekcija. Nato so predstavljena odstopanja od teoretičnega modela kot posledice dejanske fizične izvedbe fotografskih objektivov - distorzija objektiva. Predstavljen je zajem podobe v digitalnem fotoaparatu - zgradba digitalnega senzorja ter elementi notranje orientacije, ki iz nje izhajajo. Nato so predstavljene različne metode kalibracije. Bolj detajlno je predstavljena uporabljena metoda ter programski paket Modifoto. Sledi predstavitev praktičnega dela naloge t.j. izvedbe praktičnih meritev, njihove obdelave ter rezultatov. Na koncu je podana analiza rezultatov, ki je podana tudi v obliki napotkov za izvajanje kalibracije.

2 TEORETIČNE OSNOVE

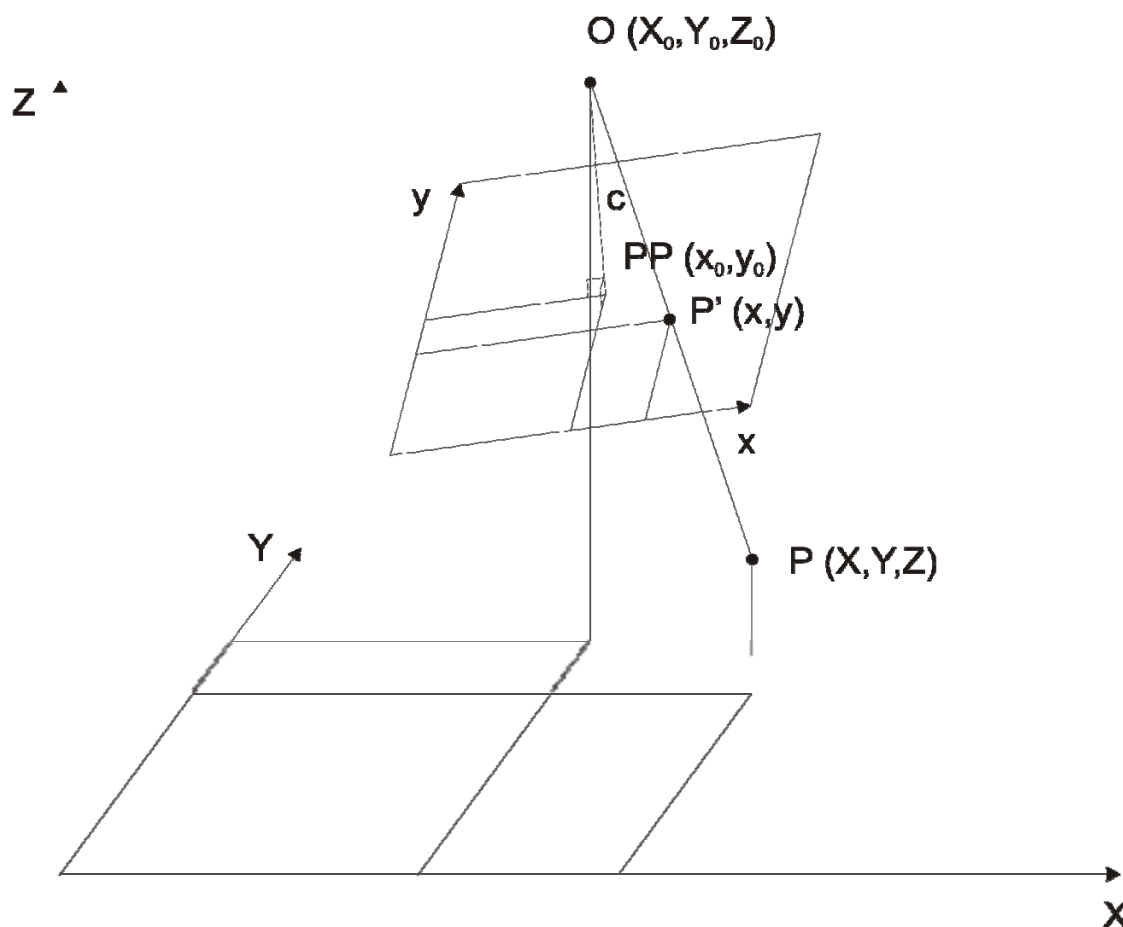
2.1 Centralna projekcija

Da lahko na podlagi fotografije ugotovimo položaj detajlnih (objektnih) točk v prostoru, moramo poznati geometrijske zakone, na katerih temelji nastanek fotografije. Teoretično odnose med objektom, ki ga slikamo, fotoaparatom in sliko opišemo s centralno projekcijo.



Slika 1: Osnovna slika centralne projekcije

Svetlobni žarki v takem sistemu potujejo od točke objekta preko projekcijskega centra do slikovne ravnine. Svetlobni žarek si geometrijsko predstavljamo kot premico, ki od točke objekta P preko projekcijskega centra O prebada slikovno ravnino v točki posnetka P' (P se preko O preslika v P'). Premica, ki poteka skozi projekcijski center in je pravokotna na slikovno ravnino, prebada slikovno ravnino v glavni točki posnetka PP s koordinatami (x_0, y_0) (slika 1). Razdalja med projekcijskim centrom in glavno točko se imenuje konstanta fotoaparata.



Slika 2: Zveza med slikovnimi in prostorskimi koordinatami

Povezavo med slikovnimi koordinatami točke P' (x, y) ter prostorskimi koordinatami točke P (X, Y, Z), prikazano na sliki 2, zapišemo (Kraus, 1993):

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= y_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

ali obratno:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) - r_{13}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) - r_{23}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c} \end{aligned} \quad (2)$$

Parametri $r_{i,j}$ predstavljajo elemente prostorske rotacijske matrike R , ki opisuje rotacije slikovne ravnine okoli osi prostorskega koordinatnega sistema in ima sledečo obliko (Gorjup, 2001):

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & -\cos \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & -\sin \omega \cdot \cos \varphi \\ \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix}$$

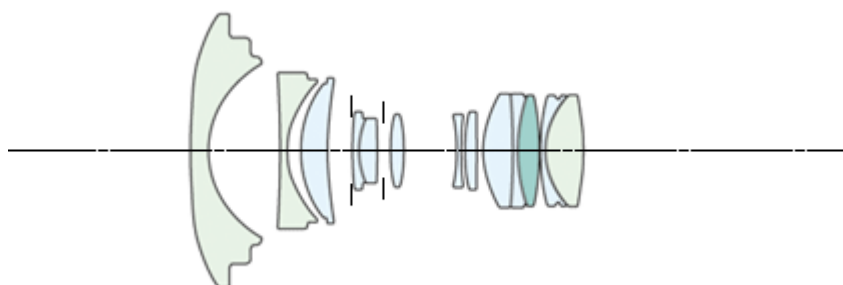
kjer je ω kot rotacije okoli x osi, φ kot rotacije okoli y osi in κ kot rotacije okoli z osi.

Elemente x_0 , y_0 , c imenujemo elemente notranje orientacije fotoaparata in jih določimo v postopku kalibracije.

Iz enačb (1) in (2) izhaja, da za vsako objektno točko P obstaja ena slikovna točka P' . Obratno velja, da za vsako slikovno točko obstaja več mogočih objektnih točk. Posledično velja: iz enega posnetka je nemogoče rekonstruirati objekt v prostoru. Za to je potrebna dodatna informacija. To lahko pridobimo z drugim posnetkom istega objekta ali s poznavanjem ene od objektnih koordinat (na primer: vse objektno točke ležijo v ravnini, kar pomeni $Z = 0$) (Kraus, 1993).

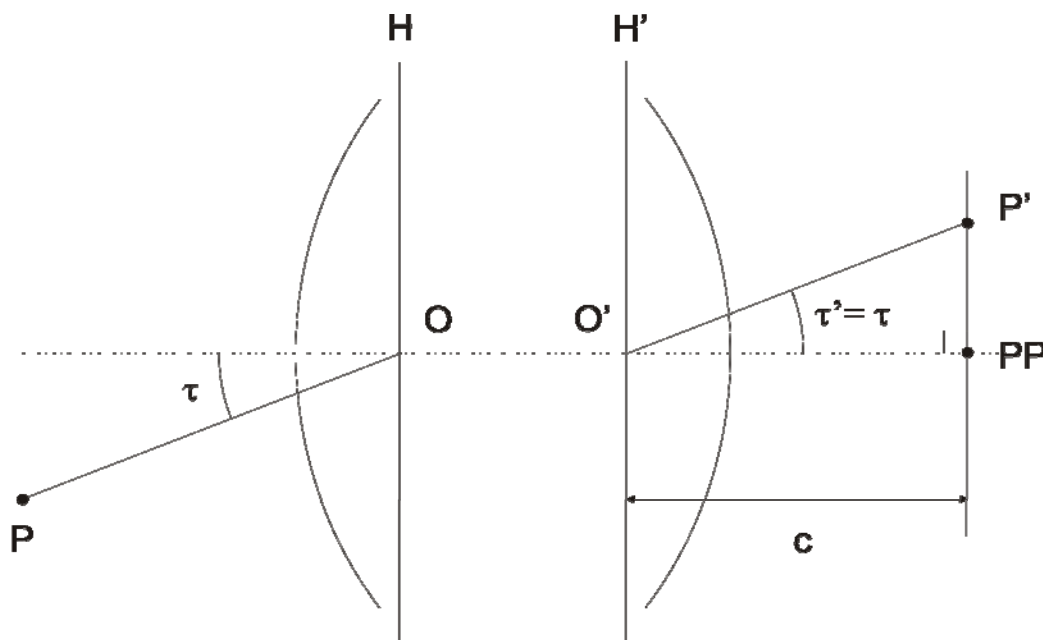
2.2 Fotografski objektiv

V realnosti preslikava seveda ne poteka točno po modelu centralne projekcije. Svetlobni žarki potujejo od objekta do slikovne ravnine preko objektiv, ki je sestavljen iz večjega števila leč (slika 3).



Slika 3: Primer sestave fotografskega objektiv

Z ustreznimi kombinacijami leč iz različnih vrst stekla se odpravljajo oziroma zmanjšujejo optične napake leč (astigmatizem, koma,...). Idealizirano predstavimo potek preslikave skozi objektiv z naslednjo skico (Kraus, 1993):



Slika 4: Idealiziran prikaz preslikave skozi objektiv

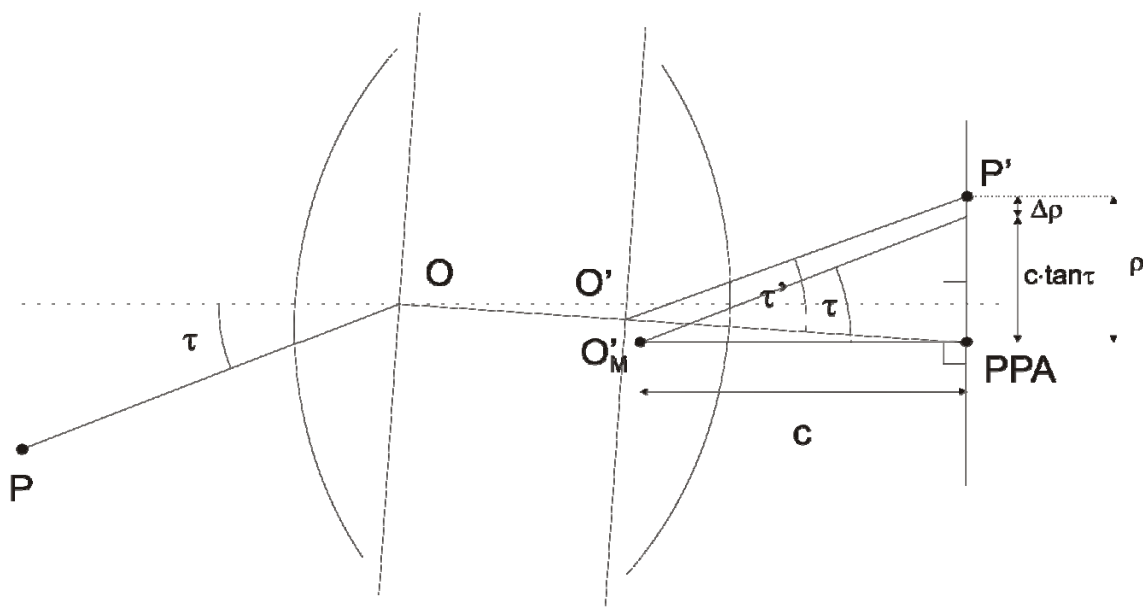
Svetlobni žarek potuje od točke P pod kotom τ glede na optično os v center projekcije O, ki predstavlja presečišče optične osi ter glavne ravnine v prostoru objekta H, kjer vstopi v objektiv. Iz objektiva izstopi pod kotom $\tau = \tau'$ v točki O', ki predstavlja presečišče glavne ravnine v slikovnem prostoru ter optične osi, in seka slikovno ravnino v točki P'.

V zgoraj opisanem, idealnem primeru velja:

- središča zakrivljenosti vseh leč v objektivu ležijo na optični osi,
- slikovna ravnina je pravokotna na optično os,
- kota τ in τ' imata izhodišče v projekcijskih centrih O in O', katera ležita na ravninah H ter H'.

Praktična izvedba nikoli ne izpolnjuje zgornjih pogojev. Središča leč ne ležijo na isti osi, njihova izdelava ni idealna, kar privede do asimetrije. Objektiv kot celota tako določa t.i. avtokolimacijski žarek, ki se razlikuje od teoretične optične osi in torej ni pravokoten na slikovno ravnino. To praktično pomeni, da objektiv v splošnem ni pritrjen na fotoaparatus tako,

da bi avtokolimacijski žarek sovpadal z optično osjo. Presek avtokolimacijskega žarka s slikovno ravnino imenujemo glavna točka avtokolimacije. Posledica navedenih odstopanj je razlika med kotoma τ in τ' , ki je prostorsko nesimetrična glede na optično os. Razlika med vstopnim in izstopnim kotom τ in τ' pripelje do razlike med teoretičnim in dejanskim položajem preslikane točke v slikovni ravnini. Dejanska razmerja prikazuje slika 5 (Kraus, 1993):



Slika 5: Prikaz dejanskega poteka preslikave

Slika 5 prikazuje opredelitev glavne točke avtokolimacije PPA. Glede na tako definirano PPA določimo matematični projekcijski center O'_M , ki je od PPA, pravokotno glede na slikovno ravnino, oddaljen za vrednost goriščne razdalje c . Kot τ (ki je enak vstopnemu kotu τ) z izhodiščem v točki O'_M določa teoretični položaj slike točke P na slikovni ravnini. Ta položaj se od dejanskega položaja P' razlikuje za $\Delta\rho$. Ta odstopanja so posledica napak objektiv, ki jih splošno imenujemo distorzija objektiv. Oddaljenost slike poljubne točke, s slikovnimi koordinatami (x,y) , od glavne točke PPA, s slikovnimi koordinatami (x_0,y_0) , lahko zapišemo kot:

$$\rho = \Delta\rho + c \cdot \tan \tau \quad (3)$$

kjer je

$$\rho = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (4)$$

S postopkom kalibracije fotoaparata želimo poleg določitve elementov x_0 , y_0 , c ugotoviti tudi odstopanja $\Delta\rho$ za različne oddaljenosti ρ (za različne prostorske vstopne kote τ) ter jih izraziti v obliki matematičnih izrazov, ki nam omogočajo izračun pravih (teoretičnih) slikovnih koordinat.

2.3 Distorzija objektiv

Distorzija objektiv je sistematična napaka objektiv (fotoaparata), ki povzroča geometrijsko nepravilno preslikavo. Posledica distorzije je razlika med vstopnim kotom τ in izstopnim kotom τ' , kar povzroči premik preslikane točke za vrednost $\Delta\rho$. Lastnosti distorzije ugotavljamo s postopkom kalibracije, v katerem se izdelajo tabele vrednosti distorzije na različnih oddaljenostih od glavne točke ali pa se določijo koeficienti distorzijskega polinoma. Tako dobljene parametre distorzije uporabimo za popravo slikovnih koordinat.

Distorzijo razdelimo na več komponent:

- simetrična radialna distorzija
- nesimetrična distorzija

Nesimetrična distorzija se dodatno deli na radialno ter tangencialno komponento.

2.3.1 Simetrična radialna distorzija

Predstavlja radialni premik točke na slikovni ravnini glede na teoretično vrednost ter prispeva največji del k skupni distorziji objektiv. Glavni vzroki simetrične distorzije so v napakah pri centriranju posameznih leč, nepravokotnosti slikovne ravnine in optične osi ter napakah pri izdelavi leč. Modeliramo jo s polinomom lihih potenc radialne oddaljenosti slikovne točke od glavne točke posnetka:

$$\Delta r = k_1 \cdot r^3 + k_2 \cdot r^5 + k_3 \cdot r^7 \dots \quad r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (5)$$

V enačbi (5) predstavlja Δr radialni premik točke na slikovni ravnini. Na vrednost Δr najbolj vplivata prva dva člena. Ostali koeficienti k_i ($i \geq 3$) so v praksi majhnih vrednosti in jih lahko zanemarimo (Dobričič, 2006). Za popravo slikovnih koordinat Δr razdelimo na komponenti v smeri osi x (Δx) in y (Δy):

$$\Delta x = (x - x_0) \cdot \frac{\Delta r}{r} \quad (6)$$

$$\Delta y = (y - y_0) \cdot \frac{\Delta r}{r}$$

2.3.2 Nesimetrična distorzija

Dodatno jo delimo na dve komponenti: radialno ter tangencialno. Je predvsem posledica dejstva, da centri leč ne ležijo na isti premici. Geometrijsko predstavlja tisti del odstopanj, ki ostanejo po odpravi simetrične radialne distorzije. Ti popravki so glede na simetrično distorzijo zanemarljivo majhni, izračunamo pa jih z enačbama (Dörstel, 2003):

$$\begin{aligned} \Delta x_n &= P_1 \cdot (3 \cdot x'^2 + y'^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x' \cdot y' \\ \Delta y_n &= 2 \cdot P_1 \cdot x' \cdot y' + P_2 \cdot (3 \cdot x'^2 + y'^2) \end{aligned} \quad (7)$$

kjer je $x' = x - x_0$ in $y' = y - y_0$.

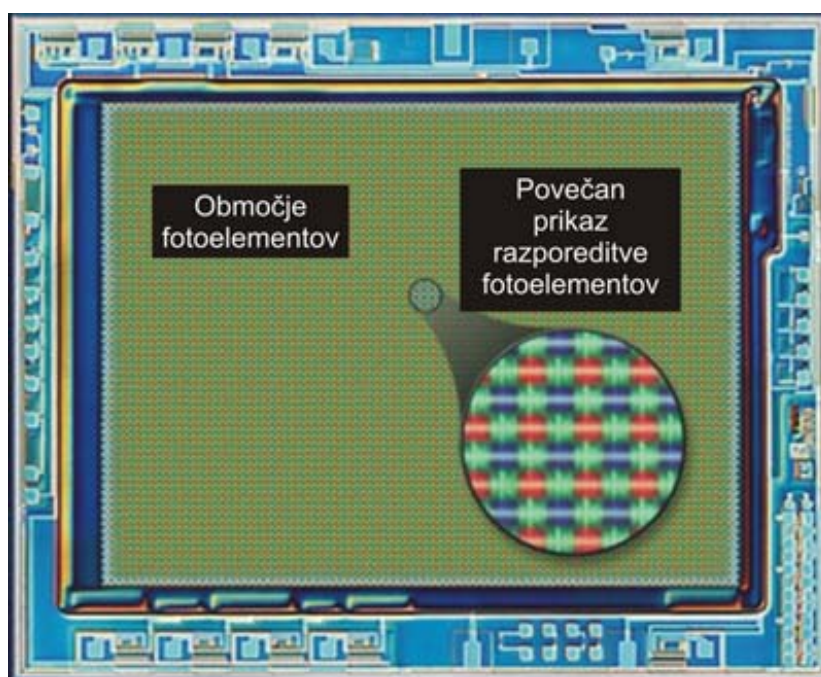
2.3.3 Poprava slikovnih koordinat

Vse popravke slikovnih koordinat zaradi distorzije objektiva združimo v skupni izraz:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x + x' (k_1 r^2 + k_2 r^4) + P_1 \cdot (3 \cdot x'^2 + y'^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x' \cdot y' \\ \Delta y &= y + y' (k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2 \cdot P_1 \cdot x' \cdot y' + P_2 \cdot (3 \cdot x'^2 + y'^2) \end{aligned} \quad (8)$$

2.4 Svetlobna tipala

V digitalnih fotoaparatih omogoča zapis podobe svetlobno tipalo. Sestavljeno je iz mreže na svetlobo občutljivih elementov - fototranzistorjev (fotodiod). Fototranzistorji so razporejeni v obliki pravokotne mreže, kjer vsak fototranzistor predstavlja ustrezen piksel končne podobe. V osnovi so tipala monokromatska. Zaznavajo količino vpadle svetlobe (fotonov) ter to vrednost pretvorijo v električni signal, ki se v analogno-digitalnem pretvorniku pretvori v računalniku razumljivo obliko. Za pridobitev informacije o barvi so pred svetlobna tipala nameščeni ustrezni barvni filtri (Pucelj, 2004; Digital microscopy primer, 2007).

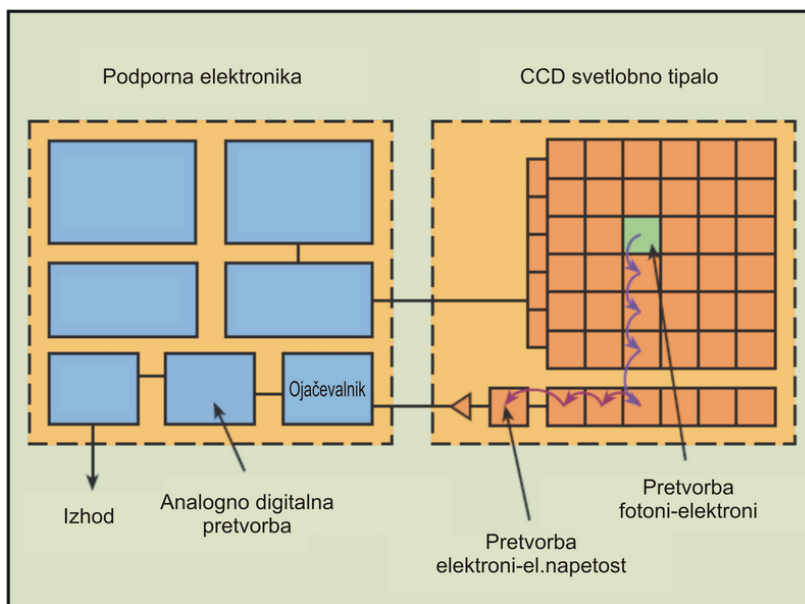


Slika 6: Fizični izgled svetlobnega tipala s fotoelementi ter podporno elektroniko

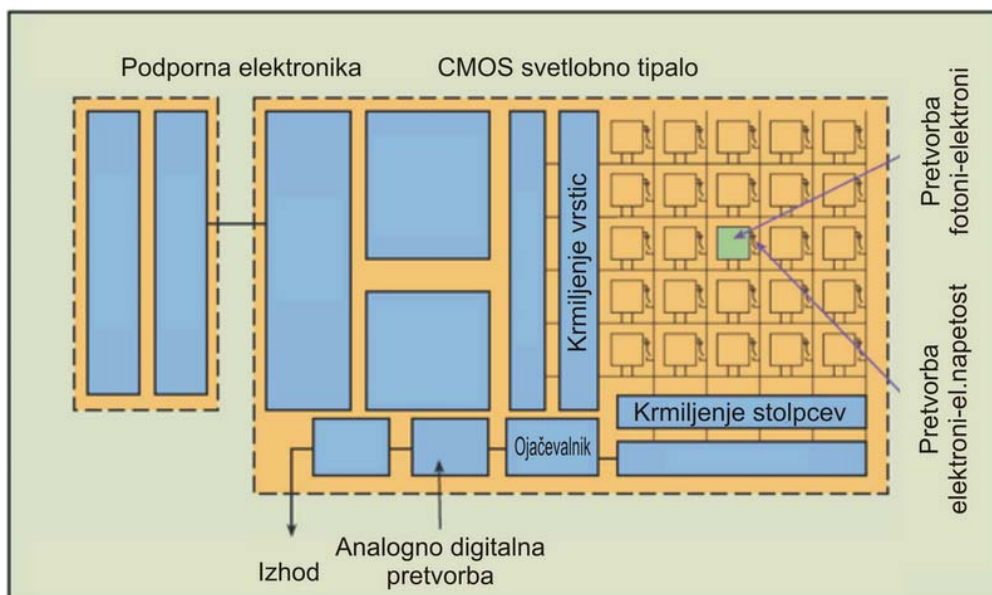
2.4.1 Različni tipi svetlobnih tipal

V digitalnih fotoaparatih se uporablja različne tipe svetlobnih tipal. V osnovi prevladujeta dve osnovni tehnologiji: CCD (angl. Charge Coupled Device) in CMOS (angl. Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Osnovni princip delovanja oziroma zaznavanja vpadle svetlobe

je pri obeh enak, razlike nastanejo pri načinu in mestu obdelave električnega signala, nastalega kot posledica vpadle svetlobe (Curtin, 2007).



