
DIGITALNI ON-LINE SISTEMI V BLIŽNJESLIKOVNI FOTOGRAMETRIJI

Zmago Fras
dipl.inž.geod.

Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo
Katedra za fotogrametrijo in kartografijo
junij, 1989, Ljubljana

AVTORSKI IZVLEČEK

Najnovejši napredki v razvoju polprevodniške in mikroročunalniške tehnologije in drastično padanje cen izdelkov, ki bazirajo na omenjenih tehnologijah, omogočajo izdelavo orodij za enostavno zajemanje in obdelavo digitalnih posnetkov in njihovo najširšo uporabo. V članku so najprej opisane posamezne enote za elektronsko zajemanje slik in tehnične rešitve vodilnih svetovnih proizvajalcev te opreme. V nadaljevanju so prikazane različne rešitve sistemov za obdelavo digitalnih posnetkov in predstavljen postopek popolnoma avtomatiziranega točkovnega izvrednotenja. V zaključku so omenjene nekatere naloge, ki jih je treba na področju digitalne fotogrametrije še rešiti.

AUTHOR'S ABSTRACT

Recent advancements in computer and sensor technology have improved the capabilities and reduced the costs of digital components so drastically that digital processing systems are becoming increasingly available. In the paper, the units for electronic image acquisition and technical equipment solution of leading world producers are described. Then, different solutions of digital image processing techniques and the procedure of fully automated point compilation are presented. In the conclusion, some further tasks in the field of digital photogrammetry that are to be solved, are mentioned.

1. UVOD

Prvi poizkusi popolne avtomatizacije fotogrametričnega procesa od zajemanja preko obdelave do prezentacije obdelanih slikovnih informacij segajo že v 50-a leta.

Za realizacijo popolnoma avtomatiziranih fotogrametričnih sistemov za civilne potrebe, ki so danes kot eksperimentalni sistemi že razviti v nekaterih raziskovalnih institucijah v svetu, pa je bilo potrebnih kar nekaj tehnoloških revolucij, ki pa so potekale bistveno hitreje kot v 19. stol. in začetku 20. stol. Tako je bilo potrebnih skoraj sto let, da so se po iznajdbi fotografije pojavili prvi analogni instrumenti in še nadaljnjih 50 let je moralo preteči, da so bili analitični instrumenti vpeljeni v civilno prakso.

Prvi korak v smeri novih popolnoma avtomatiziranih fotogrametričnih sistemov predstavlja izstrelitev prvega satelita iz serije LANDSAT, s katerega so bili narejeni prvi **digitalni posnetki**. S tem je bil postavljen nov mejnik v načinu zajemanja informacij o prostoru.

Drugi korak predstavlja hiter razvoj računalniške tehnologije, ki je omogočila uspešno obdelavo ogromnega števila podatkov, zajetih s satelitov. Razviti so bili popolnoma novi algoritmi za obdelavo digitalnih posnetkov, s katerimi na začetku nejasne digitalne posnetke prevedemo v človeku razumljive in sprejemljive posnetke. Z nadgradnjo in povezovanjem osnovnih algoritmov pa lahko iz digitalnih posnetkov

izluščimo tudi informacije, katere na osnovnem posnetku za človeško oko niso vidne.

Najširšo uporabo te v začetku vesoljske tehnologije in tretji korak pri dosegu željenega cilja pa predstavlja razvoj polprevodniške in mikrorračunalniške tehnologije, ki omogočata izdelavo orodij za enostavno zajemanje in obdelavo digitalnih posnetkov.

Praksa in možnosti naprednih fotogrametričnih metod, ki bazirajo na obdelavi digitalnih posnetkov, imajo širok krog uporabe. To se v največji meri odraža na področju bližnjeliskovne fotogrametrije, kjer je že tako široko področje uporabe z novo tehnologijo zajemanja in obdelave posnetkov razširjeno še na real-time aplikacije, kot so pridobitev rezultatov na mestu snemanja, pridobivanje 3-D koordinat na neposreden način (brez beleženja situacije na filmski material) kontrola kvalitete, kontrola dinamičnih procesov v industriji, kontrola in vodenje robotov. Natančnost in stabilnost kamer, ki uporabljajo digitalno tehnologijo za zajemanje slikovnih informacij, se naglo izboljšuje. Hitrost in kapaciteta mikrorračunalnikov konstantno narašča. Vse to v povezavi s padanjem cen prerokuje real-time fotogrametriji lepo bodočnost (El-Hakim 86).

2. ELEKTRONSKO ZAJEMANJE (RASTERSKA DIGITALIZACIJA) SLIK

Elektronsko zajemanje slik sestavljajo:

- zaznavanje svetlobe s fotosenzorji,
- adresiranje senzorjev,
- A/D pretvorba,
- hranjenje slike.

2.1. Video kamere

Video kamere delimo glede na način zaznavanja slike v dve skupini. Prvo predstavlja vidicon kamera, ki bazira na tehnologiji vakuuma, v katerem elektronski žarek skanira svetlobno občutljive elemente in tako ustvarja "vzorec" slike. Zaradi neizogibno navzoče velike geometrične

distorzije v slikah, dobljenih z vidicon kamerami, le-te niso primerne za sisteme namenjene veliki natančnosti meritev (El-Hakim 86, Real 86).

Druga skupina kamer bazira na polprevodniški tehnologiji. Večina teh kamer uporablja CCD (Charge Coupled Devices) ali CID (Charge Injection Device) senzorje namesto filma za zajemanje slikovnih informacij. "Slikovno" ravnino pri obeh tipih senzorjev sestavljajo diskretni svetlobno občutljivi elementi, ki so lahko kovinsko-oksidni polprevodniki (MOS) ali fotodiode. Razporeditev teh elementov je lahko linijska ali matrična. Geometrična natančnost teh slikovnih ravnin je omejena samo s tovarniško natančnostjo namestitve senzorskih elementov. Položaj elementa v matriki ali liniji predstavlja njegovo addresso, preko katere je definiran položaj slikovnih elementov digitalno zajete slike.

Energija svetlobe, ki pade na posamezen element, ustvari naboj (Charge), proporcionalen skupni intenziteti svetlobe. Naboji iz posameznih elementov se zbirajo in pošiljajo v ojačevalca, ki poda sliko v obliki spremenljivo se napetosti. Pri tej pretvorbi in prenosu take slike pa pride zaradi različnih zunanjih vzrokov (šum pretvornika, ojačevalca, ...) do sistematičnega popačenja slike. Vplive raznih шумov odpravimo s kalibracijo kamer (Stančič, ta edicija).

Kamere s CCD (CID) senzorji so kompatibilne z digitalno strojno opremo in procesnimi tehnikami (Real 86). Njihove prednosti so:

- majhne dimenzije,
- majhna teža,
- dolga življenska doba,
- direktna povezava z računalnikom,
- enostavno vzdrževanje.

Zelo važno je, da so senzorji časovno stabilni v poziciji in občutljivosti, kar pomeni, da lahko kamero kalibriramo.

Poleg naštetih prednosti pa lahko izdvojimo dve slabosti CCD kamer (izraz CCD kamere

je postal sinonim za video kamere s senzorsko slikovno ravnino):

- vezani smo na skoraj laboratorijske pogoje dela, ki jih s seboj prinaša direktna povezava z računalnikom,
- majhno merilo snemanja in s tem povezana natančnost v merilu 1:1.

