

# AVTOMATIZACIJA CELOTNEGA POSTOPKA RELATIVNE ORIENTACIJE STEREOPARA

COMPLETE AUTOMATION OF THE RELATIVE ORIENTATION OF A STEREOPAIR

*Mojca Kosmatin Fras, Rok Vezočnik, Tomaž Gvozdanović, Dušan Kogoj*

UDK: 528.7

## POVZETEK

*V članku so predstavljeni rezultati raziskave avtomatizacije celotnega postopka relativne orientacije stereopara. Opisana so teoretična izhodišča, ki so potrebna za razumevanje problematike, predstavljeni so rezultati testiranja algoritmov na realnih primerih. Postopek relativne orientacije je v splošnem sestavljen iz treh faz: zajema vhodnih podatkov, izračuna parametrov relativne orientacije in ocene pogreškov opazovanj. V procesu popolne avtomatizacije relativne orientacije je ključnega pomena avtomatizacija zajema homolognih točk na stereoobmočju. V testu smo homologne točke zajeli z različnimi metodami: ročno, polavtomatsko in avtomatsko, nato smo rezultate izračuna parametrov relativne orientacije med seboj primerjali. Ugotovili smo, da avtomatizacija postopka relativne orientacije deluje uspešno in zanesljivo, če v postopek vgradimo nadzor nad oceno pogreškov opazovanj, predvsem pa do rezultatov pridemo hitreje kot z ročno ali polavtomatsko metodo.*

## KLJUČNE BESEDE

*relativna orientacija, avtomatizacija, slikovno ujemanje, robustna ocena pogreškov*

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.01

## ABSTRACT

*In the paper the results of the research on the complete automation of the relative orientation of a stereo pair is presented. The theoretical background needed for understanding this topic is described and the results of testing the algorithms with real data are presented. In general, the relative orientation procedure consists of three phases: input data acquisition, computation of relative orientation parameters and estimation of observation errors. In the process of the complete relative orientation automation, the key step is the automation of homologous points acquisition in the stereo area. In the tests presented, the homologous points were acquired with different methods: manually, semi-automatically and fully automatically. The results of the computed relative orientation parameters have been compared. It has been concluded that the automation of the relative orientation procedure is successful and reliable if the control of the observation errors estimation is built into the procedure, and, especially, we get the results faster than with the manual or semi-automated method.*

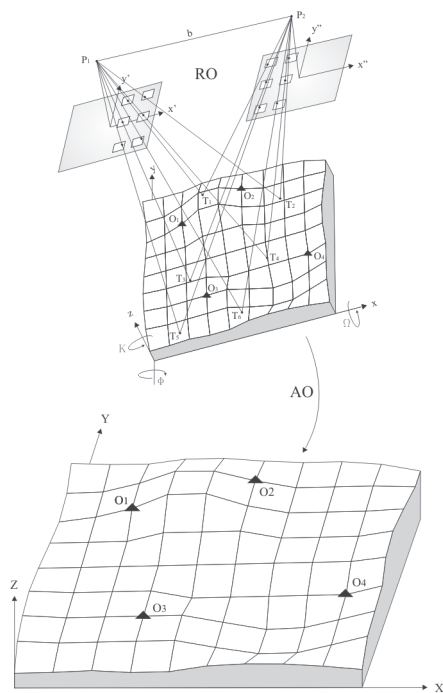
## KEY WORDS

*relative orientation, automation, image matching, robust estimation of errors*

## 1 UVOD

V članku so predstavljeni rezultati raziskave avtomatizacije celotnega postopka relativne orientacije stereopara, ki je bila izvedena kot del raziskovalnega projekta »Razvoj metod in sistemov za slikanje terena ter detekcijo in razpoznavanje tarč« (Kogoj et al., 2006).

Relativna orientacija (RO) je ena od osnovnih fotogrametričnih metod, ki jo poznamo še iz časov analogne tehnologije. Predstavlja prvo stopnjo v postopku orientacije stereopara, in sicer z njo vzpostavimo pravilni medsebojni položaj stereoposnetkov in tako ustvarimo stereomodel. Drugo stopnjo predstavlja absolutna orientacija (AO), ki stereomodel postavi v pravilni položaj v referenčnem prostoru. Obe stopnji sta grafično predstavljeni na sliki 1.



**Slika 1:** Grafični prikaz relativne (RO) in absolutne (AO) orientacije stereopara.

Položaj stereopara v prostoru definira 12 parametrov (tri translacije in tri rotacije za vsak posnetek), od katerih jih 5 rešimo s postopkom relativne orientacije in 7 s postopkom absolutne orientacije. Postopek absolutne orientacije matematično opišemo s sedemparametrično prostorsko podobnostno transformacijo, ki jo rešimo na osnovi znanih koordinat najmanj treh (v praksi pa vsaj štirih ali več) oslonilnih točk v obeh koordinatnih sistemih (referenčnega in modelnega); na sliki 1 so oslonilne točke prikazane z oznakami  $O_1 \dots O_4$ . Ta transformacija je v geodeziji dobro poznana in se uporablja predvsem takrat, ko izvajamo transformacijo med dvema različnima 3D-koordinatnima sistemoma.