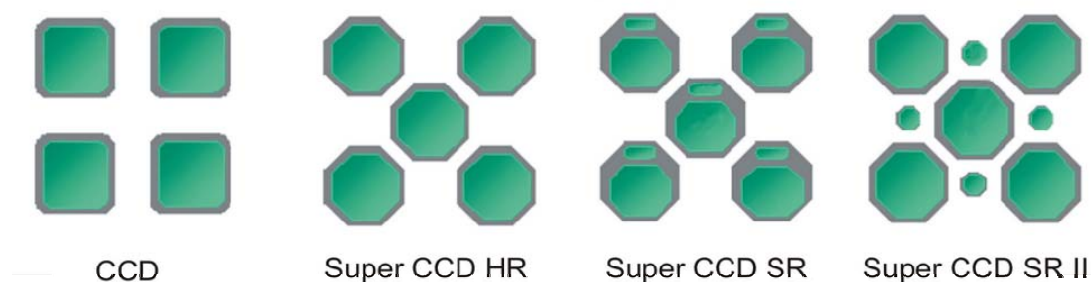
Slika 7: Shema senzorja CCD



Slika 8: Shema senzorja CMOS

Pri tipalu CCD se vrednosti posameznih pikslov preko registrov prenašajo v izhodni ojačevalnik ter naprej v analogno digitalni pretvornik (slika 7). Tako nimamo neposrednega dostopa do vrednosti posameznega piksla. Pri tehnologiji CMOS pa imamo ojačevalnik signala na nivoju vsakega posameznega piksla (slika 8), kar nam s pomočjo vodoravnih in navpičnih vodil omogoča branje vrednosti posameznega fotoelementa (Curtin, 2007). Razlika med obema tipaloma je tudi v zgradbi celotnega sistema zajema in obdelave. Tipala fizično predstavljajo elektronski čip. Tipalo CMOS na enem čipu združuje tako mrežo fotoelementov kot tudi vso podporno elektroniko (ojačevalnike, A/D pretvornike,...), medtem ko ima tipalo CCD fotoelemente na enem čipu, ostala funkcije pa se izvajajo ločeno z dodatno elektroniko (Digital microscopy primer, 2007).

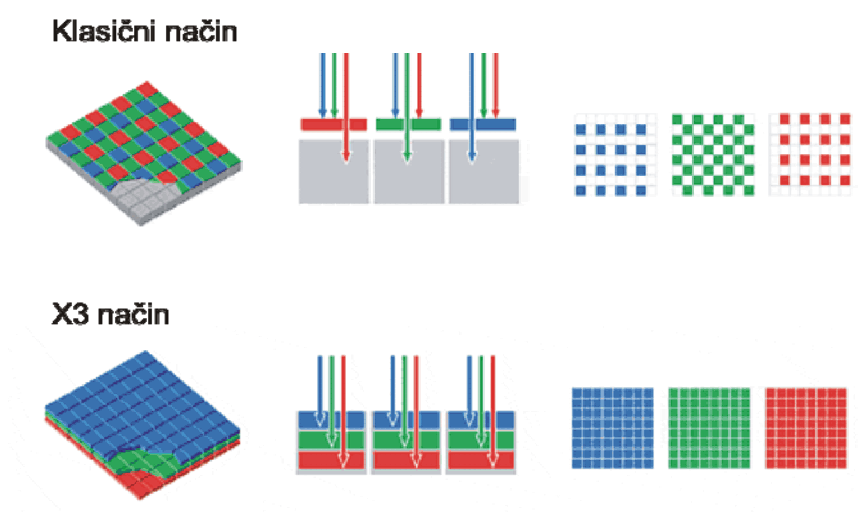
Poleg teh dveh osnovnih tipov senzorjev, obstaja tudi več drugih izvedb, ki se razlikujejo predvsem v obliki in razporeditvi posameznih fototranzistorjev ter v načinu zaznavanja barve (Pucelj, 2004). Na področju razporeditve in oblike fotoelementov poznamo tipala Super CCD, kjer so namesto klasične kvadratne oblike fotoelementov uporabili osmerokotno obliko. Takšna oblika omogoča postavitev večjega števila fotoelementov na površino tipala, kar se odraža v večji ločljivosti in učinkovitosti zajema. Obstaja tudi izvedba tipala Super CCD, ki v enem slikovnem elementu (piksel) uporablja dve svetlobni tipali. Dodatni senzor je namenjen izboljševanju barvne globine.



Slika 9: Razporeditev fotoelementov na različnih CCD tipalih

Fototranzistor v osnovi ne zaznava barve svetlobe oziroma deluje monokromatsko, zato so pred svetlobno tipalo nameščeni barvni filtri. Pri klasičnih tipalih CCD in CMOS so barvni filtri razporejeni v obliki mreže treh osnovnih barv (rdeča, modra, zelena), tako da posamezen fotoelement zaznava samo eno od teh barv. Barvo posameznega piksla se nato določi z

interpolacijo vrednosti na obravnavanem ter sosednjih fotoelementih. Tak način razporeditve barvnih filtrov in interpolacije se imenuje Bayer-jev vzorec (Bockaert, 2007). Podjetje Foveon pa je razvilo tipalo z imenom X3, ki na vsakem fotoelementu zazna celotno barvno informacijo. V osnovi je to CMOS tipalo, ki ima naneseo silicijsko prevleko za ločevanje posameznih barv. Tu se izkorišča dejstvo, da svetloba različnih frekvenc (različnih barv) prodre v silicijski prevleki do različnih globin. Na vrhu se zazna modro svetlobo, na sredini zeleno in na dnu rdečo (Foveon Inc., 2007). Tako imamo vrednosti vseh treh osnovnih barv zaznane v enem samem pikslu in ni potrebna interpolacija. Tak način izboljša ostrino ter barvno natančnost.

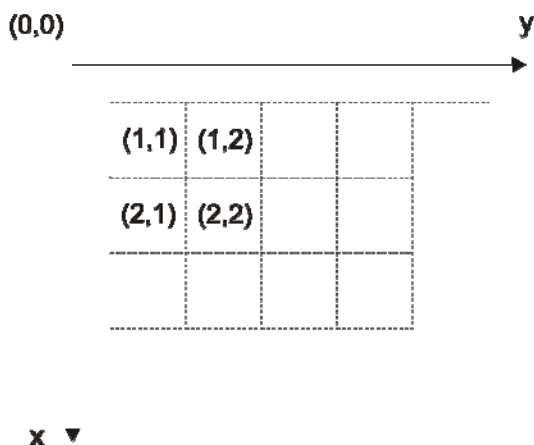


Slika 10: Primerjava različnih načinov zaznavanja barvne informacije

2.4.2 Svetlobno tipalo ter slikovni koordinatni sistem

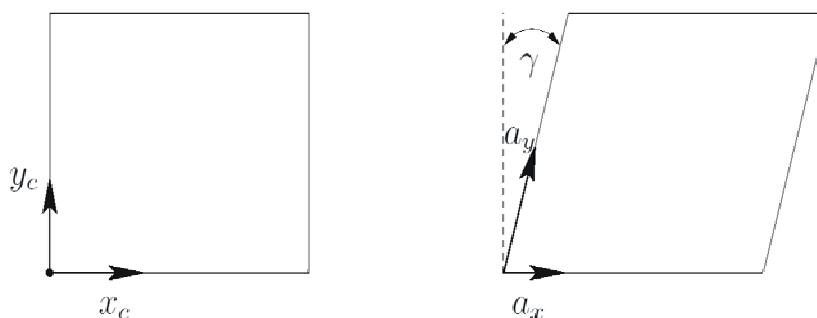
Za določevanje slikovnih koordinat detajlnih točk na digitalni podobi moramo najprej opredeliti izhodišče oziroma koordinatni sistem. V klasični fotogrametriji so koordinatni sistem določale t.i. robne marke. To so točke z določenimi slikovnimi koordinatami, ki so se ob fotografiranju preslikale na film. Z merjenjem njihovih koordinat se je opredelil slikovni koordinatni sistem. V digitalnih fotoaparatih dobimo kot rezultat podobo sestavljeno iz pravokotne mreže pikslov. Vsak piksel predstavlja vrednost, ki jo je na fototipalu zaznal posamezen fotoelement v ustrezni vrstici in stolpcu. Fotoelementi so torej že na tipalu

razporejeni v pravokotno mrežo. Določitev koordinatnega sistema je zato preprosta, saj nam koordinatni osi določajo vrstice in stolpci podobe. Običajno se koordinatni sistem definira tako, da je izhodišče v zgornjem levem kotu podobe. Smeri koordinatnih osi potekajo desno v smeri vrstice ter navzdol v smeri stolpca. Enoto predstavlja piksel, izhodišče pa je definirano tako, da ima piksel, ki leži skrajno zgoraj levo, koordinati (1,1).



Slika 11: Slikovni koordinatni sistem podobe

Kot je že omenjeno, nam praktično določa koordinatni sistem oziroma pravokotno mrežo pikselov razporeditev fotoelementov na fototipalu. Ker je izdelava in zgradba fototipala zapletena, ne moremo trditi, da so fotoelementi razporejeni v pravilni mreži. Zato lahko v postopek kalibracije uvedemo dodatne neznanke, ki opisujejo odstopanja fototipala od predpostavk. Zgoraj opisani koordinatni sistem zamenjamo s koordinatnim sistemom, ki ima različni merili vzdolž koordinatnih osi, kot med koord. osema pa je različen od 90° (DeMenthon, 2000).



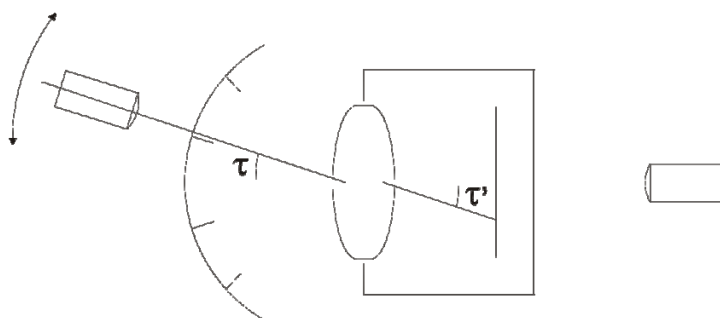
Slika 12: Modificiran koordinatni sistem

2.5 Metode kalibracije

Kalibracija predstavlja nasproten postopek običajnemu fotogrametričnemu postopku merjenju koordinat točk (Kraus, 1997). Pri fotogrametričnem merjenju poznamo elemente notranje orientacije fotoaparata in pridobivamo koordinate objektnih točk. V postopku kalibracije s pomočjo poznanih koordinat točk v objektnem prostoru in izmerjenih slikovnih koordinat teh točk določamo elemente notranje orientacije.

2.5.1 Laboratorijska kalibracija z uporabo goniometra

Elementi notranje orientacije posredno opisujejo geometrijo vstopnega snopa žarkov (prostor - objektiv) ter geometrijo izstopnega snopa žarkov (objektiv - slikovna ravnina). Goniometer je naprava, ki nam omogoča vzpostavitev v prostoru definiranega vstopnega žarka in spremljanje izstopnega žarka. Praktično to pomeni, da opazujemo kota τ in τ' (glej poglavje 2.2). Na podlagi različnih vstopnih kotov ter sprememb izstopnih kotov lahko določimo elemente notranje orientacije. Ta metoda se uporablja predvsem za kalibriranje profesionalnih fotogrametričnih fotoaparotov (predvsem v aerofotogrametriji).



Slika 13: Shema goniometra

2.5.2 Kalibracija s testnim poljem točk z znanimi prostorskimi koordinatami

Testno polje predstavljajo ustrezno signalizirane prostorske točke, katerim predhodno določimo prostorske koordinate. Običajno namestimo točke na objekt, kjer lahko zagotovimo, da so točke čimbolj prostorsko razpršene v smeri vseh treh koordinatnih osi. S fotoaparatom

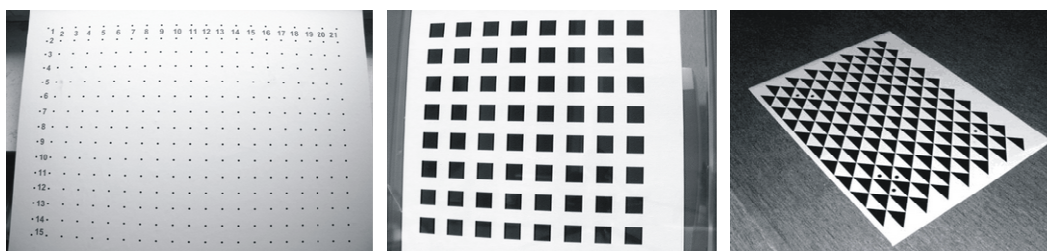
nato naredimo ustrezno število posnetkov testnega polja. Pri tem pazimo, da testno polje oziroma točke pokrijejo celotno površino posnetka in da so vsi posnetki narejeni z istimi nastavitvami fotoaparata.



Slika 14: Primer razporeditve točk v testnem polju

Elementi notranje orientacije se nato kot dodatne spremenljivke določajo v sklopu t.i. snopovne izravnave bloka, v katero so vključeni vsi posnetki. To metodo se uporablja za kalibracijo fotoaparata v terestrični fotogrametriji. Primerna je tudi za kalibracijo nemetričnih fotoaparata, vendar je vzpostavitev obsežnega trirazsežnega testnega polja zamudna in zahteva dodatne geodetske meritve.

Za kalibracijo nemetričnih fotoaparata je mnogo primernejša metoda kalibracije z ravninskim testnim poljem. Pri tej metodi predstavlja testno polje na ravno podlago nanešena mreža točk z znanimi koordinatami. Testna polja so različnih oblik (pike, mreže kvadratov...).



Slika 15: Ravninska testna polja

Obstaja več različnih izvedb metode: Zhang, 1998; Tsai, 1987; Heikkila, 1997. Metoda zahteva več perspektivno različnih posnetkov testnega polja. Na podlagi izmerjenih slikovnih koordinat točk in znanih koordinat točk testnega polja se lahko izračunajo elementi notranje orientacije fotoaparata. Izdelava testnega polja in določitev koordinat točk testnega polja (določi se X in Y koordinata, medtem ko velja $Z = 0$) ni zahtevna. Postopek merjenja slikovnih koordinat in izračun kalibracije je samodejen postopek, kar nam omogoča hitro pridobitev rezultatov. Ker je testno polje majhnih dimenzij, ga lahko odnesemo s seboj na terensko snemanje. Tako imamo možnost kalibracije za vsako različno nastavitvev fotoaparata.

V skupino metod kalibracije z uporabo testnega polja lahko uvrstimo tudi t.i. metode kalibracije med projektom (angl. on the job calibration). Pri teh metodah si testno polje točk z znanimi koordinatami vzpostavimo okoli in na samem objektu snemanja. Te metode se običajno uporablja pri krajših razdaljah snemanja v industrijski fotogrametriji (Kraus, 1997). Metoda zahteva več posnetkov z različnih položajev in v različnih smereh. Relativni položaj med testnim poljem in objektom se med snemanjem ne sme spremeniti.

2.5.3 Kalibracija na podlagi poznanih oblik v prostoru

Namesto kartezičnih koordinat točk (namesto testnega polja) lahko za izračun parametrov notranje orientacije uporabimo druge informacije v prostoru. Ena od možnosti je uporaba medsebojno pravokotnih parov vzporednih linij na posnetku (na primer robovi objekta) (Kraus, 1997). Skozi linije v prostoru ter njihove slike na posnetku lahko definiramo ravnine, ki se sekajo v projekcijskem centru. Z izbiro več parov linij, ki so med seboj pravokotne (v prostoru), pridobimo dovolj podatkov za izračun notranje orientacije. Druga, bolj razširjena metoda pa je uporaba vzporednih linij (angl. plumb-line calibration). Metoda izkorišča dejstvo, da je ravna linija v idealni preslikavi (centralna projekcija) tudi na sliki ravna. Testno polje predstavlja mreža vzporednih linij, ki se na posnetek zaradi vpliva distorzije objektiva, preslikajo kot krivulje. Na podlagi odstopanj teh krivulj od ravne linije se nato izračunajo parametri notranje orientacije. Metoda je uporabna predvsem za določitev parametrov distorzije objektiva, medtem ko so za določitev koordinat glavne točke primernejše druge metode (vzrok je velika korelacija med koordinatami glavne točke ter parametri nesimetrične distorzije) (Clarke, Fryer, 1998). Obstaja tudi metoda, ki za izračun parametrov notranje

orientacije uporablja ravninsko testno polje, ki ga predstavlja slika krožnice in linij, ki gredo skozi središče krožnice. Metoda izkorišča dejstvo, da se krožnica v centralni projekciji preslika kot elipsa. Z določitvijo slikovnih koordinat točk na dobljeni elipsi in posledično parametrov elips na več posnetkih testnega polja se lahko izračunajo parametri notranje orientacije. Prednost metode je, da ni potrebno poznati geometrije testnega polja (koordinat centra, radija) in je zato postopek mogoče povsem avtomatizirati (Meng, 2000).

2.5.4 Samokalibracija (angl. self-calibration)

Metoda samokalibracije za izračun notranje orientacije ne potrebuje nobenih kartezičnih podatkov o prostoru (koordinat) (Faugeras, Luong, Maybank, 1992). Vhodni podatki so slikovne koordinate detajlnih objektnih točk izmerjene na več perspektivno različnih posnetkih. Za uspešno samokalibracijo je potrebno izpolniti naslednje pogoje (Brown, 1989, cit. po Clarke, Fryer, 1998):

- z enim fotoaparatom opravimo vsaj tri posnetke objekta,
- nastavitve fotoaparata (notranja orientacija) ter objekt (detajlne točke) morajo med snemanjem ostati stabilne
- posnetki morajo biti med seboj perspektivno različni,
- v obdelavo moramo vključiti zadostno število dobro razporejenih točk.

Če pogoj o uporabi detajlnih objektnih točk, o katerih načeloma nimamo nikakršne prostorske informacije, nekoliko razširimo, bi lahko v to skupino uvrstili tudi metodo vzporednih linij ali metodo točk na krožnici, kjer prav tako uporabljamo detajlne točke, o katerih pa imamo še določene dodatne informacije.

Ob zgornjih opredelitvah ter poimenovanjih opazimo, da se nekatere definicije ter logični pomeni poimenovanja metod medsebojno prepletajo. Metodo samokalibracije, kjer ne potrebujemo testnega polja, se večkrat zamenjuje z metodo kalibracije med projektom, kjer imamo testno polje. Prav tako metode kalibracije z ravninskim testnim poljem ne moremo uvrstiti med metode kalibracije med projektom, čeprav v tem primeru kalibracijo dejansko opravljamo na terenu, med projektom. Zato moramo za dosledno razvrstitev metod upoštevati predvsem naslednje lastnosti:

- imamo testno polje (trirazsežno ali dvorazsežno) točk z znanimi prostorskimi koordinatami,

- nimamo testnega polja točk, uporabimo samo slikovne koordinate detajlnih točk,
- testno polje in objekt snemanja sta na različnih mestih,
- testno polje točk je vzpostavljeno okoli objekta snemanja,
- testno polje nam predstavljajo določeni geometrijski elementi (linije, krogi).

2.5.5 Metoda kalibracije s ravninskim testnim poljem (Zhang, 1998)

V tem poglavju je na kratko opisana začetna nastavitev postopka kalibracije po metodi, ki jo je predlagal Zhang (1998) in je uporabljena v praktičnem delu naloge v programskem paketu Modifoto.

Vzpostaviti želimo zvezo med izmerjenimi slikovnimi koordinatami testnega polja ter poznanimi koordinatami testnega polja v prostoru, v kateri bodo vsebovani elementi notranje orientacije. Metoda je zasnovana z uporabo projektivnih (homogenih; angl. homogeneous coordinates) koordinat. Slikovno točko (x,y) s projektivnimi koordinatami zapišemo:

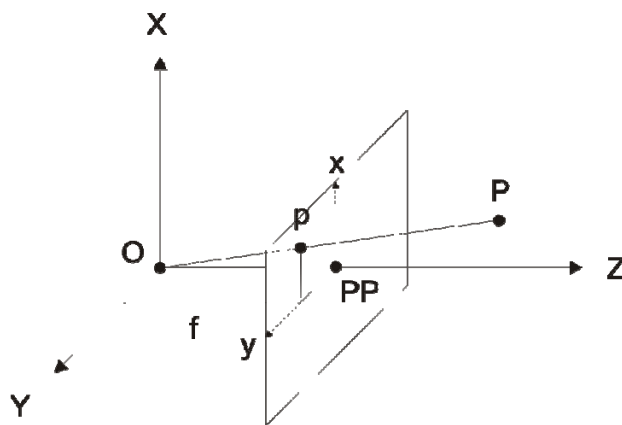
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w \end{bmatrix}; \quad x = \frac{x'}{w}; \quad y = \frac{y'}{w} \quad (9)$$

Trojka (x',y',w) predstavlja zapis v projektivnih koordinatah, w pa je poljuben od nič različen skalar.

Matematični model fotografske preslikave predstavlja centralna projekcija. Za predstavitev v projektivnih koordinatah jo prikažemo na naslednji način:

Center projekcije O leži v izhodišču prostorskega koordinatnega sistema. Slikovna ravnina je vzporedna ravnini XY in od nje oddaljena za vrednost goriščne razdalje f . Koordinatna os Z seka slikovno ravnino v glavni točki posnetka PP . Objektna točka P se iz prostora preslika v slikovno točko p . Vsaka točka na posnetku predstavlja projekcijski žarek, kar pomeni, da se vsaka prostorska točka na tem žarku preslika v isto slikovno točko. Smer žarka lahko tako predstavimo z slikovnimi koordinatami ali s koordinatami katerekoli prostorske točke, ki leži

na tem žarku. V zgoraj definirani centralni projekciji predstavimo žarek, ki gre skozi prostorsko točko $[X,Y,Z]^T$ s projektivnimi koordinatami $[x,y,1]^T$. Isti žarek predstavlja tudi



Slika 16: Centralna projekcija

točka $[\lambda X, \lambda Y, \lambda Z]^T$. To pomeni, da skaliranje nima vpliva na projektivne koordinate. To zapišemo:

$$[X,Y,Z]^T \sim \lambda[X,Y,Z]^T = [\lambda X, \lambda Y, \lambda Z]^T \quad (10)$$

kjer znak \sim predstavlja projektivno enakost, λ pa poljuben, od nič različen skalar.

Če slikovna ravnina leži na oddaljenosti $Z = 1 = f$, lahko projekcijski žarek skozi slikovno točko (x,y) predstavimo projektivno:

$$[x,y,1]^T \sim [Zx,Zy,Z]^T \quad (11)$$

za katerokoli oddaljenost $Z \neq 0$.