Merilo snemanja je povezano z velikostjo matrike senzorjev. Povprečna velikost matrik je 700H x 550V pikselov, velikost pikselov pa okoli 15 x 15 mikronov. Navkljub zelo dobri natančnosti, doseženi v slikovnem merilu, to je 0.1 piksela, je zaradi majhnega merila snemanja natančnost v merilu objekta 10-krat slabša, kot jo dosegamo z analognimi metričnimi kamerami. Slika 2.1 predstavlja barvno vidicon kamero in nekaj tipičnih CCD kamer (ASPRS 89 - Non Topographic Photogrammetry)).

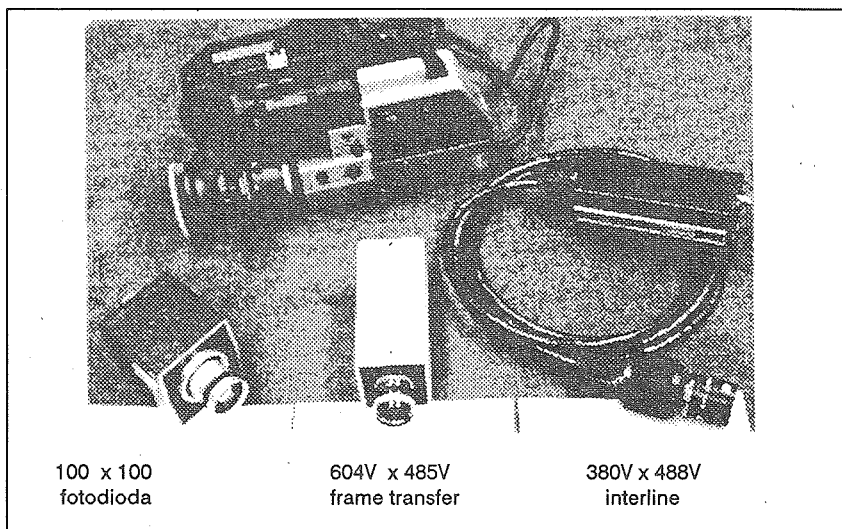
Številni raziskovalci in proizvajalci (v glavnem vodilne firme na področju fotografske tehnike in tehnologije) skušajo te pomanjkljivosti CCD kamer odpraviti. V nadaljevanju bodo predstavljeni trije poizkusi delne odprave slabih strani CCD kamer.

2.1.1. Canon RC701 (RC706) video kamera

Kot osnova služi ohišje navadnega fotoaparata, ki mu je dodan zoom objektiv s svetlobno vrednostjo 1: 1.2 in omogoča kontinuirano spreminjanje goriščne razdalje med 11 in 66 mm.

Namesto filma je v ohišje fotoaparata nameščen CCD senzor, ki transformira analogno sliko v elektronski signal. V kameri RC701 je uporabljen barvni 2/3-inčni CCD senzor velikosti 780H x 490V pikselov (skupaj 380.000 pikselov). Tehnične specifikacije prikazuje tabela 2.1 (Novak 88).

Novost pri tej kameri pa je, da za zajemanje slike ne rabimo računalnika. Analogni elektronski videospinal, ki ga ustvarja CCD senzor se shranjuje **direktno** na floppy disk (dimenzije 54 x 60 mm). Na en disk lahko shranimo do 50 "polovičnih" slik. Izraz "polovična" slika pomeni, da zajeto sliko sestavljajo elektronski signali iz vsake druge senzorske vrstice. Ker je vertikalna resolucija bistveno manjša od horizontalne, se vmesne vrstice enostavno kopirajo (enak princip uporabljajo televizijski in video monitorji).



Barvna vidicon kamera (v ozadju) in nekaj tipičnih CCD kamer (v ospredju)
Slika 2.1

Proizvajalec	Canon
Model	RC701 (706)
Število pikslov	780Hx480V (780Hx780V)
Velikost senzorja	8.8x6.6 mm
Tip senzorja	matrični CCD
Registracija slike	Floppy disk 54x80 mm
Čas snemanja	1/8 - 1/2000
Hitrost slikanja	p/s frekv. 2/5/10 slik/s
Občutljivost	24 DIN

p ... posamezen posn.
s ... serija posn.

Tabelat

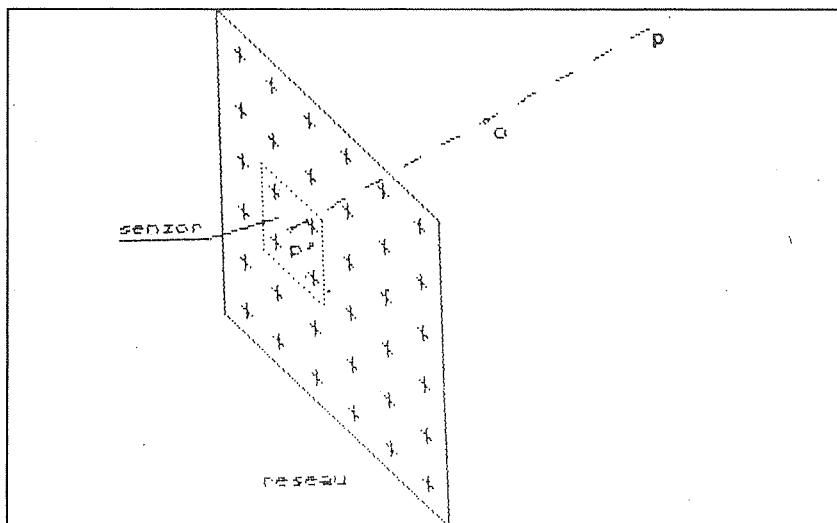
Izdelana je tudi različica zgoraj omenjene kamere RC706, ki ima vgrajen senzor velikosti 780 x 780 pikslov (skupaj 600.000 pikslov), pri kateri se na disketo zapiše celotna slika.

Takšna kamera ohranja vse prednosti CCD kamer, poleg tega pa omogoča veliko fleksibilnost pri delu na terenu. Edina pomankljivost, ki še ostane, je manjša natančnost, ki pa vseeno dovoljuje aplikacije v arhitekturi (rektifikacije fasad in fotomontaže).

2.1.2. Rollei "reseau-scanning" kamera

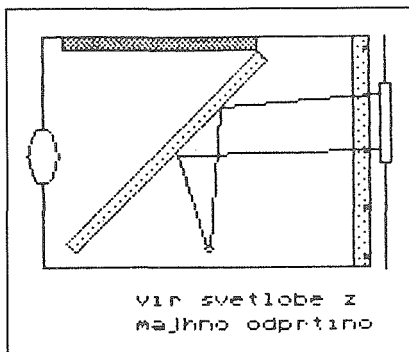
Za doseg zadovoljive natančnosti in resolucije z "malofORMATnimi" CCD senzorji moramo končno sliko sestaviti iz več manjših, bolj natančnih kosov, orientiranih v lokalnem slikovnem koordinatnem sistemu. Firma Rollei rešuje to s svojim sistemom "reseau-scanning" v kameri Rolleimetric RSC.

Povezava posameznih delnih slik, dobljenih s senzorji, je izvedena preko reseau mreže, ki je nameščena v slikovni ravnini fotoaparata. Pogoj za uspešno povezavo posameznih delnih slik je, da se vedno vsaj štirje reseau križi projicirajo na senzor. Tako lahko za vsako delno sliko izvedemo strogo perspektivno transformacijo v skupen slikovni sistem (slika 2.2). Sistem, ki premika senzor in lečje



Princip "reseau-scanninga" v fotogrametrični kameri

Slika 2.2



Projeciranje reseau mreže na senzor
Slika 2.3

vzporedno s slikovno ravnino, je zato lahko zelo enostavne konstrukcije.

