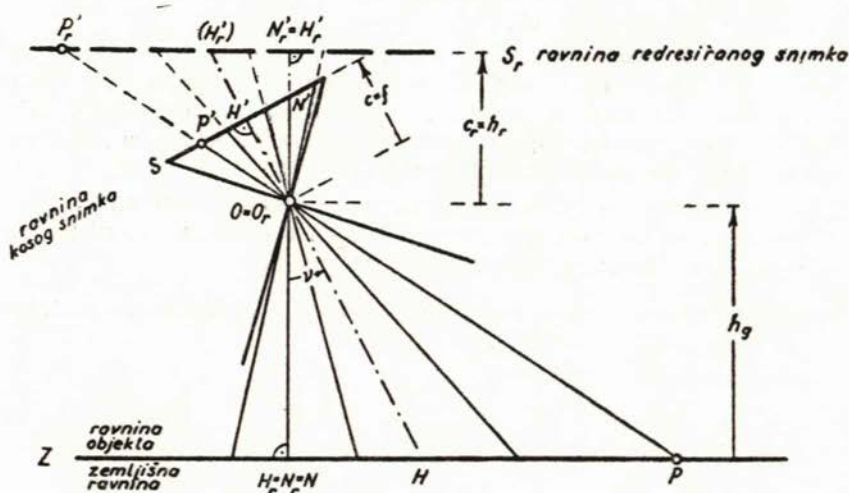


FOTOGRAMETRIJSKO POLARNO ODREĐIVANJE

Dubravka MEDIĆ — Zagreb*

Orientacija pri redresiranju (sl. 1), vanjska orientacija pojedinačnih aerosnimaka i relativna orientacija aerosnimaka (sl. 2) predstavljaju zapravo presjecanje natrag. Međutim u geodeziji se to presjecanje natrag izvodi u



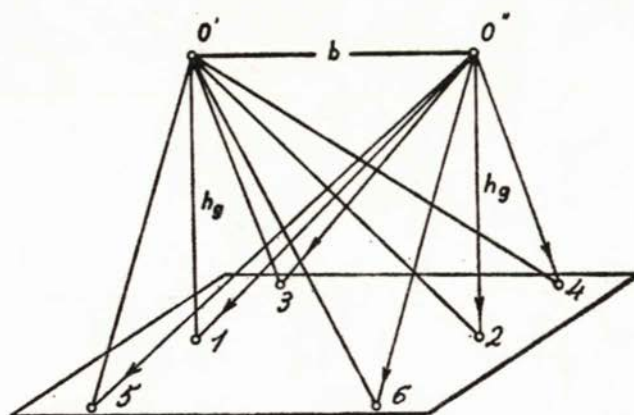
Sl. 1. Iz ove slike se vidi da su kod redresiranja sve vanjske zrake nakon izvršene vanjske orientacije presječene jednom te istom horizontalnom ravninom zemljišta. Time je u tim vanjskim odrescima određena njihova glavna komponenta — vertikalna komponenta $h_g = \text{const.}$; pored orijentiranog smjera određena je time i dužina vanjskog odreska zrake, a to je polarno određivanje. [1]

jednoj (horizontalnoj) ravnini (sl. 3), dok se u fotogrametriji radi o prostornom presjecanju natrag (sl. 2. i 4.).

Kod vanjske orientacije pojedinačnih aerosnimaka imamo 6 orijentacionih elemenata: 3 koordinatna pomaka (Δx , Δy , Δz) i 3 rotacije oko tih smjerova (ω , φ i κ) (sl. 4). U geodeziji obzirom na horizontaliranu alhidadu, otpadaju nagibi ω i φ , a kako se stvar rješava u horizontalnoj ravnini otpada i Δz , te prema tome ostaju samo 3 orijentaciona elementa: x_0 , y_0 , α (sl. 3).