V zgoraj definirani centralni projekciji vzpostavimo povezavo med slikovno točko $p(x,y)$ ter pripadajočo prostorsko točko $P(X,Y,Z)$ s pomočjo podobnih trikotnikov in dobimo:

$$x = \frac{fX}{Z}; \quad y = \frac{fY}{Z} \quad (12)$$

Pri goriščni razdalji $f = 1$ lahko enačbi (12) zapišemo v projektivnih koordinatah:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Z enačbo (13) se prostorska točka preslika v točko na slikovni ravnini, ki jo sedaj označimo s koordinatami (x_c, y_c) . Ker imajo fotoaparati zaradi svoje konstrukcije določene fizične lastnosti (notranja orientacija), ki vplivajo na položaj slikovne točke, moramo te koordinate ustrezno popraviti, da dobimo prave slikovne koordinate (x, y) . Upoštevamo naslednje lastnosti (Bergtholdt, 2002):

- goriščna razdalja

Ob vsakem premiku leč v objektivu se spremeni tudi goriščna razdalja, ki predstavlja fizično oddaljenost centra projekcije od slikovne ravnine. Sprememba goriščne razdalje je ekvivalentna spremembi merila vzdolž slikovnih koordinatnih osi, zato zapišemo:

$$[x_c, y_c]^T \mapsto [x, y]^T = [f \cdot x_c, f \cdot y_c]^T \quad (14)$$

- različni merili vzdolž koordinatnih osi

Če upoštevamo predpostavko, da piksli niso kvadratni ampak pravokotni, dobimo razmerje med višino in širino piksla a_x/a_y različno od ena. Ker je sprememba merila ekvivalentna spremembi goriščne razdalje, izrazimo goriščno razdaljo v enotah pikslov in dobimo dve vrednosti: $\alpha_x = f/a_x$ in $\alpha_y = f/a_y$. Sledi:

$$[x_c, y_c]^T \mapsto [x, y]^T = [\alpha_x \cdot x_c, \alpha_y \cdot y_c]^T \quad (15)$$

- glavna točka

Glavna točka je točka v slikovni ravnini s koordinatami (\hat{x}_0, \hat{y}_0) . Če koordinate pretvorimo v enote pikslov, dobimo $x_0 = \hat{x}_0/a_x$ in $y_0 = \hat{y}_0/a_y$. Koordinate ustrezno popravimo:

$$[x_c, y_c]^T \mapsto [x, y]^T = [\alpha_x \cdot x_c + x_0, \alpha_y \cdot y_c + y_0]^T \quad (16)$$

- nepravokotnost koordinatnih osi

Uvedemo dodatni parameter, ki opisuje nepravokotnost koordinatnih osi. Predpostavimo, da je x os fiksna. Kot do osi y označimo z γ . Sedaj zapišemo:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix}^T \mapsto \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \alpha_x \cdot x_c + x_0 \\ \alpha_y \cdot y_c + s \cdot x_c + y_0 \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

kjer je s-faktor nepravokotnosti izračunan:

$$s = \text{ctg}(\gamma) \cdot \alpha_y \quad (18)$$

V projektivnih koordinatah vse zgornje transformacije zapišemo:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} \alpha_x & s & x_0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Matriko K imenujemo kalibracijska matrika in vsebuje parametre notranje orientacije.

Če uvedemo še matriko E, ki vsebuje prostorski položaj projekcijskega centra ter nagibe fotoaparata v prostoru (šest elementov zunanje orientacije), lahko zapišemo:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim K \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot E \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Enačba (18) predstavlja osnovo za nadaljnji postopek kalibracije, kjer se izračunajo elementi matrike K ter dodatno še koeficienti polinoma simetrične radialne distorzije.

2.6 Stereo izvrednoteje

Prostorski položaj točk objekta v objektovem koordinatnem sistemu XYZ lahko določimo na podlagi dveh posnetkov istega objekta, ki sta narejeni z različnih stojišč. Takemu paru posnetkov, ki se medsebojno delno prekrivata vsaj 50%, rečemo stereopar. Postopki, s katerimi določamo prostorski položaj na podlagi posnetkov, temeljijo na rekonstrukciji snopa žarkov vsakega posameznega posnetka. Z znanimi elementi notranje orientacije (x_0 , y_0 , c) lahko obnovimo snop žarkov posameznega posnetka, vendar ne poznamo njegovega položaja v prostoru. Tega določajo elementi zunanje orientacije posnetka (X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , φ , κ).

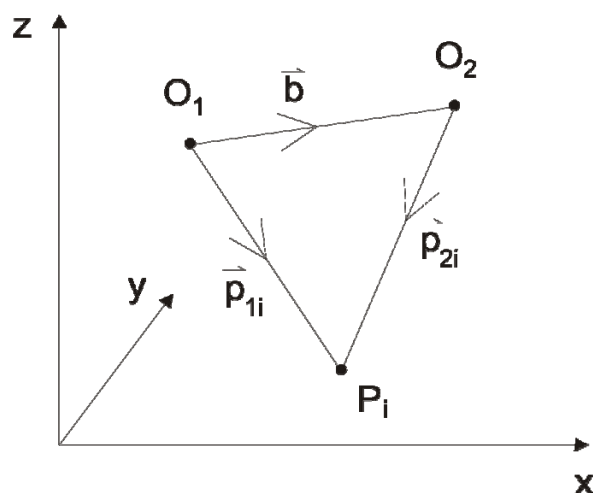
- X_0 , Y_0 , Z_0 prostorske koordinate projekcijskega centra

- ω , φ , κ rotacije posnetka okoli osi prostorskega koordinatnega sistema

Elementi notranje orientacije so običajno znani (kalibracija), zato v postopku izvrednotenja določamo predvsem elemente zunanje orientacije. Določimo jih na različne načine. Lahko jih določimo neposredno med samim snemanjem. Danes nam to omogočata sistema GPS (Globalni sistem za določanje položaja) ter INS (Inercialni navigacijski sistem), ki omogočata določitev položaja projekcijskih centrov ter zasukov posnetka okoli koordinatnih osi za vsak posamezen posnetek. V tem primeru pravimo, da so elementi zunanje orientacije znani. V primeru, ko so elementi zunanje orientacije neznan, pa jih je potrebno določiti posredno v postopku izvrednotenja. Te postopke razdelimo v tri skupine (Gorjup, 2001). V prvi skupini so postopki, v katerih orientiramo vsak posnetek stereopara posebej. Druga skupina vsebuje postopke, kjer določamo zunanjo orientacijo sočasno za oba posnetka stereopara. Sočasno torej določamo vseh 12 neznanih elementov. V tretji skupini pa so postopki, kjer posnetka prav tako orientiramo sočasno, vendar je postopek razdeljen v dva dela. V prvem delu snopa dveh posnetkov privedemo v medsebojni položaj, identičen položaju v času snemanja in s tem ustvarimo model objekta, ki pa ni orientiran v prostoru in je poljubnega merila. V drugem delu ta model prostorsko orientiramo in mu določimo pravilno merilo. V naslednjem poglavju je ta postopek (kot postopek, ki sem ga uporabil v praktičnem delu naloge) podrobneje opisan.

2.6.1 Dvostopenjski postopek orientacije stereopara

Orientacija se izvaja v dveh ločenih korakih. V prvem privedemo snopa žarkov obeh posnetkov v takšen medsebojni položaj, da presečišča homolognih žarkov (par žarkov, ki ga definirata projekcijska centra O_1 in O_2 , ter sliki P'_1 in P'_2 (iste) točke P) tvorijo stereo model objekta. To praktično pomeni, da snopa žarkov privedemo v enak medsebojni položaj, kot v času snemanja. Na podlagi projektivne geometrije lahko trdimo, da bo model vzpostavljen, ko se bodo sekali homologni žarki vsaj petih smiselno izbranih točk modela. To lahko predstavimo tudi s pogojem koplanarnosti vektorjev, predstavljenim na sliki 17 (Kraus, 1993):



Slika 17: Pogoj koplanarnosti

kjer velja:

$$(\vec{b}, \vec{p}_{1i}, \vec{p}_{2i}) = 0 \quad i = 1 \dots 5 \quad (21)$$

Enačba (21) predstavlja mešani produkt vektorjev \vec{b} , \vec{p}_{1i} , in \vec{p}_{2i} . Če trije vektorji ležijo v isti ravnini, je njihov mešani produkt enak nič.

Ta del imenujemo relativna orientacija, saj rekonstruiramo le relativne odnose med posnetkoma, ne določimo pa prostorskega položaja stereo modela. Zato za relativno

orientacijo ne potrebujemo nobene oslonilne (prostorske) točke, ampak jo izvajamo izključno z merjenjem slikovnih koordinat detajlnih točk. Dejansko pri praktičnem izvajanju relativne orientacije merimo paralakso. V splošnem se žarka z dveh posnetkov identične prostorske točke pred relativno orientacijo ne sekata in povzročata x in y paralakso. x paralakso odpravimo s spreminjanjem baze (razdalje med projekcijskima centroma). y paralakso odpravljamo s pomikanjem in rotacijo enega od posnetkov. Ko je y paralaksa odpravljena na celotni skupni površini stereopara, je relativna orientacija opravljena in dobimo stereomodel. Z relativno orientacijo pridobimo 5 elementov zunanje orientacije.

V drugem delu pa dobljeni model transformiramo v prostor oziroma objektni koordinatni sistem. Enačba transformacije med modelnim k.s. (xyz) ter objektnim k.s. (XYZ) se glasi:

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

kjer so:

X_u, Y_u, Z_u - koordinate izhodišča modelnega k.s. v objektnem k.s.

m - modul merila sistema xyz

R - rotacijska matrika sistema xyz v sistem XYZ (vsebuje tri rotacijske kote)

Zgornji parametri se imenujejo parametri absolutne orientacije. Za določitev parametrov absolutne orientacije potrebujemo glede na enačbo (20) točke dane v obeh sistemih - oslonilne točke. To so točke na objektu z znanimi prostorskimi koordinatami. Za določitev parametrov potrebujemo najmanj 7 enačb. To pomeni, da potrebujemo vsaj dve oslonilni točki z znanimi koordinatami (XYZ) ter eno oslonilno točko z znano eno od koordinat (Kraus, 1993).

3 PRAKTIČNA IZVEDBA IN MERITVE

3.1 Uvod

Nemetrični digitalni fotoaparati so orodje, ki je povsem primerno za fotogrametrične naloge arhitekturne fotogrametrije oziroma splošneje, naloge, ki zahtevajo nekajcentimetrsko natančnost rezultatov. Njihova cena je znatno nižja od cene profesionalnih fotogrametričnih fotoaparatorov. Razvitih pa je tudi veliko različnih metod kalibracije, ki nam s pomočjo samodejnih digitalnih postopkov omogočajo hitro določitev elementov notranje orientacije. S praktičnimi primeri sem skušal ugotoviti optimalen način kalibracije s programskim paketom Modifoto ter stabilnost notranje orientacije ter vpliv sprememb le te na rezultate fotogrametričnih meritev.

3.2 Fotoaparat Nikon D70

V nalogi je bil uporabljen digitalni zrcalno-refleksni fotoaparat Nikon D70 v kombinaciji z objektivom AF-S DX Zoom-Nikkor z naslednjimi tehničnimi lastnostmi.

Preglednica 1: Tehnične karakteristike fotoaparata Nikon D70

Fotoaparat - Nikon D70	
Svetlobno tipalo	CCD
Velikost tipala	23.7 x 15.6 mm
Število vseh pikslov	6.24 M
Število efektivnih pikslov	6.10 M
Maksimalna ločljivost	3008×2000
Občutljivost tipala (ISO)	200 - 1600
Čas osvetlitve	1/8000 -30 s
Beleženje barve	Bayer-jev vzorec

Objektiv - AF-S DX Zoom-Nikkor f/3.5-4.5G IF-ED	
Goriščna razdalja	18-70mm
Območje ostrenja (Fokus)	0.38m - ∞



Slika 18: Fotoaparat Nikon D70

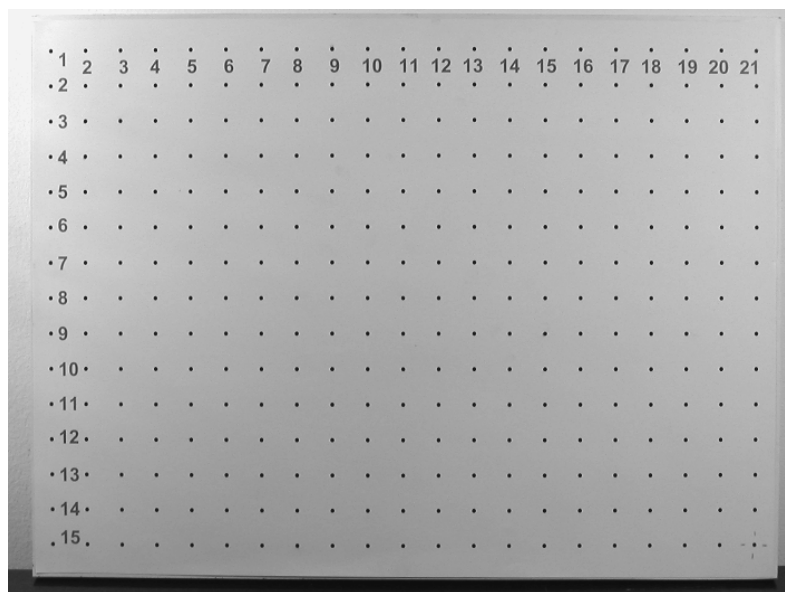
Uporabljeni fotoaparat danes glede na število pikslov na svetlobnem tipalu (6.1M) spada med manj zmogljive digitalne zrcalno-refleksne fotoaparate na tržišču. V ponudbi so danes fotoaparati z 6.1M - 13.3M piksli, ki nam omogočajo še natančnejše meritve. Fotoaparat Nikon D70 sem izbral predvsem zato, ker je v lasti in uporabi Fakultete. Tako mi je bila omogočena nemotena uporaba, rezultati pa bodo lahko upoštevani pri kasnejši uporabi.

3.3 Kalibracija fotoaparata

Fotoaparat, ki sem ga uporabil za snemanje, je nemetričen. Da dobimo pravo (idealno) podobo fotografiranega objekta, potrebujemo elemente notranje orientacije objektiva oziroma fotoaparata, ki jih pridobimo s postopkom kalibracije. Kalibracijo sem izvajal v programskem paketu Modifoto (avtor: Grigillo D., Ver. 1.0, 2002), ki temelji na metodi kalibracije z ravninskim testnim poljem ki jo je predstavil Zhang (1998). Metoda za izračun parametrov notranje orientacije zahteva perspektivno različne podobe testnega polja. Za izračun sedmih parametrov notranje orientacije (α_x - goriščna razdalja v pikslih, α_y - goriščna razdalja v pikslih, x_0 - koordinata x glavne točke, y_0 - koordinata y glavne točke, s - faktor

nepravokotnosti koordinatnih osi, k_1 , k_2 - prva dva koeficienta polinoma simetrične radialne distorzije) potrebujemo vsaj tri perspektivno različne posnetke. Če predpostavimo, da sta koordinatni osi pravokotni ($s = 0$), zadostujeta dva perspektivno različna posnetka. Če poznamo koordinati glavne točke in če velja $s = 0$, zadostuje en posnetek (Grigillo, 2003)

Uporabljeno testno polje je velikosti 42 x 59,4 centimetrov (format A2) z enakomerno razporejenimi točkami. Na njem je na oddaljenosti 26 milimetrov razporejenih 315 točk v 15 vrsticah in 21 stolpcih. Točke predstavljajo črni krogi s premerom treh milimetrov. Testno polje lahko preprosto natisnemo na obstojen papir ter ga nalepimo na trdo ravno podlago. Koordinate točk sem s pomočjo nonijskega merila izmeril na 0.1mm natančno. Datoteka s koordinatami točk testnega polja je vhodni podatek postopka kalibracije.



Slika 19: Testno polje

Pri fotografiranju testnega polja je treba paziti na naslednje:

- posnetek naj bo čimbolj zapolnjen s testnim poljem
- posnetek naj bo enakomerno osvetljen
- fotografiramo z enakimi nastavitvami fotoaparata, kot bomo kasneje snemali objekt
- spodnji del testnega polja mora biti na vseh posnetkih na spodnji strani podobe

S podatki (datotekami) o koordinatah točk testnega polja ter posnetki testnega polja nadaljujemo kalibracijo v programu Modifoto (MOnoslikovna DIgitalna FOTOgrametrija), ki je narejen za potrebe postopkov obdelave podob v enoslikovni fotogrametriji. V nalogi sem uporabil modula Fotoanalist in FA_Kalibracija, ki sta namenjena za geometrično analizo digitalnih fotoaparata (kalibracijo fotoaparata) in popravo pridobljenih podob, sestavlja pa ga še modul Fotoplan, ki omogoča izdelavo metričnih fotonačrtov in njihovo mozaičenje za potrebe enoslikovne arhitekturne fotogrametrije.

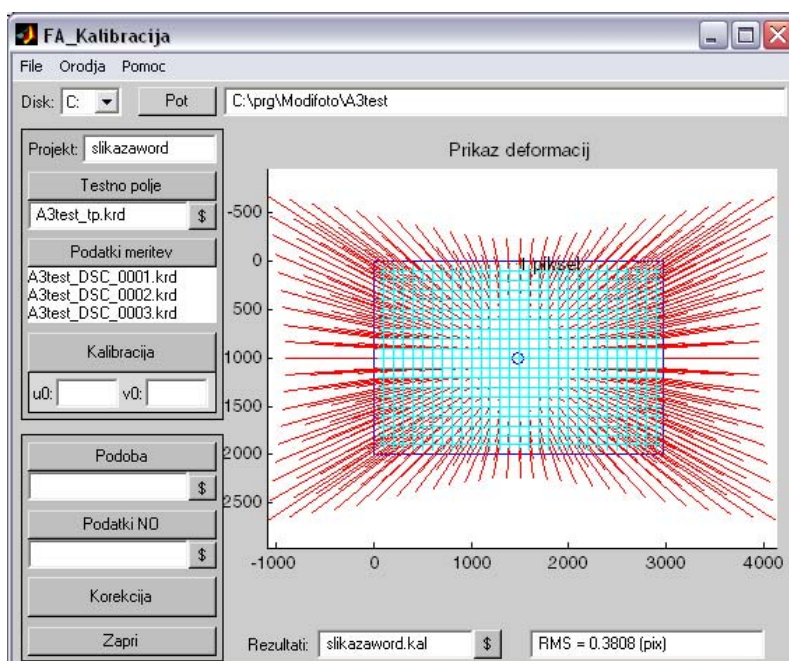
3.3.1 Programska modula Fotoanalist in FA_Kalibracija

Modul Fotoanalist je namenjen merjenju slikovnih koordinat točk testnega polja. Merjenje slikovnih koordinat se izvaja samodejno s pomočjo digitalnega postopka slikovnega ujemanja delov podob. V ta namen moramo za vsak posamezen posnetek izdelati vzorčno podobo točke testnega polja - tarčo. To storimo tako, da izrežemo del podobe, na katerem se nahaja točka. Ta del podobe (tarča) služi programu, da s pomočjo slikovnega ujemanja (slikovne korelacije) izmeri slikovne koordinate vseh točk testnega polja. S pomočjo grafičnega vmesnika izrežemo tarčo, jo pregledamo in shranimo. Meritve izvajamo z vmesnikom Meritev, kamor podamo število vrstic in stolpcev testnega polja, datoteko s tarčo ter velikost iskanja. Nato določimo položaj štirih robnih točk, program pa nato samodejno izmeri koordinate vseh točk s podpikselsko natančnostjo.

Modul FA_Kalibracija je namenjen izračunu parametrov notranje orientacije fotoaparata in geometrični popravi podob. Vhodni podatki za kalibracijo predstavljajo datoteka s koordinatami testnega polja in datoteke pridobljene s Fotoanalistom, ki vsebujejo slikovne koordinate točk testnega polja na vsaj treh perspektivno različnih podobah. Rezultate kalibracije (parametre notranje orientacije ter prva dva koeficienta simetrične radialne distorzije) program zapiše v izhodno datoteko. Grafična predstavitev distorzije objektivna predstavlja smer in velikost premika točk na podobi, s katerim (premikom) odstranimo vpliv simetrične radialne distorzije. Program izračuna tudi srednji pogrešek RMS modeliranja distorzije (Zhang, 1998, cit. po Grigillo 2003):

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum e^2}{nm}} \quad (23)$$

kjer predstavlja e odstopanje med izmerjenimi slikovnimi koordinatami ter pravimi koordinatami "pokvarjenimi" z dobljenimi parametri notranje orientacije, n število podob v izračunu, m pa število točk na posamezni podobi.



Slika 20: Modul FA_Kalibracija ter grafični prikaz simetrične radialne distorzije

Če imamo narejenih več podob testnega polja, lahko za izračun enostavno izbiramo različne kombinacije posnetkov. To nam omogoča hitro primerjavo rezultatov različnih kombinacij, kar sem uporabil pri prvem delu praktičnega dela naloge.

Modul FA_Kalibracija vsebuje tudi program za geometrično popravo podob. Na podlagi rezultatov kalibracije lahko podobo prevzorčimo tako, da odstranimo vpliv ugotovljene simetrične radialne distorzije. Enačbe, ki jih program uporablja za modeliranje simetrične radialne distorzije so naslednje:

$$\begin{aligned}\tilde{u} &= u + (u - u_0)(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2) \\ \tilde{v} &= v + (v - v_0)(k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2)\end{aligned}\quad (24)$$

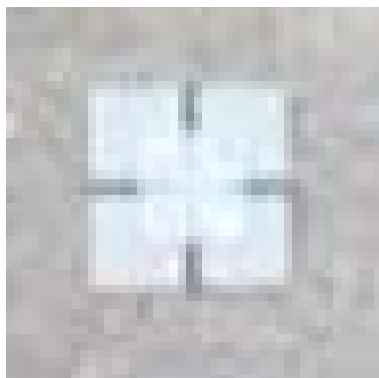
kjer so (u, v) idealne slikovne koordinate, neobremenjene z distorzijo, (\tilde{u}, \tilde{v}) dejansko opazovane slikovne koordinate, (x, y) normalizirane slikovne koordinate z izhodiščem v glavni točki podobe, kjer je tudi 'center' simetrične radialne distorzije (Grigillo, 2003).

3.4 Stereofotogrametrično snemanje objekta

V nalogi sem skušal ugotoviti tudi vpliv sprememb vrednosti parametrov notranje orientacije na rezultate praktičnega fotogrametričnega dela. V ta namen sem izbral objekt, katerega sem uporabil za stereofotogrametrično snemanje ter iz vrednotenja. Ker so rezultat iz vrednotenja prostorske (trirazsežne) koordinate točk objekta, sem poskušal izbrati objekt, ki je čim bolj prostorsko razgiban. Izbrani objekt je tudi arhitekturno dokaj zanimiv.

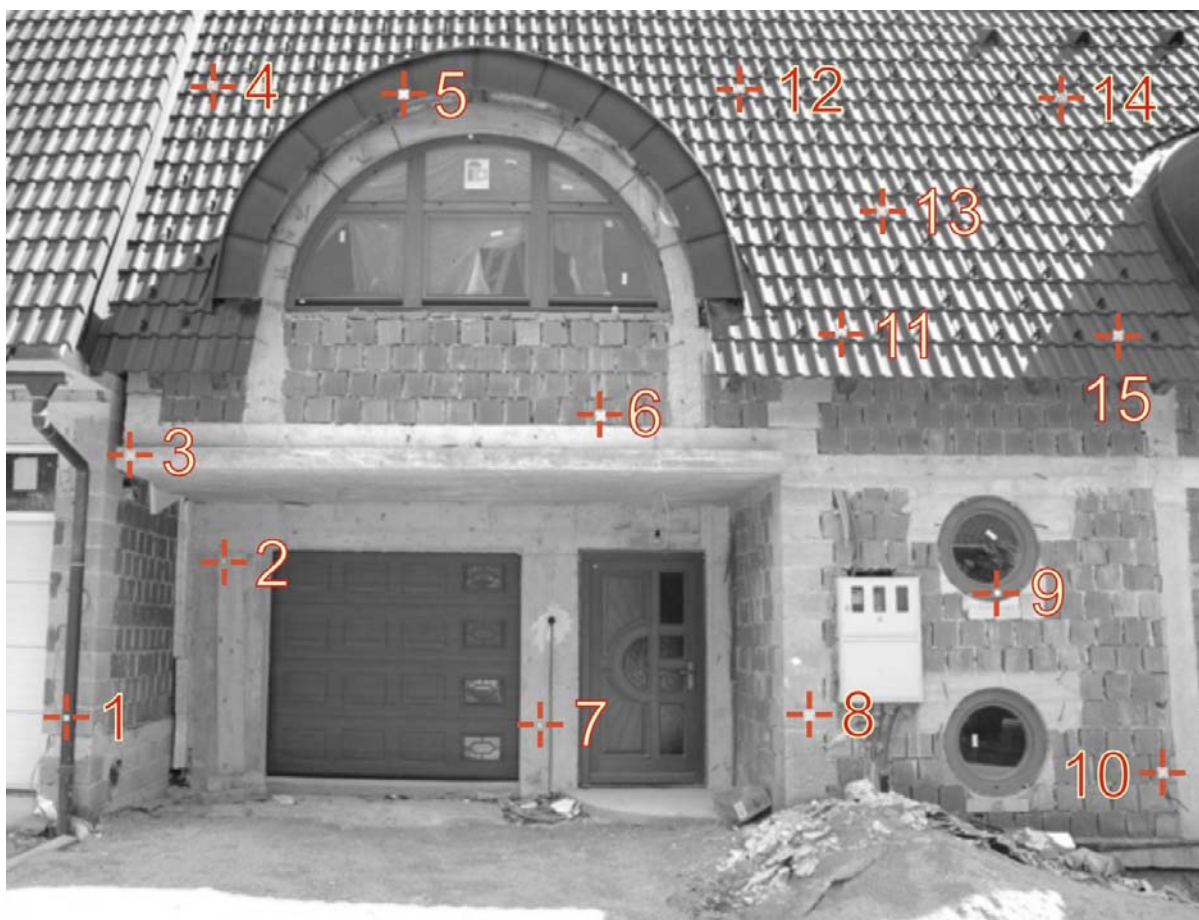
3.4.1 Oslonilne in kontrolne točke

Za določitev absolutne orientacije stereopara potrebujemo na objektu oslonilne točke. To so točke z znanimi prostorskimi koordinatami. Ker sem meritve opravljal z namenom ugotavljanja vpliva vrednosti notranje orientacije na rezultat meritev (koordinate točk), sem na objektu potreboval tudi večje število kontrolnih točk. To so prav tako točke z znanimi prostorskimi koordinatami, ki pa niso uporabljene za izračun absolutne orientacije. Z stereomeritvami kontrolnih točk lahko ugotavljamo končno natančnost celotnega postopka orientacije stereopara, dajo pa nam tudi podatek o natančnosti izmerjenih koordinat detajlnih točk. Kot oslonilne in kontrolne točke sem uporabil retro tarče, ki jih je mogoče nalepiti na objekt. To so posebne tanke merske tarče z dobro označenim centrom in posebnim nanosom, ki omogoča odboj laserskega žarka za merjenje dolžin z laserskimi razdaljemerji. Ker mi velikost objekta ter ločljivost podob oziroma svetlobnega tipala nista omogočala snemanja z oddaljenosti, na kateri bi bile tarče oziroma njihov center dobro vidne na podobi, sem tarče nalepil na podlago s posebej poudarjenimi črtami, ki kažejo center tarče.