Zaradi zanesljivosti upodobitve reseau križev sta reseau mreža in fotogrametrično področje posneta ločeno. Medtem, ko je zaslonka kamere zaprta, notranji vir svetlobe preko steklene plošče osvetli reseau mrežo. Zaradi zelo majhne odprtine izvora svetlobe so reseau točke projicirane z zelo veliko globinsko ostrino. To dejstvo poenostavlja konstrukcijo v toliko, da ni potrebe, da sta reseau plošča in senzor v isti

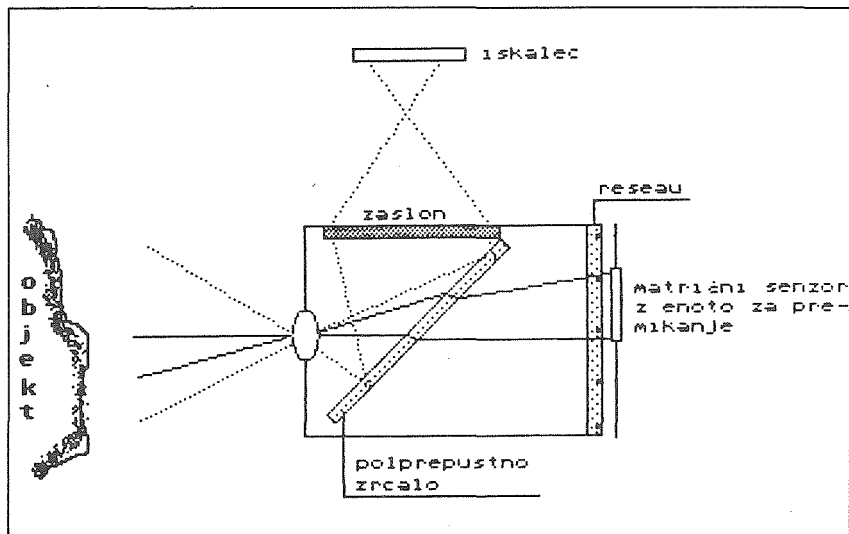
ravnini. Ob odprti zaslonki se na senzor projicira še objekt (Luhman 87) (sliki 2.3 in 2.4).

Taka konstrukcijska rešitev sicer poveča natančnost, zmanjša pa fleksibilnost kamere.

2.1.3. Eikonix digitalni slikovni sistemi

Eikonix je ena vodilnih firm na področju digitalnega zajemanja slik v ZDA. Zadnjih nekaj let deluje v okviru Eastman Kodak Company.

Z razliko od Rollei-a, ki povezuje posamezne dele slike preko reseau mreže, so se pri Eikonixu odločili za sistem preciznih koračnih motorjev, ki premikajo in natančno pozicionirajo senzor. Slika zajemajo po vrsticah in ne več po koščkih, podobno kot pri skanerjih na satelitih. Za povečanje natančnosti pa mora biti število elementov v senzorju bistveno večje kot pri "maloformatnih" senzorjih. Tako imajo kamere firme Eikonix tudi do 4096 elementov v eni vrstici. Karakteristike posameznih tipov kamer podaja tabela 2.2 (reklamni material - povzel avtor). Za razliko od obeh prej omenjenih rešitev je izhodna slika že v



Registracija objekta na senzorju
Slika 2.4

Proizvajalec	E I K O N I X			
	Serijsa 850	Serijsa 78/99	Eikonix 1000	Eikonix 1412
Model	linearno 4096 elem.	linearno 2048 elem.	linearno 4096 elem.	linearno 4096 elem.
Polje	20mil. piks. na sliko	5 mil. piks. na sliko	16mil. piks. na sliko	16mil. piks. na sliko
Resolucija	min. 16mm max. 00	min. 16mm max. 00	min. 16mm max. 00	min. 16mm max. 00
Področje skaniranja	± 1.6 piksla	± .82 piksla	2 mikrona	2 mikrona
Geometrična ponovljivost	16 sek. do nekaž min.	16 sek. do nekaž min.	16 sek. do nekaž min.	16 sek. do nekaž min.
Čas skaniranja	---	---	7 x 5 µm	7 x 5 µm
Velikost piksla	8	12	8	12
Št. bitnih ravnin				

Tabela 2.2

digitalni obliki, ker je že v ohišju kamere vgrajen A/D pretvornik.

Posledica velikosti senzorja in A/D pretvornika, nameščenega v ohišju kamere, so povečane dimenzije kamere.

2.2. Analogno/digitalna pretvorba; "zajemanje" zaslonske slike in hranjenje slike

Video kamere dajejo kot izhod analogni video signal, ki ga lahko direktno prikažemo na monitorju oz. zapišemo na magnetni medij. Informacija, ki jo nosi video signal, je kodirana v obliki enodimenzionalnega signala t. j. napetosti, ki se časovno spreminja. Z računalnikom pa ne moremo obdelovati napetosti kot fizične količine. Iz tega razloga je potrebno video signal digitalizirati. To izvedemo z analogno/digitalnimi pretvorniki. Kljub digitalizaciji pa slika še ni primerna za obdelavo z računalnikom. Slika, ki jo daje kamera, se zamenja vsakih 1/25 sekunde (evropski normativ). Takšne "prekajoče" slike pa seveda ne moremo uspešno iz vrednotiti pri objektih, ki se premikajo. Zadnji del pri digitalnem zajemanju slike tako predstavlja zajemanje ene zaslonske slike (v angleščini to označujejo z izrazom **image frame grab**) in hranjenje le-te.

Zajemalec ene zaslonske slike oz. frame grabber je v bistvu razširitvena kartica za računalnik, ki jo sestavljajo:

- video spomin (opcija),
- matematični procesor (opcija),
- ura,
- A/D pretvornik (trije za barvne slike),
- sinhronizator.

Ta razširitvena kartica nam torej omogoča shranjevanje zaslonskih slik v 1/25 sekunde (ob predpostavki, da sta kapaciteta in hitrost spominskega medija ustrezni). Tako "ujeto" sliko v spominu računalnika lahko takoj obdelujemo.

3. VIDEO PROCESORJI ZA OBDELAVE V REALNEM ČASU

Reševanje 3-D problemov pri meritvah in kontrolah zahteva združitev hitrih fotogrametričnih algoritmov s tehnikami transformacije in redukcije slik (nizki nivo) in procesi razumevanja slik (visoki nivo). Frekvenca digitalnega procesiranja slik za obdelave v realnem času mora biti vsaj 25-30Hz. Na današnji stopnji razvoja tehnik za obdelavo in analiziranje digitalnih slik lahko govorimo o obdelavi v **realnem času** samo pri uporabi enostavnih algoritmov, namen-

osnovni slikovni operatorji		
ARITMETIČNI (točkovno avtonomni)	en niz podatkov	> premiki, izrezovanje, normalizacija, primerjanje s pragom (thresholding)
		> transformacije s pomočjo prevedbene tabele
	več nizov podatkov	> sestevanje, odštevanje, množenje, deljenje
		> test enakosti
		> poleate (grafika, slike, tekst)
LOKALNI (kolicica točke)	> n:m konvolucija za izvedbo digitalnih visoko, nizko in pasovno frekvenenih prostorskih filtrov	
STATISTIČNI	> izravnava in specificiranje histogramov	
GEOMETRIČNI	> merilo, rotacije, translacije, zvižanje, prevzorenje	
KORELACIJA: FOURIER. TRANSF.	> iskanje, primerjanje	
MORFOLOŠKI	> redukcija in opis slik za računalniško analizo in razumevanje	

Tabela 3.1

jenih za enostavne točkovne transformacije oz. redukcije točkovno avtonomne aritmetične operacije - glej tabelo 3.1) (Real 86). Vse ostale funkcije pa se izvajajo le v približno realnem času.