* Adresa autora: Dubravka Medić, dipl. inž. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26

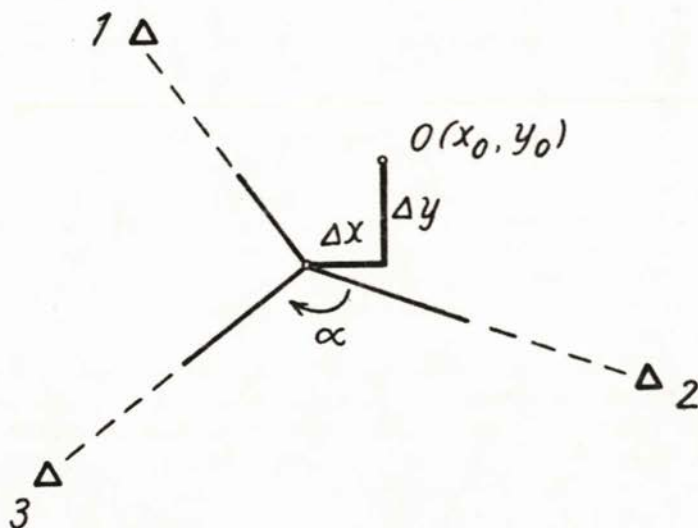
Ovaj rad izrađen je u okviru istraživačkog zadatka »Fotogrametrijsko istraživanje prikaza prostora« (voditelj prof. dr F. Braum), što ga financira Samoupravna interesna zajednica za znanstveni rad (SIZ III).



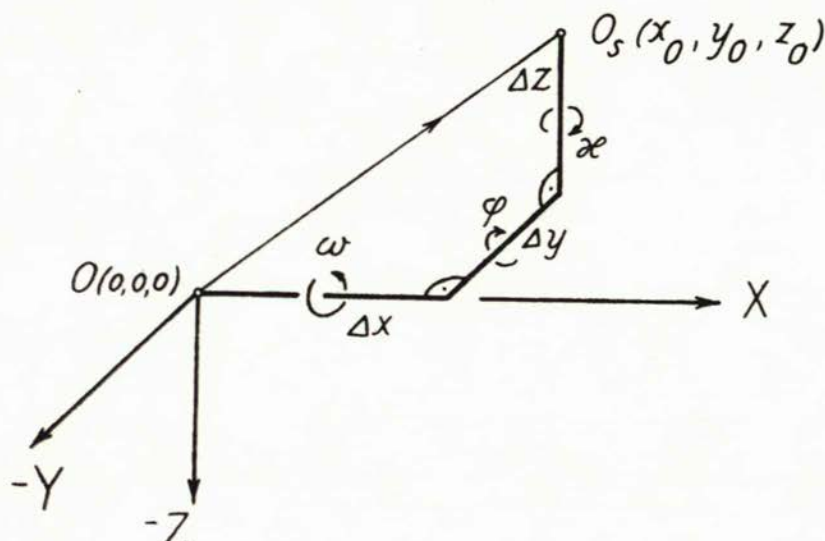
Sl. 2. Desni snop zraka treba (pri priključivanju) biti u prostoru tako smješten i rotiran da njegove zrake 1", 2", 3", 4", 5", 6" pogađaju pripadni prostorni položaj na lijevom snopu — a to je prostorno presjecanje natrag. [1]

Apsolutna orijentacija modela je njegova prostorna transformacija u zemljišni geodetski koordinatni sistem. Ona se do nedavno, tj. do afirmacije kompjutera, izvodila gotovo isključivo optičko-mehanički: horizontacijom modela i mijenjanjem baze u stereoinstrumentu, te rotacijom i translacijom planšete, a tako se i danas najčešće radi.

Fotogrametrijskim snimanjem dobijemo za sve točke snimke samo smjerove zraka obzirom na optičku os (os snimanja), a njenu duljinu ne. Prema tome u posve fotogrametrijskom premjeru (bez korištenja geodetskih podataka) otpada polarna metoda. Između fotogrametrijskog premjera u stereofoto-



Sl. 3. Orijentacioni elementi x_0 , y_0 , α geodetskog presjecanja natrag u horizontalnoj ravni; 1, 2, 3 orijentacione točke.