Postopek relativne orientacije se konceptualno precej razlikuje od absolutne orientacije in je za izvedbo zahtevnejši. Pravilni relativni medsebojni položaj obeh posnetkov, ki tvorita stereopar, dosežemo takrat, ko se na najmanj petih modelnih točkah njihovi homologni pari slikovnih žarkov sekajo (model je premaknjen, zasukan in običajno pomanjšan prostorski objekt; slikovni žarek je premica, ki poteka skozi projekcijski center posnetka in slikovno točko). Pet parametrov

relativne orientacije izračunamo na osnovi izmerjene paralakse  $y$  (tj. razlike slikovnih koordinat  $y$  homolognih točk), zato za rešitev zadostujejo slikovne meritve.

Glavni vhodni podatek za izračun parametrov relativne orientacije so torej meritve slikovnih koordinat homolognih točk, ki pa jih je bilo včasih možno meriti le ročno. Šele pojav digitalnih slik (v začetku 80. let 20. stoletja) je omogočil obsežnejšo avtomatizacijo fotogrametričnih procesov. Različni avtorji so, predvsem v programskih modulih za digitalne fotogrametrične postaje, vključevali avtomatizacijo posameznih postopkov relativne orientacije (Tang in Heipke, 1993). Pri tem so zelo učinkoviti različni postopki slikovnega ujemanja (angl. image matching), s katerimi prepoznavamo vzorce in merimo slikovne koordinate homolognih točk.

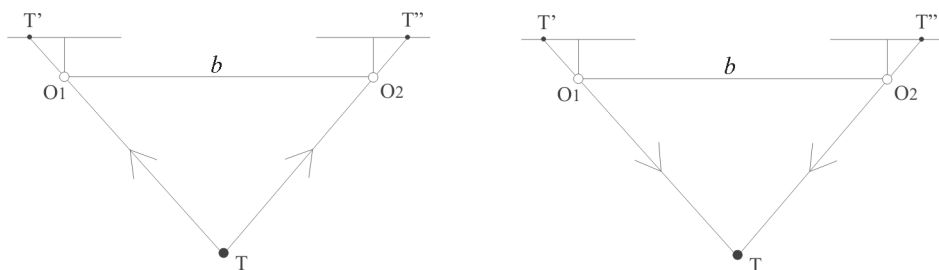
V procesu popolne avtomatizacije naletimo na precej kompleksen problem izbire dobre značilne (karakteristične) točke oz. vzorca. Ker pa avtomatsko iskanje značilnih točk v primerjavi s človekovo izbiro ni zanesljivo, je v proces treba vpeljati mehanizem za nadzor pogreškov po izravnavi, ki zazna in odpravi morebitne grobe pogreške v vhodnih podatkih.

V naši raziskavi smo za popolno avtomatizacijo relativne orientacije uporabili naslednje postopke:

- numerični izračun parametrov relativne orientacije,
- Förstnerjev algoritem za izbor značilnih točk,
- slikovno ujemanje površin in
- metodo robustne ocene pogreškov opazovanj.

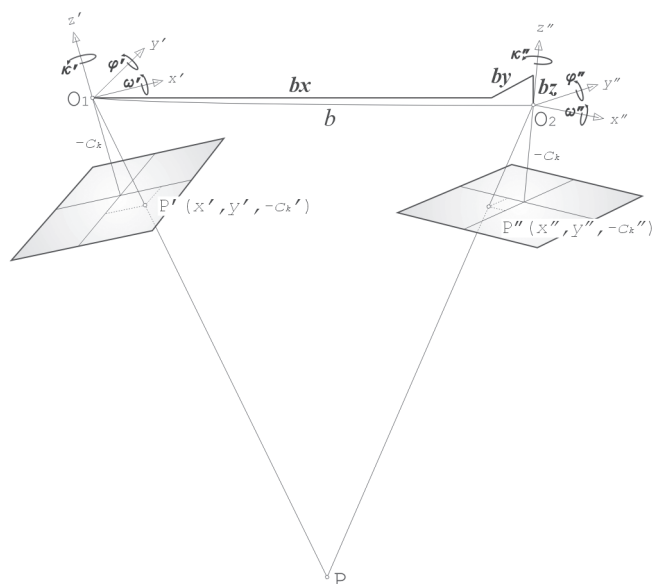
## 2 NUMERIČNI IZRAČUN PARAMETROV RELATIVNE ORIENTACIJE

Fotografija nastane po pravilih centralno-perspektivne preslikave. V trenutku ekspozicije se svetloba iz posamezne prostorske točke ( $T$ ) prek centra projekcije ( $O_1$  oz.  $O_2$ ) preslika na film ali digitalni senzor ( $T'$  oz.  $T''$ ) (slika 2, levo). V fazi izvrednotenja (slika 2, desno) pa gre za obratno pot – izhajamo iz slikovne točke ( $T'$  za levi posnetek oz.  $T''$  za desni posnetek) in skozi projekcijski center ( $O_1$  oz.  $O_2$ ) matematično zapišemo slikovni žarek. Prostorsko točko določimo s presekom homolognih slikovnih žarkov, pri čemer mora biti prostorski položaj posnetkov enak, kot je bil v času ekspozicije. Vzpostavitev izvornega položaja posnetkov lahko dosežemo z različnimi metodami, ena od teh je dvostopenjska metoda.