Osnovna problema pri obdelavi v realnem času sta ogromna količina podatkov in kompleksnost procesnih algoritmov. V sistemih, kjer sta važna izhoda obdelave podatkov **hitrost in precizni rezultati**, kar se v veliki meri nanaša tudi na fotogrametrične kontrole, običajni splošno uporabni procesorji niso najboljša rešitev. Nadomeščajo jih specialni procesorji, ki imajo že vgrajene osnovne operatorje za obdelavo slik, kar znatno poveča hitrost. Osnovni operatorji so navedeni v tabeli 3.1 in jih moderni slikovni procesorji vsebujejo v najrazličnejših kombinacijah.

Izbira možnih konfiguracij strojne opreme je danes zelo pestra. Kljub raznolikosti pa lahko te možne konfiguracije s stališča uporabljene strojne opreme razvrstimo v štiri večje skupine (Real 86):

- slikovni procesni sistem, zgrajen okoli splošno uporabnega mini računalnika razreda mikro VAX II z dodatnimi koprocessori,

- specialni, samostojni, učinkoviti sistemi za posamezne aplikacije v realnem času, ki vključujejo kamere, glavni računalnik, koprocessori, pomnilniške enote in programsko opremo za obdelave v realnem času (cena osn. verzije se giblje okoli 30.000 USD),
- procesorji za obdelavo digitalnih signalov na enem čipu,
- razširitvene kartice za procesiranje digitalnih posnetkov namenjene mini in osebnim računalnikom (cena od 8.000 DEM navzgor).

4. SISTEMI ZA OBDELAVO DIGITALNIH POSNETKOV

Iz zornega kota fotogrametra lahko trdimo, da se pojavljata dve konceptualni rešitvi sistemov z možnostjo obdelave digitalnih posnetkov.

4.1. Analitični fotogrametrični instrumenti z enoto za digitalizacijo posnetkov

Ta rešitev je nastala v prehodnem obdobju, ko so se tehnike obdelave digitalnih posnetkov šele uveljavljale.

Konstrukciji analitičnega ploterja je dodana samo enota (maloformatna CCD kamera) za digitalizacijo majhnih kosov posnetkov. Senzorji so nameščeni nad posnetki in povezani z računalnikom oz. sistemom za digitalno korelacijo. Na ta način je mogoče avtomatizirati oz. odvisno od strukture modela delno avtomatizirati orientacijo modelov in zajemanje podatkov. Operater je tako rešen rutinskih utrujajočih opravil in samo nadzira delovni proces ter intervenira, če je potrebno. Tako opremljeni analitični ploterji omogočajo **popolnoma avtomatsko digitalizacijo DMR-a**. Le v točkah, za katere sistem ne more najti ustrezne korelacije za višino (neizrazite terenske oblike), pri digitalizaciji le-te operater določi ustrezno višino. Taka zasnova instrumenta omogoča tudi skoraj **avtomatsko izdelavo digitalnega ortofota**, za izdelavo katerega tako ne rabimo več posebnih instrumentov. **Delno so avtomatizirani tudi postopki notranje in zunanje orientacije**, saj lahko takšen sistem sam prepozna signalizirane točke oz. najde identične točke na dveh posnetkih, ki so podane s koordinatami.

Takšna rešitev je ob vseh drugih možnostih za številne aplikacije bližnjleslikovne fotogrametrije predraga, pa tudi učinkovitost v procesu izvrednotenja je samo za 30% večja (Shortis 88).

4.2. Računalniško orientirani video merski sistemi

Pri teh sistemih ni več razlike med fotogrametričnim instrumentom in računalnikom, ki krmili določene operacije, ampak je jedro celotnega sistema računalnik in video zaslon. Računalniška in video tehnologija v teh sistemih vplivata na vse faze, od zajemanja, obdelave in hranjenja podatkov celo do takšne mere, da so vse tri faze popolnoma avtomatizirane. Gruen je poimenoval takšne sisteme "Digital stations".

Računalniško orientirani video merski sistemi združujejo naslednje komponente:

- eno ali dve CCD kameri,
- A/D pretvornik,

- procesorski računalnik za hitro izvajanje osnovnih obdelav digitalne slike, kot so poudarjanje slike, detekcija robov, določevanje obrisa in konvolucija,
- kontrolni (host) računalnik,
- izhodne enote.

Z vidika zajemanja podatkov, s čimer je tesno povezana izhodna natančnost, lahko te sisteme delimo na:

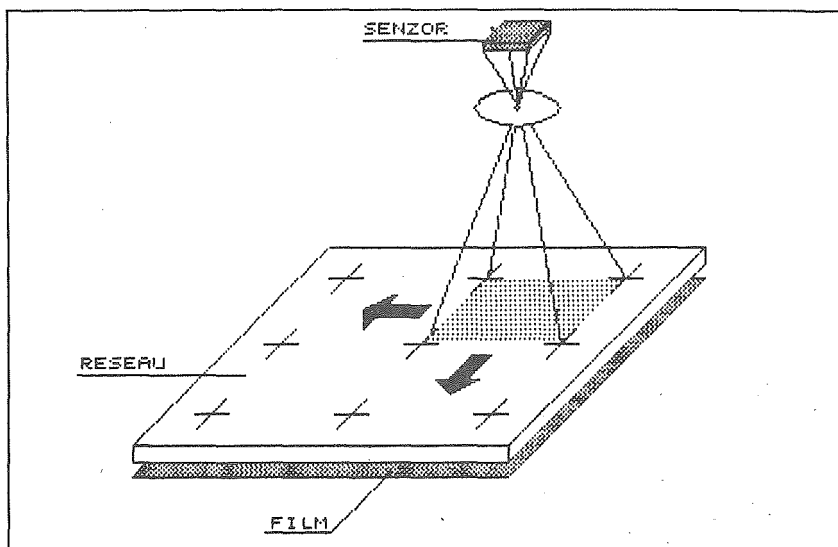
- posredne sisteme in
- direktne sisteme.

4.2.1. Posredni sistemi

Posredni sistemi bazirajo na komparatorskem principu in rasterski digitalizaciji analognih predlog. Rastersko digitalizacijo analognih predlog lahko izvedemo s skanerji (mizni in bobni skanerji) ali CCD kamerami v on ali off-line povezavi z ostalimi elementi sistema. Zaradi enostavnosti, priročnosti, vseh ostalih prednosti CCD kamer in ne nazadnje bistveno manjših investicijskih vlaganj so CCD kamere prevladale v aplikacijah bližnjleslikovne fotogrametrije kot enota za rastersko digitalizacijo analognih predlog (El-Hakim 86).

Zaradi posredne digitalizacije ti sistemi niso primerni za izvrednotenje dinamičnih procesov. Tako nismo strogo vezani na obdelave v realnem času in lahko posvetimo nekaj več časa rasterski digitalizaciji analognih predlog, s čimer povečamo vhodno natančnost rasterske slike.