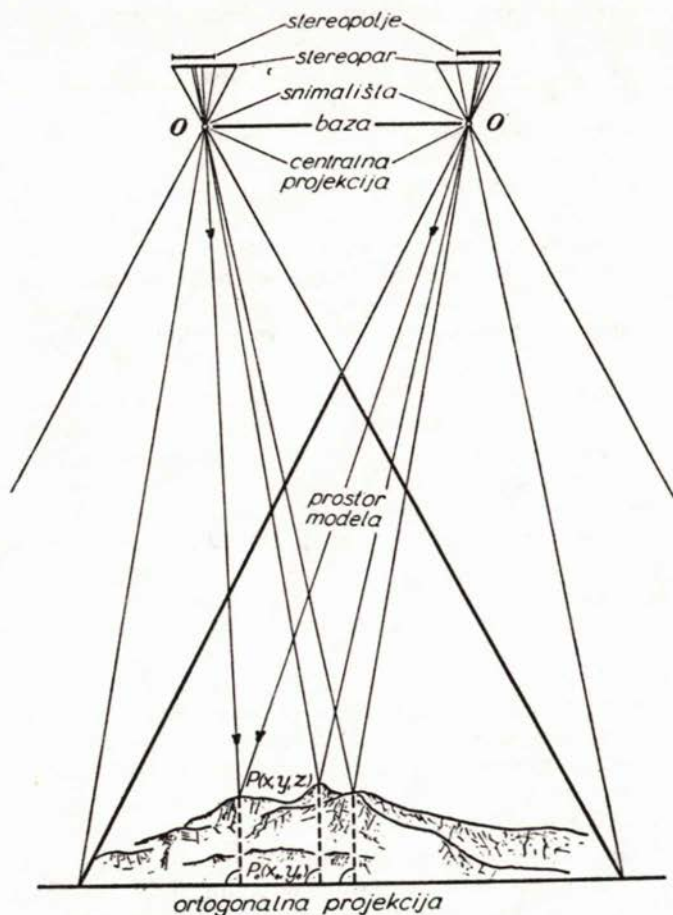
Sl. 4. Orientacioni elementi $x_0, y_0, z_0, \omega, \varphi, \alpha$ vanjske orijentacije fotogrametrijskog snopa zraka za prostorno presijecanje natrag.

grametriji i redresiranja postoji bitna razlika [3,78]. Kod redresiranja pretpostavljamo horizontalan teren, pri čemu bi vertikalna komponenta za sve zrake bila jednaka, a to je u aerofotogrametriji i glavna komponenta rekonstruirane zrake. Visina donjeg kraja vertikalne komponente dobivena je iz geodetskih podataka, a visina gornjeg kraja te komponente dobivena je vanjskom orijentacijom. Nakon izvršene orijentacije rekonstruirani se snop zraka presječe s rekonstruiranom horizontalnom ravninom terena. Orijentacijom rekonstruiranog snopa dobili smo za svaku točku orijentirani smjer njene zrake, što bi u geodeziji dobili mjerenjem horizontalnog i vertikalnog kuta, dok je duljina te zrake određena po njenoj glavnoj komponenti (u geodeziji je to dužina reducirana na horizont).

Dakle kod objektivnooptičkog redresiranja premjer se vrši polarno koristeći geodetske podatke $h = \text{const}$. U konvencionalnoj stereofotogrametriji premjer se za sve točke vrši presijecanjem naprijed (sl. 5). Međutim, postupkom vanjske orijentacije pojedinačnih aerosnimaka [2] omogućeno je na projekcionom stereoinstrumentu i polarno određivanje, i to onih točaka čija je visina geodetski poznata. Prema zaključku u [5] vanjska orijentacija pojedinačnih aerosnimaka trebala bi biti točnija od konvencionalne orijentacije modela (relativna + apsolutna orijentacija).

Pri polarnom određivanju potrebno je u tahimetriji iz poznatog stajališta poznavati smjer prema određivanoj detaljnoj točki, kao i udaljenost do nje. I u tahimetriji se direktna kosa dužina reducira na horizontalnu dužinu kao svoju glavnu komponentu.