Slika 2: Faza ekspozicije (levo) in postopek izvrednotenja (desno) (Vežočnik, 2006).

Kot smo omenili že v uvodu, v prvi stopnji najprej vzpostavimo pravičen medsebojni položaj stereoposnetkov. Definiramo matematični model, ki ga predstavlja paralaksna enačba (1).



**Slika 3:** Matematični model relativne orientacije (Vežočnik, 2006).

Paralaksna enačba je oblike:

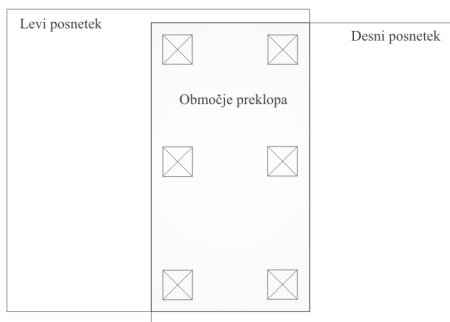
$$p_y = A \cdot dby + B \cdot dbz + C \cdot d\varphi' - D \cdot d\omega' - E \cdot d\kappa' - F \cdot d\varphi'' + G \cdot d\omega'' + H \cdot d\kappa'' \quad (1)$$

Vektor, ki poteka od levega ( $O_1$ ) do desnega projekcijskega centra ( $O_2$ ), imenujemo baza ( $b$ ) stereopara (slika 3). Slikovni koordinatni sistem levega posnetka ima izhodišče v  $O_1$  in koordinatne osi  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ , slikovni koordinatni sistem desnega posnetka pa ima izhodišče v  $O_2$  in koordinatne osi  $x''$ ,  $y''$ ,  $z''$ . V obeh koordinatnih sistemih definiramo zasuke okoli koordinatnih osi ( $\omega'$ ,  $\varphi'$ ,  $\kappa'$  za levi posnetek in  $\omega''$ ,  $\varphi''$ ,  $\kappa''$  za desni posnetek). Definiramo tudi komponente baznega vektorja  $b_x$ ,  $b_y$  in  $b_z$ , ki predstavljajo premik projekcijskega izhodišča  $O_2$  napram slikovnemu koordinatnemu sistemu levega posnetka. Skupaj imamo šest rotacijskih kotov in tri bazne komponente. Bazno komponento  $b_x$  lahko poljubno izberemo, saj vpliva le na merilo modela, ki ga pravilno lahko komponento določimo šele v postopku absolutne orientacije. Torej medsebojni položaj posnetkov opiše osem parametrov (šest zasukov,  $b_y$  in  $b_z$ ), ki so izraženi v paralaksni enačbi  $p_y$  (1). Iz slike 3 je tudi razvidno, da se homologna žarka sekata natanko takrat, ko ležijo vsi trije vektorji ( $b$ ,  $O_1P$ ,  $O_2P$ ) v ravnini, kar imenujemo pogoj koplanarnosti (Schenk, 1999). Paralaksa  $p_y$  je razlika slikovnih koordinat y homolognih točk in mora biti enaka nič, da je koplanarni pogoj izpolnjen. Nadaljnja podrobnejša analiza pokaže, da je le pet parametrov od navedenih osmih linearno neodvisnih,

torej pravih parametrov, preostali trije pa so konstante. Izbor petih parametrov je lahko poljuben, vendar pa se uporabljata predvsem naslednja dva izbora:

- vrtenje posnetkov (neodvisna RO):  $d\kappa'$ ,  $d\kappa''$ ,  $d\varphi'$ ,  $d\varphi''$ ,  $d\omega''$ ;
- priorientacija (odvisna RO):  $db_y$ ,  $db_z$ ,  $d\omega''$ ,  $d\varphi''$ ,  $d\kappa''$ .

Za izračun petih parametrov v paralaksni enačbi potrebujemo torej meritve slikovnih koordinat najmanj petih homolognih točk. Najboljše rezultate dosežemo, če so homologne točke v območju stereopara izbrane na šestih Gruberjevih lokacijah, kot je prikazano v sliki 4 (točke na šesti lokaciji služijo za kontrolo). Na vsaki lokaciji izberemo in izmerimo vsaj en homologen par točk, za večjo zanesljivost in kontrolo pa je priporočljivo, da je teh točk več.



**Slika 4:** Primerna območja za izbor homolognih točk.

Izračun parametrov relativne orientacije izvedemo z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Za numerični izračun parametrov relativne orientacije se v strokovni literaturi pogosto uporablja tudi izraz digitalna relativna orientacija (DRO).