Slika 21: Primer tarče s podlago

Oslonilne in kontrolne točke sem enakomerno razporedil po objektu. Kot oslonilne sem uporabil šest točk na zunanjem delu posnetka (1, 4, 8, 12, 10, 14), ostale točke (2, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15) so bile kontrolne.



Slika 22: Razporeditev in oštevilčenje oslonilnih ter kontrolnih točk

Oslonilnim in kontrolnim točkam sem s klasičnimi geodetskimi meritvami s tahimetrom določil prostorske koordinate. Za meritve sem uporabil elektronski tahimeter Leica 605 L. Uporabil sem girusno metodo. Točke sem opazoval z dveh stojišč. Najprej sem na stojišču A (z orientacijo proti točki B) opazoval vse oslonilne in kontrolne točke v dveh girusih, nato pa še na stojišču B (z orientacijo proti točki A) prav tako v dveh girusih. Ob vsakem viziranju sem izmeril tudi poševno razdaljo do točke. Pri merjenju dolžin z uporabo retro tarč moramo zagotoviti ustrezno oddaljenost inštrumenta od tarče tako, da je kot, pod katerim laserski žarek vpade na tarčo, čim manjši. V nasprotnem primeru je lahko odboj laserskega žarka premajhen in meritve dolžin niso mogoče. Izravnavo opazovanj sem opravil s programoma RamWin (avtorja: Tomaž Ambrožič & Goran Turk, ver. 4.0, Dec. 2002) za izravnavo ravninske geodetske mreže ter WimWin (avtorja: Tomaž Ambrožič & Goran Turk, ver. 4.0, Dec. 2002) za izravnavo višinske geodetske mreže.

3.4.2 Fotografiranje objekta

Za določitev prostorskih koordinat detajlnih točk na objektu na podlagi merjenja slikovnih koordinat, potrebujemo dva posnetka istega objekta narejena z različnih stojišč. Pri tem je pomembno, da se točke, katerim želimo določiti prostorske koordinate, nahajajo na obeh posnetkih. Enako velja za oslonilne in kontrolne točke. Tak par posnetkov imenujemo stereopar. Stereopar sta dva posnetka, ki sta fotografirana iz različnih stojišč in se medsebojno delno prekrivata vsaj 50%. V nalogi sem uporabil približno 80% preklap.



Slika 23: Stereopar ter območje preklopa

Pred snemanjem objekta sem z enakimi nastavitvami kot kasneje objekt slikal testno polje z namenom kalibracije fotoaparata. Objekt sem fotografiral z nastavitvami, ki omogočajo najboljšo končno podobo (največja ločljivost) in ne vplivajo na notranjo geometrijo fotoaparata (na primer izključen autofocus). Podobe sem shranil v JPEG formatu, ki ne vpliva na geometrijo podobe, zmanjša pa velikost datoteke.

3.4.3 Obdelava stereopara na digitalni fotogrametrični postaji

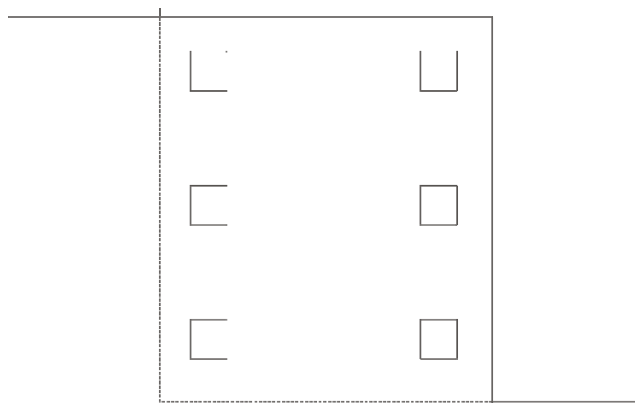
Z dobljenimi parametri notranje orientacije sem s prevzorčenjem odstranil vpliv simetrične radialne distorzije iz posnetkov. Ker sem objekt slikal pri skoraj minimalni goriščni razdalji, so bili pogreški zaradi vpliva radialne simetrične distorzije zelo veliki (glej sliko 20). V takšnih primerih moramo paziti na postavitev oslonilnih točk na posnetku. Če so točke preblizu roba posnetka, lahko pri prevzorčenju "izpadejo" iz območja posnetka.

Popravljeni podobi sem uporabil za nadaljnjo obdelavo. Obdelavo sem opravljal na digitalni fotogrametrični postaji (DVP-GS Software verion 5.5, Groupe Alta) v podprogramu za stereo iz vrednotenje. Postopek poteka po posameznih fazah orientacije stereopara.

Najprej je potrebno podati elemente notranje orientacije posnetkov (goriščna razdalja, položaj glavne točke). Uporabljena metoda kalibracije izračuna dve goriščni razdalji kot posledica različnih meril vzdolž koordinatnih osi. V nalogi sem za izračune uporabil srednjo vrednost. Položaj glavne točke je bilo potrebno pretvoriti iz koordinatnega sistema opisanega v poglavju 2.4.2 v koordinatni sistem z izhodiščem "na sredini" podobe. Robne marke v tem primeru predstavljajo robovi (vokalnih pikslov) podobe.

Elemente notranje orientacije se klasično podaja v dolžinskih enotah (na primer milimetrih). Ker je program Modifoto oziroma sama metoda kalibracije zasnovana na uporabi enote pikslov, dobimo tudi rezultate v tej enoti. Če pogledamo enačbi (2) vidimo, da se enote elementov notranje orientacije (na desni strani enačbe) med seboj krajšajo in dobimo rezultat (koordinato točke) v dolžinski enoti. To pomeni, da lahko elemente notranje orientacije načeloma podajamo v katerikoli enoti. To dejstvo nam prihrani nesigurno pretvarjanje (zaradi netočnega poznavanja velikosti piksla) vrednosti iz pikslov v dolžinsko enoto.

Sledi relativna orientacija stereopara. Na posnetkih je potrebno določiti identične detajlne točke, na katerih se odpravlja paralaksa (glej poglavje 2.6.1). Točke oziroma območja, kjer odpravljamo paralakso, se imenujejo po Von Gruberju in so razporejena tako, da so razdalje med njimi čim večje. Teoretično je dovolj, da paralakso odpravimo v 5-ih točkah stereopara, praktično pa jo odpravljamo vsaj v 6-ih. V nalogi sem v vsakem od Gruberjevih območij določil dve detajlni točki.



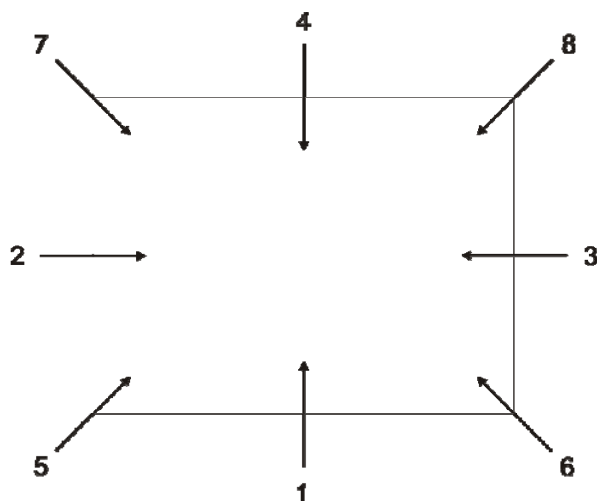
Slika 24: Razporeditev Gruberjevih območij

Po izvedeni relativni orientaciji dobimo stereomodel, ki ga je potrebno orientirati v prostoru. Absolutna orientacija stereomodela poteka v načinu stereoopazovanja. Na zaslonu se izmenično prikazujeta levi in desni posnetek. Pred zaslonom je nameščen polarizacijski filter, opazovalec pa nosi polarizacijska očala. Na ta način zagotovimo, da desno oko vidi desni posnetek, levi pa levega, kar omogoča stereografsko opazovanje. V modelu lahko premikamo mersko markico, s katero določamo prostorski položaj. Za absolutno orientacijo moramo poznati prostorske koordinate oslonilnih točk. V nalogi sem za absolutno orientacijo uporabil šest točk z vsemi prostorskimi koordinatami (glej sliko 22).

V absolutno orientiranem stereomodelu sem nato izmeril koordinate kontrolnih točk in jih primerjal s koordinatami dobljenimi z geodetskimi opazovanji točk.

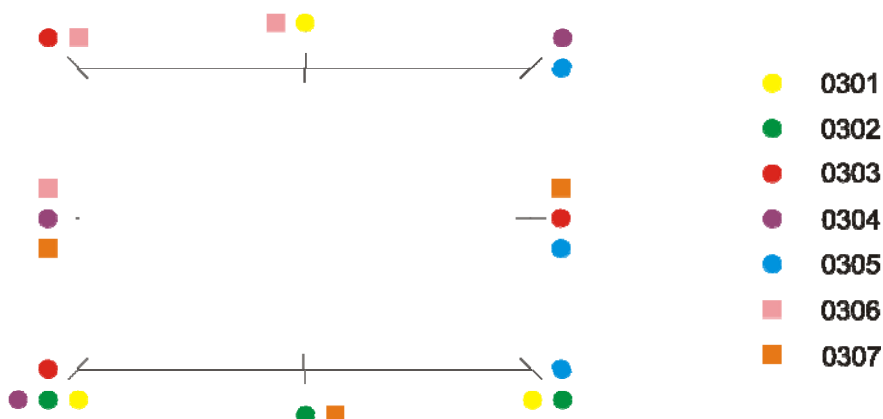
3.5 1. DEL: Kalibracija s testnim poljem (minimalno število posnetkov in njihova orientacija)

V prvem delu naloge sem želel ugotoviti potrebno število posnetkov za zanesljivo določitev parametrov notranje orientacije z uporabljenimi metodami. Metoda zahteva perspektivno različne posnetke testnega polja. Kakšno je optimalno število posnetkov in kateri posnetki so glede na položaj fotoaparata ter testnega polja najprimernejši za kalibracijo, sem ugotavljal na podlagi več posnetkov z različnih položajev. V testu sem uporabil osem posnetkov, simetrično razporejenih okrog testnega polja.

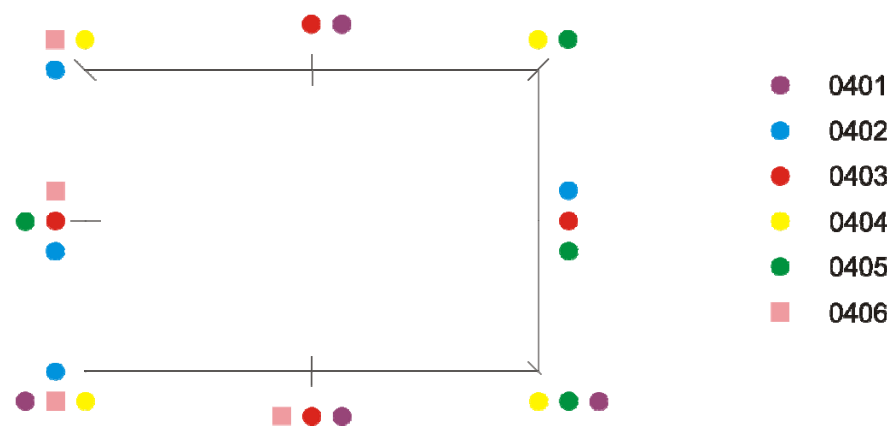


Slika 25: Položaj posnetkov testnega polja

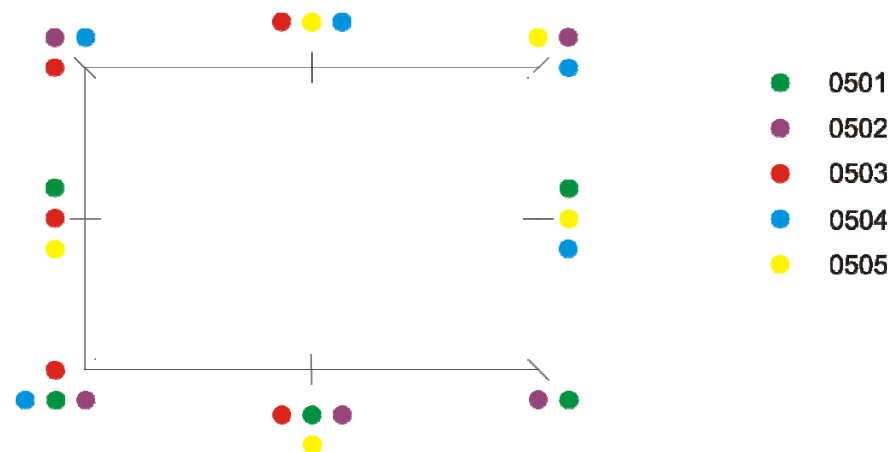
V programu Modifoto sem nato za izračun parametrov notranje orientacije uporabil različne kombinacije posnetkov.



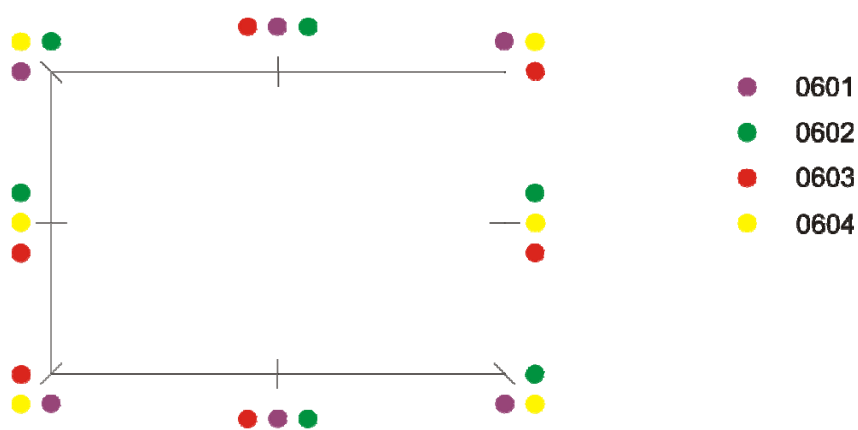
Slika 26: Kombinacije treh posnetkov



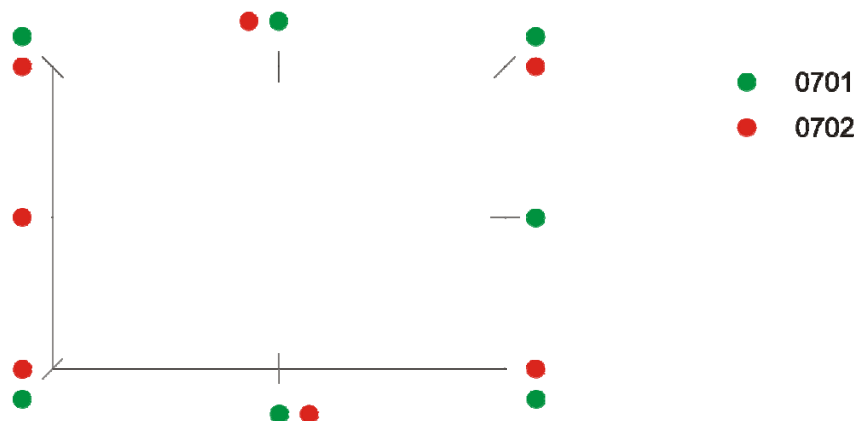
Slika 27: Kombinacije štirih posnetkov



Slika 28: Kombinacije petih posnetkov



Slika 29: Kombinacije šestih posnetkov



Slika 30: Kombinacije sedmih posnetkov

Kalibracijo sem torej izvedel: sedemkrat s kombinacijami treh posnetkov (0301-0307), šestkrat s kombinacijami štirih posnetkov (0401-0406), petkrat s kombinacijami petih posnetkov (0501-0505), štirikrat s kombinacijami šestih posnetkov (0601-0604), dvakrat s kombinacijama sedmih posnetkov (0701-0702) ter tudi z uporabo vseh osmih posnetkov (kombinacija 0801).

Ker je bil uporabljen objektiv s spremenljivo goriščno razdaljo (zoom objektiv), sem test izvedel za dve različni nastavitvi goriščne razdalje f in sicer za minimalno ter srednjo vrednost (vrednost goriščne razdalje (minimalna, srednja) lahko zgolj ocenimo na podlagi grafičnega merila na objektivu). Ostale nastavitve fotoaparata so bile v obeh primerih enake:

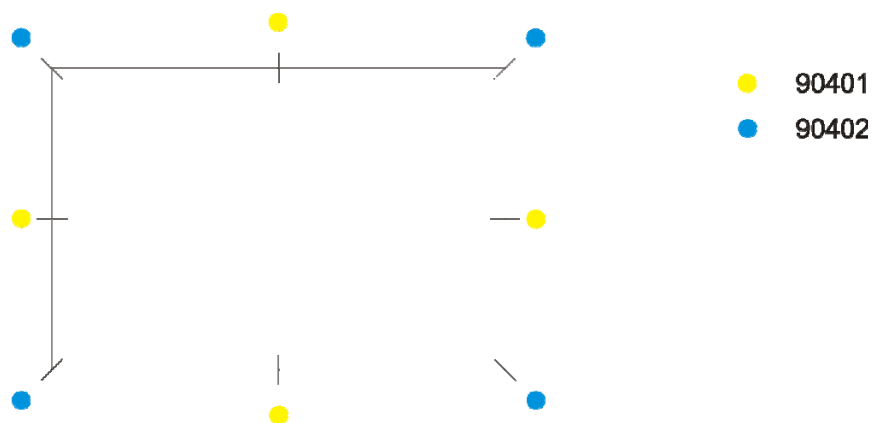
zaslonsko število:	6.3
čas zaklopa:	1/200s
občutljivost tipala (ISO):	avtomatska

Pri obeh vrednostih goriščne razdalje sem zaporedoma naredil dve seriji osmih posnetkov. Želel sem ugotoviti morebitne razlike med obema serijama posnetkov. Te bi lahko nastale kot posledica "ogrevanja" fotoaparata na delovno temperaturo.

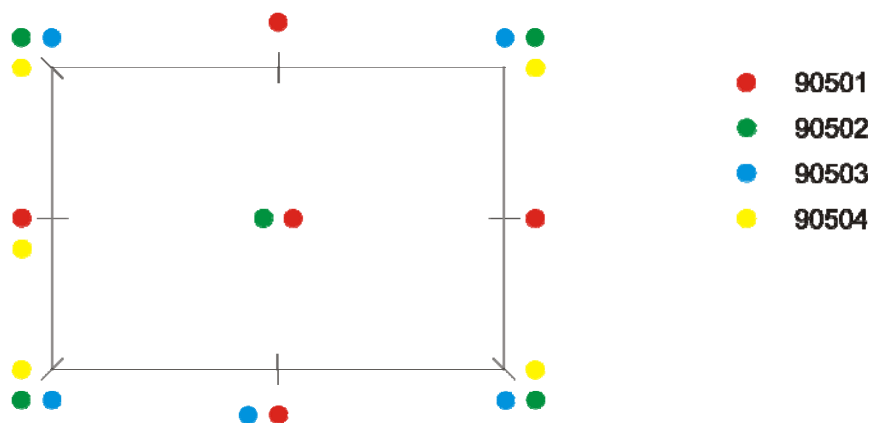
3.5.1 Vpliv centralnega posnetka

Dodatno sem izvedel test, v katerega sem vključil še deveti posnetek. Ta posnetek sem naredil v smeri sredine testnega polja (vpadni kot glavnega projekcijskega žarka je približno 0,

slikovna ravnina in ravnina testnega polja sta približno vzporedni). Želel sem ugotoviti, ali tak posnetek bistveno vpliva na rezultat kalibracije. V ta namen sem kalibracijo izvedel z uporabo štirih posnetkov, brez devetega posnetka in jih primerjal z rezultati pridobljenimi z uporabo petih posnetkov, kjer sem uporabil tudi deveti posnetek. Primerjal sem tudi rezultate kalibracije z osmimi (slika 25) ter devetimi posnetki (kombinaciji 90801 in 90801).



Slika 31: Kombinaciji štirih posnetkov

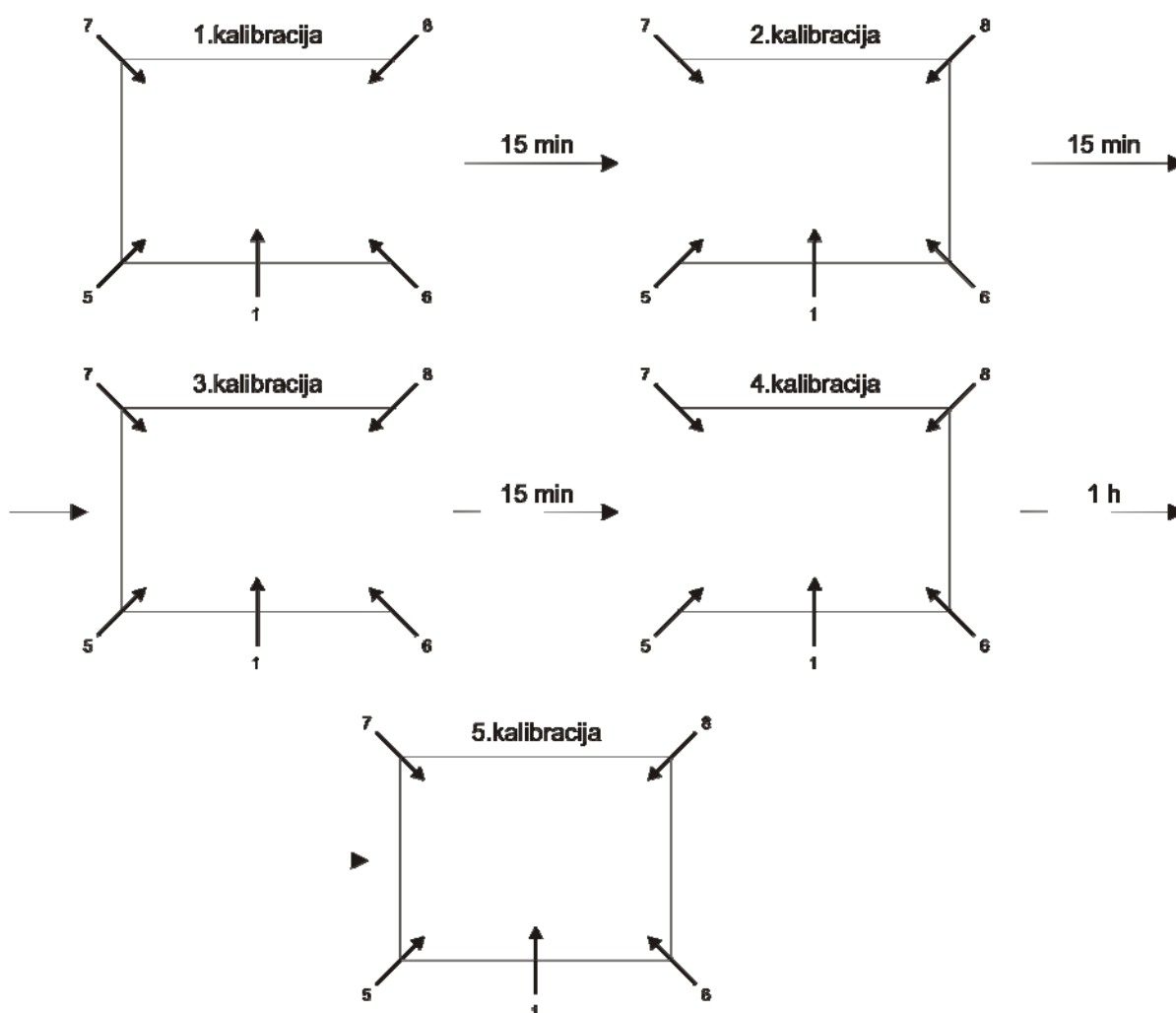


Slika 32: Kombinacije petih posnetkov

3.6 2. DEL: Časovna stabilnost parametrov notranje orientacije

V drugem delu naloge sem želel preveriti časovno stabilnost notranje orientacije. Glede na dejstvo, da amaterski fotoaparati niso namenjeni fotogrametričnim meritvam, njihova konstrukcijska stabilnost ni nujno prioriteta proizvajalcev. Tudi pri uporabljenih objektivih s spremenljivo goriščno razdaljo je več možnosti za morebitne premike leč kot pri objektivih z fiksnimi lečami. Glede na to, da med snemanjem na terenu fotoaparati ni v idealnih (laboratorijskih) pogojih (sprememba temperature, fotoaparati prenašamo na različna mesta, na objektiv namestimo pokrov, ...), lahko pričakujemo časovne spremembe vrednosti parametrov notranje orientacije.

