

ANALIZA POGREŠAKA U BLIZUPREDMETNOJ FOTOGRAMetriJI (DLT-metoda) METODOM SIMULIRANJA

Tomislav HENGL, Josip KRIŽAN* – Zagreb

SAŽETAK. Ovaj je rad nusproizvod primjene blizupredmetne (close-range) fotogrametrije u dendrometrijske svrhe. Temelji se na iskustvima stečenim pri izradi korisničkog programa "STABLO3D" za fotogrametrijsku izmjeru i analizu pojedinačnih stabala uporabom amaterskih snimaka. Kako se pri izradi programa težilo primijeniti fotogrametriju u šumarstvu uz uporabu što ekonomičnijih instrumenata i metoda, a pri tome većinu radnji automatizirati, odabrana je metoda direktne linearne transformacije – DLT. Ipak, unatoč činjenici da se radi o području primijenjene znanosti, problemi slučajnih pogrešaka simulacijom su svedeni na univerzalni nivo. Rezultati simulacije potvrđuju da točnost fotogrametrijske izmjere ovom metodom raste s povećanjem broja i točnosti izmjere orijentacijskih točaka, broja snimaka i preciznosti digitalizacije. Kao osobito važan element snimanja pokazao se odnos rasporeda orijentacijskih, novih mjerenih točaka i pozicija kamere.

1. UVOD

Program "STABLO3D" (Hengl & Križan, 1996) izvršni je program razvijen uporabom programskog paketa **Borland DELPHI 2.0**. Program je namijenjen izmjeri stabla u dubećem stanju u smislu izmjere dendrometrijskih elemenata te određivanju volumena stabla. Svrha mu je da se smanji terenski rad pri izmjeri i obradi podataka te da se postupci što više automatiziraju. Osim toga, istražuje se niz novih mjernih elemenata stabla, koji bi mogli otvoriti nove mogućnosti u izmjeri drvne mase te u modeliranju i simuliranju rasta stabla i sastojine. Izmjera i obrada se izvodi na skeniranim snimcima koji se učitavaju u programu. Program radi sa svim snimcima istodobno i ima mogućnost uvećanja slike. Radi bolje orijentacije na snimcima, odabirom točke na prvom snimku, iscrtavaju se pravci (koji prolaze kroz projekcijsko središte prvog snimka i tu točku) na druga dva snimka. Odabirom iste točke na drugom snimku, na trećem snimku vidimo dva pravca koja bi se trebala sjeći na mjestu mjerene točke. Time se, automatski, vizualno predočava točnost izmjere pojedine točke.

* Tomislav Hengl, dipl. ing. šumarstva, Strossmayerova 172, Osijek

e-mail: Tomislav.Hengl@public.srce.hr.

Josip Križan, student, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička cesta 30, Zagreb

e-mail: krizan@student.math.hr.

Ta metoda ne zahtijeva uporabu teodolita, fototeodolita, mjerne kamere, digitalizatora, niti kojega drugoga geodetskog instrumenta, budući da se orijentacijske točke postavljaju (kvadar-konstrukcija); upotrebljava se univerzalni fotogrametrijski algoritam, a digitalizacija se izvodi izravno na skeniranim snimcima odabirom miša. Inače je predviđena uporaba digitalnih kamera, čime bi se preskočilo razvijanje i skeniranje snimaka. Također je isprogramirana obrada podataka te sve ostale računске radnje. Radi praktičnosti, predviđeno je standardno postavljanje 8 orijentacijskih točaka (vrhovi kvadra) – najmanji broj točaka potrebnih za izjednačenje, te snimanje objekta iz tri neovisne pozicije.

Program se može lako prilagoditi i drugim područjima primjene, koja pripadaju domeni blizupredmetne fotogrametrije, a ta domena ide od elektronskih mikroskopa do svemirskih kamera: arhitektura, arheologija, medicina, industrija i inženjerstvo, meteorologija i proučavanje oblaka, astronomija i aerodinamika, atomska i nuklearna fizika, balistika i proučavanja putanje, geologija, šumarstvo, uzgoj domaćih životinja i druge biološke studije, studije ulica i prometa, podvodna fotografija kao i multimedija (Atkinson 1980).