Ako smo proveli vanjsku orijentaciju aerosnimke, onda je time u prostoru modela s projekcionim središtem određen apsolutni prostorni položaj snimališta, kao i prostorni položaj rekonstruirane zrake za svaku snimljenu točku. Poznavajući geodetske koordinate i visine za određeni broj signaliziranih



Sl. 5. U stereofotogrametrijskom premjeru (aero ili terestričkom) svaka detaljna točka određuje se presijecanjem naprijed sa krajeva baze. [1]

točaka, a time indirektno i njihovu aplikatu z_m u modelu, možemo se za polarno određivanje tih točaka iz samo jedne vanjski orjentirane snimke ograničiti na najveću komponentu dužine, a to je vertikalna komponenta vanjskog odreska, koja ide od projekcionog središta do nivoa dotične točke modela. To je njihova z — razlika. Ta je komponenta nakon izvršene vanjske orijentacije uspostavljena samim postavom poznate geodetske visine za tu točku na »h«-brojilu stereoinstrumenta. Postavom geodetske visine i monokularnim viziranjem određene točke na snimci rekonstruirana zraka presječena je na projekcionom instrumentu razinom točke. Sve je rađeno u modelu. Time je stvorena mogućnost polarnog instrumentalnog određivanja detaljnih točaka čije su visine poznate. Razlika između ovakvog polarnog određivanja i tahimetrije sastoji se između ostalog i u tome što se u tahimetriji najprije odredi pol (stajalište), a tek onda se iz njega određuju detaljne točke, dok se ovdje najprije

određuju visine (geodetski), a tek kasnije pol (snimalište) vanjskom orijentacijom aerosnimke.

Zbog prethodnog geodetskog određivanja visina detaljnih točaka, polarni premjer je dakako kompliciraniji od konvencionalnog stereoskopskog premjera. Stoga se primjena polarnog fotogrametrijskog premjera ne može odnositi na totalni premjer već npr. da se poligona mreža u rastresitom šumskom području nadomjesti stalnim točkama koje bi se postavilo u enklavama i čistinama, i tamo optimalno signaliziralo (vidi sl. 5 u [5]). Njihove visine je jednostavno odrediti tehničkim nivelmanom, a mnogo je teže u takvim okolnostima odrediti njihov položaj. Takve točke često nisu pogodne ni za konvencionalnu stereoskopsku izmjeru zbog mrtvih uglova uslijed visine stabala, dok je mogućnost da se one mogu polarno odrediti iz samo jedne ili druge snimke mnogo veća.

Prema programu prof. dr. F. Brauma trebalo je ispitati točnost vanjske orijentacije pojedinačnih aerosnimaka i polarnog fotogrametrijskog određivanja točaka. Obradena je u tu svrhu aerosnimka 062 područja »Spitze«* kod kojih je snimaka mjerilo snimanja bilo $M_b \approx 2150$, žarišna daljina $f = 152$ mm, srednja pogreška geodetskog određivanja orijentacionih i kontrolnih točaka $\pm 1-2$ cm, što pretpostavlja a priori srednju koordinantnu pogrešku u x-odnosno y-smjeru od

$$m_{xg} = m_{yg} = \pm 0,01 \text{ mm.} \quad (1)$$

Kako postupak za vanjsku orijentaciju zahtjeva u svakom uglu snimke po jednu geodetski određenu točku, to se on može primjenjivati na stereoinstrumentima na kojima je primjenjena konstrukcija Zeissovog paralelograma s mogućim postavom baze $b_x = 0$. Tada štapovi postaju paralelni, te se mogu opažati sve 4 točke na snimci. To su redovito univerzalni projekcioni stereoinstrumenti (A5, A7, A10, C8...).