### 3 FÖRSTNERJEV ALGORITEM ZA IZBOR ZNAČILNIH TOČK

Pare homolognih slikovnih točk (točki  $P'$  in  $P''$  na sliki 3), ki poleg parametrov notranje orientacije fotoaparata (glavna točka, konstanta kamere in distorzija objektiva) predstavljajo vhodne podatke za določitev petih orientacijskih parametrov relativne orientacije, lahko določimo in izmerimo na tri načine:

- z ročno metodo: točke izberemo in izmerimo ročno,
- s polavtomatsko metodo: na enem posnetku točko ročno izberemo, na drugem pa homologno točko poiščemo in izmerimo na avtomatski način,
- z avtomatsko metodo: izbira in merjenje točk sta v celoti avtomatizirana.

Cilj naše raziskave je bil izdelati avtomatsko metodo in jo primerjati z rezultati polavtomatske in ročne metode. Za izbor značilnih točk na primarnem posnetku smo uporabili Förstnerjev operator (po avtorju W. Förstnerju).

Algoritem za iskanje značilnih točk mora izpolnjevati naslednje pogoje (Förstner in Gülch, 1987):

- prepoznavanje različnosti (angl. distinctness): najdene točke se morajo razločevati od sosednjih, izbranih značilnih točk,
- zagotavljanje invariantnosti (angl. invariance): izbor in izbrana pozicija morata biti invariantni glede na pričakovano geometrično in radiometrično distorzijo – to pomeni, da se s spremembo orientacije posnetka in njegovih radiometričnih lastnosti izbira in lokacija značilnih točk ne spremeni,
- zagotavljanje stabilnosti (angl. stability): šum v sliki ne sme vplivati na določitev koordinat značilnih točk,
- zagotavljanje redkosti (angl. seldomness): različnost zadosti pogoju lokalne ločljivosti, redkost pa pogoju globalne ločljivosti točk, kar pride v poštev v primeru ponavljajočih se vzorcev v sliki,
- omogočanje interpretacije (angl. interpretability): izbor mora biti utemeljen, npr. iskati je treba robove, vogale in druge izrazite slikovne vzorce.

Obstaja veliko različnih algoritmov za avtomatsko določanje slikovnih točk na posnetkih, ki so jih razvili številni avtorji (Kraus, 2004; Fritch et al., 1993). Algoritmi se na postopkovni ravni med seboj razlikujejo, pri čemer so določeni izmed njih v nekaterih situacijah primernejši od drugih. Za izvedbo naše naloge smo izbrali Förstnerjev operator značilnih točk, ki tudi izpolnjuje vse zgoraj našete kriterije in zagotavlja dobre rezultate v relativno kratkem času procesiranja. Algoritem deluje tako, da najprej poišče optimalno velikost okna, znotraj katerega potem po zgoraj postavljenih kriterijih določi optimalno točko. Na podlagi omenjenega algoritma, ki je v celoti objavljen v Förstner in Gülch (1987), smo izdelali programski modul, njegovo delovanje pa preverili na različnih podatkih. Na primeru (slika 5) je razvidna uspešnost algoritma pri določitvi značilnih točk.

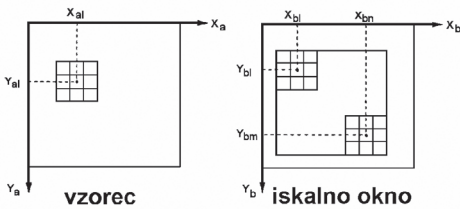


**Slika 5:** Prikaz značilnih točk, ki so bile določene s Förstnerjevim operatorjem.

#### 4 SLIKOVNO UJEMANJE POVRŠIN

Za določitev in izmero homolognih točk na stereoparu smo uporabili metodo slikovnega ujemanja površin (angl. area-based matching). Ko na enem posnetku stereopara (primarni posnetek) izberemo ustrezno točko, jo s postopki slikovnega ujemanja poiščemo na drugem posnetku. Obstaja več različnih metod slikovnega ujemanja. V naši nalogi smo se odločili za metodo slikovnega ujemanja površin, ki za kriterij podobnosti uporabi korelacijski koeficient. Razlog za izbiro je visoka učinkovitost in zanesljivost metode (Baltasvias et al., 1990; Kraus, 2004; Vollmerhaus, 1987; Vovk, 1998).

Metoda temelji na ugotavljanju podobnosti dveh površin, ki ju predstavljata izsek na primarnem posnetku in izsek na njegovem stereoparu. Izsek površine v matematičnem smislu predstavlja del slikovne matrike. Na primarnem posnetku je izbrana točka v centru matrike, velikost matrike pa mora biti primerna glede na značilnost točke in njene okolice. To matriko imenujemo vzorec ali referenčna matrika. Na stereoparu določimo nekoliko večje iskalno okno (del slike), kjer pričakujemo, da se nahaja homologna točka. Vzorec »prekrivamo« čez iskalno okno (slika 6) in v vsaki možni poziciji (okno premikamo po vrsticah in stolpcih) izračunamo korelacijski koeficient.



Slika 6: Princip slikovnega ujemanja površin (Albertz in Kreiling, 1989).