Budući da se pri izradi programa "STABLO3D" moralo prethodno testirati algoritam izjednačenja, napisan je program za simulaciju centralne projekcije, tj. kamere. Taj je program omogućio aktivno mijenjanje parametara vanjske orijentacije: F_x , F_y , F_z , kuteva rotacije oko x , y , z – osi (α , β , χ), te žarišne daljine kamere (c). Slikovne, 2D koordinate točaka na snimci, računaju se izravnom transformacijom prema algoritmu za centralnu projekciju (matrica rotacije), čime je simulirana digitalizacija točaka. Kako se tim simuliranjem snimaka dobilo zapravo idealno mjerenje, izjednačeni i zadani parametri orijentacije savršeno su se poklapali, kao i izračunane i zadane prostorne koordinate točaka, a sve sume odstupanja težile su nuli. Kasnije je zaključeno da bi se, isto tako, moglo simulacijom pogrešaka na simuliranim snimcima analizirati utjecaj pojedinih elemenata snimanja na točnost izračuna metodom direktne linearne transformacije i pri tome istražiti zakonitosti.

Direktna linearna transformacija (DLT)

DLT je matematička metoda pomoću koje se ostvaruje izravna veza između 2D koordinata (*comparator coordinates*) snimka i 3D (prostornih) koordinata istih točaka (*object space coordinates of points*). Osnovna je karakteristika te metode linearizacija matrice rotacije. Međutim, za razliku od konvencionalnih fotogrametrijskih metoda, taj metodi nisu potrebne mjerne markice (*fiducial marks*) na fotografiji, ni ulazna aproksimacija nepoznanica (F_x , F_y , F_z , c , α , β , χ). Ulazni podaci izjednačenja DLT-om su prostorne koordinate orijentacijskih točaka (X_0 , Y_0 , Z_0), standardno odstupanje određivanja orijentacijskih točaka (s_{x_0} , s_{y_0} , s_{z_0}), slikovne koordinate orijentacijskih (x_0 , y_0) i novih točaka objekta (x_n , y_n).

DLT je potpuno univerzalna fotogrametrijska metoda, budući da se svi elementi vanjske i unutarnje orijentacije svih fotografija, prostorne koordinate (*space coordinates*) točaka objekta, sustavne pogreške kamere (distorzija objektiva, deformacija filma) rješavaju simultano računski sve kao nepoznate, a slučajne pogreške, metodom najmanjih kvadrata, svode na najmanji broj. Ipak, sami orijentacijski elementi nisu eksplicitno postignuti iz rješenja ujednačenosti sustava, tj. oni pružaju samo matematički najpodesnije rješenje (metoda najmanjih kvadrata), dok stvarne vrijednosti elemenata unutarnje i vanjske orijentacije mogu znatno odstupati. Zbog toga je pri uporabi DLT-metode za točnost izmjere, uz optimalan raspored točaka, najvažnija točnost određivanja/postavljanja orijentacijskih točaka, broj orijentacijskih točaka te točnost digitalizacije: mogućnosti blizupredmetne fotogrametrije u pogledu točnosti mogu biti u punoj mjeri upotrebljene ako su i orijentacijske točke i točke objekta definirane određenom točnošću (Braun 1973). Svrha je ovog rada da se analizira upravo taj utjecaj točnosti određivanja/po-

stavljanja orijentacijskih točaka i točnosti digitalizacije (pogreška digitalizatora) na točnost izračuna, te istraže zakonitosti promjene točnosti s obzirom na elemente snimanja i obrade podataka. U stereofotogrametriji pogreška izmjere, tj. mogućnost metode, određuje se na osnovi geometrijskog odnosa elemenata snimanja i na osnovi iskustva (Braum 1970), pri tome izvedene formule ne mogu se primjeniti i na tu metodu budući da nije zajednička baza snimanja, a kako je metoda novija, iskustva se tek trebaju steći.

Premda je ta metoda originalno namijenjena za rad s amaterskim kamerama u blizupredmetnoj fotogrametriji, može se upotrijebiti i za mjerne kamere. Autori DLT-a su Y. I. Abdel-Aziz & H. M. Karara sa Sveučilišta Illinois (1971.). U ovom se radu upotrebljava njihov računalni program napisan u (zastarjelom) Fortranu, koji je uz neznatne modifikacije preveden u Pascal. Taj je algoritam "osovina" korisničkog programa za fotogrametrijsku izmjeru i analizu pojedinačnih stabala ("STABLO3D").