Kot je znano, je največja slabost CCD kamer majhna senzorska površina, ki meri okoli 100 mm². Prav tako ni zaslediti tendenc, da bi v bližnji prihodnosti izdelali CCD kamere, katerih senzorska površina bi vsaj približno odgovarjala dimenzijam danes uporabljenih analognih posnetkov. Vhodno natančnost zato lahko povečamo le tako, da analogno predlogo digitaliziramo v več delnih slikah v večjem merilu. Povezavo teh delnih slik v skupen slikovni koordinatni sistem lahko rešimo na optično-mehanski ali optično-numerični način (Wester-Ebbinghaus 86).

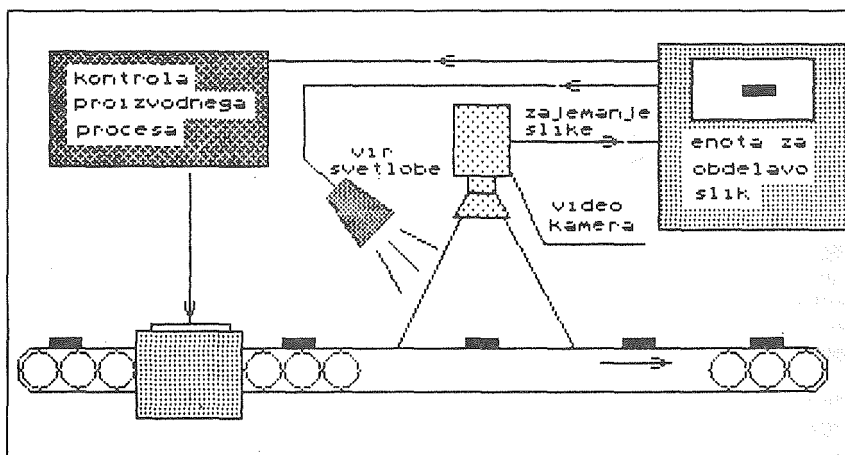


Princip "reseau-scanninga", kot je uporabljen v reseau - skanerju RS1 firme Rollei
Slika 4.1

- Pri optično-mehanskem načinu je povezava delnih slik izvedena z mehansko konstrukcijo, po kateri se premika kamera oz. senzorska površina in nam omogoča v vsakem trenutku natančno določitev položaja delne slike v skupnem slikovnem koordinatnem sistemu. Izvedba take

konstrukcije je zaradi visokih zahtev po natančnosti zelo draga in občutljiva na vplive okolice.

- Pri optično-numeričnem načinu pa izvedemo povezavo delnih slik v skupen slikovni koordinatni sistem na numeričen



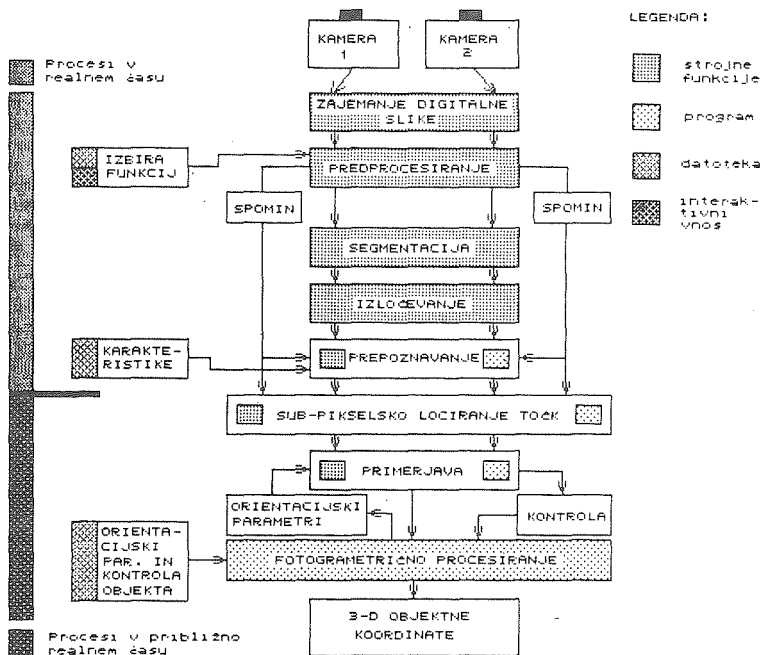
Machine vision system za prepoznavanje in sortiranje
Slika 4.2

način, ob predpostavki da uporabljamo pri digitalizaciji analognih slik reseau mrežo, nameščeno neposredno pred analogno predlogo. V postopku rasterske digitalizacije moramo potem samo zagotoviti, da se vsaj štirje križi reseau mreže preslikajo v delno sliko (slika 4.1). Le-to nato z bilinearno transformacijo na reseau križih prevedemo v skupen slikovni koordinatni sistem. Mehanska rešitev takega sistema ni zahtevna (Luhman 87).

4.2.2. Direktni (real-time) sistemi (machine vision systems)

O direktnih (real-time) sistemih govorimo takrat, ko so realna scena, rasterska digitalizacija in rezultati izvedenja v on-line povezavi v realnem času.

Ti sistemi izvirajo iz želje industrije po avtomatizirani proizvodnji (robotizaciji) v 3-D prostoru in jih v tujini poznajo in razvijajo pod imenom **machine vision systems**. Dobesedni prevodi (npr. sistemi s strojnim vidom) skoraj nikoli ne ustrezajo pravemu pomenu, zato je boljše opisno (z definicijo) podati pomen prej omenjenega izraza. Definicija o **machine vision** je bila sprejeta že leta 1985 s strani MVA/SME (Machine Vision Association of the Society of Manufacturing Engineers) in AVA (Automated Vision Association) in se glasi (Wong 86): uporaba enot za optično nekontaktno zaznavanje za avtomatsko sprejemanje in interpretacijo digitalnih slik realnega prostora, z namenom zajemanja informacij in/ali kontrole strojev ali procesov.



Blok diagram avtomatskega stereo merskega sistema
Slika 4.3

Glede na definicijo pokrivajo aplikacije machine vision velik del fotogrametričnih aplikacij v realnem času, predvsem v bližinskem področju.

V svetu, pri nas pa nekoliko manj, so že uveljavljeni sistemi za prepoznavanje in sortiranje izdelkov v procesu proizvodnje (slika 4.2) (Haggren 86). V teh sistemih so fotogrametrične operacije omejene na določitev merila slike in dvodimenzionalne transformacije slike. Popolnejša in pomembnejša vloga fotogrametrije v machine vision sistemih danes je v 3-D točkovnih merjenjih in kontrolnih aplikacijah. Zahtevnejše operacije, kot so kontinuirana 3-D merjenja in lociranje interpretiranih podatkov v objektu, so za današnjo stopnjo razvoja "standardne" strojne opreme še nerešljiv problem (Haggren 86).

4.2.3. Postopek izvedenja

Proces izvedenja je faza fotogrametričnega kontrolnega procesa, za katero še do pred kratkim fotogrametri nismo verjeli, da se da popolnoma avtomatizirati in da so rezultati meritev (prostorske koordinate, odstopanja, potrebne korekcije) znani v istem trenutku, kot so bile izvedene meritve.

Zanimanje znanstvenikov s področij kot sta fizika in elektrotehnika za razvoj avtomatiziranih proizvodnih procesov (robotizacije) je ob sodelovanju fotogrametrov in seveda ob podpori hitro se razvijajoče računalniške procesne in video tehnike privedlo do izgradnje prvih popolnoma avtomatiziranih sistemov za izvedenja. Seveda je ta popolna avtomatiziranost še omejena in to na točkovne kontrolne procese objektov z dobro signaliziranimi kontrolnimi točkami. Prav tako je trenutno omejena natančnost takšnih sistemov. Edini poseg operaterja predstavlja vnos parametrov za kamero in vnos orientacijskih točk, iz katerih po fotogrametričnih postopkih izračunamo orientacije posnetkov (El-Hakim 86,88).

