

## DIGITALNA FOTOGRAMetriJA — IZAZOV DANAS, METODA ZA SUTRA

Zoran STANČIĆ — Ljubljana\*

### 1. UVOD

Sredinom pedesetih godina skromno su objavljeni prvi rezultati naučnih istraživanja s područja digitalne fotogrametrije [19]. Ta su istraživanja nažalost ostala u sjenci vrhunskih dostignuća analogne fotogrametrije. Naime, stanje razvoja računala bilo je na tako niskom stupnju da je numeričko izvođenje fotogrametrijskih operacija bilo neekonomično. Jak razvoj tehnologije proizvodnje računala šesdesetih i sedamdesetih godina stvorio je objektivne mogućnosti za razvoj digitalne fotogrametrije kojom su se najjače istraživačke institucije počele baviti tek krajem sedamdesetih godina. Pitanje je kako možemo doprinjeti u istraživanjima koje većina zemalja još uvijek smatra vrhunskom, strogo povjerljivom tehnologijom.

U tekstu je najprije analiziran povijesni razvoj fotogrametrije. Nadalje je prikazana konfiguracija sistema digitalne fotogrametrije za potrebe dokumentacije arheoloških iskopavanja i prvi rezultati istraživanja u primjeni te metode.

### 2. RAZVOJ FOTOGRAMetriJE

Fotogrametrija je danas u jednom od prijelomnih trenutaka razvoja. Tehnički razvoj znanosti i tehnologije se uvijek odvija u fazama. Svaka faza razvoja bazira se na izumu ili tehničkom prodiru nakon kojega slijedi razvoj tehnologije. Kada ta faza dostigne vrhunac, slijedi stagnacija. Stagnaciju može prekinuti samo serija novih izuma. Pogledajmo kratak pregled historije fotogrametrije kako ga vidi Torlegard [24].

Fotogrametrija se razvila kao zamjena klasičnih geodetskih metoda mjerenja za potrebe izrade topografskih karata. Već sredinom prošlog stoljeća učestala su istraživanja, pa čak i operativna upotreba fotografskih snimaka za mjerne potrebe [16]. Fotogrametrijska metoda mjerenja se veoma brzo aplicirala i u netopografske svrhe [2].

Razvojem sigurnosnih balona počinje njihova upotreba za potrebe topografskih snimanja iz zraka. Na prijelomu stoljeća Pulfrich i Fourchade, nezavisno jedan od drugoga, razviju stereokomparator kao instrument za mje-

---

Mr. Zoran Stančić, dipl. inž. Filozofski fakultet, Odeljenje za arheologiju, Aškercева 12, Ljubljana

renje koordinata homolognih točaka na stereoparu. Sporost postupka izrade nacрта iz komparatorskih mjerenja uvjetovala je razvoj analognog stereoautografa koji konstruirao Von Orel, slovenski oficir u Austro-Ugarskoj vojsci. Uspješna upotreba aviona pri izviđanju u prvom svjetskom ratu kasnije je omogućila aplikacije za topografska aerosnimanja. Tako je došlo do naglog razvoja fotogrametrije koji se, bez sumnje, isključivo bazira na analognim metodama.

Pedesetih godina se na tržištu pojavljuju prva računala. Ona se počinju upotrebljavati u fotogrametriji, prije svega, za potrebe aerotriangulacije. Prvi korak k analitičkoj fotogrametriji bilo je opremanje analognih instrumenata s opremom za numeričko čitanje modelnih koordinata. Nastali su tzv. hibridni sistemi [15] — analogni instrumenti on-line povezani s računalom. Vrlo brzo se pokazala neistinitom opće važeća tvrdnja tridesetih godina nastala u oduševljenju nad izvanrednim rezultatima analogne fotogrametrije, a to je da analitičke metode nemaju nikakve budućnosti. Kao vrhunac tehnologije analitičkih metoda nastaju analitički ploteri, instrumenti koji svojim mogućnostima uveliko nadmašuju čak najuniverzalnije analogne restitucijske instrumente. Oni, naime, omogućavaju restituciju snimaka koji su napravljeni kamerama sa žižnim razdaljinama od nekoliko centimetara do nekoliko metara. Konvergencija ili veći nagibi osovina (30 i više stupnjeva) ne predstavljaju nikakvo ograničenje.

Nažalost, analitička fotogrametrija svoj nagli razvoj polako zaključuje. Analitičke metode su u svom razvoju počele stagnirati te su postale standardne mogućnosti fotogrametrijske restitucije koje već savladava fotogrametrijski operater.