2. METODA I CILJ RADA

2.1. Metoda simuliranja

Testirati točnost jedne metode moguće je uspoređujući stvarna mjerenja s mjerenjima koja su rezultat druge metode poznatih točnosti. Upotrebljavajući metodu simuliranja, mjerenja se mogu uspoređivati sa zadanim (unaprijed poznatim) vrijednostima, što otvara mogućnost analize i determinacije ovisnosti točnosti o elementima snimanja. Metode simuliranja počele su se razvijati 50-ih godina ovoga stoljeća, ponajprije pri izradi i konstrukciji balističkih raketa i svemirskih letjelica, a potom za civilnu i inženjersku primjenu. Pod pojmom simulacije razumijeva se imitiranje ponašanja stvarnosti različite prirode. Postoji cijeli niz definicija, ali je važno da se pod tim pojmom razumijeva niz aktivnosti, od eksperimentiranja na realnom sustavu pa do analize eksperimentalnih rezultata, što znači modeliranje promatrane zbilje, računalno programiranje i eksperimentiranje modelom (Munitić 1990).

Prema Munitiću opći razlozi uporabe simulacijskih modela su:

- rješavanje najsloženijih upravljačkih sustava, u kojima je matematička ili statistička analiza previše složena;
- omogućavanje istraživaču da stekne nova znanja i razumijevanja mehanizama događanja, odnosno zakonitosti u složenim realnim sustavima.

2.2. Cilj rada

Cilj je rada bio utvrditi kako i koliko točnost izračuna prostornog položaja novih točaka ovisi o:

- a) pogrešci određivanja/postavljanja orijentacijskih točaka,
- b) pogrešci digitalizacije,
- c) udaljenosti točke od težišta orijentacijskih točaka,
- d) broju snimaka,
- e) broju orijentacijskih točaka,
- f) udaljenosti kamere od objekta

Važno je napomenuti da se ovim radom ispituje utjecaj samo slučajnih pogrešaka na točnost izračuna. Sve su sistavne pogreške (distorzija objektiva, deformacija filma, sistematska pogreška skeniranja, digitalizacije) isključene iz analize jer se pretpostavlja da one nemaju znatnog utjecaja na istraživane zakonitosti, a uključenje sustavnih pogrešaka u simulaciju znatno bi povećalo kompleksnost istraživanja.

Ipak, iako u simulaciju nisu uključeni svi elementi snimanja, rezultati tih analiza poslužiti će preliminarnoj optimalnoj organizaciji snimanja. Drugim riječima, budući da se ekonomičnost snimanja povećava:

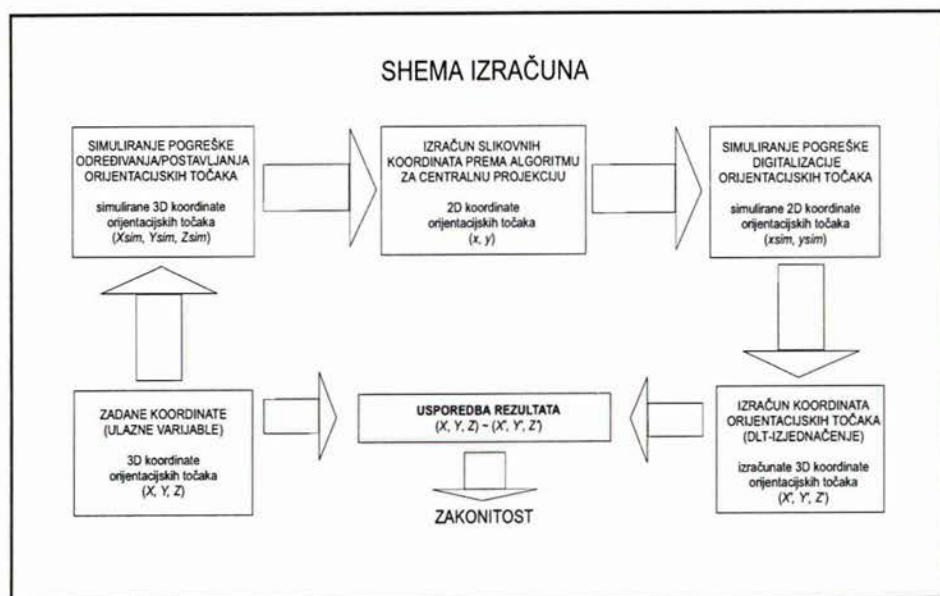
- što je manji broj orijentacijskih točaka
- što je manji broj snimaka
- što su instrumenti i metode jednostavniji,

uz poznavanje elemenata snimanja, metoda simulacije može uputiti ka optimalnom broju orijentacijskih točaka, snimaka, optimalnim instrumentima (teodolit, digitalizator) i metodama s obzirom na traženu točnost pojedinog fotogrametrijskog slučaja.