Korelacijski koeficient je razmerje med kovarianco radiometričnih vrednosti vzorca in matrike v iskalnem oknu ( $\sigma_{12}$ ) in produkta standardnih odklonov obeh matrik ( $\sigma_1$  je standardni odklon radiometričnih vrednosti v vzorcu,  $\sigma_2$  je standardni odklon radiometričnih vrednosti v matriki iskalnega okna) (Kraus, 2004):

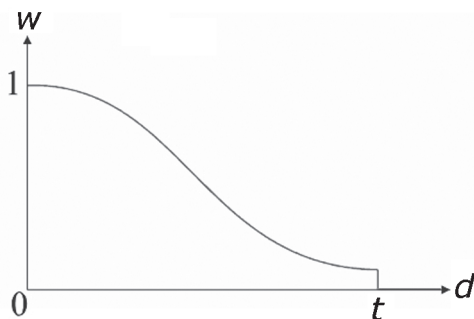
$$r = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (2)$$

Koeficient  $r$  lahko obsega vrednosti med  $r = -1$  (ena matrika je negativ druge) in  $r = 1$  (absolutno ujemanje – matriki sta popolnoma identični). Če je  $r$  enak nič, ni nobene podobnosti med vzorcem in matriko v iskalnem oknu. Za najbolj verjetno pozicijo homologne točke tako izberemo centralni piksel tiste pozicije vzorca v iskalnem oknu, kjer ima korelacijski koeficient največjo vrednost (npr. če je največji  $r = 0,85$ , to hkrati pomeni, da je ujemanje med vzorcem in matriko v iskalnem oknu 85 %). Definiramo lahko tudi prag (angl. threshold), ki določa, katera minimalna vrednost  $r$  je še sprejemljiva.

## 5 METODA ROBUSTNE OCENE POGREŠKOV OPAZOVANJ

Za uspešnost avtomatizacije celotnega postopka relativne orientacije je treba v proces vgraditi mehanizem, ki bo avtomatsko nadzoroval pogreške izračuna parametrov relativne orientacije. Uporabljeni algoritem za izračun parametrov relativne orientacije temelji na Gauß -Markovem modelu posredne izravnave po metodi najmanjših kvadratov. Ta model smo nadgradili tako, da smo vanj vključili robustno oceno (angl. robust estimation) pogreškov opazovanj, pri čemer opazovanja predstavljajo posamezne fotomeritve homolognih točk. Izraz robusten se nanaša predvsem na lastnost statističnih cenilk in zagotavlja, da so takšne cenilke čimbolj neobčutljive na velika odstopanja v podatkih. Pri tem odstopanja predstavljajo razliko med merjenimi in ocenjenimi oz. izravnanimi vrednostmi podatkov.

Tehnike robustne ocene opazovanj posvečajo veliko pozornosti ustreznemu določevanju uteži posameznim opazovanjem, ki so vključena v proces izravnave. Uteži se določajo glede na izbrano utežno funkcijo, ki je za naš primer predstavljena na sliki 7.



**Slika 7:** Utežna funkcija ( $d$  – pogrešek opazovanj,  $w$  – utež,  $t$  – tolerančni prag).

Enačba utežne funkcije:

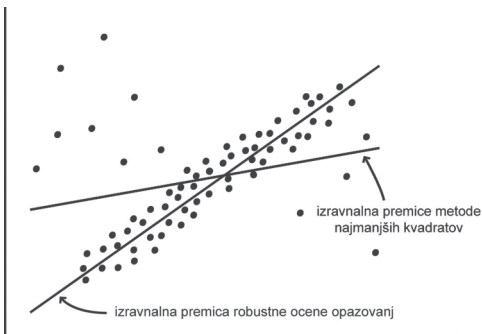
$$w(d_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + (a \cdot |d_i|)^b} & \text{za } d \leq t \\ 0 & \text{za } d > t \end{cases} \quad (3)$$

Parametra  $a$  in  $b$  v utežni funkciji določata obliko krivulje, pri čemer velja  $a > 0$  ter  $b > 0$ .

Ker so opazovanja vedno obremenjena s pogreški, so ocenjene vrednosti parametrov oz. neznank neposredno pod njihovim vplivom. Da bi preprečili prenos predvsem večjih in grobih pogreškov na iskane parametre ter kvarjenje njihove kvalitete, določimo delež vpliva posameznega opazovanja na neznanke glede na velikost njegovega pogreška in temu ustrezno dodelimo utež. Utež je torej tista količina, ki uravnava vplive opazovanj in po potrebi grobo pogrešena opazovanja tudi izključi iz postopka izravnave.

Zanimiva je primerjava tehnike robustne ocene opazovanj z metodo najmanjših kvadratov, ki je v geodeziji zelo uveljavljena. Grafično je razlika med metodama ponazorjena z enostavnim primerom na sliki 8. V primeru metode najmanjših kvadratov na iskane parametre (iskana parametra





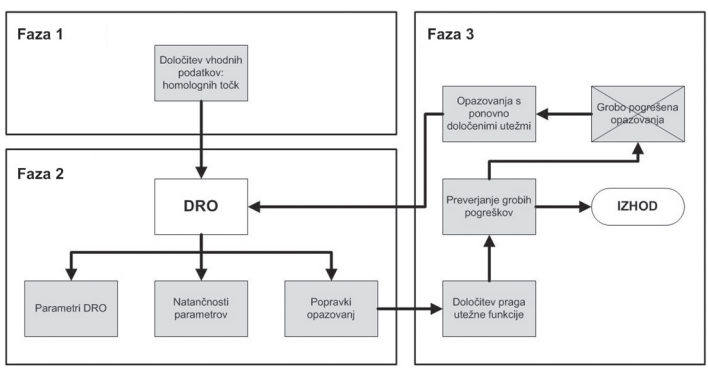
Slika 8: Grafična ponazoritev primerjave metode najmanjših kvadratov in tehnik robustne ocene.