Naravno nismo došli do kraja razvoja fotogrametrije. Već u prvoj polovici osamdesetih godina se kao primarno područje razvoja javlja tzv. digitalna fotogrametrija. Torlegard [24] tvrdi da se digitalna fotogrametrija bazira na snimcima koji su u obliku serije pixela (picture element) čuvani u računarskoj memoriji. To je u suprotnosti s prijašnjim razumjevanjem fotogrametrije kao analiziranje fotografija u fotogrametrijskim instrumentima. Godine 1972. smo iz satelita LANDSAT dobili digitalne snimke koje su već bile upotrebljavane u kartografske svrhe. Međutim, te digitalne snimke nisu bile u potpunosti digitalno obrađene. Iako su prvi koraci u digitalnoj fotogrametriji učinjeni već pedesetih godina [19], tek potreba za razvojem robotike i mogućnosti robota da »gledaju« uvjetovala je razvoj digitalnih fotogrametrijskih sistema. Iznenada smo se našli u situaciji kada konstruktori robota upotrebljavaju i razvijaju metode već poznate fotogrametrijskim stručnjacima (npr. principi korelacije). Tako je, između ostalog, i jako prosperitetna industrijska grana uvjetovala razvoj nove grane fotogrametrije — digitalne fotogrametrije.

### 3. DIGITALNA FOTOGAMETRIJA — OPĆI PRINCIPI

Nevjerojatan razvoj mikroelektronike i poluprovodničke tehnologije utjecao je na sva područja čovjekovog djelovanja. Suvremeni mikročipovi i digitalni senzori prouzrokovali su potrebu za temeljitom revizijom fotogrametrijskih procesa u fazi snimanja, obrade i čuvanja podataka. Upotreba digitalnih, odnosno nefotografskih kamera omogućava direktan prijenos podataka u računarske medije. Sa stanovišta računarskih znanosti kamera je u stvari samo periferna jedinica računala. Nepostojanje same fotografije u procesu

uvjetovalo je predlaganje drugačijeg termina: umjesto fotogrametrije — videogrametrija [10]. Budući da je termin uži i da isključuje upotrebu npr. skanirane fotografije u prikazu same metode izbjegavajmo ga. Digitalna slika se nakon obuhvaćanja obrađuje u računalu. Računalo tako zamijenjuje restitucijski instrument i čak operatera.

Potrebe konstruktora robota uvjetovala su prije svega sasvim automatizirani proces koji smo nazvali real-time fotogrametrija. Termin real-time u računarskim znanostima znači obradu ulaznih podataka u sistemu takvom brzinom da rezultate dobijamo naoko istovremeno s ulazom podataka. Zasad je cilj real-time fotogrametrije izvođenje cijelog procesa obrade u okviru jednog video ciklusa, dakle vremena između dva uzastopna obuhvata iste točke na videodetektoru, a to je s obzirom na videostandard 1/25 ili 1/30 sekunde [7]. Istovremeno moramo imati na umu činjenicu da konstruktori robota razvijaju pojednostavljenu fotogrametriju, gdje je obično objekt (dimenzijski i situacijski) poznat, a često se analiza objekta ograničava na određivanje koordinata samo posebno signalnih točaka.

Pogledajmo поближе komponente digitalnog fotogrametrijskog sistema. Cijeli sistem podijeljen je na:

- obuhvaćanje podataka,
- obradu podataka,
- prezentaciju — izlaz rezultata.

### 3.1. Obuhvaćanje podataka

Fazu obuhvaćanja podataka podijelimo na podfaze:

- elektrooptičko skaniranje,
- prijenos slikovnih podataka,
- A/D pretvorba,
- čuvanje slike.

U idealnim uvjetima sve postupke obavlja kvalitetna digitalna kamera. Budući da su te kamere tek u fazi razvoja i zbog toga izuzetno skupe, upotrebljavamo analogne video kamere. Analogne video kamere su kamere koje kao izlaz produciraju analogni elektronski video signal. S obzirom na način dobivanja slike, kamere dijelimo na one koje se baziraju na video cijevima (slika se dobiva na bazi vanjskog fotoelektričkog efekta — fotoemisije) i one koje se baziraju na fotodetektorima (slika se dobiva na bazi unutrašnjeg fotoelektričnog efekta — fotoprovodnosti). Proces dobivanja slike kod video cijevi je obrnuti proces dobivanja slike kod televizije. Skaneri s fotodetektorima cijelo područje slike razdijele na diskretne elemente osjetljive na svjetlost. Oni se baziraju na silikonskim čipovima sa strukturom poluvodiča iz metalnog oksida ili na fotodiodama. Uspoređujući kamere s video cijevima (koje, usput rečeno, imaju nekoliko različitih sistema) kamere s fotodetektorima imaju sljedeće prednosti [7]:

- stabilnu geometriju slike,
- široki spektralni pojas (0,4  $\mu\text{m}$  — 1,1  $\mu\text{m}$ ),
- bolje boje,
- potroše manje energije,
- male su, lake, robustne konstrukcije,

- ne oštećuju se prilikom preosvjetljenja,
- ne zastarjevaju,
- magnetski su neosjetljive,
- jeftinije su.

U isto vrijeme te kamere imaju nedostatke:

- manje su svjetlosno osjetljive,
- manje rezolucije,
- imaju manju brzinu obuhvaćanja slike.