Za ulazne su podatke uzeti u geodeziji zahtijevani iznosi točnosti (Kraus 1985):

Tablica 1. Zahtijevana točnost izmjere u geodeziji

područje primjene	točnost izmjere (mm)	najveća dozvoljena pogreška (mm)
- izradba topografskih karata (M 1:10000)	150	400
- izradba topografskih planova (M 1:1000)	30	80
- izradba planova arhitektura (M 1:50)	10	10
- izmjera deformacija građevinskih objekata	5	



Slika 1. Shema postupka simuliranja

Simuliranje mjerenja

Simuliranje pogreške određivanja/postavljanja orijentacijskih točaka i pogreške digitalizacije obavljeno je uz pretpostavku da su te pogreške distribuirane po normalnoj razdiobi. Simuliranje mjerenja se izvodi prema inverznoj kumulativnoj normalnoj distribuciji uz zadanu srednju (stvarnu) vrijednost i standardno odstupanje i slučajni iznos vjerojatnosti (0,00...-1):

$$x_{sim} = s_x \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln(1-y)} \cdot \cos(2\pi \cdot z) + \bar{x}$$

$$z = \text{RANDOM2}$$

$$y = \text{RANDOM1}$$

$$\text{RANDOM} \in [0,1)$$

Sve radnje, od simuliranja pogreške određivanja/postavljanja orijentacijskih točaka, simuliranja digitalizacije i pogreške digitalizacije, računa izjednačenja do izračuna odstupanja s obzirom na zadane podatke, objedinjene su programom. Pri tome je struktura programa pojednostavljena na ulazne i izlazne (izračunane) podatke:

Tablica 2. Ulazne i izlazne varijable – oznake i formule izračuna

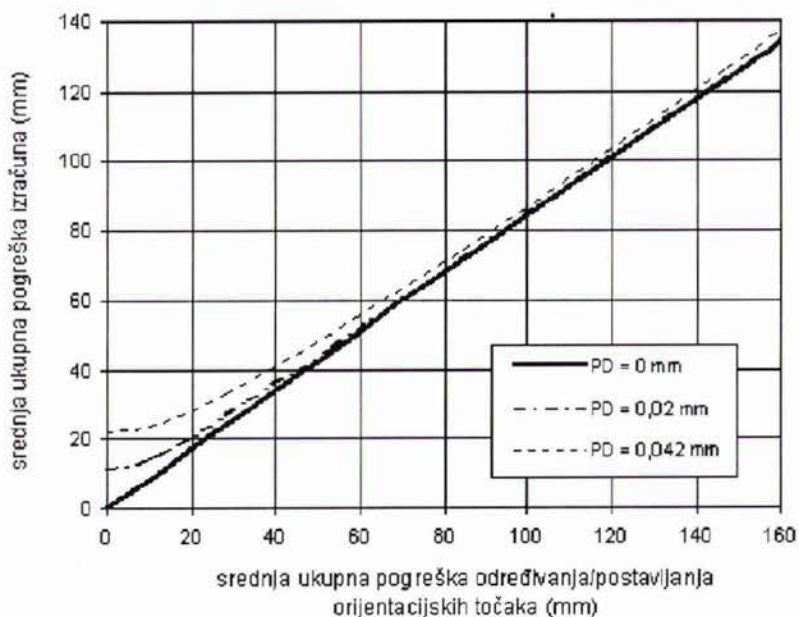
ULAZNE VARIJABLE	IZLAZNE VARIJABLE
broj orijentacijskih točaka..... n	pogreška izračuna položaja nove točke ΔT_{xyz_i}
prostorne koordinate orijentacijskih točaka..... X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}	$\Delta T_{xyz_i} = \sqrt{(Tx'_i - Tx_i)^2 + (Ty'_i - Ty_i)^2 + (Tz'_i - Tz_i)^2}$
pogreška određivanja/postavljanja orijentacijskih točaka.....	pogreška izračuna novih točaka..... s_{xn}, s_{yn}, s_{zn}
s_{x0}, s_{y0}, s_{z0}	$s_{xn(yn,zn)} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (X'_k - X_k)^2}{m}}$
broj novih točaka..... m	ukupna pogreška izračuna novih točaka.... s_{xyzn}
prostorne koordinate novih točaka X_{nk}, Y_{nk}, Z_{nk}	$s_{xyzn} = \sqrt{s_{xn}^2 + s_{yn}^2 + s_{zn}^2}$
broj snimaka..... p	srednja ukupna pogreška izračuna.... \bar{s}_{xyzn}
parametri vanjske i unutarnje orijentacije	$\bar{s}_{xyzn} = \frac{\sum_{i=1}^N s_{xyzn}}{N}$
$Fx_p, Fy_p, Fz_p, c_p, \alpha_p, \beta_p, \chi_p$	pogreška srednje ukupne pogreške izračuna novih točaka... $s_{s_{xyzn}}$
pogreška digitalizacije.....	$s_{s_{xyzn}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{s}_{xyzn} - s_{xyzn})^2}{N}}$
s_{x2D}, s_{y2D}	
broj ponavljanja izračuna, veličina uzorka N	
$i = 1 \dots n$ redni broj orijentacijske točke	
$k = 1 \dots m$ redni broj nove točke	
$j = 1 \dots p$ redni broj fotografije	