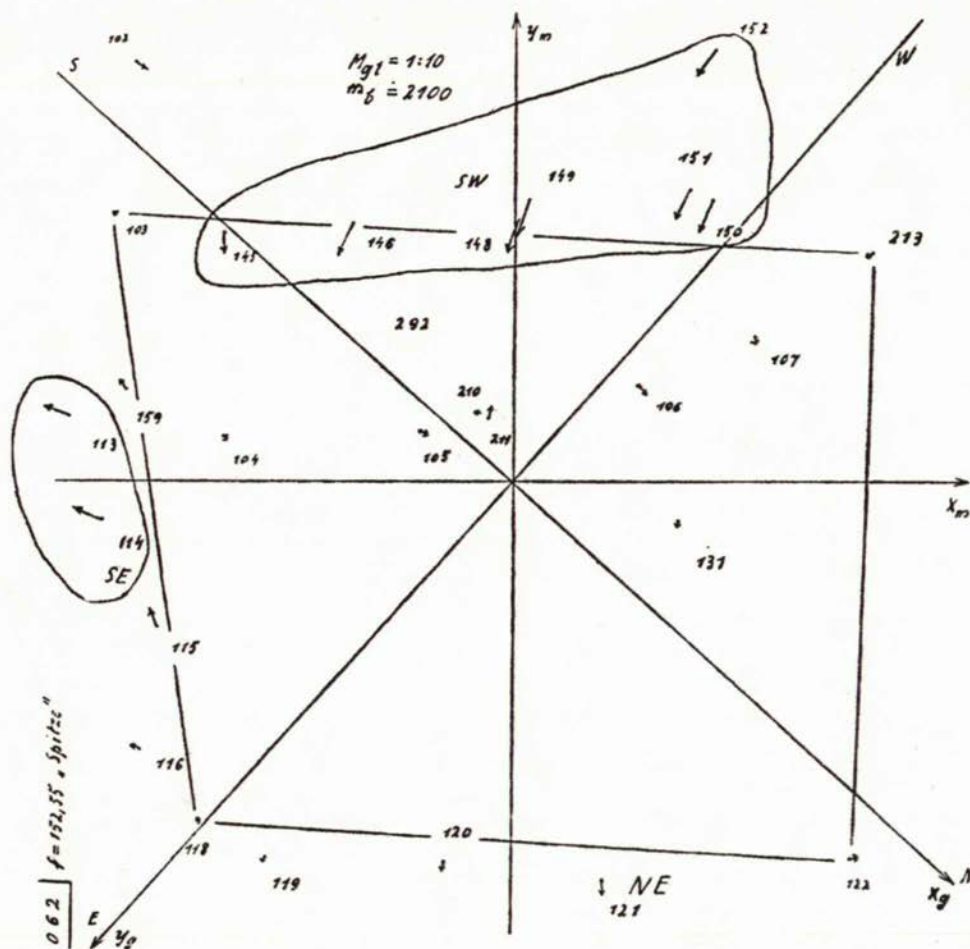
Za točnost vanjske orijentacije pojedinačnih aerosnimaka važan je pravilan razmještaj točaka, što se može postići ciljanim aerosnimanjem, i optimalna signalizacija točaka. Visina se namješta po preciznom geodetskom podatku, čime će otpasti visinska pogreška stereoskopske koincidencije. Okolnosti kod našeg ispitivanja nisu bile povoljne — nije bilo poznatih točaka u uglovima snimke, čime je poprečni raspon bio smanjen (sl. 6).

Točnost fotogrametrijskog određivanja točaka vrlo često iskazujemo u dimenziji na snimci, čime smo se oslobodili mjerila snimanja kao promjenljivog parametra. U ovoj radnji mjerenje modelnih koordinata registrirano je automatski s EK 22 firme Wild na 0,01 mm. Izmjeren je velik broj točaka metodom dvostrukih mjerenja u girusu. Dobivena je srednja pogreška aritmetičke sredine za modelne koordinate x i y.

$$m_{xm} = m_{ym} = \pm 0,007 \text{ mm.} \quad (2)$$

Obzirom na projekciono povećanje $z : f = 2,5$ pripadat će toj vrijednosti reducirana vrijednost na snimci

* Čitav materijal za ovo ispitivanje stavio nam je na raspolaganje Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Technische Universität Hannover.