Najznačajnija prednost kamera s poluprovodničkom strukturom za fotogrametrijsku upotrebu sastoji se u tome da su senzori tokom vremena relativno stabilni, kako pozicijski, tako i po osjetljivosti. Analize geometrijskih i radiometrijskih pogrešaka ukazuju na relativno visoku razinu tih kamera [5] koje se zbog toga mogu laboratorijski kalibrirati. S obzirom na način očitavanja električnog naboja dijelimo ih na CID (Charge Injection Device) i CCD (Charge Coupled Device) kamere, koje su u fotogrametrijske svrhe najpopularnije.

Najneosjetljivije CCD kamere imaju sliku sastavljenu iz  $128 \times 128$  slikovnih elemenata, kod veličine slike  $8 \times 8$  mm. Najnovije kamere (npr. Kodak Megaplug) otprilike iste veličine slike imaju  $1320 \times 1035$  slikovnih elemenata. Veličina jednog slikovnog elementa je već ispod  $10 \mu\text{m}$ . Detaljniji prikaz CCD kamera i principe njihova djelovanja predstavio je Gruen [7].

Nakon toga slijedi prijenos analogne slike putem jednog od video-standarda do monitora ili računarske opreme koja digitalizira sliku. Digitalizaciju slike obavi analogno/digitalni (A/D) pretvarač. On podijeli video — sliku na pojedinačne slikovne elemente. Istovremeno s digitalizacijom slike A/D pretvarač bi morao osigurati i čuvanje slike. Sav taj posao obave »frame grabberi« (teško se prevodi, zato za njih upotrebljavamo izraz A/D pretvarači, iako je A/D pretvaranje samo dio poslova koje »frame grabber« obavlja). A/D pretvarač može imati različitu rezoluciju (obično između  $256 \times 256$  do  $1024 \times 1024$  slikovnih elemenata). Istovremeno može odrediti različit broj sivih vrijednosti za svaki slikovni element. Tako npr. 8 bita omogućava 256 različitih vrijednosti sivine. Naravno A/D pretvarač moramo izabrati tako da je kompatibilan s jedinicom za obradu — procesiranje slike. Nekoliko različitih modela prikazao je Gruen [7]. Ukoliko želimo proces fotogrametrijske restitucije obaviti u real-timeu ili bar približno tome, javlja se problem brzog prijenosa podataka iz A/D pretvarača do računala.

### 3.2. Obrada podataka

Digitaliziranu sliku obrađujemo u računalu. Njegova uloga je da zamijeni fotogrametrijski restitucijski instrument i djelomično čak operatera. Budući da su fotogrametrijske operacije veoma komplicirane, očigledna je potreba za jakim računalima ukoliko želimo brzo procesiranje slike. Zato u istraživanju real-time fotogrametrije nisu rijetka računala s VLSI (Very Large Scale Integration) procesorima ili paralelnim procesiranjem. Pošto nas u ovoj fazi real-time za naše potrebe ne zanima, pogledajmo jednostavnije sisteme.

U pravilu se upotrebljavaju grafičke stanice koje se baziraju na procesorima Motorole 68010 ili 68020 [5, 18]. Skromnije potrebe može zadovoljiti

IMB PC AT računalo [8], dok neobično spore IMB PC XT s pripadajućim procesorima gotovo nitko ne upotrebljava u te svrhe. Programi za obradu slike pišu se po pravilu u jeziku C i assemblerima. Činjenica da su softverska rješenja određenih fotogrametrijskih operacija relativno spora, uvjetuje hardverska rješenja problema. Tako je neophodno da se pojedine operacije obave hardverskim modulima opće primjene. Oni mogu obaviti operacije 10 do 100 puta brže nego softverska rješenja. Specijalno razvijeni hardver može biti čak 100 do 1000 puta brži i naravno toliko skuplji od softverskih rješenja [4].

Pored svih informacija o eksperimentalnoj hardverskoj bazi fotogrametrijskih sistema dobro je pogledati nekoliko specifičnih problema koji nastaju kod toga. Osnovu teorijskog procesa je najslikovitije predstavio El-Hakim [5]. Slika iz A/D pretvarača se prvo poboljšava i reducira šum. Cilj te faze je stvaranje optimalnih uvjeta na cijelom snimku. Upotrebljavaju se različite programske operacije koje se mogu birati. Slijedi faza segmentacije i ekstrakcije oblika koje se izvodi hardverski. Slijedeća izuzetno važna faza je re-kognosciranje meta i otkrivanje ivice objekta. Ta faza se izvodi hardverski i softverski na bazi ulaznih informacija o objektu. Faza lociranja meta obavlja se različitim, već razvijenim algoritmima. Istraživanja ukazuju da se kod analize okoline mete  $3 \times 3$  pixla ili  $5 \times 5$  pixla može dostići srednja greška lociranja mete ispod 0,1 pixla [17]. Slijedi faza uspoređivanja dva ili više snimaka za potrebe određivanja prostornih koordinata. Postupak se odvija u dvije faze. Najprije se na bazi oslonih točaka odrede elementi orijentacije kamere i parametri kalibracije, a u slijedećoj fazi se uspoređuju sve točke osim oslonih.