3. REZULTATI

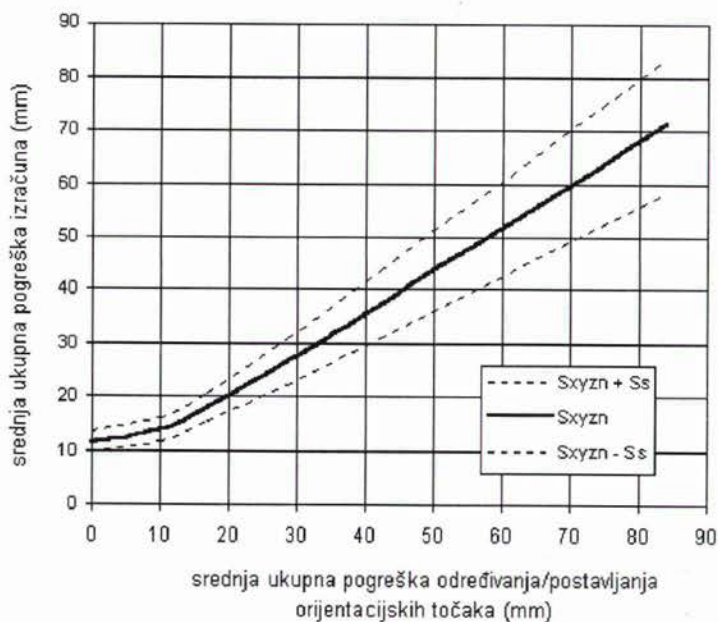
Pri istraživanju svake od pretpostavljenih zakonitosti, izračun se obavljao za različite vrijednosti samo jedne od promatranih varijabli, dok su ostale varijable nepromijenjene kako bi se izolirao njihov utjecaj. Fiksne ulazne vrijednosti koje su pri tome upotrebljavane (slučaj) stvarne su vrijednosti koje se susreću pri primjeni ove metode u izmjeri stabala. Pogreška digitalizacije je pogreška izračunana pri upotrebi programa, a temelji se na uvjetu da se snimci A4 formata skeniraju rezolucijom od 300 tpi-a. Da bi se pojednostavila analiza, orijentacijske točke uzete su kao nove.

Tablica 3. Stalne vrijednosti ulaznih varijabli (slučaj)

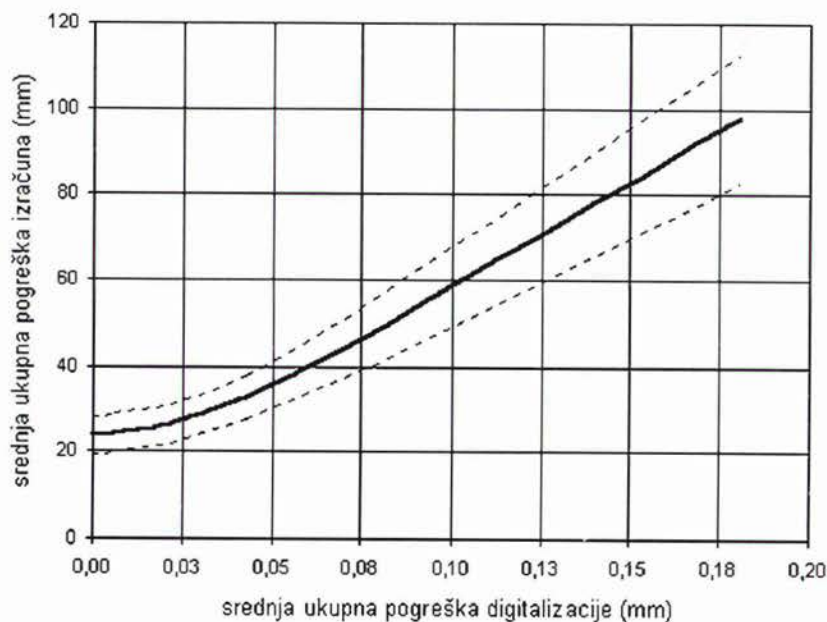
broj orijentacijskih točaka	8
položaj orijentacijskih točaka	kvadar 5 x 5 x 5 m
pogreška određivanja/postavljanja orijentacijskih točaka	30 mm
pogreška digitalizacije	0,02 mm
broj snimaka	3
udaljenost od objekta	20 m
žarišna daljina	50 mm