na sliki sta koeficienta  $a$  in  $b$  linearne regresije) močno vplivajo tudi grobo pogrešena opazovanja, medtem ko v primeru tehnike robustne ocene določitev neznanih parametrov grobo pogrešena opazovanja nimajo vpliva. Ker je zanesljivost avtomatskega določanja in merjenja homolognih točk pričakovano slabša, kot so ročne meritve, je zato uporaba tehnik robustne ocene nujna.

6 IZVEDBA IN REZULTATI AVTOMATIZACIJE RELATIVNE ORIENTACIJE

Praktična izvedba raziskave je obsegala izdelavo računalniških programov v obliki posameznih modulov (v razvojnem okolju Visual C++ 6.0). Posamezen modul rešuje določeno fazo procesa, vendar pa z njihovo ustrezno medsebojno povezavo dosežemo popolno avtomatizacijo izračuna parametrov relativne orientacije. Modularna zgradba je primerna iz več vidikov, glavni razlog je v lažjem testiranju posameznih faz in ugotavljanju njihove uspešnosti delovanja, poleg tega pa lahko posamezne module uporabimo tudi pri drugih fotogrametričnih nalogah.

Celoten postopek smo razdelili v tri faze: zajem vhodnih podatkov (faza 1), izračun parametrov relativne orientacije (numerična oz. digitalna relativna orientacija – DRO; faza 2) in oceno pogreškov opazovanj (faza 3). Izdelava računalniških programov je bila dokaj zahtevna, saj gre za kompleksne matematične algoritme, ki jih je v končni fazi treba na ustrezen način povezati v smiselno celoto. Slika 9 prikazuje izvedbo in povezanost posameznih delov omenjenih faz.



Slika 9: Diagram izvedbe avtomatizirane relativne orientacije (DRO – digitalna relativna orientacija).

Pravilnost delovanja posameznih faz smo preverili na aeroposnetkih, za katere smo že imeli na voljo fotomeritve in parametre orientacije (notranje, relativne in absolutne). Numerični rezultati, ki smo jih dobili s postopkom avtomatizirane relativne orientacije, so se ujemali s tistimi, ki smo jih dobili po klasičnem postopku aerotriangulacije (Kogoj et al., 2006).

Praktično delovanje smo nato preizkusili še na primeru terestričnih snemanj, katerim je izdelani postopek predvsem namenjen. Snemanje smo izvajali s parom običajnih digitalnih kamer Canon XM1, ki sta pritrjeni na kovinskem nosilcu na fiksni razdalji približno 1 m (slika 10). Kameri sta že bili predhodno kalibrirani, kar pomeni, da poznamo njune parametre notranje orientacije (goriščnico, glavno točko in distorzijo objektivov).



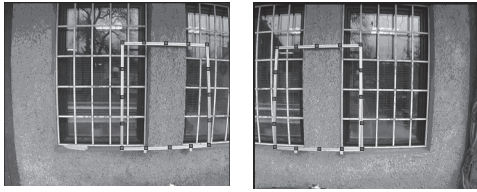
**Slika 10:** Par digitalnih kamer Canon XM1, pritrjenih na kovinskem nosilcu.

Namen testa je bil predvsem preizkus delovanja razvitega sistema v realnih razmerah, ki vključuje terensko snemanje z videokamera srednje ločljivosti.

Vhodne podatke (homologne točke) smo zajeli na različne načine: ročno oz. polavtomatsko in avtomatsko, nato smo izračunali parametre relativne orientacije na oba načina (neodvisni modeli, priorientacija) in rezultate med seboj primerjali. Ročne oz. polavtomatske meritve smo izvajali v programu DOG (avtor in lastnik: DFG CONSULTING d.o.o.). Podrobnosti izvedenih testov so objavljene v Kogoj et al. (2006). Zbirni rezultati izračuna parametrov relativne orientacije so predstavljeni v preglednici 1, in sicer tako za metodo neodvisnih modelov kot tudi za metodo priorientacije.

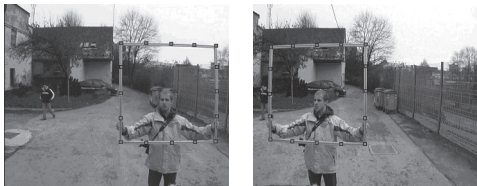
Za razumevanje preglednice 1 moramo pojasniti vsebino stereoparov, ki so označeni od 1 do 5. Stereopar 1 je posnetek fasade, stereopar 2 je vsebinsko enak, le da je registriran v drugem časovnem trenutku. V primeru stereopara 3 smo uporabili poseben kovinski okvir, na katerega smo pritrdili tarče, ki zagotavljajo dobro razporeditev in prepoznavnost vhodnih točk za relativno orientacijo (slika 11).