### 3.3. *Prezentacija — izlaz rezultata*

Tako obrađena slika se poslije obrade sačuva na željenom računarskom mediju, prikaže na ekranu ili pak iscrta. Za čuvanje se danas isključivo upotrebljavaju magnetni mediji. Kod A/D pretvarača većih mogućnosti, vrlo brzo može količina podataka za jednu sliku premašiti 1Mbyta. Slika se zbog toga čuva na magnetnom disku barem tipa winchester.

Prikazivanje slike za potrebe daljeg obrađivanja ili za sam interaktivan rad trebalo bi biti na kolor-ekranu visoke rezolucije. Obično nam je potrebna i sama slika na papiru. Za te potrebe možemo upotrebiti jednostavni matrični printer, koji nažalost rijetko zadovoljava potrebe za kvalitetnijom slikom. Potrebna je profesionalnija oprema. Kod skromnijih potreba obično izaberemo laserski printer. Bolji modeli imaju rezoluciju slikovnih elemenata između 0,1 mm i 0,025 mm (u stvari 300 do 1200 slikovnih elemenata na inch). Najkvalitetniju izlaznu jedinicu predstavljaju profesionalni fotoprinteri koji omogućavaju izradu C/B ili kolor snimka rezolucijom 40 linija na mm.

## 4. DIGITALNA FOTOGRAMetriJA I ARHEOLOGIJA

U tekstu sam opisao osnovu fotogrametrijskog sistema, gdje obuhvaćanje i obrada podataka može proticati real-time ili bar približno tome. Prezentacija podataka je vremenski najzahtjevnija. Prikazani sistem bi praktički mogao potpuno isključiti fotogrametrijskog operatera (iako do toga još neće tako brzo doći). Međutim, za opće fotogrametrijske svrhe real-time obrada nije neophodna. Stoga su za različite potrebe razvijeni sistemi koji omogućavaju

manji stupanj automatizacije. Tako Novak [18] predlaže upotrebu računala za potrebe digitalnog redresiranja slika u arhitektonskoj fotogrametriji. Razvijena je i programska oprema koja omogućava simulaciju analitičkog stereorestitucijskog instrumenta osobnim računalom [1]. Fotografski stereopar se skanira, zrcalnim stereoskopom operater vidi stereosliku na monitoru, a »miša« upotrebljava za vođenje nitnog križa. Računalo on-line računa prostorne koordinate objekta. Najraširenija je upotreba digitalne fotogrametrije za dobivanje ortofota što predlaže i Kosmatin Fras [14]. Između ostalog utvrđeno je da se metodom fotogrametrijskih mjerenja CCD kamerama može dostići relativnu grešku manju od 1 : 10000, što zadovoljava potrebe za srednje točnim mjerenjima u industrijskoj fotogrametriji [20].

Pitanje zašto upotrijebiti tako suvremene fotogrametrijske metode u arheologiji je opravdano. Upotrebu digitalne fotogrametrije uvjetuju slijedeće činjenice:

- linijski prikaz arheoloških struktura (slično je stanje i u arhitektonskoj fotogrametriji) je problematično, jer su spomenici bogati detaljima,
- dokument o iskopanim arheološkim strukturama je potrebno osigurati što prije. Dosada smo taj problem rješavali tako da smo osigurali povećanje približno pravokutne fotografije za potrebe interpretacije na samom terenu u improviziranom fotolaboratoriju. Nacrte za potrebe detaljnijih procesa nakon iskopavanja osigurali smo restitucijom u uredu [22],
- iznajmljivanje fotorestitucijskih instrumenata relativno je skupo (da o kupnji i ne govorimo),
- restitucija snimaka napravljenih nemjerskom kamerom na analognim restitucijskim instrumentima prihvatljiva je samo za rješenja niže točnosti [21]. Nemjerske snimke moramo restituirati analitički, što dovodi do već navedenih problema.

Kvalitetna dokumentacija arheoloških iskopavanja od ključnog je značaja pri razumijevanju samog nalazišta. Videotehnika se već upotrebljava kao sredstvo dokumentiranja prilikom arheoloških iskopavanja. Do sada je ta tehnika upotrebljavana za zapis semantičke poruke, u propagandne svrhe, kulturni marketing te pedagoško sredstvo. Mnogo značajniju upotrebu videa predlaže Jouliau [11] koji vidi video u kombinaciji s računalom kao sredstvo sistematičkog dokumentiranja arheoloških iskopavanja.