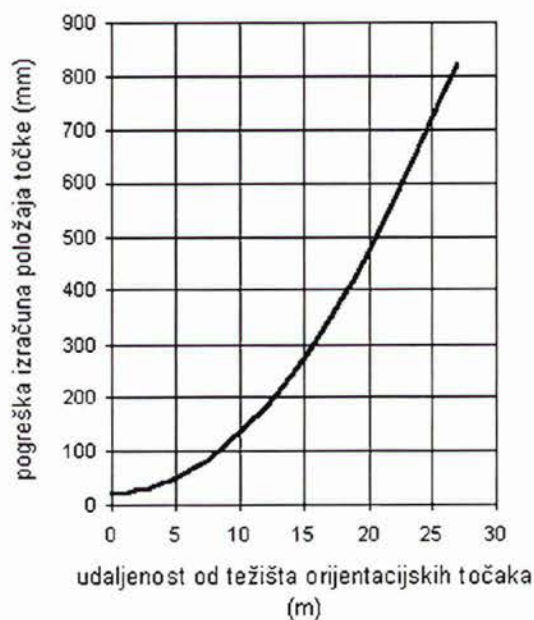
Slika 2. Ovisnost točnosti izračuna položaja točaka o točnosti određivanja/postavljanja orijentacijskih točaka
PD – pogreška digitalizacije



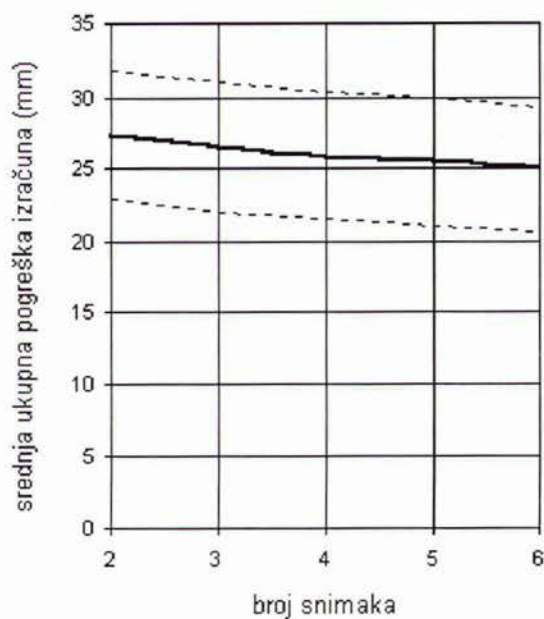
Slika 3. Ovisnost točnosti izračuna položaja točaka o točnosti izmjere točaka uz pogrešku digitalizacije $PD=0,02$ mm
 s_s – pogreška srednje ukupne pogreške izračuna