Sl. 6. Orijentacioni četverokut kontrolne točke i odstupanja njihovih fotogrametrijskih položaja od geodetski određenih

$$m_{x'} = m_{y'} = \frac{m_{x_m} = m_{y_m}}{z : f} = \pm \frac{0,007}{2,5} = \pm 0,0028 = m_{x_s} = m_{y_s}. \quad (3)$$

Za jedno opažanje imali bi:

$$m_{x'} \sqrt{2} = \pm 0,00392 \doteq \pm 0,004 \text{ mm}. \quad (4)$$

Sračunate veličine su srednje pogreške a posteriori, jer su dobivene iz izvršenih mjerenja, ali se one odnose na unutarnju (postavnu), a ne na vanjsku točnost.

Nakon približne relativne orijentacije određena je vanjska orijentacija snimke 062 po metodi prikazanoj u poglavlju 345.2 iz [2]. Relativna orijentacija

radena je da bi se postupak vanjske orijentacije pojedinačne snimke ubrzao. Geodetske koordinate krajeva jedne dijagonalne orijentacione dužine (npr. 1-3) transformirane su po Helmertu u modelne koordinate, a iz odstupanja Δx odnosno Δy na krajevima druge dijagonalne orijentacione dužine (2-4) sračunate su popravke nagiba po formulama (3451.19) iz [2]:

$$v_{\omega} = \frac{f}{\frac{1}{2} d_{2-4}^2 n} (\Delta x_2 + \Delta x_4) \quad v_{\varphi} = \frac{f}{\frac{1}{2} d_{2-4}^2 n} (\Delta x_2 + \Delta y_4) \quad (5)$$

gdje je d' duljina orijentacione dijagonale na snimci, a $n = z_m : f$ je projekciono povećanje. Formule (5) važe za A5, A7, A10. Za $n = 2.5$ i $M_b = 1:2083$ iznosi mjerilo modela

$$M_m = n \cdot M_b = 1:833,33. \quad (6)$$

Nakon izvršene vanjske orijentacije pojedinačne snimke izmjerene su modelne koordinate svih signaliziranih točaka pri zauzetim zadanim geodetskim visinama na visinskom brojilu, kao što je već ranije navedeno.

Izmjerene modelne koordinate korigirane su za:

1. utjecaj distorzije δ_r ,
2. utjecaj preostale pogreške nagiba $\delta\omega$ i $\delta\varphi$
3. utjecaj instrumentalnih pogrešaka stereoinstrumenata Autographa A7 Wild — br. 357 na kojem su vršena mjerenja.

Ad 1. Kako nismo imali kompenzacionih ploča, pročitane modelne koordinate korigirane su računski za utjecaj distorzije Optonovog objektiva Pleogon A broj 98184 nominalne slikovne daljine 153 mm (kamera RMK 23×23). Optička deformacija za mjerene točke bila je interpolirana u podatke certifikata, i te smo vrijednosti pomnožili s projekcionim povećanjem $z_m : f = 2.5$.

Ad 2. Preostale pogreške nagiba određene su iz orijentacionog četverokuta točaka 103, 213, 122 i 218 (sl. 6). Utjecaj tih malih pogrešaka je zbog mrtvih hodova točnije izračunati nego nanijeti korekcije na instrumentu. Modelne koordinate korigirane su računski za utjecaj δ_r' , $\delta\omega$ i $\delta\varphi$ pomoću algoritma za tu svrhu.

Ad 3. Modelne su koordinate korigirane također računski za instrumentalnu pogrešku određenu polinomom. Taj je polinom određen na temelju »treba — jest« vrijednosti modelnih koordinata križišta rešetkaste ploče (Gitterplatte). »Treba« vrijednosti modelnih koordinata križišta su poznate. Iz odstupanja »treba-jest« tih modelnih koordinata bio je u Photogrammetrisches Institut der Universität-Bonn određen polinom 5. stupnja za x_m - i y_m — popravke za projekcionu daljinu $z_m = 375$ mm. Program za računanje vrijednosti polinoma na Hewlett — Packard 9845 A izradio je dipl. ing. T. Fiedler.