Z namenom ugotovitve velikosti teh sprememb sem izvedel več kalibracij fotoaparata v določenih časovnih presledkih. Po prvi kalibraciji sem fotoaparati pustil stati 15 minut. Med tem časom se s fotoaparatom ni nič dogajalo. Nato sem izvedel drugo kalibracijo in zopet počakal 15 minut. Med tem presledkom sem s fotoaparatom naredil nekaj posnetkov, ga izpostavil sončni svetlobi in silam ob prenašanju, vse z namenom simuliranja pogojev, v katerih opravljamo terenske fotogrametrične meritve (fotoaparati prenašamo obešenega okoli vratu; ga odložimo in s tem "naslonimo" na objektiv; objektiv pokrijemo s pokrovčkom, ...). Sledila je tretja kalibracija in po njej premor 15 minut, med katerim je fotoaparati miroval. Po premoru sem opravil četrto kalibracijo, nato pa je sledil premor dolg eno uro, med katerim sem fotoaparati izklopil. Po 1 uri sem fotoaparati vklopil in opravil še peto kalibracijo. Glede na predpostavke o vplivih na notranjo orientacijo ter posledično njeni nestabilnosti, lahko pričakujemo naslednje vrednosti rezultatov. Razlike med prvo in drugo kalibracijo naj bi bile glede na mirovanje fotoaparata minimalne. Med drugo in tretjo kalibracijo bi lahko prišlo do razlik zaradi različnih vplivov na fotoaparati. Vrednosti tretje in četrte kalibracije bi morale biti zopet podobne. Zadnjo kalibracijo sem vključil z namenom ugotovitve vpliva daljše neaktivnosti fotoaparata. Zaporedje kalibracij prikazuje slika 33:



Slika 33: Časovni potek kalibracij

Za kalibracijo sem vsakič opravil dve zaporedni seriji petih posnetkov v kombinaciji 0502 (glej sliko 28). Test sem, tako kot v prvem delu, opravil pri minimalni in srednji vrednosti goriščne razdalje. Ostale nastavitve so bile naslednje:

zaslonsko število:	6.3
čas zaklopa:	1/200s (pri f_{\min}); 1/160s (pri f_{sr})
občutljivost tipala (ISO):	avtomatska

3.7 3 DEL: Vpliv sprememb notranje orientacije na rezultate izvedenja

V prvih dveh delih sem ugotavljal zgolj spremembe vrednosti parametrov notranje orientacije. V tretjem delu pa sem želel na praktičnem primeru stereofotogrametričnega snemanja ugotoviti, kako in koliko te spremembe vplivajo na končne rezultate.

Predhodno sem določil koordinate oslonilnih ter kontrolnih točk (glej poglavje 3.4.1). Nato sem približno določil stojišči, s katerih sem kasneje naredil posnetka za stereopar ter fotoaparata nastavil za slikanje objekta. S temi nastavitvami sem pred fotografiranjem naredil osem posnetkov testnega polja za kalibracijo fotoaparata. Nato je sledilo fotografiranje objekta. Po fotografiranju sem z istimi nastavitvami zopet naredil osem posnetkov testnega polja, na podlagi katerih sem lahko ugotavljal morebitne spremembe notranje orientacije med snemanjem. Fotografiral sem z naslednjimi nastavitvami fotoaparata:

goriščna razdalja:	minimalna
zaslonsko število:	7.1
čas zaklopa:	1/125s
občutljivost tipala (ISO):	avtomatska

Za nadaljnjo obdelavo sem izbral tri različne rezultate kalibracije. V prvem primeru sem uporabil rezultate pridobljene na podlagi posnetkov testnega polja narejenih pred snemanjem. V drugem primeru sem uporabil posnetke narejene po snemanju. Za primerjavo sem uporabil še rezultate kalibracije narejene na podlagi treh posnetkov.

Ves nadaljnji postopek izvedenja (glej poglavje 3.4.3) sem tako izvedel trikrat, s tremi različnimi vrednostmi notranje orientacije. Pri tem sem opazoval rezultate absolutne orientacije, končni rezultat pa so bile izmerjene koordinate kontrolnih točk, ki sem jih primerjal z vrednostmi dobljenimi z geodetskimi meritvami. Na podlagi odstopanj končnih rezultatov ter razlik med vhodnimi podatki (notranjo orientacijo) sem lahko sklepal o vplivih sprememb notranje orientacije na rezultat.

4 REZULTATI IN ANALIZA

4.1 1. DEL

V prvem delu sem pridobil štiri sklope rezultatov. Pri minimalni ter srednji goriščni razdalji sem opravil dve zaporedni seriji osmih posnetkov. Vse štiri serije sem obdelal na enak način oziroma uporabil iste kombinacije posnetkov (glej poglavje 3.5) za kalibracijo. Rezultati posameznih serij se v absolutnih vrednostih med seboj seveda razlikujejo, vendar v vsaki seriji pridemo do enakih glavnih ugotovitev. Podrobneje bom zato predstavil zgolj rezultate prve serije posnetkov pri minimalni goriščni razdalji, rezultati ostalih serij so podani v prilogi.

Rezultate kalibracij posameznih kombinacij posnetkov sem primerjal z rezultati pridobljenimi na osnovi vseh osmih posnetkov. Največja odstopanja se pokažejo pri rezultatih, ki so pridobljeni na osnovi treh posnetkov. Rezultati na osnovi treh posnetkov se najbolj razlikujejo tudi, če primerjamo iste kombinacije posnetkov v različnih serijah. Trije posnetki testnega polja zato ne morejo zanesljivo zagotoviti ustreznih rezultatov. Če iščemo kombinacijo posnetkov, kjer s čim manj posnetki dobimo najboljše rezultate, je to v vseh primerih kombinacija štirih posnetkov 0404. V tej kombinaciji so posnetki razporejeni simetrično okrog testnega polja, narejeni pa so iz smeri vogalov testnega polja. Zanimiva je primerjava s kombinacijo 0403, kjer so posnetki prav tako razporejeni simetrično, vendar so narejeni iz smeri stranic testnega polja. V tem primeru se rezultati dokaj razlikujejo glede na rezultate kombinacije 0801. To kaže na dejstvo, da na končni rezultat najbolj vplivajo posnetki 5,6,7,8 (glej sliko 25). Glede na rezultate kombinacije 0404 in dejstvo, da so uporabljeni posnetki 5,6,7,8 razporejeni simetrično okrog testnega polja, lahko sklepamo, da je za dober rezultat potrebna simetrija posnetkov, kar s tremi posnetki težko dosežemo, zato v primeru treh posnetkov rezultati tudi najbolj odstopajo. Zanimivi so rezultati kombinacije 0302, kjer so vsi posnetki narejeni z ene strani testnega polja (iz pozitivne smeri x osi). Položaj glavne točke se v tem primeru znatno premakne ravno v tej smeri (zmanjša se vrednost x_0). Podobno se zgodi v primeru kombinacije 0305 v smeri y osi. Odstopanja rezultatov so značilna predvsem za vrednost goriščne razdalje ter položaj glavne točke. Vrednost faktorja nepravokotnosti koordinatnih osi se z različnimi kombinacijami posnetkov tudi spreminja, vendar kot γ tudi če

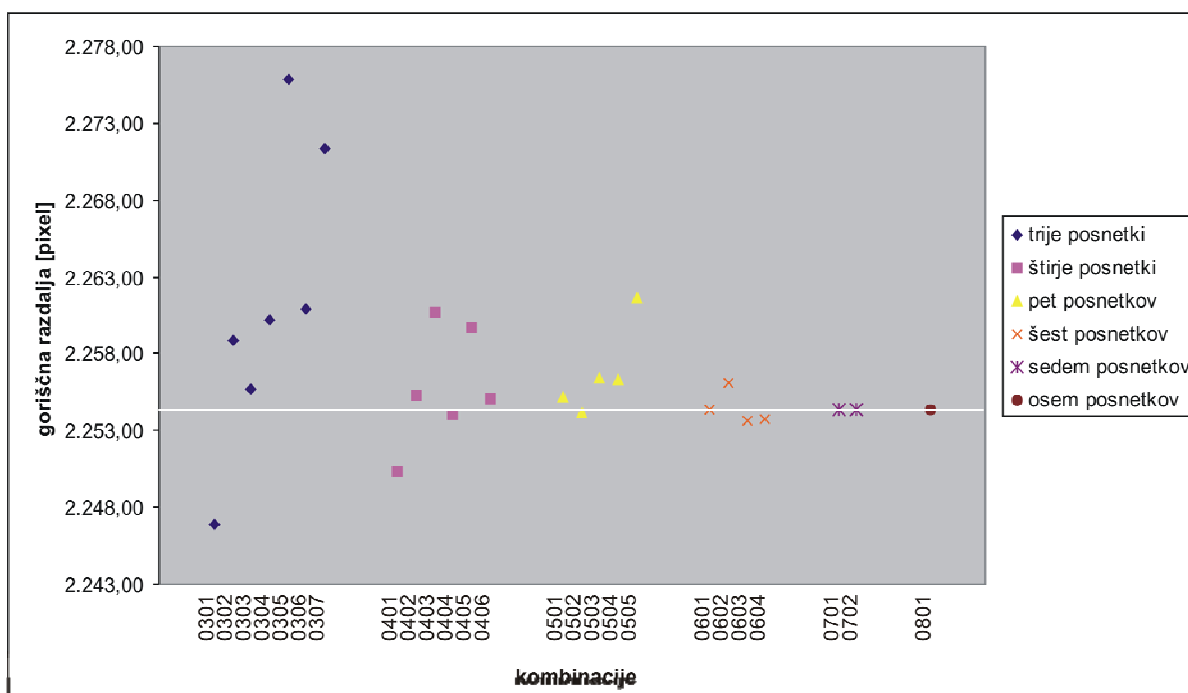
ga izračunamo (enačba 18) z vrednostjo s , ki najbolj odstopa, znaša 89.99° , kar praktično pomeni, da sta koordinatni osi pravokotni. Odstopanja koeficientov polinoma simetrične radialne distorzije pa so v vseh kombinacijah posnetkov minimalna.

Preglednica 2: Rezultati za različne kombinacije posnetkov (enota: piksel) (f_{\min} , 1.serija)

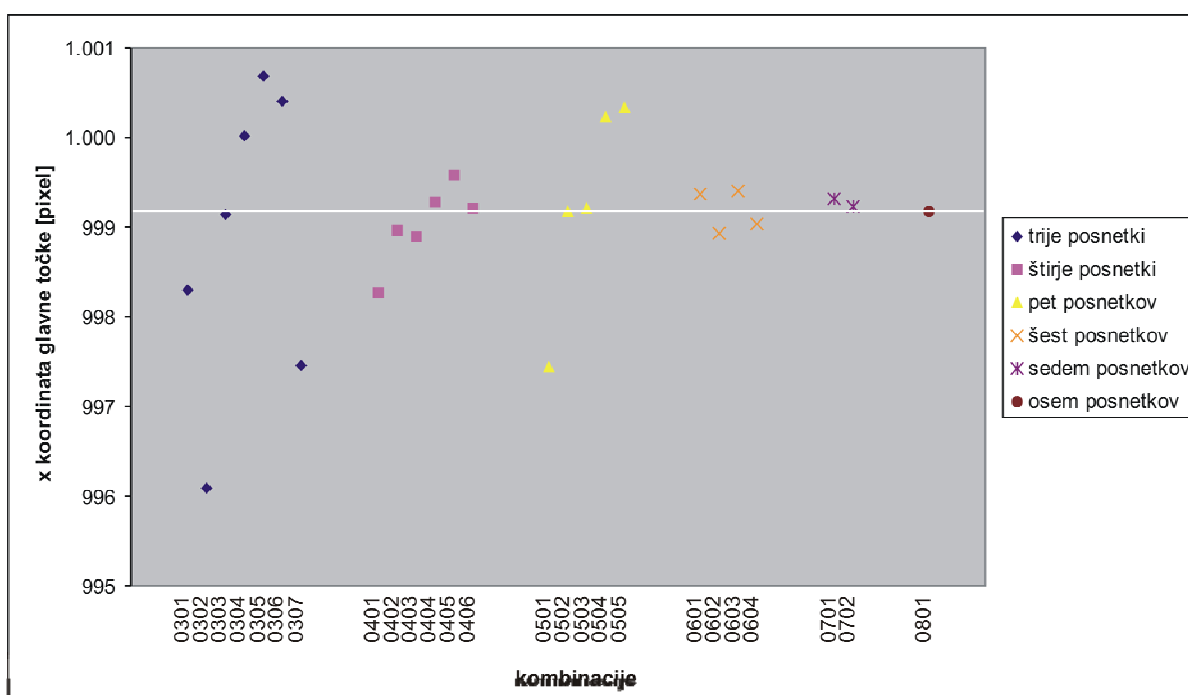
kombinacija	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
0301	2246,50	2247,28	998,29	1487,43	0,46	-0,190	0,142	0,36
0302	2258,25	2259,38	996,09	1487,28	0,31	-0,192	0,145	0,35
0303	2255,34	2256,11	999,14	1487,96	0,23	-0,191	0,143	0,37
0304	2259,72	2260,64	1000,02	1486,68	0,11	-0,192	0,145	0,41
0305	2275,56	2276,18	1000,69	1480,38	0,69	-0,193	0,145	0,40
0306	2260,57	2261,35	1000,41	1488,03	0,35	-0,192	0,145	0,36
0307	2270,89	2271,81	997,46	1486,19	0,31	-0,194	0,147	0,34
0401	2249,92	2250,81	998,27	1487,41	0,41	-0,190	0,142	0,36
0402	2254,95	2255,71	998,97	1487,72	0,26	-0,191	0,144	0,36
0403	2260,30	2261,12	998,90	1486,72	0,39	-0,192	0,144	0,35
0404	2253,65	2254,54	999,29	1486,55	0,33	-0,191	0,143	0,41
0405	2259,29	2260,08	999,58	1484,41	0,45	-0,191	0,143	0,39
0406	2254,61	2255,46	999,20	1487,26	0,21	-0,192	0,145	0,36
0501	2254,70	2255,62	997,44	1486,87	0,32	-0,191	0,143	0,35
0502	2253,68	2254,59	999,18	1486,57	0,31	-0,190	0,142	0,40
0503	2256,00	2256,80	999,22	1487,73	0,30	-0,192	0,144	0,36
0504	2255,88	2256,78	1000,23	1486,88	0,33	-0,191	0,142	0,40
0505	2261,25	2262,09	1000,33	1485,60	0,39	-0,192	0,144	0,38
0601	2253,91	2254,80	999,38	1486,65	0,37	-0,191	0,142	0,39
0602	2255,67	2256,50	998,93	1486,66	0,43	-0,191	0,143	0,36
0603	2253,18	2254,06	999,41	1486,65	0,35	-0,191	0,142	0,38
0604	2253,32	2254,16	999,03	1486,42	0,34	-0,191	0,142	0,39
0701	2253,92	2254,79	999,31	1486,58	0,38	-0,190	0,142	0,39
0702	2253,91	2254,78	999,23	1486,62	0,36	-0,191	0,143	0,38
0801	2253,88	2254,74	999,17	1486,57	0,36	-0,191	0,142	0,38

Preglednica 3: Odstopanja nekaterih značilnih kombinacij glede na 0801 (enota: piksel)

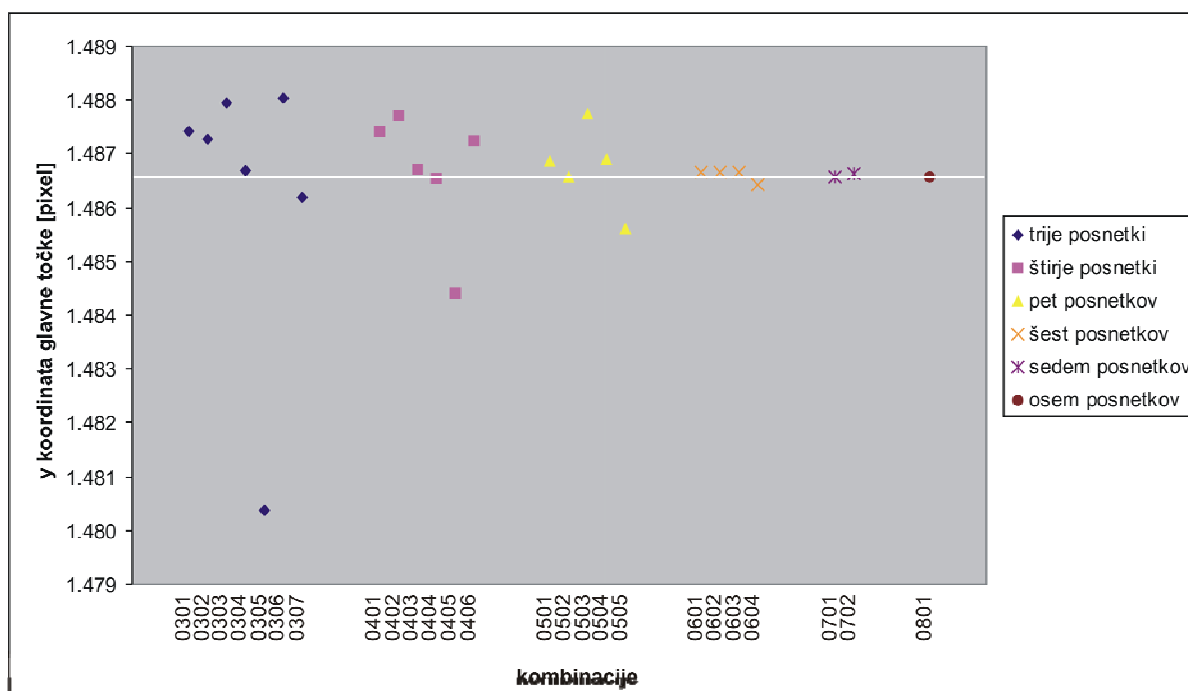
kombinacija	$\Delta \alpha_x$	$\Delta \alpha_y$	Δx_0	Δy_0
0302	-4,37	-4,64	3,08	-0,71
0305	-21,68	-21,44	-1,51	6,19
0403	-6,42	-6,38	0,27	-0,15
0404	0,23	0,20	-0,11	0,02
0603	-1,79	-1,76	0,25	-0,09



Slika 34: Prikaz odstopanj goriščne razdalje (srednja vrednost) za posamezne kombinacije



Slika 35: Prikaz odstopanj x koordinate glavne točke za posamezne kombinacije



Slika 36: Prikaz odstopanj y koordinate glavne točke za posamezne kombinacije

Glavna ugotovitev prvega dela naloge je dejstvo, da za zanesljivo določitev parametrov notranje orientacije z uporabljeno metodo zadostujejo štiri posnetki testnega polja, ki pa morajo biti narejeni iz smeri vogalov testnega polja - kombinacija 0404 (posnetki 5,6,7,8; glej sliko 25). Takšna kombinacija posnetkov da rezultate, ki so najbolj podobni rezultatom kalibracije z osmimi uporabljenimi posnetki.

4.1.1 Centralni posnetek

V prvem delu sem dodatno ugotavljal tudi vpliv centralnega posnetka na rezultate kalibracije. Ugotovimo lahko, da centralni posnetek praktično ne vpliva na rezultat. Če primerjamo rezultate na podlagi kombinacije 90401 (štiri posnetki) ter kombinacije 90501 (pet posnetkov) vidimo, da centralni posnetek rezultata ne "popravi" bistveno glede na rezultat kombinacije 90801 (osem posnetkov). Prav tako ni praktično nobene razlike med kombinacijama 90801 (osem posnetkov) ter 90901 (devet posnetkov). Test sem izvedel pri minimalni ter srednji vrednosti goriščne razdalje. V nadaljevanju podajam rezultate pridobljene pri minimalni goriščnici. Ostali rezultati so podani v prilogi.

Preglednica 4: Rezultati kalibracije pri uporabi devetega posnetka (enota: piksel) (f_{\min})

kombinacija	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
90401	2252,53	2253,20	997,89	1486,38	0,54	-0,192	0,142	0,42
90401	2246,38	2247,06	998,45	1486,84	0,33	-0,191	0,142	0,41
90501	2252,26	2252,95	998,03	1486,01	0,52	-0,192	0,142	0,40
90502	2246,15	2246,85	998,53	1486,48	0,37	-0,191	0,141	0,41
90503	2246,59	2247,30	998,29	1486,68	0,29	-0,191	0,141	0,42
90504	2249,31	2249,93	998,86	1485,58	0,49	-0,191	0,140	0,43
90801	2246,66	2247,35	998,31	1486,61	0,44	-0,191	0,141	0,42
90901	2246,64	2247,34	998,36	1486,44	0,44	-0,191	0,141	0,41

4.2 2. DEL

V drugem delu sem prav tako pridobil štiri serije posnetkov. Rezultati v nobeni od serij niso potrdili predvidevanj o spremembi vrednosti elementov notranje orientacije, ki sem jih navedel v poglavju 3.6. Praktično se rezultati med posameznimi kalibracijami razlikujejo največ za približno 4 piksele pri vrednosti goriščne razdalje ter približno 2 piksla pri položaju glavne točke. Na podlagi teh rezultatov (preglednica 5) bi lahko trdili, da se notranja orientacija časovno ter na podlagi različnih zunanjih vplivov ne spreminja oziroma je stabilna. V tretjem delu naloge sem sicer pri terenskem snemanju ugotovil večja odstopanja vrednosti elementov notranje orientacije, predvsem vrednosti goriščne razdalje (približno 13 pikslov (preglednica 6)), vendar se je izkazalo, da tudi takšne (večje) vrednosti odstopanj bistveno ne vplivajo na natančnost rezultatov (preglednica 8).

Preglednica 5: Rezultati kalibracij v časovnih presledkih (enota: piksel) (f_{\min} , 1. serija)

	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
1. kalibracija	2269,34	2270,23	997,52	1486,90	0,11	-0,188	0,144	0,41
2. kalibracija	2270,72	2271,66	998,46	1487,10	0,13	-0,189	0,144	0,42
3. kalibracija	2273,60	2274,52	998,11	1487,33	0,24	-0,189	0,144	0,43
4. kalibracija	2272,26	2273,00	997,79	1486,91	0,25	-0,188	0,143	0,43
5. kalibracija	2271,96	2272,80	998,45	1487,45	0,19	-0,188	0,144	0,44

Ostali rezultati so podani v prilogi.

4.3 3. DEL

4.3.1 Določitev koordinat oslonilnih ter kontrolnih točk

Meritve sem opravljal z elektronskim tahimetrom:

Leica 605 L št. 1, FGG

deklarirana natančnost: merjenje kotov V/Hz : 5"

merjenje dolžin: 3mm+/-3ppm

Pri merjenju dolžin sem zaradi uporabe retro tarč moral upoštevati adicijsko konstanto, ki znaša +34,4 mm. Poševno razdaljo sem pretvoril v horizontalno z uporabo merjene zenitne razdalje. Ostalih redukcij zaradi kratkih dolžin (maks. dolžina je 15.93m) nisem izvajal.