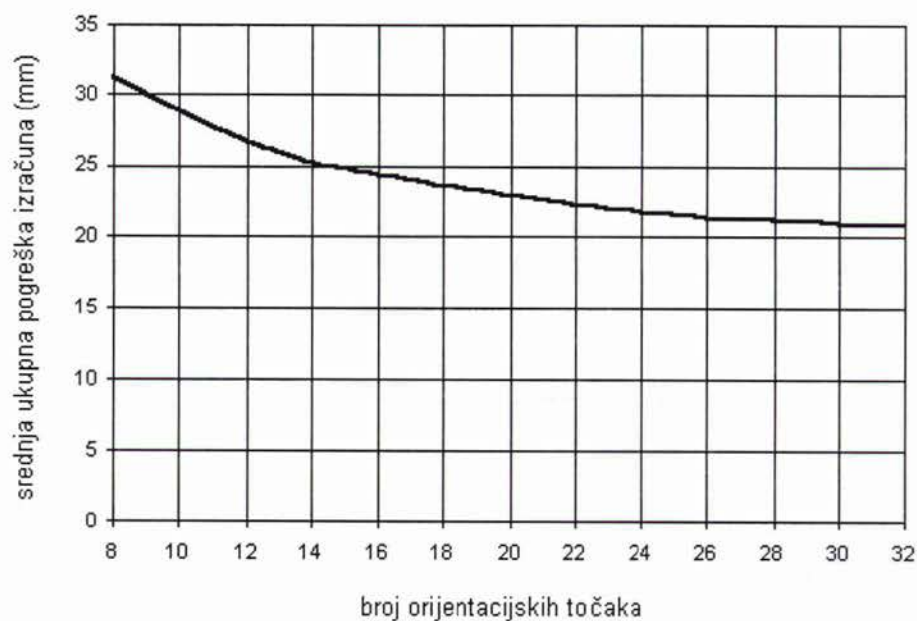
Slika 4. Ovisnost točnosti izračuna položaja točaka o preciznosti digitalizacije



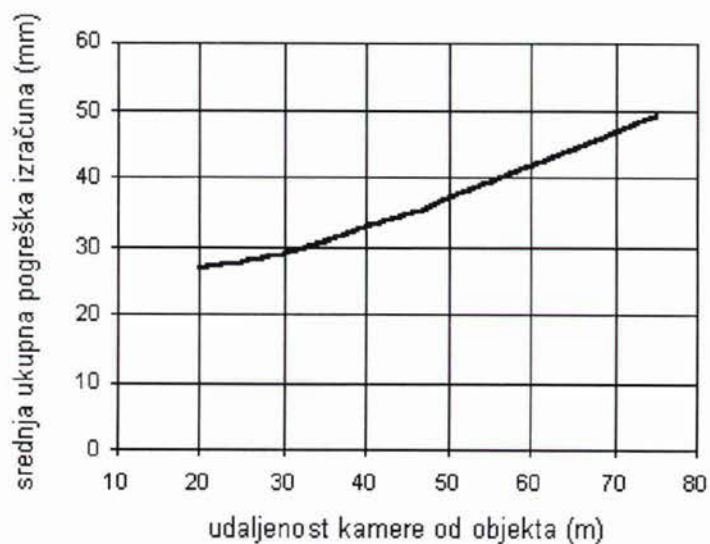
Slika 5. Ovisnost točnosti izračuna položaja točaka o udaljenosti točke od težišta orijentacijskih točaka (ekstrapolacija)



Slika 6. Ovisnost točnosti izračuna položaja točaka o broju snimaka objekta



Slika 7. Ovisnost točnosti izračuna položaja točaka o broju orijentacijskih točaka



Slika 8. Ovisnost točnosti izračuna položaja točaka o udaljenosti kamere od objekta snimanja

Budući da je osam orijentacijskih točaka premalen uzorak za signifikantnu simulaciju normalne razdiobe, korištena je prosječna vrijednost ukupne izračunane pogreške iz 500 izračuna ($N = 500$). Međusobna ovisnost dviju varijabli je normalno distribuirana oko srednje vrijednosti, tj. oko dobivenog pravca/krivulje.

Svi se dobiveni rezultati mogu slikovito prikazati sljedećim grafovima:

4. ZAKLJUČAK

Rezultati simulacije dokazuju hipoteze da točnost izračuna prostornih koordinata točaka, primjenom DLT-a, proporcionalno ovisi o:

- točnosti izmjere orijentacijskih točaka;
- točnosti digitalizacije;
- povećanju broja snimaka;
- povećanju broja orijentacijskih točaka,

a obrnuto proporcionalno ovisi o:

- udaljenosti točke od težišta orijentacijskih točaka;
- udaljenosti kamere od objekta.

Također se može zaključiti:

1. Pogreška izračuna prostornih koordinata novih točaka parabolički raste s povećanjem udaljenosti točke od težišta orijentacijskih točaka.

2. Ta bi se metoda mogla upotrijebiti za izradbu planova arhitektura, gdje se zahtijeva centimetarska točnost izmjere, ali bi bilo potrebno povećati broj snimaka te broj i točnost izmjere orijentacijskih točaka, nego što je to u promatranom slučaju.