Upotrebu digitalne fotogrametrije za potrebe (nazovimo to) real-time slikovne dokumentacije prilikom arheoloških iskopavanja možemo promatrati s drugog zornog kuta. Dok su metode digitalne fotogrametrije još u eksperimentalnoj fazi, potrebni su nam primjeri testiranja, prije svega oni kod kojih je kvaliteta (točnost) restitucije po fotogrametrijskim normama relativno mala. I baš arheološka dokumentacija gdje je potrebna točnost restitucije negdje između 1 : 50 i 1 : 5000 [23], zadovoljava tim zahtjevima. Informacije koje dobivamo tim testiranjima omogućuju nam razvoj metoda i kasniju aplikaciju u topografske svrhe.

#### 4.1. Matematičke osnove i organizacija sistema

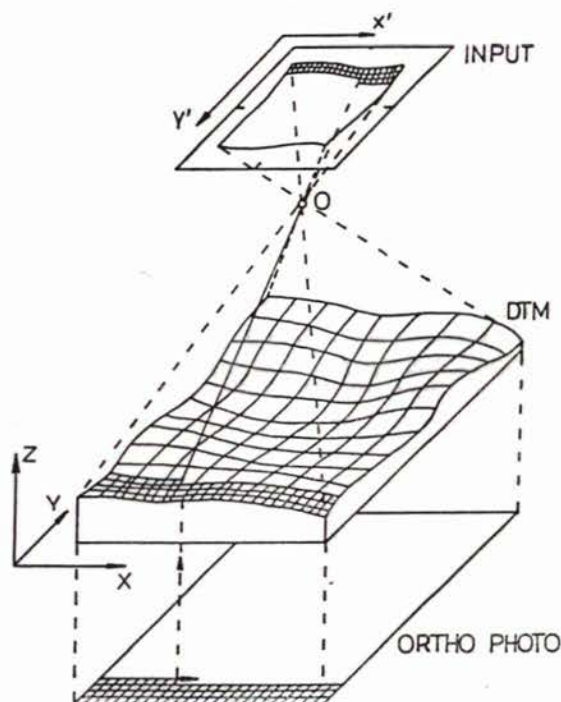
Sistem digitalne fotogrametrije za potrebe dokumentacije arheoloških iskopavanja bazira se na digitalnom ortofotu. Analogni signal jedne video ka-

mere digitalizirao bi A/D pretvarač. Na osnovi podataka o laboratorijskoj kalibraciji kamere, digitalnu sliku bismo korigirali za radiometrijske i geometrijske pogreške. Iz podataka o digitalnom modelu reljefa i na osnovi podataka o orijentaciji snimka, izračunali bismo korekcije slike. Razvijeno je nekoliko sistema [12, 25]. Prihvatili smo jednu od teorijskih osnova koju je razvio Konecny [13] i nazvao je indirektnom on-line metodom.

$$x' = -c_k \frac{A_{11}(X - X_0) + A_{21}(Y - Y_0) + A_{31}(Z - Z_0)}{A_{13}(X - X_0) + A_{23}(Y - Y_0) + A_{33}(Z - Z_0)}$$

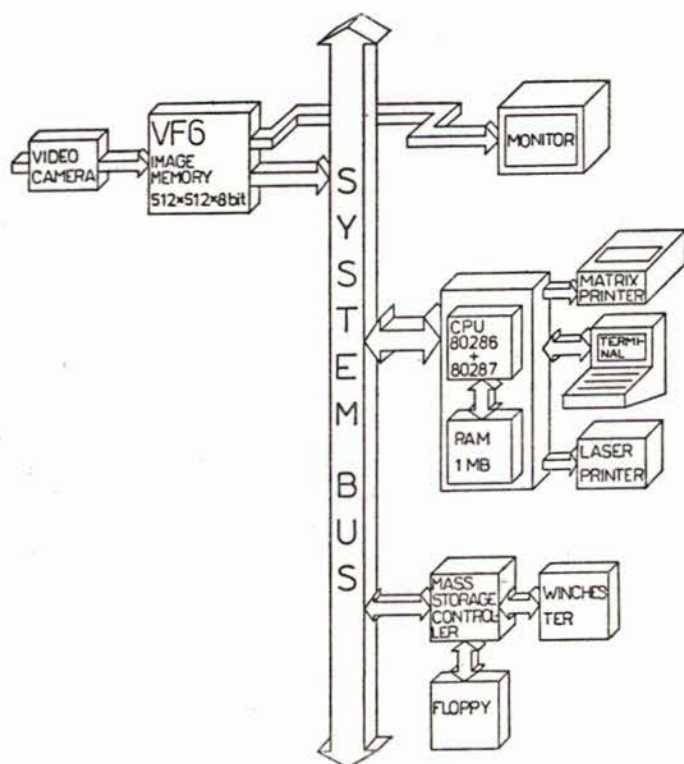
$$y' = -c_k \frac{A_{12}(X - X_0) + A_{22}(Y - Y_0) + A_{32}(Z - Z_0)}{A_{13}(X - X_0) + A_{23}(Y - Y_0) + A_{33}(Z - Z_0)}$$