Pridobljene rezultate girusne metode sem pripravil za izravnavo s programoma RamWin (avtorja: Tomaž Ambrožič & Goran Turk, ver. 4.0, Dec. 2002) ter WimWin (avtorja: Tomaž Ambrožič & Goran Turk, ver. 4.0, Dec. 2002). Opazovanja sem izravnaval lokalno oziroma kot prosto mrežo. Srednji pogrešek izravnanih vrednosti koordinat je znašal 1mm oziroma manj. Izhodni datoteki programov RamWin ter WimWin, ki vsebujeta pregled opazovanj ter rezultate izravnave, sta podani v prilogi. Ker je fotogrametrična postaja v osnovi namenjena aerofotogrametriji, sem moral koordinatni sistem ustrezno transformirati:

$$X = X; \quad Y = Z; \quad Z = -Y$$

4.3.2 Kalibracija fotoaparata

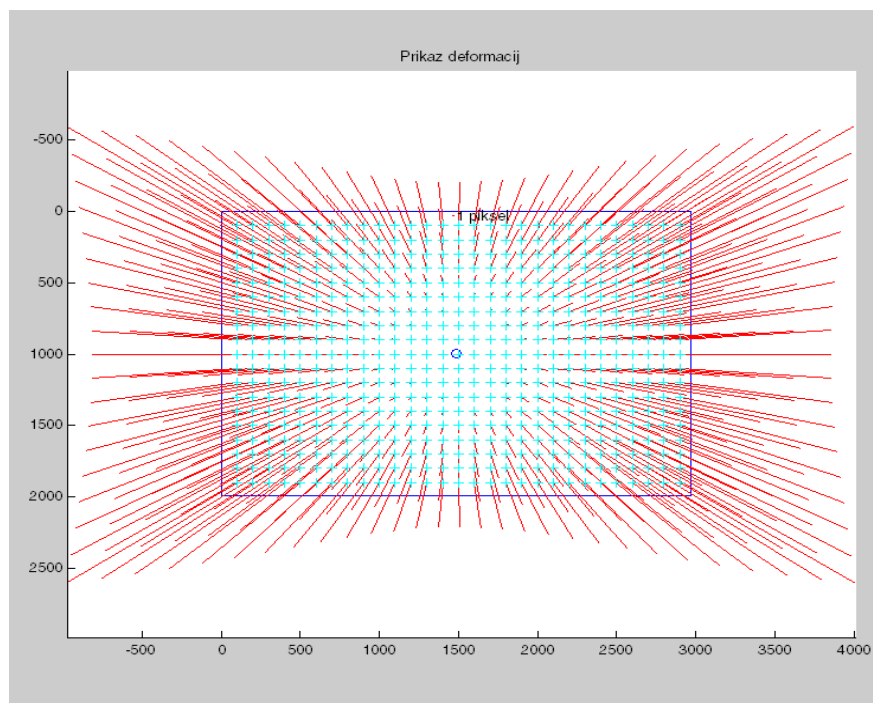
Fotoaparat sem najprej kalibriral (osem posnetkov) pred snemanjem objekta, nato pa še enkrat po snemanju. Za primerjavo sem uporabil tudi kalibracijo s tremi posnetki (uporabil sem kombinacijo 0307). Dobil sem naslednje rezultate:

Preglednica 6: Rezultati kalibracij uporabljenih za izvrednotenje stereopara (enota: piksel)

kalibracija	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
pred snemanjem	2345.21	2346.09	996.41	1484.84	0.31	-0.180	0.152	0.36
po snemanju	2358.40	2359.03	994.49	1485.32	0.26	-0.181	0.155	0.48
s tremi posnetki	2395.95	2397.53	985.17	1483.10	-0.05	-0.185	0.162	0.48

Kot vidimo je med kalibracijama pred in po snemanju prišlo do razlike, predvsem pri vrednosti goriščne razdalje. Kot je že omenjeno v poglavju 4.2 so ta odstopanja večja kot pri testiranju časovne stabilnosti notranje orientacije v omenjenem poglavju (preglednica 5). Pri terenskem delu tako nikoli ne moremo z gotovostjo trditi, da je notranja orientacija fotoaparata stabilna. Glede na praktično neomejeno število posnetkov, ki jih lahko naredimo z digitalnim fotoaparatom ni odveč, če med terenskim delom fotoaparata večkrat kalibriramo (na primer pred vsakim sklopom posnetkov objekta). Postopek digitalne obdelave (merjenja slikovnih koordinat) posnetkov, nam omogoča hitro pridobitev rezultatov kalibracije. Tako imamo v primeru sprememb notranje orientacije na voljo ustrezne parametre notranje orientacije za nadaljnjo obdelavo oziroma v nasprotnem primeru vemo, da je bila notranja orientacija stabilna.

Rezultate vsake od gornjih kalibracij sem uporabil za nadaljnjo obdelavo posnetkov. Posnetka sem najprej prevzorčil oziroma odstranil vpliv simetrične radialne distorzije. Ker sem slikal pri minimalni goriščni razdalji, je bila simetrična radialna distorzija velika oziroma je prišlo pri prevzorčenju do precej velikih premikov pikslov.



Slika 37: Prikaz simetrične radialne distorzije fotoaparata Nikon D70 (f_{\min})

4.3.3 Orientacije stereopara

Sledila je orientacija stereopara. Vhodni podatki so: prevzorčeni podobi ter vrednost goriščne razdalje in koordinate glavne točke. Podatke podajamo v pikslih. Prva je relativna orientacija z merjenjem detajlnih točk, nato sledi absolutna orientacija z merjenjem oslonilnih točk (glej poglavje 3.4.3). Podprogram digitalne fotogrametrične postaje, namenjen stereo orientacijam, v katerem sem opravljal meritve, nam na koncu izpiše datoteko z rezultati posamezne faze orientacije stereopara. Natančnost relativne orientacije je podana na podlagi odstopanj detajlnih točk v smeri y koordinatne osi ("ostanek" y paralakse). V vseh treh primerih znaša standardni srednji pogrešek manj kot 0.3 piksla. V preglednici 7 podajam natančnost absolutne orientacije, ki je podana kot odstopanje oslonilnih točk orientiranega stereomodela glede na podane (prave) koordinate oslonilnih točk. Celotne izhodne datoteke so podane v prilogi.

Preglednica 7: Natančnost absolutne orientacije

kalibracija	σ_x	σ_y	σ_z
pred snemanjem	0.008m	0.005m	0.010m
po snemanju	0.005m	0.005m	0.006m
s tremi posnetki	0.010m	0.009m	0.010m

4.3.4 Primerjava rezultatov meritev na kontrolnih točkah

Koordinate kontrolnih točk, izmerjene na digitalni fotogrametrični postaji, sem, za vsako uporabljeno kalibracijo posebej, primerjal s koordinatami pridobljenimi z geodetskimi meritvami, ki sem jih privzel za dane. V preglednici 8 lahko opazimo večja odstopanja pri koordinatah Z, ki predstavljajo oddaljenost od objekta snemanja. Posebej izstopata točki, ki sta najbolj oddaljeni oziroma imata najmanjši Z koordinati. Možen vzrok za to je dejstvo, da točke, ki sem jih uporabil za absolutno orientacijo niso dovolj prostorsko razpršene prav v smeri Z osi, kar lahko privede do napak v rezultatih absolutne orientacije. Drugi vzrok večjih odstopanj je dejstvo, da se žarki pri bolj oddaljenih točkah sekajo pod ostrejšim kotom, kar posledično pomeni manj natančno opredelitev točke preseka žarkov. Primerjava rezultatov

dobljenih s kalibracijo pred in po snemanju pokaže, da med vrednostmi elementov notranje orientacije praktično ni izstopajočih razlik. To pomeni, da odstopanja notranje orientacije, ki so v rangu odstopanj teh dveh kalibracij (preglednica 6), ne vplivajo na natančnost končnega rezultata. Pri rezultatih kalibracije s tremi posnetki vidimo, da so odstopanja v smeri osi X primerljiva z ostalimi rezultati, odstopanja v smeri osi Y so večja (posledica večjega odstopanja koordinate glavne točke v smeri osi x slikovnega koordinatnega sistema (vrednost x_0 v preglednici 6) - smer osi x slikovnega koordinatnega sistema se približno ujema z smerjo osi Y prostorskega koordinatnega sistema) prav tako so večja odstopanja v smeri osi Z.

Srednje pogreške koordinatnih odstopanj sem izračunal z enačbami:

$$RMS_x = \sqrt{\frac{\sum dX^2}{n}} \quad RMS_y = \sqrt{\frac{\sum dY^2}{n}} \quad RMS_z = \sqrt{\frac{\sum dZ^2}{n}} \quad (25)$$

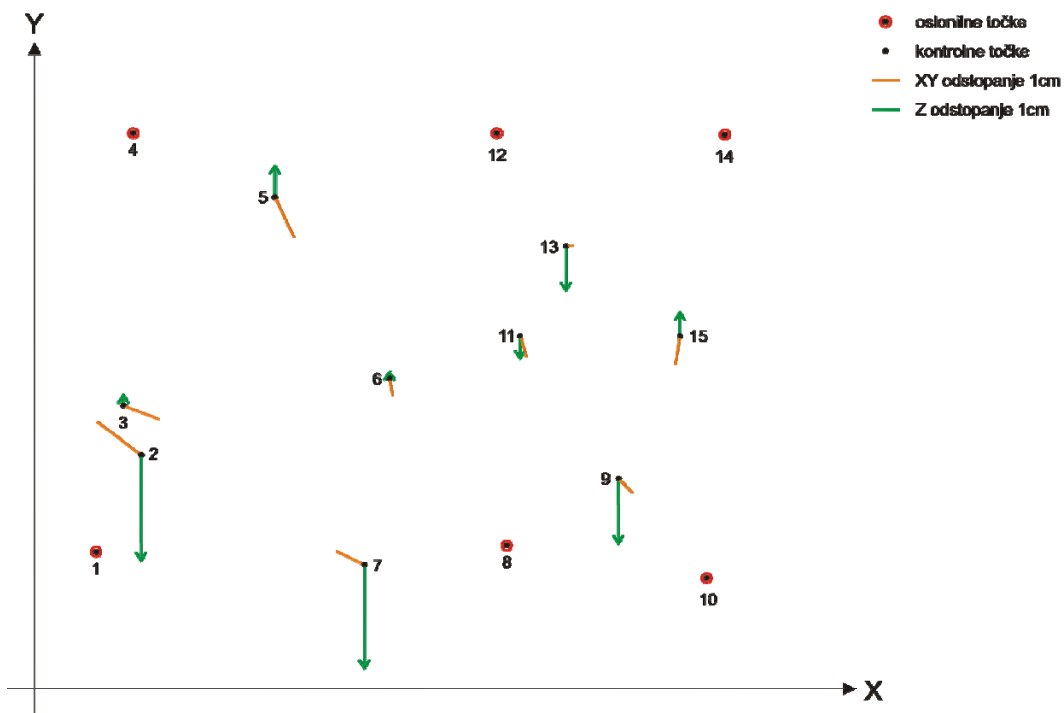
kjer so dX , dY , dZ koordinatne razlike fotogrametrično določenih točk glede na koordinate določene z geodetskimi meritvami, n pa število kontrolnih točk.

Preglednica 8: Primerjava natančnosti izmerjenih kontrolnih točk

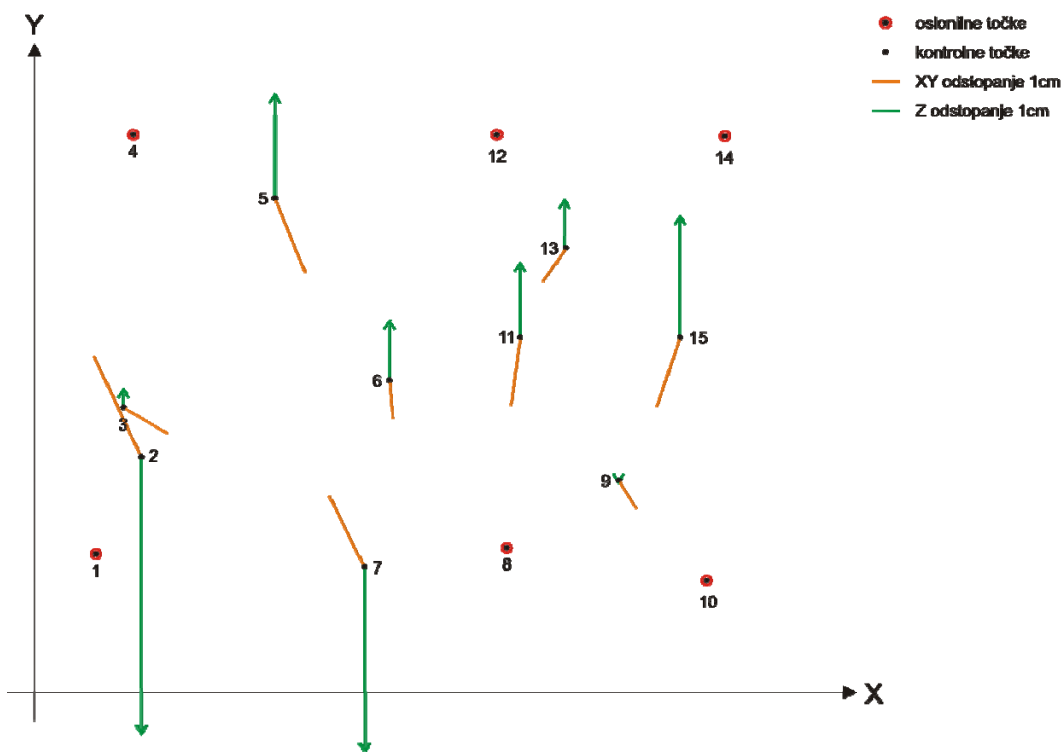
kalibracija	RMS _x	RMS _y	RMS _z
pred snemanjem	0.9cm	1.0cm	2.5cm
po snemanju	1.1cm	1.4cm	2.3cm
s tremi posnetki	1.0cm	2.2cm	4.5cm

Seznam koordinat ter odstopanja za posamezno točko so podana v prilogi.

Rezultate meritev na kontrolnih točkah (odstopanja) sem tudi grafično predstavil. Slika 38 prikazuje odstopanja na kontrolnih točkah v primeru uporabe kalibracije pred snemanjem. Na sliki 39 so predstavljene posledice uporabe manj natančne kalibracije (kalibracija s tremi posnetki), ki se odražajo v večjih vrednostih odstopanj.



Slika 38: Grafični prikaz odstopanj na kontrolnih točkah (kalibracija pred snemanjem)



Slika 39: Grafični prikaz odstopanj na kontrolnih točkah (kalibracija s tremi posnetki)

4.4 Napotki za kalibracijo digitalnega fotoaparata.

Glede na rezultate testov v nalogi lahko podam nekatera priporočila za optimalno izvajanje kalibracije ter priporočila o kalibracijah med terenskim snemanjem.

Za zanesljivo določitev elementov notranje orientacije pri uporabljeni metodi povsem zadostujejo štirje posnetki testnega polja, ki pa morajo biti narejeni iz vogalov testnega polja (iz smeri 5, 6, 7, 8 na sliki 25). Rezultati s tako kombinacijo posnetkov se praktično ne razlikujejo od rezultatov pridobljenih na osnovi več (simetrično razporejenih) posnetkov. Pri fotografiranju testnega polja pazimo, da je posnetek čimbolj zapolnjen s testnim poljem, da je spodnja stran testnega polja vedno na spodnji strani posnetka ter da so posnetki čimbolj simetrično razporejeni oziroma (simetrično) enaki.

Za fotogrametrične naloge, kjer zahtevana natančnost končnih rezultatov ni večja od nekaj centimetrov, zadostuje kalibracija, ki jo opravimo pred snemanjem. Manjše spremembe vrednosti parametrov notranje orientacije praktično ne vplivajo na rezultat. Pri tem pa moramo paziti, da s fotoaparatom ravnamo previdno in ga ne izpostavljammo zunanjim vplivom, ki bi lahko kakorkoli vplivali na notranjo geometrijo fotoaparata. Ker nam programski paketi, ki temeljijo na samodejnem merjenju na podobah, omogočajo hiter izračun notranje orientacije in ker pri digitalnih fotoaparatih danes nismo več omejeni s številom posnetkov, je priporočljivo kalibracijo izvajati tudi med snemanjem. Tako imamo kasneje pregled nad vrednostmi notranje orientacije fotoaparata in lahko ob morebitnih večjih odstopanjih uporabimo ustrezne rezultate. Pri fotoaparatih večje ločljivosti, ki omogočajo natančnejše meritve točk oziroma natančnejšo orientacijo stereomodela, pa je potrebno tudi manjšim spremembam notranje orientacije posvetiti ustrezno večjo pozornost.

5 ZAKLJUČEK

Fotogrametrične metode nam omogočajo pridobivanje prostorskih koordinat točk objekta na podlagi merjenja na sliki, ki nastane kot posledica preslikave objekta skozi fotografski objektiv na svetlobno občutljiv medij. V digitalnih fotoaparatih je ta medij elektronsko svetlobno tipalo, ki ga sestavlja mreža svetlobno občutljivih fotoelementov. To nam omogoča pridobitev vrednosti posamezne točke podobe - piksla v digitalni obliki, ki omogoča takojšnje pridobitev podobe in njeno avtomatizirano obdelavo. V fotogrametriji ostajajo profesionalni digitalni fotoaparati namenjeni izključno fotogrametričnim meritvam. Takšni fotoaparati imajo sicer veliko geometrično ločljivost, visoka pa je tudi njihova cena. Z razvojem digitalne tehnologije pa so na razpolago vedno bolj zmogljivi in kakovostni amaterski digitalni fotoaparati. Takšni fotoaparati nimajo znanih parametrov notranje orientacije (nemetrični fotoaparati), ki so nujno potrebni za uporabo fotoaparata v fotogrametrične namene. Te parametre lahko dobimo s postopkom kalibracije fotoaparata na podlagi ravninskega testnega polja, ki je ena izmed metod kalibracije.

Namen naloge je bil s pomočjo omenjene metode, ki jo vsebuje programski paket Modifoto, testirati stabilnost parametrov notranje orientacije nemetričnega fotoaparata. Testirani digitalni fotoaparati Nikon D70 sicer ni med najzmogljivejšimi na trgu, je pa povsem primeren za nekatere fotogrametrične naloge, kjer ni zahtevana visoka natančnost. Najprej sem moral ugotoviti, koliko posnetkov testnega polja je potrebno narediti za zanesljivo določitev notranje orientacije. Ugotovitve kažejo, da s tremi posnetki parametrov notranje orientacije ne moremo zanesljivo določiti. Za zanesljiv izračun zadostujejo štiri posnetki, s katerimi lahko glede na pravokotno obliko testnega polja zagotovimo ustrezno simetrijo posnetkov. Pri testiranju časovne stabilnosti notranje orientacije sem ugotovil minimalne spremembe v času (npr. do 5 pikslov pri vrednosti goriščne razdalje; pri približni velikosti piksla $7,8\mu\text{m}$ (Nikon, 2007) je to $0,04\text{mm}$). Pri kasnejših terenskih meritvah so bila odstopanja sicer nekoliko večja, vendar niso bistveno vplivala na končni rezultat. Pri terenskih meritvah oziroma izrednotenju stereopara sem pri manjših odstopanjih med rezultati kalibracije pred in po snemanju dosegel praktično isto natančnost izmerjenih koordinat kontrolnih točk. Pri kalibraciji narejeni z manj kot štirimi posnetki, kjer so bila odstopanja večja (do 40 pikslov pri

vrednosti goriščne razdalje oziroma do 10 pikslov pri položaju glavne točke), pa je tudi natančnost izmerjenih kontrolnih točk izrazito manjša.

Pri nadaljnjih raziskavah bi bilo zanimivo z uporabljenno metodo kalibracije kalibrirati profesionalen fotogrametrični fotoaparatus zanesljivo znano notranjo orientacijo in primerjati dobljene rezultate. Sam sem kot osnovo za primerjavo rezultatov uporabil kalibracijo na osnovi osmih posnetkov testnega polja. Načeloma ne moremo trditi, da je ta rezultat absolutno najbolj pravilen.

Pri pazljivem ravnanju s fotoaparatom ter upoštevanju priporočil za kalibracijo so torej spremembe notranje orientacije med terenskim snemanjem zanemarljive. Končna natančnost, ki sem jo dosegel pri terenskih meritvah znaša 1-2cm in je zadostna za potrebe na primer v arhitekturni fotogrametriji.

VIRI

Al-Ajlouni, S.S., Fraser, C.S. 2006. Zoom-dependent calibration for consumer grade-cameras. ISPRS Commission V: Symposium 'Image engineering and vision metrology', Dresden 25-27 September 2006. IAPRS Volume XXXVI, Part 5.

http://www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/AL-A_607.pdf (18.05.2007)

Bergtholdt, M. 2002. Auto-calibration with convex constraints. Diploma thesis. Mannheim, University of Mannheim.

<http://www.cvgpr.uni-mannheim.de/mberg/cv03/thesis.pdf> (26.07.2007)

Bockaert, V. 2007. The New Foveon Sensors. Digital photography Review, Sensors

http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Camera_System/sensors_01.htm (20.06.2007)

Bric, V., Griggillo, D., Kosmatin-Fras, M. Programska zasnova in priprava gradiv za izvedbo strokovnega dela izpita iz geodetske stroke. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije, Matična sekcija geodetov.

http://www.izs.si/fileadmin/dokumenti/strokovni_izpiti/msgeo/Fotogrametrija.pdf (1.8.2007)

Ciceli, T. 2007. Kalibracija digitalne kamere FUJI FinePIX S2. Geodetski list, 61, 1: 41-59.

Clarke, T.A., Fryer, J.F. 1998. The development of camera calibration methods and models. Photogrammetric record, 16,19: pp 51-66

http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/papers/DevelopmentCameraCalibrationMethodsModels.pdf (26.07.2007)

Curtin, D.P. 2007. Short courses, Curtin's Guide to Digital Cameras And Other Photographic Equipment, Image Sensors—Types.

<http://www.shortcourses.com/guide/guide2-8.html> (20.06.2007)

DeMenthon, D. 2000. Camera calibration. Computer Vision Course, Lecture 9.

<http://www.umiacs.umd.edu/~ramani/cmsc828d/lecture9.pdf> (26.07.2007)

Digital microscopy primer. 2007. Digital imaging in optical microscopy. Spletna stran.

<http://microscopy.fsu.edu/primer/digitalimaging/index.html> (20.06.2007)

Dobričič, L., Kosmatin Fras, M. 2006. Izdelava metričnih modelov stavb z nizkocenovnim orodjem. Geodetski vestnik, 50, 1: 25-36.

Dörstel, C., Jacobsen, K., Stallmann, D. 2003. DMC-Photogrammetric Accuracy, Calibration Aspects and Generation of Synthetic DMC Images, in: Grün A., Kahmen H. (Eds.), Optical 3D Measurement Techniques VI, Vol. I, Institute for Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, 74-82.

<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2003/paper/Jac0903zuerich.pdf>
(25.6.2007)

Faugeras, O.D., Luong, Q.T., Maybank, S.J. 1992. Camera self-calibration: Theory and experiments. European Conference on Computer Vision.
<http://cobnitz.codeen.org:3125/citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/2289/http:zSzzSzwww.ai.sri.comzSz~luongzSzresearchzSzpublicationszSzeccv92.pdf/faugeras92camera.pdf>
(25.06.2007)

Foveon, Inc. 2007. Direct Image Sensors.
<http://www.foveon.com/article.php?a=67> (20.06.2007)

Grigilo, D. 2003. Uporaba digitalnih fotoaparatorov v enoslikovni arhitekturni fotogrametriji. Magistrska naloga. Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.

Gorjup, Z. 2001. Temelji fotogrametrije in postopki izrednotenja. Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Heikkilä, J., Silven, O. 1997. A four step camera calibration procedure with implicit image correction. Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oslo.
http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/papers/heikkila97.pdf (05.06.2007)

Kraus, K. 1993. Photogrammetry, Volume 1, Fundamentals and standard processes. Bonn, Ferd. Dümmlers Verlag.

Kraus, K. 1997. Photogrammetry, Volume 2, Advanced methods and applications. Bonn, Ferd. Dümmlers Verlag.