Nakon korekcije 1, 2, 3 određeni su elementi transformacije s orijentacionim točkama zadanog četverokuta (103, 213, 122, 118, sl. 6). Modelne koordinate transformirane su u geodetske i s tako izjednačenim elementima transformacije transformirane su u geodetske i modelne koordinate ostalih točaka, koje su služile za kontrolu. Na taj smo način dobili srednje pogreške iz:

a) popravaka prekobrojnih orijentacionih točaka (4 umjesto 2)

$$m_{xfo} = \pm 0.0165 \text{ m}; \quad m_{yfo} = \pm 0.0131 \text{ m}; \quad m_{xyfo} = \pm 0.014 \text{ m}; \quad m_{lfo} = 0.021 \text{ m}$$

b) odstupanja u svim 13 kontrolnim točkama unutar orijentacionog četverokuta (sl. 6)

$$m_{xrk} = \pm 0.0210 \text{ m}; \quad m_{yrk} = \pm 0.0166 \text{ m}; \quad m_{xyrk} = \pm 0.0187 \text{ m}; \quad m_{lrk} = 0.0265 \text{ m}.$$

Budući da se izjednačenje vrši po orijentacionim točkama, to se normalno očekuje manja srednja pogreška izvedena iz prekobrojnih orijentacionih točaka negoli ona iz kontrolnih točaka, no ta razlika ne smije kod točnih mjerenja i ispravnog postupka biti prevelika.

U izračunavanju srednje pogreške dobivene iz popravaka u orijentacionim točkama proizašlih iz izjednačenja elemenata transformacije nisu bile uzete u obzir i pogreške geodetskog određivanja, dok su u izračunavanju srednjih pogrešaka dobivenih iz nesuglasica u kontrolnim točkama bile uzete u obzir i pogreške geodetskog određivanja (v. (1)), na koju potrebu je ukazano u [4] (formule 9 i 10), a opravdanost čega će se pokazati i u kasnijoj analizi rezultata. Izvan orijentacionog četverokuta imamo ekstrapolaciju, kod koje se očekuju veće pogreške nego kod interpolacije.

U našem slučaju ima dvije ekstrapolacije. Prva ekstrapolacija u transformaciji odnosi se na grupu SE i na grupu SW, te na točku 121 u NE (sl. 6). U točkama grupe SE (113, 114) odstupanja su nešto veća (5.7 cm), što se može rastumačiti ekstrapolacijom korekcionog polinoma za instrumentalne pogreške iz područja gdje nije bilo križišta rešetkaste ploče. Grupa SW (145, 146, 148, 149, 150, 151 i 152) je izvan orijentacionog četverokuta, ali unutar polinomske interpolacije, te ima odstupanja $\Delta x \approx 2.5 \text{ cm}$, $\Delta y \approx 8.5 \text{ cm}$, što u mjerilu modela iznosi $\Delta x_m = 30 \text{ }\mu\text{m}$ i $\Delta y_m = 102 \text{ }\mu\text{m}$.

Zbog ove mnogo veće Δy_m -vrijednosti izveli smo nakon izmjere projekcije rešetkaste ploče ponovno mjerenje pod potpuno istim okolnostima. Iz razlika ovog neovisnog dvostrukog mjerenja u svim signaliziranim i izmjerenim točkama, koje su se nalazile na formatu te snimke proizašla je stabilnost mjerenja u ovom postupku od cca $\pm 10 \text{ }\mu\text{m}$ za x_m i isto toliko za y_m , u čemu je uključena i eventualna promjena instrumentalnih pogrešaka između mjerenja prije i poslije izmjere projekcije rešetkaste mreže.