Na bazi tih rezultata i interpolacije određene okoline izračunane vrednosti, određi se stupanj sivosti, koji će se prenijeti na izlaznu sliku (slika 1). Taj opći put željeli smo pojednostaviti. Uz pretpostavku da možemo osigurati vertikalnost slikovne osi prilikom snimanja, računске se operacije pojednostavljaju. Stativ za fotogrametrijsko snimanje arheoloških iskopavanja, koji je konstruirao dr. Šribar a koji podsjeća na Whittleseyev bipod [26], to nam omogućava. Vertikalnost slikovne osi je u granicama  $\pm 0,5$  stupnjeva, što daje realne osnove da snimke s tog stativa možemo uzeti za vertikalne. Matematičke osnove za procesiranje slike već su izrađene, slijedi još izrada odgovarajuće programske opreme.



Slika 1. Digitalno ortofoto — princip rada

Hardverska osnova sistema bila je veoma ograničena. Stoga smo morali potražiti kompromisno rješenje (slika 2).

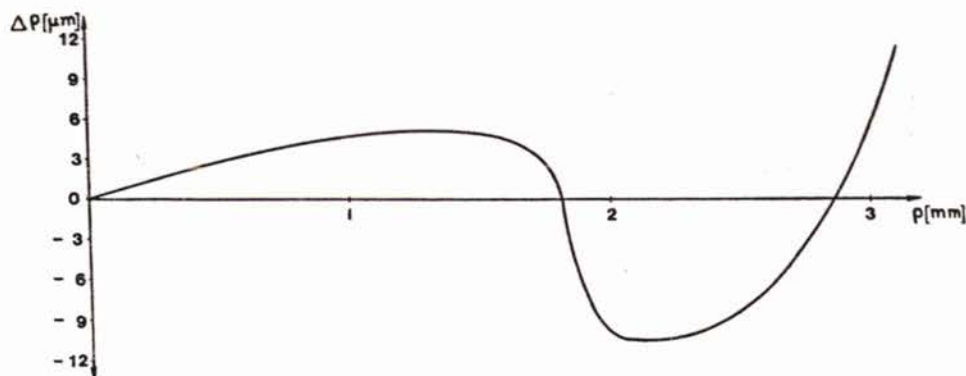


Slika 2. Hardverska osnova sistema

#### 4.1.1. Kamera

Uprkos brojnim prednostima kamera koje se baziraju na poluprovodničkim čipovima pred kamerama s video cijevima, bili smo prisiljeni upotrijebiti kameru s video cijevi. Razlog je bio vrlo jednostavan: suvremenije kamere nismo imali. Koristili smo kameru JVC GZ — S3. Ona pripada gornjem razredu amaterskih videokamera. Radius slikovne cijevi je  $\frac{1}{2}$  inča. Slika je sastavljena od 625 redaka, a redak između 250 i 320 točaka (točni podatak nisam mogao utvrditi). Uzimajući u obzir da je slika veličine  $6,0 \times 4,5$  mm i da sliku u jednom video ciklusu sastavlja svaki drugi redak, svaki je pixel veličine  $24 \times 14,4$   $\mu\text{m}$ . Ni izdaleka nismo očekivali rezultat kao što poručuju Curry et al. [3], koji su utvrdili da je radiometrijska i geometrijska točnost bila u okviru 0,2 pixla, odnosno približno 10  $\mu\text{m}$ . Analizirali smo samo geometrijske pogreške. Probno smo snimali kvadratnu mrežu iz više udaljenosti i više pozicija namještenja zooma (mreža je postavljena s točnošću  $\pm 0,2$  mm). Srednja vrijednost svih probnih snimanja prikazana je u dijagramu (slika 3), gdje je  $\Delta\delta$  geometrijska pogreška a  $\delta$  udaljenost od slikovnog centra. Slika je on-line prenijeta do digitalizatora putem CCIR video standarda.





Slika 3. Grafikon eliminiranja geometrijskih pogrešaka kamere (suma kvadrata odstupanja zbog pogrešaka je minimalna)

Analogni video signal smo digitalizirali »frame grabberom« VFG proizvođača Visiometric Inc. koji je priređen za osobna računala PC XT i AT. On omogućava digitalizaciju slike tako da cijelu sliku podijeli na  $512 \times 512$  pixla. Za svaki pixel moguće su 256 različite razine sivosti — zapis je 8 bitni. Digitalizator ima 256 kbyta memorije.

Uz sve to moram naznačiti još jednu mogućnost A/D pretvarača koja može biti korisna za naše potrebe. Slika se može pokazati tehnikom koju možemo nazvati »pseudo-color«. Različitim razinama sivosti pixla odredi se određena boja. Tako je moguće nijanse sivih tonova promjeniti u mnogo jasnije nijanse različite boje. Upotrebom video-cijevi koje omogućavaju širi spektar registriranja prema infracrvenom dijelu spektra (do  $1,1 \mu\text{m}$ ) ili CCD senzora koji imaju slične kvalitete, možemo prijeći u infracrveno snimanje čije su mogućnosti u području zaštite kulturnih spomenika poznate [6].