Matsuoka, R., Sudo, N., Yokotsuka, H., Sone, M. 2006. Experiment on precision of camera calibration of non metric digital cameras. ISPRS Commission V Symposium 'Image engineering and vision metrology', Dresden 25-27 September 2006, IAPRS Volume XXXVI, Part 5.
http://www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/MATS_636.pdf (18.05.2007)

Matsuoka, R., Sudo, N., Yokotsuka, H., Sone, M. 2006. Experiment on parameter selection of image distortion model. ISPRS Commission V Symposium 'Image engineering and vision metrology', Dresden 25-27 September 2006, IAPRS Volume XXXVI, Part 5.
http://www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/MATS_635.pdf (18.05.2007)

Meng, X., Li, H., Hu, Z. 2000. A new easy camera calibration technique based on circular points.
<http://www.bmva.ac.uk/bmvc/2000/papers/p50.pdf> (26.07.2007)

Nikon Corporation. 2007. Nikon D70, AF-S DX Zoom-Nikkor. Technical Specifications.
http://nikonimaging.com/global/products/lens/af/dx/af-s_dx_zoom18-70mmf_35-45g_if/
(1.8.2007)
<http://nikonimaging.com/global/products/digitalcamera/slr/d70/> (1.8.2007)

Pucelj, B. 2004. Kalibracija digitalnega fotoaparata visoke ločljivosti in analiza uporabnosti za fotogrametrične namene. Diplomsko naloga. Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Remondino, F., Fraser, C. 2006. Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. ISPRS Commission V Symposium 'Image engineering and vision metrology', Dresden 25-27 September 2006, IAPRS Volume XXXVI, Part 5.
http://www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/REMO_616.pdf (18.05.2007)

Shortis, M.R., Bellman, C.J., Robson, S., Johnston, I., Johnson, G.W. 2006. Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. ISPRS Commission V Symposium 'Image engineering and vision metrology', Dresden 25-27 September 2006, IAPRS Volume XXXVI, Part 5.
http://www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/SHOR_617.pdf (18.05.2007)

Tsai, R.Y. 1987. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. IEEE journal of robotics and automation, vol. Ra-3, no. 4.
www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/papers/Tsai.pdf (05.06.2007)

Zhang, Z. 1998. A flexible new technique for camera calibration - Technical report. Redmond, Microsoft research, Microsoft corporation.
<http://research.microsoft.com/~zhang/Papers/TR98-71.pdf> (05.06.2007)

PRILOGE

Priloga A: Rezultati kalibracij za različne kombinacije posnetkov

1. serija, f_{\min} (enota: piksel)

kombinacija	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
0301	2246,50	2247,28	998,29	1487,43	0,46	-0,190	0,142	0,36
0302	2258,25	2259,38	996,09	1487,28	0,31	-0,192	0,145	0,35
0303	2255,34	2256,11	999,14	1487,96	0,23	-0,191	0,143	0,37
0304	2259,72	2260,64	1000,02	1486,68	0,11	-0,192	0,145	0,41
0305	2275,56	2276,18	1000,69	1480,38	0,69	-0,193	0,145	0,40
0306	2260,57	2261,35	1000,41	1488,03	0,35	-0,192	0,145	0,36
0307	2270,89	2271,81	997,46	1486,19	0,31	-0,194	0,147	0,34
0401	2249,92	2250,81	998,27	1487,41	0,41	-0,190	0,142	0,36
0402	2254,95	2255,71	998,97	1487,72	0,26	-0,191	0,144	0,36
0403	2260,30	2261,12	998,90	1486,72	0,39	-0,192	0,144	0,35
0404	2253,65	2254,54	999,29	1486,55	0,33	-0,191	0,143	0,41
0405	2259,29	2260,08	999,58	1484,41	0,45	-0,191	0,143	0,39
0406	2254,61	2255,46	999,20	1487,26	0,21	-0,192	0,145	0,36
0501	2254,70	2255,62	997,44	1486,87	0,32	-0,191	0,143	0,35
0502	2253,68	2254,59	999,18	1486,57	0,31	-0,190	0,142	0,40
0503	2256,00	2256,80	999,22	1487,73	0,30	-0,192	0,144	0,36
0504	2255,88	2256,78	1000,23	1486,88	0,33	-0,191	0,142	0,40
0505	2261,25	2262,09	1000,33	1485,60	0,39	-0,192	0,144	0,38
0601	2253,91	2254,80	999,38	1486,65	0,37	-0,191	0,142	0,39
0602	2255,67	2256,50	998,93	1486,66	0,43	-0,191	0,143	0,36
0603	2253,18	2254,06	999,41	1486,65	0,35	-0,191	0,142	0,38
0604	2253,32	2254,16	999,03	1486,42	0,34	-0,191	0,142	0,39
0701	2253,92	2254,79	999,31	1486,58	0,38	-0,190	0,142	0,39
0702	2253,91	2254,78	999,23	1486,62	0,36	-0,191	0,143	0,38
0801	2253,88	2254,74	999,17	1486,57	0,36	-0,191	0,142	0,38

2.serija, f_{\min} (enota: piksel)

kombinacija	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
0301	2249,64	2250,43	998,33	1487,52	0,58	-0,189	0,140	0,38
0302	2248,75	2249,48	998,26	1487,10	0,48	-0,190	0,142	0,36
0303	2251,40	2252,24	999,08	1486,93	0,39	-0,190	0,142	0,36
0304	2260,36	2261,39	1000,25	1486,87	0,12	-0,192	0,145	0,37
0305	2269,23	2269,61	1000,92	1480,12	0,77	-0,192	0,143	0,36
0306	2266,07	2267,08	1002,32	1488,52	0,42	-0,192	0,143	0,38
0307	2254,56	2255,41	998,08	1486,01	0,30	-0,191	0,142	0,37
0401	2251,07	2251,90	998,13	1487,53	0,48	-0,190	0,141	0,39
0402	2252,69	2253,55	999,16	1486,86	0,33	-0,191	0,143	0,36
0403	2255,20	2256,04	998,80	1486,84	0,46	-0,190	0,141	0,39
0404	2253,39	2254,26	998,96	1486,62	0,44	-0,191	0,142	0,38
0405	2258,63	2259,44	999,19	1484,89	0,52	-0,191	0,143	0,37
0406	2248,21	2249,09	999,50	1486,33	0,15	-0,190	0,142	0,37
0501	2253,31	2254,14	997,73	1486,38	0,32	-0,191	0,143	0,37
0502	2253,07	2253,93	998,66	1486,69	0,37	-0,191	0,142	0,38
0503	2254,67	2255,46	999,20	1487,96	0,37	-0,191	0,142	0,39
0504	2254,02	2254,96	1000,02	1486,52	0,53	-0,190	0,141	0,38
0505	2256,46	2257,35	999,48	1486,19	0,47	-0,191	0,142	0,39
0601	2252,83	2253,69	998,95	1486,91	0,47	-0,190	0,141	0,39
0602	2254,51	2255,33	998,89	1486,80	0,49	-0,190	0,141	0,38
0603	2253,98	2254,87	998,92	1486,69	0,41	-0,190	0,142	0,39
0604	2254,06	2254,93	998,90	1486,40	0,43	-0,191	0,142	0,37
0701	2252,84	2253,70	998,95	1486,66	0,48	-0,190	0,141	0,38
0702	2253,47	2254,33	998,92	1486,91	0,43	0,190	0,141	0,39
0801	2253,44	2254,30	998,89	1486,69	0,45	-0,190	0,141	0,38

1. serija, f_{sr} (enota: piksel)

kombinacija	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
0301	4361,88	4363,70	992,62	1492,62	0,40	-0,019	0,314	0,38
0302	4329,67	4329,06	1006,06	1492,91	0,48	-0,018	0,299	0,42
0303	4348,09	4349,74	994,62	1491,70	0,86	-0,014	0,278	0,37
0304	4358,06	4360,06	993,10	1491,61	0,54	-0,017	0,297	0,36
0305	4350,99	4353,31	990,83	1495,28	-0,09	-0,016	0,294	0,38
0306	4323,26	4325,00	986,62	1483,92	2,05	-0,014	0,277	0,34
0307	4352,61	4354,33	994,18	1492,24	0,44	-0,016	0,287	0,37
0401	4360,87	4362,65	992,82	1492,60	0,38	-0,018	0,304	0,39
0402	4347,83	4349,43	994,28	1491,83	0,74	-0,015	0,283	0,36
0403	4357,20	4359,11	993,19	1492,19	0,40	-0,016	0,292	0,36
0404	4354,11	4355,79	993,77	1493,00	0,79	-0,015	0,290	0,40
0405	4358,73	4360,52	992,91	1492,38	0,40	-0,016	0,299	0,37
0406	4350,16	4351,65	995,27	1492,72	0,51	-0,015	0,282	0,39
0501	4355,42	4357,05	994,22	1492,57	0,46	-0,017	0,300	0,39
0502	4353,92	4355,61	993,12	1493,14	0,70	-0,015	0,286	0,40
0503	4349,25	4351,20	994,11	1491,65	0,56	-0,016	0,286	0,37
0504	4352,39	4354,38	993,58	1492,01	0,81	-0,015	0,283	0,36
0505	4357,71	4359,63	992,92	1492,10	0,40	-0,016	0,289	0,36
0601	4354,15	4356,00	993,56	1492,87	0,59	-0,016	0,289	0,39
0602	4351,77	4353,53	994,01	1493,05	0,47	-0,015	0,288	0,38
0603	4358,28	4360,21	993,10	1491,97	0,41	-0,016	0,292	0,36
0604	4354,10	4355,81	993,79	1492,78	0,68	-0,015	0,291	0,38
0701	4353,97	4355,84	993,62	1492,84	0,58	-0,015	0,288	0,38
0702	4354,63	4356,42	993,57	1492,76	0,58	-0,016	0,291	0,38
0801	4354,42	4356,24	993,62	1492,71	0,57	-0,016	0,290	0,38

2.serija, f_{sr} (enota: piksel)

kombinacija	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
0301	4358,85	4360,85	991,60	1491,74	0,77	-0,015	0,277	0,38
0302	4354,84	4356,62	993,77	1492,53	0,69	-0,015	0,277	0,40
0303	4346,18	4347,73	994,11	1491,23	1,04	-0,015	0,286	0,35
0304	4361,09	4363,21	993,38	1491,75	0,27	-0,018	0,306	0,36
0305	4341,97	4344,70	990,55	1497,00	0,24	-0,013	0,271	0,36
0306	4323,70	4326,05	987,17	1483,87	2,06	-0,014	0,278	0,33
0307	4361,89	4364,12	992,56	1492,60	0,38	-0,016	0,297	0,34
0401	4359,32	4361,43	992,05	1492,22	0,60	-0,016	0,284	0,38
0402	4344,95	4346,04	993,59	1491,16	0,87	-0,015	0,289	0,35
0403	4361,19	4363,41	992,55	1492,69	0,41	-0,016	0,297	0,33
0404	4351,13	4352,74	993,36	1492,51	1,15	-0,013	0,269	0,39
0405	4353,23	4355,12	991,94	1492,47	0,56	-0,014	0,275	0,36
0406	4347,91	4349,67	995,87	1491,53	0,25	-0,016	0,294	0,37
0501	4357,58	4359,63	992,52	1492,17	0,56	-0,015	0,283	0,37
0502	4352,27	4354,09	993,86	1492,95	0,89	-0,014	0,276	0,39
0503	4350,80	4352,95	993,96	1491,64	0,59	-0,016	0,292	0,36
0504	4351,94	4353,96	993,22	1491,72	1,01	-0,015	0,289	0,35
0505	4358,30	4360,50	992,71	1492,58	0,40	-0,016	0,296	0,34
0601	4352,94	4352,94	993,34	1492,68	0,77	-0,015	0,279	0,38
0602	4349,92	4351,91	993,34	1492,96	0,59	-0,014	0,274	0,35
0603	4360,24	4362,40	992,90	1492,10	0,41	-0,017	0,299	0,35
0604	4350,98	4352,68	993,16	1492,42	0,90	-0,014	0,278	0,37
0701	4352,98	4355,00	993,36	1492,68	0,76	-0,015	0,281	0,37
0702	4353,09	4355,07	993,14	1492,59	0,72	-0,015	0,282	0,37
0801	4353,11	4355,10	993,16	1492,57	0,71	-0,015	0,283	0,36

Priloga B: Rezultati kalibracij ob uporabi centralnega posnetka

f_{\min} (enota: piksel)

kombinacija	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
90401	2252,53	2253,20	997,89	1486,38	0,54	-0,192	0,142	0,42
90401	2246,38	2247,06	998,45	1486,84	0,33	-0,191	0,142	0,41
90501	2252,26	2252,95	998,03	1486,01	0,52	-0,192	0,142	0,40
90502	2246,15	2246,85	998,53	1486,48	0,37	-0,191	0,141	0,41
90503	2246,59	2247,30	998,29	1486,68	0,29	-0,191	0,141	0,42
90504	2249,31	2249,93	998,86	1485,58	0,49	-0,191	0,140	0,43
90801	2246,66	2247,35	998,31	1486,61	0,44	-0,191	0,141	0,42
90901	2246,64	2247,34	998,36	1486,44	0,44	-0,191	0,141	0,41

f_{sr} (enota: piksel)

kombinacija	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
90401	4515,08	4517,06	991,62	1493,17	0,73	-0,003	0,290	0,34
90401	4521,83	4523,65	991,44	1492,76	0,76	-0,002	0,283	0,34
90501	4515,32	4517,30	991,64	1493,21	0,75	-0,004	0,294	0,33
90502	4522,04	4523,92	991,51	1492,77	0,77	-0,002	0,288	0,33
90503	4520,56	4522,33	991,47	1492,85	0,70	-0,002	0,281	0,36
90504	4521,91	4523,81	991,56	1492,86	0,80	-0,002	0,288	0,33
90801	4520,44	4522,33	991,38	1492,88	0,76	-0,002	0,286	0,34
90901	4520,53	4522,43	991,41	1492,90	0,77	-0,003	0,289	0,33

Priloga C: Rezultati kalibracij v časovnih presledkih

1.serija, f_{\min} (enota: piksel)

	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
1. kalibracija	2269,34	2270,23	997,52	1486,90	0,11	-0,188	0,144	0,41
2. kalibracija	2270,72	2271,66	998,46	1487,10	0,13	-0,189	0,144	0,42
3. kalibracija	2273,60	2274,52	998,11	1487,33	0,24	-0,189	0,144	0,43
4. kalibracija	2272,26	2273,00	997,79	1486,91	0,25	-0,188	0,143	0,43
5. kalibracija	2271,96	2272,80	998,45	1487,45	0,19	-0,188	0,144	0,44

2.serija, f_{\min} (enota: piksel)

	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
1. kalibracija	2270,02	2270,79	997,86	1486,84	0,21	-0,188	0,143	0,41
2. kalibracija	2270,31	2271,07	997,65	1487,08	0,17	-0,188	0,144	0,42
3. kalibracija	2270,78	2271,59	998,40	1486,86	0,18	-0,188	0,144	0,43
4. kalibracija	2271,94	2272,58	998,59	1488,24	0,35	-0,188	0,144	0,43
5. kalibracija	2271,36	2272,22	999,16	1486,98	0,20	-0,188	0,144	0,47

1.serija, f_{sr} (enota: piksel)

	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
1. kalibracija	4384,60	4386,57	991,39	1489,30	0,58	-0,009	0,251	0,38
2. kalibracija	4381,36	4383,34	991,35	1489,65	0,32	-0,009	0,254	0,39
3. kalibracija	4381,92	4383,86	992,09	1489,04	0,34	-0,010	0,260	0,38
4. kalibracija	4381,77	4383,65	991,65	1490,04	0,45	-0,008	0,248	0,38
5. kalibracija	4382,40	4383,90	992,08	1489,80	0,38	-0,008	0,246	0,39

2.serija, f_{sr} (enota: piksel)

	α_x	α_y	x_0	y_0	s	k_1	k_2	RMS
1. kalibracija	4383,15	4384,73	992,30	1490,05	0,75	-0,009	0,249	0,38
2. kalibracija	4382,82	4384,85	992,26	1489,04	0,65	-0,011	0,270	0,35
3. kalibracija	4383,26	4385,47	992,09	1489,33	0,50	-0,009	0,266	0,36
4. kalibracija	4383,80	4385,84	992,50	1489,02	0,66	-0,008	0,256	0,36
5. kalibracija	4384,90	4386,83	992,73	1488,99	0,63	-0,008	0,258	0,37

Priloga D: Rezultati izravnave (določitev oslonilnih ter kontrolnih točk)

Izhodna datoteka programa RamWin:

Izravnava RAVninske geodetske Mreže
Program: RAM, ver.4.0, dec. 02
Copyright (C) Tomaž Ambrožič & Goran Turk

Ime datoteke s podatki: oslo.pod
Ime datoteke za rezultate: oslo.rez
Ime datoteke za risanje slike mreže: oslo.ris
Ime datoteke za izračun premikov: oslo.koo

Datum: 11. 7.2007
Čas: 8:20:23

Seznam PRIBLIŽNIH koordinat novih točk
=====

Točka	Y (m)	X (m)
A	1000.0000	1000.0000
B	1004.4320	1000.0000
1	997.2959	1013.5750
2	997.8871	1015.7898
3	997.6609	1013.6122
4	997.7868	1014.7833
5	999.6537	1013.3020
6	1001.1638	1013.6879
7	1000.8287	1015.7171
8	1002.6960	1013.6658
9	1004.1725	1013.6702
10	1005.3316	1013.5862
11	1002.8766	1013.2099
12	1002.5730	1014.6952
13	1003.4826	1013.8431
14	1005.5708	1014.6210
15	1004.9797	1013.1629
16	1007.4190	1013.0902
17	1007.5735	1013.5189
18	1006.3584	1013.6051
19	1007.7839	1013.5133

Vseh točk je 21.

Pregled OPAZOVANJ
=====

Štev.	Stojišče	Vizura	Opazov. smer (stopinje)	W (")	Utež	Dolžina (m)	Du (m)	Utež	Gr
1	A	1	9 55 50.	0.000	1.00	13.8440	0.0000	1.00	1
2	A	2	13 34 25.	0.000	1.00	15.9300	0.0000	1.00	1
3	A	3	11 26 47.	0.000	1.00	13.8130	0.0000	1.00	1
4	A	4	12 40 49.	0.000	1.00	14.9480	0.0000	1.00	1
5	A	5	19 42 14.	0.000	1.00	13.3070	0.0000	1.00	1
6	A	6	26 3 20.	0.000	1.00	13.7370	0.0000	1.00	1
7	A	7	24 12 53.	0.000	1.00	15.7390	0.0000	1.00	1
8	A	8	32 21 24.	0.000	1.00	13.9300	0.0000	1.00	1
9	A	9	38 10 14.	0.000	1.00	14.2930	0.0000	1.00	1
10	A	10	42 37 26.	0.000	1.00	14.5950	0.0000	1.00	1
11	A	11	33 28 58.	0.000	1.00	13.5190	0.0000	1.00	1
12	A	12	31 7 36.	0.000	1.00	14.9200	0.0000	1.00	1

13	A	13	35 19 3.	0.000	1.00	14.2750	0.0000	1.00	1
14	A	14	42 3 13.	0.000	1.00	15.6460	0.0000	1.00	1
15	A	15	41 55 8.	0.000	1.00	14.0730	0.0000	1.00	1
16	A	16	50 44 17.	0.000	1.00	15.0470	0.0000	1.00	1
17	A	17	50 27 19.	0.000	1.00	15.4950	0.0000	1.00	1
18	A	18	46 14 45.	0.000	1.00	15.0180	0.0000	1.00	1
19	A	19	51 8 26.	0.000	1.00	15.5940	0.0000	1.00	1
20	A	B	111 11 37.	0.000	1.00	4.4320	0.0000	1.00	1
21	B	A	4 59 49.	0.000	1.00	4.4320	0.0000	1.00	1
22	B	1	67 15 45.	0.000	1.00	15.3340	0.0000	1.00	1
23	B	2	72 28 54.	0.000	1.00	17.0930	0.0000	1.00	1
24	B	3	68 32 46.	0.000	1.00	15.2020	0.0000	1.00	1
25	B	4	70 47 30.	0.000	1.00	16.2080	0.0000	1.00	1
26	B	5	75 14 10.	0.000	1.00	14.1340	0.0000	1.00	1
27	B	6	81 34 2.	0.000	1.00	14.0740	0.0000	1.00	1
28	B	7	82 4 55.	0.000	1.00	16.1250	0.0000	1.00	1
29	B	8	87 45 12.	0.000	1.00	13.7750	0.0000	1.00	1
30	B	9	93 54 20.	0.000	1.00	13.6720	0.0000	1.00	1
31	B	10	98 46 56.	0.000	1.00	13.6170	0.0000	1.00	1
32	B	11	88 16 43.	0.000	1.00	13.3020	0.0000	1.00	1
33	B	12	87 47 6.	0.000	1.00	14.8120	0.0000	1.00	1
34	B	13	91 4 13.	0.000	1.00	13.8750	0.0000	1.00	1
35	B	14	99 26 55.	0.000	1.00	14.6650	0.0000	1.00	1
36	B	15	97 22 38.	0.000	1.00	13.1750	0.0000	1.00	1
37	B	16	107 50 53.	0.000	1.00	13.4260	0.0000	1.00	1
38	B	17	108 4 34.	0.000	1.00	13.8800	0.0000	1.00	1
39	B	18	103 3 10.	0.000	1.00	13.7400	0.0000	1.00	1
40	B	19	108 55 28.	0.000	1.00	13.9240	0.0000	1.00	1

Podan srednji pogrešek utežne enote smeri (a-priori ocena): 5.00 sekund.

Podan srednji pogrešek utežne enote dolžin (a-priori ocena): 3.300 mm.

Število enačb popravkov je 80.
 - Število enačb popravkov za smeri je 40.
 - Število enačb popravkov za dolžine je 40.
 Število neznank je 44.
 - Število koordinatnih neznank je 42.
 - Število orientacijskih neznank je 2.
 Defekt mreže je 3.

POPRAVKI približnih vrednosti

=====

Točka	Dy (m)	Dx (m)	Do (")
A	0.000	0.000	2.5
B	0.001	0.000	-14.9
1	0.000	-0.001	
2	0.000	0.001	
3	0.000	-0.001	
4	0.000	0.001	
5	0.000	0.001	
6	0.000	0.002	
7	0.000	0.000	
8	0.000	-0.001	
9	0.000	-0.001	
10	0.000	-0.001	
11	0.000	-0.001	
12	0.000	0.001	
13	0.000	0.000	
14	0.000	0.000	
15	0.000	0.000	
16	0.000	0.001	

17 0.000 -0.001
 18 0.000 0.000
 19 0.000 -0.001

IZRAVNANE vrednosti koordinat in ANALIZA natančnosti

=====

Točka	Y (m)	X (m)	My (m)	Mx (m)	Mp (m)	a (m)	b (m)	Theta (st.)
A	1000.000	1000.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	91.
B	1004.433	1000.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	79.
1	997.296	1013.574	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	160.
2	997.887	1015.791	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	164.
3	997.661	1013.611	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	162.
4	997.786	1014.785	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	163.
5	999.653	1013.303	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	170.
6	1001.164	1013.690	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	176.
7	1000.829	1015.717	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	175.
8	1002.696	1013.665	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	2.
9	1004.172	1013.669	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	8.
10	1005.332	1013.586	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	12.
11	1002.877	1013.209	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	3.
12	1002.573	1014.696	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	1.
13	1003.483	1013.843	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	5.
14	1005.571	1014.621	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	12.
15	1004.980	1013.163	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	11.
16	1007.419	1013.091	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	21.
17	1007.573	1013.518	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	21.
18	1006.358	1013.605	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	16.
19	1007.784	1013.512	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	22.

Srednji pogrešek utežne enote /m0/ je 0.44828.
 [pvv] = 7.8371380475
 [xx] vseh neznank = 229.4769145695
 [xx] samo koordinatnih neznank = 0.0000170608
 Srednji pogrešek aritmetične sredine /m_arit/ je 0.00023.

Srednji pogrešek smeri /m0*m0_smeri/ je 2.2414 sekund.
 Srednji pogrešek dolžin /m0*m0_dolžin/ je 0.001 metrov.

Največji položajni pogrešek /Mp_max/ je 0.001 metrov.
 Najmanjši položajni pogrešek /Mp_min/ je 0.000 metrov.
 Srednji položajni pogrešek /Mp_sred/ je 0.001 metrov.

PREGLED opazovanih SMERI
 =====

Smerni koti in dolžine so izračunani iz zaokroženih koordinat.
 Smeri in smerni koti so izpisani v stopinjah.

Nova točka: A Y = 1000.000 X = 1000.000
 Orientacijski kot = 338 48 14.