Optička deformacija mogla se odrediti s točnošću od $\pm 2 \text{ }\mu\text{m}$, što u projekciji na modelu iznosi $\pm 5 \text{ }\mu\text{m}$. Instrumentalne pogreške modelnih koordinata određene su polinomom na $\pm 5 \text{ }\mu\text{m}$ za x_m i $\pm 7 \text{ }\mu\text{m}$ za y_m . Prema tome smo mnogo veće odstupanje od $\Delta y_m = 102 \text{ }\mu\text{m}$ pripisali pogrešci ili nehomogenosti geodetskog određivanja, te zamolili Photogrammetrisches Institut Hannover da to provjeri. Nakon provjere Institut nam je potvrdio sumnju konstatiravši da u toj neslagajućoj grupi SW (sl. 6) kontrolnih točaka postoji sistematska pogreška u geodetskom određivanju. Ovo potkrepljuje stav iznesen u [4] da i kod precizne geodetske izmjere orijentacionih ili kontrolnih točaka pogreške geodetskog određivanja nisu zanemarive u ocijeni fotogrametrijske točnosti, te da je homogenost u točnosti sama po sebi bolje osigurana u aerofotogrametrijskom modelu negoli u geodetskoj izmjeri.

LITERATURA

- [1] Braum F.: Elementarna fotogrametrija«, Sveučilište u Zagrebu, 1969.
- [2] Braum F.: »Apsolutna orijentacija i deformacija modela«, Sveučilište u Zagrebu, 1980.
- [3] Braum F.: »Die äussere Orientierung der einzelnen Luftbilder«, Festschrift Karl Rinner, Mitteilungen der geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, Folge 40, Graz, 1982.
- [4] Braum F.: »Ocjena točnosti aerofotogrametrijskog određivanja na osnovu preciznih geodetskih kontrolnih podataka«, Geodetski list, 1982, 7-9, 165-168.
- [5] Braum F.: »Teorija pogrešaka vanjske orijentacije pojedinačnih aerosnimaka«, Zbornik radova Geodetskog fakulteta, Niz A. Radovi-Svezak broj 34, 1982.
- [6] Klak S.: »Teorija pogrešaka i račun izjednačenja«, Sveučilište u Zagrebu, 1982.

SAŽETAK

Fotogrametrijski premjer vrši se u stereofotogrametriji presjecanjem naprijed, a redresiranje je polarno određivanje koje pretpostavlja ravničast teren i time približno konstantnu vertikalnu komponentu vanjskog odreska zrake. U [2] je polarno određivanje iz jednog aerosnimka primjenjeno i za proizvoljan teren uzimajući u obzir visinu za svaku mjerenu točku. U tu je svrhu potreban projekcioni stereoinstrument s mogućim postavom $b_x=0$. U Zavodu za fotogrametriju Geodetskog fakulteta u Zagrebu ispitivana je točnost ovakvog određivanja iz pojedinačnog aerosnimka mjerila 1:2100. Nakon eliminacije optičke deformacije i preostalog nagiba snimka, te instrumentalnih pogrešaka dobivena je iz 4 orijentacionih točaka srednja položajna pogreška od 21 mm, a iz svih 13 kontrolnih točaka unutar orijentacionog četverokuta srednja položajna pogreška od 26 mm. Takva točnost omogućuje npr. fotogrametrijsko nadomještavanje poligone mreže u rastresitom šumskom području razasutim stalnim točkama čija se visina određuje geodetski (npr. tehničkim nivelmanom), a položaj monokularno fotogrametrijski.

ABSTRACT

The photogrammetric surveying in the stereophotogrammetry is worked out by intersection. The rectification represents a determination by ray and distance and supposes a plain terrain thereby also an approximately constant vertical component of the exterior section of the ray. In [2] was the latter determination employed for an arbitrary terrain respecting the height of every measured point. An analog stereoplotter with the possibility of the adjustment $b_x=0$ is necessary for these purpose. The examination of the accuracy achieved by these methods was worked out in the Institute for Photogrammetry at the Geodetic Faculty in Zagreb. The scale of the employed aerial photograph was 1:2100. After the elimination of lens distortion, of the remaining image inclination and of the instrumental error an planimetric mean error of 21mm resulted from redundant ground pass points and an error of 26 mm from the all 13 ground control points inside the pass quadrangle. Such an accuracy may be sufficient e.g. for the substitution of a transversing network in a not compact forest district by the spread fix points, whose heights should be determined geodetically, and situations by the monocular photogrammetric observation.