Postopek popolnoma avtomatiziranega izvedenja digitalnih posnetkov (slika

4.3) na računalniško vodenih video merskih sistemih lahko razdelimo v dve fazi:

- ustrezna obdelava digitalnega posnetka, tako da je primeren za "meritve",
- določitev slikovnih in prostorskih koordinat objekta po fotogrametričnih postopkih.

Postopek izvedenja je globalno enak za mono in stereo digitalne posnetke, razlikuje se le v fotogrametričnih postopkih, preko katerih pridemo do prostorskih koordinat objekta.

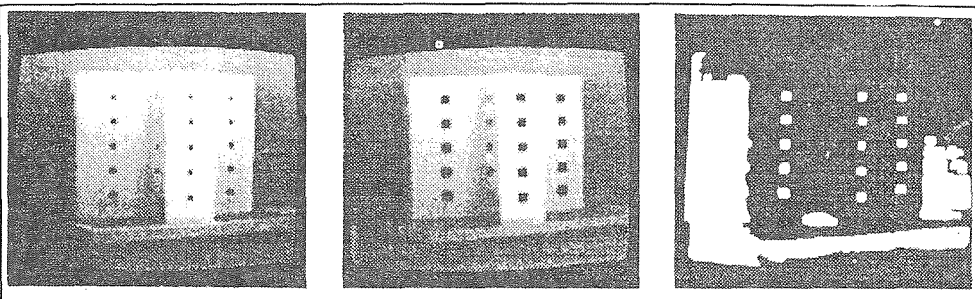
Kot je razvidno iz slike 4.3 lahko posamezne faze izvedemo s programsko oziroma specialno strojno opremo. Kakšen način reševanja posameznih faz bomo uporabili, je odvisno od finančnih sredstev (specialna strojna oprema je nekajkrat dražja od programskih rešitev), ki so nam na razpolago in časa v katerem moramo rešiti podano nalogo (specialna strojna oprema je nekajkrat hitrejša od programskih rešitev).

Ker postopek izvedenja, ki ga prikazuje diagram (slika 4.3), ni splošno poznan, je primerno posamezne faze nekoliko bolj detajlno opisati.

- Predprocesiranje

Fazo predprocesiranja digitalnega posnetka predstavljata dve operaciji: redukcija šumov in povečava kontrastnosti slike (angl. enhancement). Šume reduciramo tako, da iz večih zaporedno zajetih digitalnih slik (odvzeta slika brez ekspozicije za eliminacijo vgrajenega šuma) izračunamo povprečno sliko. Število zaporedno zajetih digitalnih slik, ki jih vzamemo za računanje povprečne slike, je odvisno od dinamičnosti scene, ki jo želimo izvednotiti.

Proces povečevanja kontrastnosti digitalne slike omogoča, da na digitalni sliki poudarimo važne, interesantne oblike, kot so tarče, robovi in "zadušimo" ostale. Poudarjanje kontrastov izvajamo s številnimi linearnimi in nelinearnimi konvolucijami (modulacijami). Te operacije se izvajajo na strojnem nivoju in vsebujejo nekaj deset vgrajenih funkcij, ki jih izbiramo



a) originalna digitalna slika

b) digitalna slika s povečanimi kontrasti

c) binarna digitalna slika

Slika 4.4

v odvisnosti od zunanjih parametrov, kot so osvetlitev, tekstura tarč in ozadja, refleksija, Izbrane funkcije (dobimo jih s testiranjem) oz. njihove številke vnesemo v datoteko ali interaktivno (intenzivno spreminjanje zunanjih parametrov). Po fazi povečave kontrastov je digitalna slika primerna za nadaljnji proces. Isto sliko pa rabimo še v fazi lociranja tarč (več v poglavju o lociranju), zato jo shranimo v spominu.

- Segmentacija

Da ne obdelujemo v nadaljnjih postopkih celotne digitalne slike, ampak samo predele, ki nas zanimajo, želimo te predele izločiti (angl. extraction) z digitalne slike. Za lažje izločevanje oblik z digitalne slike le-to prevedemo v binarno obliko. "Binarizacija" digitalne slike je kritična faza, ker so vse nadaljnje operacije odvisne od nje. Zato izbiramo prag (angl. threshold) različno za posamezne dele slike, odvisno od svetlostnih pogojev na digitalni sliki. Glede na te pogoje razdelimo digitalno sliko v več delnih digitalnih slik (oken; angl. window) in za vsako posebej določimo prag iz histograma porazdelitve sivih vrednosti. Te operacije izvajamo z namensko strojno opremo. Efekte prvih dveh faz prikazuje slika 4.4 (El-Hakim 86).

- Izločevanje

Rezultat segmentacije je digitalna slika, sestavljena iz belih "pack" na črni podlagi

(lahko tudi obratno). Operacija izločevanja oblik izolira vsako "packo" in ji dodeli karakteristično ime (angl. unique label). Te operacije izvajamo z namensko strojno opremo.

- Prepoznavanje

Za ločevanje "pack", ki predstavljajo tarče, od ostalih, izračunamo karakteristične parametre za vsako tarčo. Ti parametri lahko podajajo razmerje med višino in širino, med momentoma vztrajnosti velike in male osi, Na podlagi razlik (seveda z določenimi tolerancami) med temi parametri in danim setom parametrov za idealne tarče, ki so shranjene na vhodni datoteki, sistem avtomatsko odloča ali je "packa" razpoznan za tarčo ali ne. Vsem "prepoznanim" packam spremenimo ime, ostale "packe" pa izbrisemo iz spomina.

- Lociranje

Vsaka prepoznana "packa", ki predstavlja tarčo, pokriva področje večih pikslov, zato je potrebno locirati središče tarče s sub-pikselsko natančnostjo. Središče tarče lahko izračunamo v eni ali dveh fazah, odvisno od željene natančnosti in strukture tarč. Za enakomerno obravane tarče na kontrastnem ozadju predstavljata center tarče koordinati centroida področja, ki ga pokriva "packa". V primeru, da center tarče definira bela pika na črni podlagi (ali obrat-

no), upoštevamo za določitev centra tarče poleg binarne digitalne slike še digitalno sliko sivih vrednosti, ki smo jo v fazi predprocesiranja shranili na spominski medij. Kot v prvem primeru najprej izračunamo koordinati centroida "packe", nato pa iz sive vrednosti piksla, v katerega pade centroid in sivih vrednosti sosednjih pikslov v okviru matrike 3x3 ali 5x5 po interpolacijski metodi izračunamo koordinati centra tarče.

Raziskave so pokazale, da je natančnost koordinat centra tarče, ki ga predstavljata koordinati centroida "packe", močno odvisna od stopnje nejasnosti robu tarče in da lahko le-to izboljšamo z interpolacijo sivih vrednosti centralnega in sosednjih pikslo. Seveda pa se zaradi dvofaznosti računski čas, potreben za takšen natančnejši izračun, znatno poveča.

- Primerjava in fotogrametrično procesiranje

Vsa predhodna računanja se izvajajo za posamezne posnetke in so načelno lahko neodvisna od števila posnetkov.