Obradu slike omogućava »user friendly« meni koji ima ugrađene neke osnovne funkcije, kao npr. rezanje slike, unošenje teksta na sliku, jednostavno zumiranje. Moguće je i programiranje u assembleru te višim jezicima C i Fortranu.

#### 4.1.2. Procesiranje

Osnovna računarska oprema za procesiranje je IBM PC AT kompatibilni računar. On omogućava dovoljno brzu obradu slike prema predstavljenoj matematičkoj osnovi, iako je vrijeme obrade bar 100 puta duže nego kod boljih grafičkih stanica. Na svu sreću, moment vremena za naše potrebe nije odlučujući.

Prije procesiranja slike za potrebe dobivanja digitalnog ortofota eliminiramo pogreške geometrijske deformacije analizirane procesom laboratorijske kalibracije. Slika se čuva na disku. Svi programi bit će izrađeni u C jeziku koji je za naše potrebe najprikladniji.

#### 4.1.3. Presentacija — izlaz rezultata

Obradenu sliku potrebno je poslije obrade i čuvanja na disku prikazati na papiru. Za potrebe prikaza u C/B tehnici upotrijebili smo laserski printer

Hewlett Packard Laser Jet II. Za potrebe prikazivanja slike u boji prilikom pseudo — color tehnike takav izlaz nije moguć. Pošto nemamo na raspolaganju fotoprinter u boji, sliku je moguće fotografirati s monitora u boji.

#### 4.2. Probna snimanja i rezultati

Poslije probnih snimanja za potrebe analize geometrijskih deformacija kamere odlučili smo se za snimanje testnog modela. Model je trodimenzionalan u obliku piramide bez vrha, napravljen iz jako kontrastnog C/B uzorka. Prilikom snimanja nismo imali nikakvih problema. Rezultate same digitalne restitucije iznijet ću nakon detaljnog testiranja. Već sada možemo utvrditi slijedeće prednosti opisane metode u usporedbi sa standardnim postupkom:

- skraćanje vremena između snimanja i dobivanja dokumenta,
- izbjegavanje dviju faza — fotografije za potrebe arheološke interpretacije i linijskog plana za potrebe procesa nakon iskopavanja,
- jeftinoća restitucije u usporedbi s upotrebom analognih restitucijskih instrumenata,
- automatiziranost postupka,
- mogućnost pseudo-color i infracrvenih snimanja itd.

Slaba strana postupka je svakako neophodnost digitalnog modela reljefa, koji zasada moramo dobiti jednom od klasičnih geodetskih metoda (iako su već razvijeni sistemi potpuno automatskog pridobivanja digitalnog modela korelacijom dviju snimaka). No, lako je izračunati da digitalni model reljefa ne treba biti precizan, te ga je stoga lakše dobiti. Slabost je i prezentacija podataka. Dok sve ostale faze postupka, od snimanja do obrade, možemo izvesti na terenu pomoću video kamere te prijenosnog računala s ugrađenim A/D pretvaračem, laserski printer je još uvijek najosjetljivija točka sistema. Zato tu fazu moramo izvesti koliko-toliko u laboratorijskim uvjetima. Ograničenja laserskog printera s obzirom na veličinu slike (A4) možemo izbjeći tako da sliku podijelimo na više manjih dijelova koje izdvojeno iscertamo na printeru, te ih poslije fizički udružimo. Uz to možemo ubrzo očekivati laserske printere većeg formata slike.

S obzirom na rezultate možemo sigurno očekivati veliku upotrebljivost opisane metode za potrebe dokumentacije arheoloških iskopavanja. Testiranje i razvoj metode se nastavlja.

#### 5. ZAKLJUČAK

Trenutno se u digitalnoj fotogrametriji javljaju nedostaci koji sprečavaju topografsku primjenu [9]. To su, prije svega, nedostatak odgovarajućih digitalnih kamera i mogućnosti automatizacije identifikacije i fotointerpretacije. Međutim, ti nalazi nas ne ograničavaju pri razvoju i čak aplikaciji digitalne fotogrametrije na brojna netopografska područja. U isto vrijeme prednosti pred »klasičnim« analognim i analitičkim metodama, kao što su niža cijena fotogrametrijskih sistema, veće mogućnosti automatizacije, mogućnosti real-time procesiranja i elektronskog prijenosa slike, čine digitalnu fotogrametriju veoma atraktivnom. Stoga nas ne smije čuditi upozorenje stručnjaka koji čak tvrde da će se specijalni fotogrametrijski restitucijski instrumenti prestati proizvo-

ti. Sav posao obaviti će računala u kojima će jedina fotogrametrijska »stvar« biti softver.