Stereopar 4 smo posneli tako, da smo okvir s tarčami premikali v območju stereopreklopa. Pri terestričnih posnetkih je namreč v praksi velikokrat problem, ker del posnetka predstavlja nebo, tako da na potrebnih lokacijah ne moremo določiti točk. S premikanjem okvirja (pri tem je



**Slika 11:** Primer stereopara 3 s tarčami na okviru. Stereopara 1 in 2 sta vsebinsko enaka, le brez okvira.

pomembna časovna sinhronizacija obeh posnetkov) lahko zagotovimo ustrezne točke na celotnem območju preklopa. Stereopar 5, na katerem smo izvedli popolnoma avtomatiziran izračun relativne orientacije, je po vsebini enak stereoparu 4 (premikanje okvirja). Pri takšni snemalni konfiguraciji, ki je, kot že rečeno, najbližje realnim okoliščinam (nebo v ozadju, za razliko od stereoparov 1, 2 in 3), je bilo zato smiselno preveriti robustnost algoritma popolnoma avtomatizirane relativne orientacije.



**Slika 12:** Primer stereopara 4 in 5 s premikanjem okvirja.

Rezultati relativne orientacije neodvisnih modelov in relativne orientacije s priorientacijo za omenjene stereopare 1–5 so tako združeni v preglednici 1.

DRO neodvisnih modelov	$\omega'$ [gon]	$\varphi'$ [gon]	$\kappa'$ [gon]	$\varphi''$ [gon]	$\kappa''$ [gon]	
Ročni / Polavtomatski zajem točk	Stereopar 1	1.126	-1.936	-1.332	-0.067	-1.614
	Stereopar 2	0.890	-1.716	-0.788	0.249	-1.078
	Stereopar 3	1.162	-1.620	-1.288	0.149	-1.581
	Stereopar 4	1.151	-1.840	-1.369	-0.006	-1.620
ARO	Stereopar 5	0.874	-1.808	-0.694	-0.410	-0.867
povpr. vr. parametra		1.007	-1.783	-1.028	0.045	-1.293
max. odst. od povpr.		0.155	0.163	-0.341	-0.455	0.426

DRO s priorientacijo	$by$ [m]	$bz$ [m]	$\omega$ [gon]	$\varphi$ [gon]	$\kappa$ [gon]	
Ročni / Polavtomatski zajem točk	Stereopar 1	-0.021	0.030	-1.118	1.873	-0.249
	Stereopar 2	-0.022	0.028	-1.145	1.837	-0.216
	Stereopar 3	-0.013	0.027	-0.882	1.969	-0.263
	Stereopar 4	-0.021	0.025	-1.155	1.774	-0.261
ARO	Stereopar 5	-0.011	0.028	-0.844	1.486	-0.167
povpr. vr. parametra		-0.017	0.028	-0.996	1.845	-0.239
max. odst. od povpr.		-0.006	-0.003	-0.159	0.287	0.072

**Preglednica 1:** Rezultati relativne orientacije neodvisnih modelov in priorientacije.

Na levi strani preglednice 1 so prikazani rezultati relativne orientacije neodvisnih modelov, na desni pa relativne orientacije s priorientacijo. V zgornjem delu obeh tabel so prikazani rezultati relativne orientacije ročnega oz. polavtomatskega zajema vhodnih podatkov (DRO – digitalna relativna orientacija; stereopar 1, 2, 3 in 4), sledijo rezultati avtomatskega zajema (ARO; stereopar 5). Zadnji dve vrstici prikazujeta povprečno vrednost posameznega parametra in največje odstopanje, ki je največja absolutna razlika med vrednostjo parametra za posamezen stereopar in njegovo aritmetično sredino. Razlike med izračunanimi parametri se na prvi pogled zdijo precej

velike, vendar pa je po našem mnenju to predvsem vpliv skromnih tehničnih karakteristik samega sistema, ne pa nepravilnosti uporabljenih algoritmov. Obravnavani snemalni sistem naj bi bil namenjen predvsem zajemu prostorskih objektov iz razdalje do 50 m, s snemalnim kotom  $75^\circ$  in velikostjo digitalnih slik  $720 \times 576$  pikslov. V takim razmerah kotno odstopanje velikosti med 0,4 in 0,5 gona na posnetku predstavlja razliko le 2–3 piksle. Rezultati bi bili morda nekoliko boljši, če bi pred samim snemanjem ponovili kalibracijo kamer, kar zaradi časovnih omejitev nismo mogli izvesti.

Pri obravnavi rezultatov relativne orientacije s priorientacijo ugotovljamo enako, da so razlike med posameznimi stereopari razmeroma velike, vendar so glede na metodo neodvisnih modelov v vseh pogledih manjše. Predvsem odstopanja baznih komponent  $b_y$  in  $b_z$ , ki vključujejo tudi mehansko nestabilnost pritrjenih kamer na nosilec, so zelo majhna (maksimalno odstopanje od aritmetične sredine je manjše od 1 cm).