V primeru, da imamo samo en posnetek, operacijo primerjave preskočimo in preidemo na fotogrametrično procesiranje digitalnih posnetkov. Na podlagi prepoznanih orientacijskih točk (kako in zakaj je opisano v nadaljevanju pri stereo paru) izračunamo po fotogrametričnem notranjem vrezu orientacijske parametre digitalnega posnetka. Predpogoj za nadaljnjo obdelavo in možnost pridobitve 3-D koordinat je, da imamo na razpolago digitalni višinski model za konkreten objekt. Iz višinskih podatkov in orientacijskih parametrov posnetka izračunamo redresirano digitalno sliko oz. digitalni ortofoto.

Za stereo par digitalnih posnetkov pa moramo pred fotogrametričnim procesiranjem še poiskati ekvivalentne točke na obeh digitalnih posnetkih. To fazo imenujemo primerjava (angl. matching) in v njej vsako točko levega digitalnega posnetka primerjamo s točkami na drugem digitalnem posnetku. Zaradi enoličnosti nadaljnjega postopka opravimo to fazo v dveh korakih.

V prvem koraku obdelamo samo orientacijske točke, ki jih potrebujemo za izračun parametrov orientacije in kalibracije kamere. Te točke lahko identificiramo glede na vnaprej podano lego, razporeditev in oštevilčbo ali pa tako, da ima vsaka orientacijska točka značilno, od vseh ostalih (orientacijskih in kontrolnih) točk različno obliko. Po identifikaciji teh točk nato za vsak digitalni posnetek s fotogrametričnim notranjim vrezom upošteva pogoj kolinearnosti izračunamo orientacijske parametre. V primeru, da so relacije med kamerama znane in fiksne, lahko ta korak preskočimo.

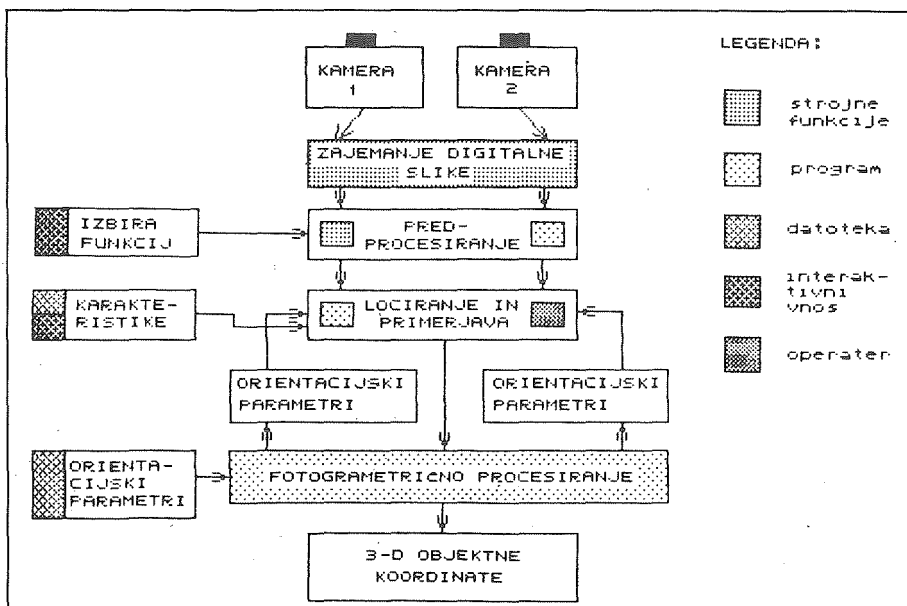
V drugem koraku zajamemo vse ostale točke. Iz slikovnih koordinat točke na prvem digitalnem posnetku, ki ji iščemo par na drugem digitalnem posnetku in iz orientacijskih parametrov obeh digitalnih posnetkov dobimo zvezo med slikovnima koordinatama x in y na drugem digitalnem posnetku. Zvezo nam predstavlja enačba premice (jedrnega žarka)

$$x^2 = a \cdot y^2 + b$$

kjer sta koeficienta a in b izračunana iz zgoraj omenjenih parametrov. Slikovne koordinate vseh točk drugega digitalnega posnetka testiramo s podano premico in tarča, katere koordinati najboljše (seveda v ustreznih tolerancah) zadostita enačbi, je najverjetnejša rešitev. V primeru, da slikovni koordinati nobene od točk na drugem digitalnem posnetku znotraj ustreznih toleranc ne zadostita enačbi, točko oz. tarčo izločimo.

- Izračun 3-D objektnih koordinat

Rezultat predhodne faze so ali pari identičnih točk na obeh digitalnih posnetkih ali digitalni ortofoto. Iz slikovnih koordinat točk na stereo paru in iz orientacijskih parametrov izračunamo objektne koordinate tarč po fotogrametričnem zunanem vrezu. Digitalni ortofoto pa nam že predstavlja ortogonalno projekcijo snemanega objekta, iz katerega lahko dobimo za vsako signalizirano točko njene 3-D koordinate. Če smo v fazi izločevanja oblik zajeli tudi robove objekta, nam potem vektorizirani ortofoto predstavlja načrt objekta. Seveda pa



Blok diagram osnovnih operacij za izvedenotenje digitalnih posnetkov
Slika 4.5

faza vektorizacije in nadaljnje obdelave vektorske slike ne poteka več v realnem času.

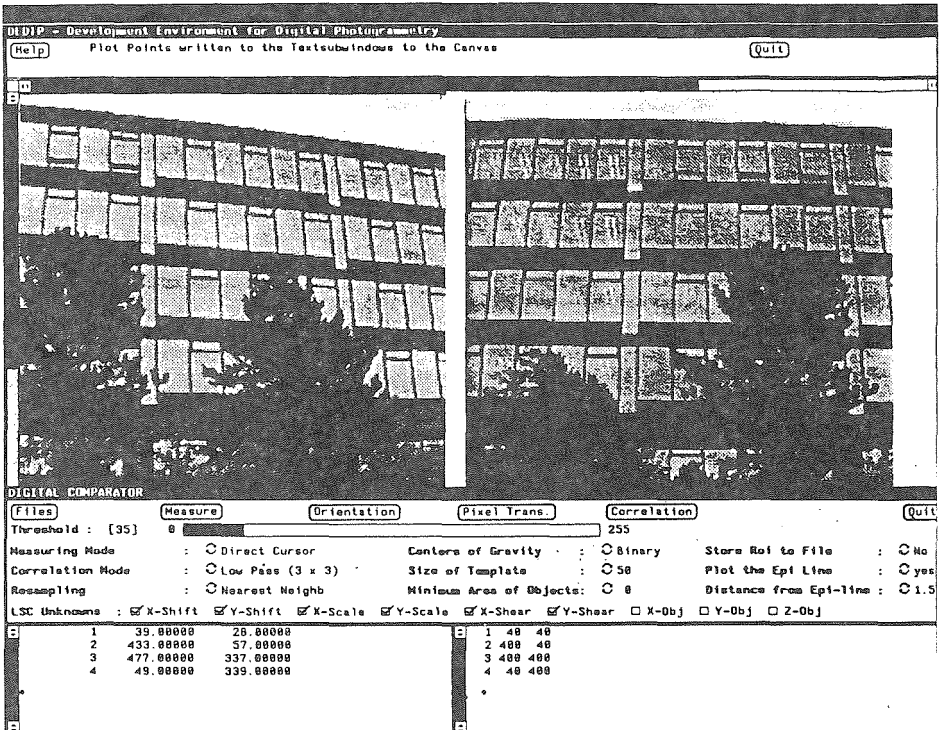
Za prvih šest operacij porabimo za vsako točko 10 do 20 milisekund, za operaciji primerjanja in fotogrametričnega procesiranja pa za vsako točko približno 50 do 60 milisekund (El-Hakim 86). Razlika v hitrosti obdelave se pojavlja zato, ker izvajamo prvih šest faz na strojnem nivoju s specialnimi procesorji, zadnji dve fazi pa uporabljata tudi programe, ki so pisani v okolju splošno uporabnih procesorjev, ki niso specialno namenjeni digitalnemu procesiranju slik (angl. digital image processing) (Čeh, Gvozdanovič, Kosmatin-Fras ta edicija).