Vizura	Gr	Utež	Opazov. smer	Orient. smer	Def. sm. kot	Popravek	Dolžina
1	1	1.00	9 55 50.	348 44 4.	348 44 2.	-2.	13.841
2	1	1.00	13 34 25.	352 22 39.	352 22 43.	3.	15.932
3	1	1.00	11 26 47.	350 15 1.	350 14 57.	-4.	13.811
4	1	1.00	12 40 49.	351 29 3.	351 29 0.	-3.	14.950
5	1	1.00	19 42 14.	358 30 28.	358 30 21.	-7.	13.308
6	1	1.00	26 3 20.	4 51 34.	4 51 36.	2.	13.739
7	1	1.00	24 12 53.	3 1 7.	3 1 9.	2.	15.739
8	1	1.00	32 21 24.	11 9 38.	11 9 38.	0.	13.928
9	1	1.00	38 10 14.	16 58 28.	16 58 23.	-5.	14.292
10	1	1.00	42 37 26.	21 25 40.	21 25 41.	1.	14.595
11	1	1.00	33 28 58.	12 17 12.	12 17 15.	3.	13.519

B	1	1.00	15.334	15.334	15.336	0.002	15.336
B	2	1.00	17.093	17.093	17.094	0.001	17.094
B	3	1.00	15.202	15.202	15.203	0.001	15.203
B	4	1.00	16.208	16.208	16.210	0.002	16.210
B	5	1.00	14.134	14.134	14.136	0.002	14.136
B	6	1.00	14.074	14.074	14.075	0.001	14.075
B	7	1.00	16.125	16.125	16.125	0.000	16.125
B	8	1.00	13.775	13.775	13.775	0.000	13.775
B	9	1.00	13.672	13.672	13.671	-0.001	13.671
B	10	1.00	13.617	13.617	13.616	-0.001	13.616
B	11	1.00	13.302	13.302	13.300	-0.002	13.300
B	12	1.00	14.812	14.812	14.813	0.001	14.813
B	13	1.00	13.875	13.875	13.876	0.001	13.876
B	14	1.00	14.665	14.665	14.665	0.000	14.665
B	15	1.00	13.175	13.175	13.174	-0.001	13.174
B	16	1.00	13.426	13.426	13.427	0.001	13.427
B	17	1.00	13.880	13.880	13.878	-0.002	13.878
B	18	1.00	13.740	13.740	13.741	0.001	13.741
B	19	1.00	13.924	13.924	13.921	-0.003	13.921

Izhodna datoteka programa VimWin:

Izravnava VIŠINSKE geodetske Mreže
Program: VIM, ver.4.0, dec. 02
Copyright (C) Tomaž Ambrožič & Goran Turk

Ime datoteke s podatki: visine.pod
Ime datoteke za rezultate: visine.rez
Ime datoteke za deformacijsko analizo: visine.def
Ime datoteke za S-transformacijo: visine.str

Datum: 6. 7.2007
Čas: 9: 3: 5

NADMORSKE VIŠINE REPERJEV

```
=====
```

Reper	Nadm.viš.	Opomba
A	10.0000	Novi reper
B	10.0000	Novi reper
1	10.0000	Novi reper
2	10.0000	Novi reper
3	10.0000	Novi reper
4	10.0000	Novi reper
5	10.0000	Novi reper
6	10.0000	Novi reper
7	10.0000	Novi reper
8	10.0000	Novi reper
9	10.0000	Novi reper
10	10.0000	Novi reper
11	10.0000	Novi reper
12	10.0000	Novi reper
13	10.0000	Novi reper
14	10.0000	Novi reper
15	10.0000	Novi reper
16	10.0000	Novi reper
17	10.0000	Novi reper
18	10.0000	Novi reper
19	10.0000	Novi reper

Število vseh reperjev = 21
 Število danih reperjev = 0
 Število novih reperjev = 21

Defekt mreže = 1

MERITVE VIŠINSKIH RAZLIK IN DOLŽIN

Reper zadaj	Reper spredaj	Merjena viš.razlika	Merjena dolžina
B	A	0.0930	4.4320
B	1	-0.8350	15.3340
B	2	0.4440	17.0930
B	3	1.0990	15.2020
B	4	4.6840	16.2080
B	5	3.8440	14.1340
B	6	1.4530	14.0740
B	7	-1.0030	16.1250
B	8	-0.7540	13.7750
B	9	0.1390	13.6720
B	10	-1.1830	13.6170
B	11	2.0180	13.3020
B	12	4.6840	14.8120
B	13	3.1980	13.8750
B	14	4.6650	14.6650
B	15	2.0150	13.1750
B	16	3.7270	13.4260
B	17	1.0970	13.8800
B	18	0.8210	13.7400
B	19	-1.3310	13.9240
A	B	-0.0910	4.0000
A	1	-0.9280	13.8440
A	2	0.3510	15.9300
A	3	1.0060	13.8130
A	4	4.5900	14.9480
A	5	3.7510	13.3070
A	6	1.3600	13.7370
A	7	-1.0960	15.7390
A	8	-0.8470	13.9300
A	9	0.0470	14.2930
A	10	-1.2750	14.5950
A	11	1.9250	13.5190
A	12	4.5910	14.9200
A	13	3.1060	14.2750
A	14	4.5720	15.6460
A	15	1.9230	14.0730
A	16	3.6350	15.0470
A	17	1.0050	15.4950
A	18	0.7290	15.0180
A	19	-1.4230	15.5940

Število opazovanj = 40

Vektor normalnih enačb je zaseden 0.02 %.

ENAČBE POPRAVKOV VIŠINSKIH RAZLIK

Št. Reper op. zadaj	Reper spredaj	Koeficienti			Utež
		a1	a2	f	
1 B	A	-1.	1.	-0.0930	225.6318
2 B	1	1.	-1.	-0.8350	65.2146
3 B	2	-1.	1.	-0.4440	58.5035

4 B	3	-1.	1.	-1.0990	65.7808
5 B	4	-1.	1.	-4.6840	61.6979
6 B	5	-1.	1.	-3.8440	70.7514
7 B	6	-1.	1.	-1.4530	71.0530
8 B	7	1.	-1.	-1.0030	62.0155
9 B	8	1.	-1.	-0.7540	72.5953
10 B	9	-1.	1.	-0.1390	73.1422
11 B	10	1.	-1.	-1.1830	73.4376
12 B	11	-1.	1.	-2.0180	75.1767
13 B	12	-1.	1.	-4.6840	67.5128
14 B	13	-1.	1.	-3.1980	72.0721
15 B	14	-1.	1.	-4.6650	68.1896
16 B	15	-1.	1.	-2.0150	75.9013
17 B	16	-1.	1.	-3.7270	74.4823
18 B	17	-1.	1.	-1.0970	72.0461
19 B	18	-1.	1.	-0.8210	72.7802
20 B	19	1.	-1.	-1.3310	71.8184
21 A	B	1.	-1.	-0.0910	250.0000
22 A	1	1.	-1.	-0.9280	72.2335
23 A	2	-1.	1.	-0.3510	62.7746
24 A	3	-1.	1.	-1.0060	72.3956
25 A	4	-1.	1.	-4.5900	66.8986
26 A	5	-1.	1.	-3.7510	75.1484
27 A	6	-1.	1.	-1.3600	72.7961
28 A	7	1.	-1.	-1.0960	63.5364
29 A	8	1.	-1.	-0.8470	71.7875
30 A	9	-1.	1.	-0.0470	69.9643
31 A	10	1.	-1.	-1.2750	68.5166
32 A	11	-1.	1.	-1.9250	73.9700
33 A	12	-1.	1.	-4.5910	67.0241
34 A	13	-1.	1.	-3.1060	70.0525
35 A	14	-1.	1.	-4.5720	63.9141
36 A	15	-1.	1.	-1.9230	71.0581
37 A	16	-1.	1.	-3.6350	66.4584
38 A	17	-1.	1.	-1.0050	64.5369
39 A	18	-1.	1.	-0.7290	66.5868
40 A	19	1.	-1.	-1.4230	64.1272

IZRAČUNANI POPRAVKI VIŠINSKIH RAZLIK

Št. Reper op. zadaj	Reper spredaj	Merjena viš.razl.	Popravek viš.razl.	Definitivna viš.razlika
1 B	A	0.0930	-0.0007	0.0923
2 B	1	-0.8350	-0.0003	-0.8353
3 B	2	0.4440	-0.0003	0.4437
4 B	3	1.0990	-0.0003	1.0987
5 B	4	4.6840	-0.0009	4.6831
6 B	5	3.8440	-0.0003	3.8437
7 B	6	1.4530	-0.0003	1.4527
8 B	7	-1.0030	-0.0003	-1.0033
9 B	8	-0.7540	-0.0003	-0.7543
10 B	9	0.1390	0.0002	0.1392
11 B	10	-1.1830	0.0002	-1.1828
12 B	11	2.0180	-0.0003	2.0177
13 B	12	4.6840	-0.0003	4.6837
14 B	13	3.1980	0.0002	3.1982
15 B	14	4.6650	-0.0003	4.6647
16 B	15	2.0150	0.0002	2.0152
17 B	16	3.7270	0.0002	3.7272
18 B	17	1.0970	0.0002	1.0972
19 B	18	0.8210	0.0002	0.8212
20 B	19	-1.3310	0.0002	-1.3308
21 A	B	-0.0910	-0.0013	-0.0923

22 A	1	-0.9280	0.0003	-0.9277
23 A	2	0.3510	0.0003	0.3513
24 A	3	1.0060	0.0003	1.0063
25 A	4	4.5900	0.0008	4.5908
26 A	5	3.7510	0.0003	3.7513
27 A	6	1.3600	0.0003	1.3603
28 A	7	-1.0960	0.0003	-1.0957
29 A	8	-0.8470	0.0003	-0.8467
30 A	9	0.0470	-0.0002	0.0468
31 A	10	-1.2750	-0.0002	-1.2752
32 A	11	1.9250	0.0003	1.9253
33 A	12	4.5910	0.0003	4.5913
34 A	13	3.1060	-0.0002	3.1058
35 A	14	4.5720	0.0003	4.5723
36 A	15	1.9230	-0.0002	1.9228
37 A	16	3.6350	-0.0002	3.6348
38 A	17	1.0050	-0.0002	1.0048
39 A	18	0.7290	-0.0002	0.7288
40 A	19	-1.4230	-0.0002	-1.4232

Srednji pogrešek utežne enote, $m_0 = 0.00639$

IZRAVNANE NADMORSKE VIŠINE REPERJEV

Reper	Približna višina	Popravek višine	Definitivna višina	Sred.pog. višine
A	10.0000	-1.2825	8.7175	0.0001
B	10.0000	-1.3748	8.6252	0.0001
1	10.0000	-2.2102	7.7898	0.0005
2	10.0000	-0.9312	9.0688	0.0006
3	10.0000	-0.2762	9.7238	0.0005
4	10.0000	3.3083	13.3083	0.0005
5	10.0000	2.4688	12.4688	0.0005
6	10.0000	0.0778	10.0778	0.0005
7	10.0000	-2.3782	7.6218	0.0006
8	10.0000	-2.1292	7.8708	0.0005
9	10.0000	-1.2357	8.7643	0.0005
10	10.0000	-2.5577	7.4423	0.0005
11	10.0000	0.6428	10.6428	0.0005
12	10.0000	3.3088	13.3088	0.0005
13	10.0000	1.8233	11.8233	0.0005
14	10.0000	3.2899	13.2899	0.0005
15	10.0000	0.6403	10.6403	0.0005
16	10.0000	2.3523	12.3523	0.0005
17	10.0000	-0.2777	9.7223	0.0005
18	10.0000	-0.5537	9.4463	0.0005
19	10.0000	-2.7057	7.2943	0.0005

Priloga E: Rezultati orientacije stereopara

Izhodna datoteka modula Stereo Orientations (kalibracija pred snemanjem):

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS
(11-07-2007 10:27:20)

D:\DIPLOME\TADEJ\ZARES\STEREO8A\STEREO8A.DAT

DESCRIPTION :

IMAGES USED

Image name : D:\DIPLOME\TADEJ\ZARES\STEREO8A\DSC_0041_R.TIF
Image date : 2005/1/23
Image time : 6:18:14
Image size : 18065240

Image name : D:\DIPLOME\TADEJ\ZARES\STEREO8A\DSC_0042_R.TIF
Image date : 2005/1/23
Image time : 6:18:44
Image size : 18065240

SCANNER CORRECTION

Title :
Description :
DPI :
Manufacturer :
Model :
Serial Number :

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 11-07-2007
Time : 10:37:36

Results of Transformations

LEFT IMAGE

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	1504.500	1000.500	0.010	-0.015	0.000	0.000
2	-1504.500	1000.500	-0.010	-0.015	0.000	0.000
3	-1504.500	-1000.500	-0.010	0.015	-0.000	-0.000
4	1504.500	-1000.500	0.010	0.015	0.000	-0.000

RIGHT IMAGE

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	1504.500	1000.500	0.010	-0.015	0.000	0.000
2	-1504.500	1000.500	-0.010	-0.015	0.000	0.000
3	-1504.500	-1000.500	-0.010	0.015	-0.000	-0.000
4	1504.500	-1000.500	0.010	0.015	0.000	-0.000

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION :

Date : 11-07-2007
Time : 11:04:27
Focal length Image #0 : 2345.654
Focal length Image #1 : 2345.654
Bx : 413.316
By : -25.780
Bz : -47.742
Phi : 1.291
Omega : 1.396
Kappa : -0.759

Number	Xmodel	Ymodel	Zmodel	Py
--------	--------	--------	--------	----

1	-712.180	783.059	-2356.482	-0.145
2	-638.488	862.651	-2417.893	0.015
3	-692.367	-1.332	-1951.043	0.064
4	-749.975	119.924	-2004.420	0.152
5	-821.464	-450.188	-1919.393	-0.183
6	-808.764	-587.072	-1892.074	0.067
7	1158.792	-585.421	-1868.767	0.474
8	1193.931	-492.752	-1880.194	-0.460
9	1198.624	107.549	-1891.394	0.081
10	1202.703	33.097	-1961.836	-0.229
11	1289.682	816.347	-2367.078	-0.144
12	1288.322	684.185	-2262.779	0.289

Standard error : 0.239

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION :

Date : 17-07-2007
 Time : 10:13:30

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
1	997.296	0.018	1007.790	0.003	486.426	0.012
4	997.786	-0.007	1013.308	0.007	485.215	-0.007
8	1002.696	-0.003	1007.871	-0.005	486.335	-0.013
10	1005.332	-0.002	1007.442	-0.009	486.414	0.003
12	1002.573	-0.005	1013.309	0.002	485.304	-0.008
14	1005.571	-0.001	1013.290	0.002	485.379	0.014

Standard Deviation: Mx = 0.008 My= 0.005 Mz= 0.010
 Standard Deviation: Mxy= 0.010

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures:

Left : 1000.365 1008.477 494.358 [0.006 0.004 0.002]
 Right : 1002.068 1008.420 494.162 [0.006 0.004 0.002]

Left Phi : -0.3948 [0.0006]
 Omega : 9.1041 [0.0005]
 Kappa : 0.6384 [0.0002]
 Right Phi : 0.9052 [0.0006]
 Omega : 10.4847 [0.0005]
 Kappa : -0.1411 [0.0002]

Izhodna datoteka modula Stereo Orientations (kalibracija po snemanju):

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS
(11-07-2007 12:11:32)
D:\DIPLOME\TADEJ\ZARES\STEREO8B\STEREO8B.DAT

DESCRIPTION :

IMAGES USED

Image name : D:\DIPLOME\TADEJ\ZARES\STEREO8B\DSC_0041_R.TIF
Image date : 2005/1/23
Image time : 6:19:4
Image size : 18065240

Image name : D:\DIPLOME\TADEJ\ZARES\STEREO8B\DSC_0042_R.TIF
Image date : 2005/1/23
Image time : 6:19:34
Image size : 18065240

SCANNER CORRECTION

Title :
Description :
DPI :
Manufacturer :
Model :
Serial Number :

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 11-07-2007
Time : 12:16:43

Results of Transformations

LEFT IMAGE

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	-1504.500	1000.500	-0.010	-0.015	0.000	0.000
2	1504.500	1000.500	0.010	-0.015	0.000	0.000
3	-1504.500	-1000.500	-0.010	0.015	-0.000	-0.000
4	1504.500	-1000.500	0.010	0.015	0.000	-0.000

RIGHT IMAGE

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	-1504.500	1000.500	-0.010	-0.015	0.000	0.000
2	1504.500	1000.500	0.010	-0.015	0.000	0.000
3	-1504.500	-1000.500	-0.010	0.015	-0.000	-0.000
4	1504.500	-1000.500	0.010	0.015	0.000	-0.000

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION :

Date : 11-07-2007
Time : 12:31:09
Focal length Image #0 : 2358.711
Focal length Image #1 : 2358.711
Bx : 412.754
By : -27.614
Bz : -48.855
Phi : 1.279
Omega : 1.437
Kappa : -0.752

Number	Xmodel	Ymodel	Zmodel	Py
1	-712.369	783.465	-2371.898	-0.442
2	-637.368	859.641	-2426.109	0.257
3	-693.792	16.987	-2003.855	-0.100
4	-750.430	119.718	-2016.801	0.281
5	-822.971	-451.028	-1934.582	0.215
6	-810.758	-587.761	-1907.298	-0.238
7	1192.547	-532.931	-1879.948	0.208
8	1114.327	-632.974	-1868.729	-0.115
9	1198.665	107.947	-1900.708	-0.048
10	1201.316	33.012	-1971.852	-0.090
11	1323.206	814.445	-2377.032	0.442
12	1325.821	649.688	-2240.128	-0.351

Standard error : 0.264

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION :

Date : 11-07-2007
 Time : 13:22:27

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
1	997.296	0.012	1007.790	-0.000	486.426	-0.000
4	997.786	-0.003	1013.308	0.006	485.215	0.004
8	1002.696	0.001	1007.871	-0.004	486.335	-0.003
10	1005.332	-0.003	1007.442	-0.007	486.414	0.005
12	1002.573	-0.003	1013.309	0.006	485.304	-0.011
14	1005.571	-0.004	1013.290	-0.000	485.379	0.005

Standard Deviation: Mx = 0.005 My= 0.005 Mz= 0.006
 Standard Deviation: Mxy= 0.007

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures:

Left : 1000.393 1008.462 494.410 [0.006 0.004 0.002]
 Right : 1002.096 1008.399 494.203 [0.006 0.004 0.002]

Left Phi : -0.2309 [0.0006]
 Omega : 9.1533 [0.0005]
 Kappa : 0.6124 [0.0002]
 Right Phi : 1.0572 [0.0006]
 Omega : 10.5766 [0.0005]
 Kappa : -0.1646 [0.0002]

Izhodna datoteka modula Stereo Orientations (kalibracija s tremi posnetki):

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS
(11-07-2007 13:44:50)
D:\DIPLOME\TADEJ\ZARES\STEREO3\STEREO3.DAT

DESCRIPTION :

IMAGES USED

Image name : D:\DIPLOME\TADEJ\ZARES\STEREO3\DSC_0041_R.TIF
Image date : 2007/7/6
Image time : 6:30:26
Image size : 18071431

Image name : D:\DIPLOME\TADEJ\ZARES\STEREO3\DSC_0042_R.TIF
Image date : 2007/7/6
Image time : 6:32:26
Image size : 18071431

SCANNER CORRECTION

Title :
Description :
DPI :
Manufacturer :
Model :
Serial Number :

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 11-07-2007
Time : 13:58:48

Results of Transformations

LEFT IMAGE

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	-1504.500	1000.500	-0.010	-0.015	0.000	0.000
2	1504.500	1000.500	0.010	-0.015	0.000	0.000
3	-1504.500	-1000.500	-0.010	0.015	-0.000	-0.000
4	1504.500	-1000.500	0.010	0.015	0.000	-0.000

RIGHT IMAGE

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	-1504.500	1000.500	-0.010	-0.015	0.000	0.000
2	1504.500	1000.500	0.010	-0.015	0.000	0.000
3	-1504.500	-1000.500	-0.010	0.015	-0.000	-0.000
4	1504.500	-1000.500	0.010	0.015	0.000	-0.000

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION :

Date : 11-07-2007
Time : 14:09:48
Focal length Image #0 : 2396.742
Focal length Image #1 : 2396.742
Bx : 413.254
By : -26.793
Bz : -48.940
Phi : 1.281
Omega : 1.393
Kappa : -0.773

Number	Xmodel	Ymodel	Zmodel	Py
1	-712.729	847.510	-2463.522	-0.309
2	-638.051	730.561	-2365.747	0.511
3	-749.488	119.910	-2048.496	-0.198
4	-789.326	40.306	-2037.166	0.025
5	-820.799	-450.370	-1959.610	-0.317
6	-808.854	-587.211	-1933.981	0.324
7	1176.474	-394.455	-1936.274	-0.034
8	1181.618	-490.444	-1920.021	-0.094
9	1201.918	32.102	-2003.953	0.068
10	1197.150	107.526	-1930.210	0.265
11	1286.602	813.053	-2414.745	0.294
12	1287.795	647.746	-2273.246	-0.550

Standard error : 0.299

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION :

Date : 11-07-2007
 Time : 14:40:01

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
1	997.296	0.021	1007.790	-0.000	486.426	0.014
4	997.786	-0.001	1013.308	0.010	485.215	-0.009
8	1002.696	-0.004	1007.871	-0.007	486.335	-0.010
10	1005.332	-0.004	1007.442	-0.014	486.414	0.001
12	1002.573	-0.007	1013.309	0.009	485.304	-0.009
14	1005.571	-0.006	1013.290	0.004	485.379	0.014

Standard Deviation: Mx = 0.010 My= 0.009 Mz= 0.010
 Standard Deviation: Mxy= 0.013

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures:

Left : 1000.362 1008.390 494.527 [0.007 0.005 0.002]
 Right : 1002.070 1008.327 494.328 [0.006 0.004 0.002]

Left Phi : -0.4051 [0.0007]
 Omega : 9.5041 [0.0005]
 Kappa : 0.6386 [0.0002]
 Right Phi : 0.8960 [0.0006]
 Omega : 10.8995 [0.0005]
 Kappa : -0.1570 [0.0002]

Priloga F: Seznam koordinat ter odstopanj na kontrolnih točkah

Dane koordinate kontrolnih točk:

kontrolna točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
2	997,887	1009,069	484,209
3	997,661	1009,724	486,389
5	999,653	1012,469	486,697
6	1001,164	1010,078	486,310
7	1000,829	1007,622	484,283
9	1004,172	1008,764	486,331
11	1002,877	1010,643	486,791
13	1003,483	1011,823	486,157
15	1004,980	1010,640	486,837

Izmerjene koordinate kontrolnih točk ter odstopanja (kalibracija pred snemanjem):

kontrolna točka	X [m]	Y [m]	Z [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]
2	997,869	1009,083	484,164	-0,018	0,014	-0,045
3	997,676	1009,718	486,393	0,015	-0,006	0,004
5	999,661	1012,452	486,710	0,008	-0,017	0,013
6	1001,165	1010,070	486,312	0,001	-0,008	0,002
7	1000,817	1007,628	484,239	-0,012	0,006	-0,044
9	1004,177	1008,758	486,303	0,005	-0,006	-0,028
11	1002,879	1010,634	486,781	0,002	-0,009	-0,010
13	1003,485	1011,823	486,138	0,002	0,000	-0,019
15	1004,978	1010,628	486,847	-0,002	-0,012	0,010
			RMS [m]	0,009	0,010	0,025

Izmerjene koordinate kontrolnih točk ter odstopanja (kalibracija po snemanju):

kontrolna točka	X [m]	Y [m]	Z [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]
2	997,871	1009,088	484,162	-0,016	0,019	-0,047
3	997,681	1009,718	486,397	0,020	-0,006	0,008
5	999,666	1012,451	486,715	0,013	-0,018	0,018
6	1001,170	1010,067	486,319	0,006	-0,011	0,009
7	1000,817	1007,635	484,239	-0,012	0,013	-0,044
9	1004,173	1008,757	486,325	0,001	-0,007	-0,006
11	1002,880	1010,625	486,801	0,003	-0,018	0,010
13	1003,483	1011,815	486,156	0,000	-0,008	-0,001
15	1004,984	1010,626	486,841	0,004	-0,014	0,004
			RMS [m]	0,011	0,014	0,023

Izmerjene koordinate kontrolnih točk ter odstopanja (kalibracija s tremi posnetki):

kontrolna točka	X [m]	Y [m]	Z [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]
2	997,871	1009,104	484,112	-0,016	0,035	-0,097
3	997,676	1009,715	486,395	0,015	-0,009	0,006
5	999,663	1012,443	486,733	0,010	-0,026	0,036
6	1001,165	1010,064	486,330	0,001	-0,014	0,020
7	1000,817	1007,647	484,219	-0,012	0,025	-0,064
9	1004,166	1008,754	486,330	-0,006	-0,010	-0,001
11	1002,874	1010,619	486,817	-0,003	-0,024	0,026
13	1003,475	1011,811	486,174	-0,008	-0,012	0,017
15	1004,972	1010,616	486,879	-0,008	-0,024	0,042
			RMS [m]	0,010	0,022	0,045