## 7 ZAKLJUČEK

Raziskovalni projekt »Razvoj metod in sistemov za slikanje terena ter detekcijo in razpoznavanje tarč« (Kogoj et al., 2006), katerega del sestavlja opisana raziskava, je bil vsebinsko obsežen. V njem smo obdelovali naslednje raziskovalne probleme: 1. detekcija objektov na osnovi premikanja, 2. prepoznavanje objektov na osnovi značilk (npr. barve, oblike), 3. določitev pozicije objekta na osnovi stereoposnetkov ter določitev smeri in hitrosti premikajočih objektov. Ker so nas zanimali predvsem dinamični terenski sistemi, je za določitev pozicije objekta (oz. v najširšem smislu tarče, to je predmeta našega trenutnega zanimanja) nujna predhodna izvedba relativne orientacije stereoposnetkov, narejenih z digitalno videokamero ali digitalnim fotoaparatom.

V opisani raziskavi smo razvili metodologijo in računalniške algoritme, ki v celoti avtomatizirajo postopek relativne orientacije, in s tem smo rešili enega od ključnih problemov omenjenega projekta. Veliko časa je bilo potrebnega za izbiro in podroben študij posameznih algoritmov, izdelavo metodologije ter na koncu računalniških programov. Z različnimi testi smo ugotavljali pravilnost delovanja programov in uporabnost v praktičnih pogojih snemanja. Ugotovili smo, da posamezni računalniški moduli delujejo pravilno, čeprav bi nekatere lahko še optimizirali, sam snemalni sistem digitalnih kamer, ki smo jih uporabili, pa ima določene pomanjkljivosti (predvsem manjša ločljivost senzorja in stabilnost kamer). S praktičnim preizkušanjem smo ugotovili, da avtomatizacija postopka relativne orientacije deluje uspešno in zanesljivo, če v postopek vgradimo nadzor nad oceno pogreškov, predvsem pa smo do rezultatov prišli hitreje kot z ročno ali polavtomatsko metodo. Časovni prihranek pa je odvisen predvsem od števila vhodnih meritev (slikovnih točk).

Končni cilj je izdelava terenskega snemalnega sistema z uporabo digitalnih fotoaparátov ali kamer, ki bi v realnem času zagotavljal prostorsko pozicijo objektov. V okviru opisane raziskave smo izdelali potrebne gradnike, ki so potrebni za realizacijo takšnega sistema.

## Literatura in viri:

- Albertz, J., Kreiling, W. (1989). *Photogrammetrisches Taschenbuch*. Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag, 215, 218–219, 260.
- Baltsavias, E. P., Beyer, H. A., Fritsch, D., Lenz, R. K. (1990). *Tutorial – Fundamentals of Real-Time Photogrammetry*. Zürich: ETH Zürich.
- Förstner, W., Gülch, E. (1987). *A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features*. V: *Proceedings Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data* (str. 281–305). Interlaken.
- Fritsch, D., Hahn, M., Haala, N., Sester, M. (1993). *Tutorial – Photogrammetric Image Processing '93*. Stuttgart: Institut für Photogrammetrie.
- Kogoj, D., Ambrožič, T., Savšek - Safić, S., Kosmatin Fras, M., Grigillo, D., Petrovič, D., Gvozdanovič, T., Ranfl, U., Fras, Z., Vezočnik, R., Praprotnik, M. (2006). *Razvoj metod in sistemov za slikanje terena ter detekcijo in razpoznavanje tarč. Končni elaborat raziskovalnega projekta CRP programa »Znanje za varnost in mir 2004–2010«*. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo in DFG CONSULTING d.o.o.
- Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie – Band 1*. Berlin-New York: Walter de Gruyter.
- Schenk, T. (1999). *Digital Photogrammetry, Volume I, Background, Fundamentals, Automatic Orientation Procedures* (str. 349–355). Ohio: The Ohio State University, Terrascience.
- Tang, L., Heipke, C. (1993). *An approach for automatic relative orientation*. V: A. Grün in H. Kahman (ur.) *Optical 3-D measurement techniques II* (str. 347–354). Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag.
- Vezočnik, R. (2006). *Avtomatizacija relativne orientacije stereopara*. Diplomaska naloga. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Vollmerhaus, D. (1987). *A Fast Algorithm for Local Matching of Patterns in Images*. V: *Proceedings Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data* (str. 273–280). Interlaken.
- Vovk, J. (1998). *Avtomatsko generiranje digitalnega modela reliefa na osnovi aerospnetkov*. Diplomaska naloga. Ljubljana: Fakulteta za računalništvo in informatiko.

**Prispelo v objavo: 25. januar 2008**

**Sprejeto: 21. maj 2008**

**doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, univ. dipl. inž. geod.**

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: mfras@fgg.uni-lj.si

**Rok Vezočnik, univ. dipl. inž. geod.**

DFG CONSULTING d.o.o., Pivovarniška 8, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: rok.vezocnik@dfgcon.si

**mag. Tomaž Gvozdanovič, univ. dipl. inž. geod.**

DFG CONSULTING d.o.o., Pivovarniška 8, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: tomaz.gvozdanovic@dfgcon.si

**izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.**

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si