3. Metoda je osobito "osjetljiva" na odnos položaja novih i orijentacijskih točaka te položaja kamera.

4. Uz pretpostavku da ne postoji pogreška digitalizacije ni bilo koja sustavna pogreška snimanja, položaj se točke može izračunati s većom točnošću od upotrijebljene izmjere (slika 2.). Drugim riječima, uporabom bi se DLT-a (teorijski) mogao odrediti položaj novih točaka s većom točnošću od točnosti izmjere orijentacijskih točaka. U stvarnosti to pravilo vrijedi samo za veću srednju pogrešku određivanja orijentacijskih točaka, i to uz uvjet da su one optimalno raspoređene oko objekta, te da je velika preciznost digitalizacije.

Stvarne mogućnosti primjene te metode tek treba ispitati, ali je očigledna njezina ekonomičnost i univerzalnost, budući da ne zahtijeva uporabu mjerne kamere, digitalizatora ili kojeg drugog sofisticiranog geodetskog instrumenta. Zbog toga bi razvitak ove metode mogao naći primjenu u brznoj i ekonomičnoj, a s obzirom na točnost nezahjevnoj fotogrametrijskoj izmjeri nedohvatnih (živih/neživih) objekata.

Mogućnosti računala i želja da se upotrebljava amaterska (*non-metric*) kamera, čak i kod preciznih instrumenata, ubrzali su razvoj analitičkih metoda. Primjena fotogrametrijskih mjerenja za buduće proračune, analize podataka i baze podataka je također promovirala analitičke metode. Treba očekivati daljnji razvitak prema većoj integraciji između obrade fotogrametrijskih podataka s jedne i analize podataka s druge strane. Da bi se to postiglo, potrebna je bliska suradnja između fotogrametara i korisnika (Atkinson 1980).

LITERATURA

- Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M. (1974): Photogrammetric potentials of non-metric cameras. Civil Engineering Studies, Photogrammetry Series No. 36, University of Illinois, Urbana, str. 120.

- Atkinson, K. B. (1980): Developments in close-range photogrammetry. Applied Science Publishers, Academic Press, London, str. 125.
- Braum, F. (1969): Elementarna fotogrametrija. Sveučilište u Zagrebu, str. 447.
- Braum, F. (1970): Teorija stereofotogrametrijskih pogrešaka. Sveučilište u Zagrebu, str. 84-92.
- Braum, F. (1974): Fotogrametrijsko snimanje. Sveučilište u Zagrebu, str. 92-145.
- Hengl, T. (1996): Izrada 3D modela stabla uz primjenu terestričke fotogrametrije. Diplomski rad, Šumarski fakultet, Zagreb.
- Hengl, T. & Križan, J. (1996): Primjena programskog jezika Pascal u dendrometrijskoj nastavi i praksi. Mehanizacija šumarstva, Zagreb, 3:139-145.
- Kraus, K. (1985): Fotogrametrija. IRO Naučna knjiga, Beograd, str. 221.
- Kružić, T. & Čavlović, J. (1993): Pouzdanost rezultata mjerenja obujma dubećih stabala pomoću Bitterlichova zrcalnog relaskopa. Mehanizacija šumarstva vol. 18:2, str. 61-71.
- Marzan, G. T. & Karara, H. M. (1975): A computer program for Direct Linear Transformation solution of the collinearity condition, and some applications of it. Close-range photogrammetric systems, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, str. 420-76.
- Munitić, A. (1990): Kompjuterska simulacija uz pomoć sistemske dinamike. Brodosplit, Kultura, Split.
- Pavlič, I. (1971): Statistička teorija i primjena. Tehnička knjiga, Zagreb, str. 100-113.
- Pranjić, A. (1990): Šumarska biometrija. Liber, Zagreb, str. 204.

ANALYSIS OF ERRORS IN CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY (DLT-method) USING SIMULATION

SUMMARY: This paper is a byproduct of application of close-range photogrammetry for dendrometric purposes. It is based on experiences acquired during the evaluation of computer program "TREE3D", intended for photogrammetric measurement and analysis of standing individual trees, using non-metric camera. Since the basic idea was to adjust photogrammetry for an economical and practical use, and automate most of the operations, the Method of Direct Linear Transformation was chosen. Despite the fact that this is the area of practical science, problems of random errors are simplified on universal level. Results of simulation confirm that accuracy of photogrammetric measurement, using this method, grows with the increase of: number and accuracy of estimation of control points, number of photos, accuracy of digitalization. It is determined that a specially important element in photogrammetric measurement is relation of disposition of control, object points and cameras.

Primljeno: 1997-05-14