Očigledno je da nova tehnologija još nije zrela za upotrebu u topografske svrhe. Stoga su testiranja na području netopografske primjene i u industrijskim kontrolnim sistemima baza za razvoj znanja potrebnog za aplikaciju u topografske svrhe. A kada će do toga doći, samo je pitanje vremena.

#### LITERATURA

- [1] Agnard, J. P., Gagnon, P.-A. & Nolette, C.: Microcomputers and Photogrammetry A New Tool: The Videoplotter, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54, 1165—1167
- [2] Braum, F.: Elementarna fotogrametrija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1969
- [3] Curry, S., Baumrind, S. & Anderson, J. M.: Calibration of an Array Camera, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, 52, 627—636
- [4] El-Hakim, S. F.: A Photogrammetric Vision System for Robots, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51, 545—552
- [5] El-Hakim, S. F.: Real-Time Image Metrology with CCD Cameras, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, 52, 1757—1766
- [6] Fiedler, T.: Primjena daljinskog istraživanja pri restauraciji i rekonstrukciji objekata, Godišnjak zaštite spomenika kulture Hrvatske, 1982—1983, 8—9, 139—144
- [7] Gruen, A.: Towards Real-Time Photogrammetry, *Photogrammetria*, 1988, 42, 209—244
- [8] Haggren, H. & Leikas, E.: Mapvision: The Photogrammetric Machine Vision System, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1987, 53, 1103—1108
- [9] Helava, U. V.: 'On System Concepts for Digital Automation, *Photogrammetria*, 1988, 43, 57—71
- [10] Hobrough, G. L. & Hobrough, T. B.: A Future for Realtime Photogrammetry, *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, 1985, 83, 312—315
- [11] Joulain, F.: Video et Archéologie, *Les nouvelles de l'archéologie*, 1988, 32, 54—56
- [12] Keating, T. J. & Boston, D. R.: Digital Orthophoto Production Using Scanning Microdensitometers, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1979, 45, 735—740
- [13] Konecny, G.: Methods and Possibilities for Digital Differential Rectification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1979, 45, 727—734
- [14] Kosmatin, Fras M.: Teorijske osnove izdelave digitalnega ortofota, *Geodetski vestnik*, 1988, 32, 25—30
- [15] Makarovic, I. B.: Hybrid Stereo Restitution Systems, *Photogrammetric Engineering*, 1970, 36, 1086—1092
- [16] Manual of Photogrammetry, American Society of Photogrammetry, treće izdanje, USA, 1966
- [17] Mikhail, E. M., Akey, M. L. & Mitchell, O. R.: Detection and Subpixel Location of Photogrammetric Targets in Digital Images, *Photogrammetria*, 1984, 39, 63—83
- [18] Novak, K.: Application of a Still Video Camera in Architectural Photogrammetry, XI. CIPA Symposium, Sofia, (u tisku), 1988
- [19] Rosenberg, P.: Information Theory and Electronic Photogrammetry, *Photogrammetric Engineering*, 1955, 21, 543—555
- [20] Shortis, M. R.: Precision Evaluations of Digital Imagery for Close-Range Photogrammetric Applications, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54, 1395—1401
- [21] Slapšak, B., Šivic, P. & Mravlje, D.: Stereofotogrametrija, *Arheo*, 1983, 03, 26—30

- [22] Stančić, Z. & Šivic, P.: Photogrammetric Documentation of Archaeological Excavations, XI. CIPA Symposium, Sofia, (u tisku), 1988
- [23] Šivic, P.: Fotogrametrična dokumentacija arheoloških izkopavanj, četvrto jugoslovensko savetovanje o fotogrametriji, druga knjiga, Budva, 1984, 131—139
- [24] Torlegard, K.: Transference of Methods from Analytical to Digital Photogrammetry, Photogrammetria, 1988, 42, 197—208
- [25] Weisel, J.: Digital Image Processing for Orthophoto Generation, Photogrammetria, 1985, 40, 69—76
- [26] Whittlesey, J. H.: Bipod camera support, Photogrammetric Engineering, 1966, 32, 1005—1010

### SAŽETAK

Fotogrametrijske istraživačke aktivnosti se u svijetu posljednjih desetak godina usredotočuju na razvoj digitalne fotogrametrije. Nova metoda zahtijeva reviziju cijelog fotogrametrijskog procesa: od obuhvaćanja podataka do kartografskog prikaza. Prikazan je povijesni razvoj fotogrametrije kao znanosti i tehnologije te prvi rezultati istraživanja na području dokumentiranja arheoloških iskopavanja.

### ABSTRACT

In the last ten years, photogrammetric research activities are focussed on the development of the digital photogrammetry. New method demands a revision of the photogrammetric process as a whole: from the data collection up to the cartographic presentation. This paper presents a historical development of photogrammetry as a science and technology as well some preliminary results of the new method applied to the documentation of archaeological excavations.

Primljeno: 1989-04-28