Vse aplikacije v bližnjefotogrametriji pa ne zahtevajo popolnoma avtomatske obdelave v realnem času (aplikacije v arhitekturi, arheologiji, podvodnih snemanjih, ...), prav tako pa v vseh aplikacijah nismo zadovoljni z relativno majhno natančnostjo, ki nam jo nudijo popolnoma avtomatizirani sistemi (inženirske aplikacije). Natančnosti v

samem procesu obdelave digitalnih posnetkov ne moremo povečati, lahko pa le-to povečamo v fazi zajemanja digitalnih posnetkov (glej poglavje 4.2.1.). Aplikacije, ki ne zahtevajo popolnoma avtomatske obdelave v realnem času, lahko izvajamo tudi na sistemih, ki nimajo vseh v poglavju 4.2 naštetih komponent. Pri tem predvsem mislimo na možnost združitve posebnega procesnega računalnika in krmilnega računalnika v eni enoti, ki je lahko že IBM PC/AT kompatibilni računalnik z razširitveno kartico, ki omogoča uporabo najosnovnejših operatorjev za obdelavo digitalnih slik (glej tabelo 3.1). V naših razmerah predstavlja takšen sistem idealno rešitev za razvoj računalniško podprtih video merskih sistemov. Če se vrnemo nazaj na obdelavo digitalnih posnetkov, mora zgoraj opisani sistem omogočati izvajanje najosnovnejših operacij pri izvedenotanju digitalnih posnetkov kot jih prikazuje slika 4.5.

- Predprocesiranje

Postopek se ne razlikuje od že opisanega.



Slika 4.6

- Lociranje in primerjava

V nadaljnjih postopkih obdelujemo digitalni sliko kot celoti. Orientacijske točke lociramo z nitnim križem, ki je sestavni del slike. Točke, ki so nedvoumno signalizirane, lahko enostavno definiramo na obeh posnetkih, pri točkah, ki pa niso signalizirane, pa si lahko pomagamo s stereoskopom (predhodno orientiran par posnetkov), ki je nameščen pred zaslonom in s stereo opazovanjem določimo pripadajoči sliki točk na obeh digitalnih posnetkih (Agnard & co. 88).

Z razvojem sistema skušamo predvsem fazi lociranja in primerjave avtomatizirati kolikor nam narekujejo naše potrebe in dovoljujejo možnosti.

- Fotogrametrično procesiranje

Iz točk, ki jih vizualno prepoznamo kot orientacijske točke, izračunamo orientacijske parametre obeh posnetkov po fotogrametričnem notranjem vrezu, upošteva pogoje kolinearnosti. Za vse ostale točke pa po izračunu orientacijskih parametrov izračunamo prostorske objektne koordinate.

Način izvedenja na takih sistemih je precej podoben (v osnovni verziji) izvedenju na komparatorju oz. na analitičnih ploterjih, s to razliko, da obdelujemo digitalne posnetke. Slika 4.6 prikazuje delovno okolje takomenovanega "digitalnega" komparatorja (Novak 88).

4.2.4. Natančnost

Večina računalniško orientiranih video merskih sistemov je še v eksperimentalni fazi, zato lahko o natančnosti, ki jo nudijo

taki sistemi, sklepamo samo iz posameznih raziskav. Kritično mesto glede natančnosti je že takoj na začetku, to je pri zajemanju digitalnih slik.

Tako nam posredni sistemi omogočajo doseg relativne natančnosti tudi do 1 : 250 000 (Haggren 86), medtem ko današnji direktni (machine vision systems) sistemi omogočajo maksimalno relativno natančnost v rangu 1 : 10 000 (Shortis 88)..

Seveda pa je treba še enkrat poudariti, da je med obema tipoma sistemov bistvena razlika v času, ki je potekel od zajemanja slike do končnih rezultatov.

5. ZAKLJUČEK

Avtomatsko merjenje in kontrola dinamičnih 3-D procesov je zanimivo novo področje, ki zahteva fotogrametrične ekspertize. Današnji in jutrišnji sistemi za zajemanje in procesiranje digitalnih posnetkov zahtevajo razvoj novih algoritmov za rešitev problemov prehoda iz 2-D v 3-D. Super čipi povezani s hitrimi sposobnimi fotogrametričnimi algoritmi za procesiranje digitalnih posnetkov lahko omogočijo prenos precizne 3-D inteligence v računalniško podprto proizvodnjo, medicino in druge discipline, ki jih pokriva bližnjeliskovna fotogrametrija. Problem real-time zahtev lahko rešijo v veliki meri paralelne obdelave na večih računalnikih (paralelna arhitektura). Zato je potrebno enako skrb posvečati razvoju algoritmov in računalniške opreme kajti le uspešna kombinacija obeh bo dala željene rezultate.

Na koncu bi želel opozoriti na nekaj nalog (Wong 86), ki jih bo treba v prihodnosti na področju digitalne fotogrametrije še rešiti.

- Razvoj stereo digitalnih sistemov

Digitalna primerjava (korelacija) konjugiranih posnetkov ostaja še vedno največji "porabnik" časa pri generiranju trodimenzionalnih podatkov o objektu. Tak proces je ponavadi izveden v treh korakih:

- določitev orientacije jedrnih žarkov na obeh posnetkih,

- primerjanje vseh svetlobnih intezitet pikslov, ki ležijo vzdolž jedrnega žarka s svetlobno vrednostjo iskanega piksla na levem posnetku,
- določitev konjugiranih slikovnih točk.

Z ustreznou konstrukcijo nosilca kamer, takó da smer jedrnih žarkov koincidira s senzorsko linijo kamere, bi lahko eliminirali prva dva koraka in s tem znatno zmanjšali računanja, povezana s korelacijo. Seveda bodo taki sistemi omejeni samo na normalni primer in zaradi majhnega razmerja baza : oddaljenost snemanja koristni samo v bližnjeliskovnih aplikacijah. Trenutno bi bili taki sistemi uporabni pri avtomatizirani proizvodnji in kontroli, v arhitekturi in arheologiji, kjer je zahtevana manjša natančnost.

- Natančnost centriranja tarč

Merjenje slikovnih koordinat tarč je osnovna operacija fotogrametričnih merenj v aplikacijah bližnjeliskovne fotogrametrije. Rezultati številnih raziskav, ki so bile posvečene natančnosti izvrednotenja operaterjev na mono in stereo komparatorjih, niso v digitalni fotogrametriji direktno uporabni. Človeški faktor nima več vpliva na te procese in je natančnost določitve centra tarče odvisna samo od velikosti najmanjšega slikovnega elementa in uporabljenih algoritmov. Za uspešno rešitev tega problema je potrebno raziskati in poznati vpliv velikosti, oblike in kontrastnosti tarč na natančnost določitve centra in tako priti do optimalne natančnosti digitalnih meritev.

- Slikovna korelacija

Digitalna slikovna korelacija je bila predmet intenzivnih raziskav v zvezi z razvojem računalniško podprtih sistemov za izvrednotenje (analitični ploterji). Trenutni obstoječi algoritmi za digitalno korelacijo se težko primerjajo s sposobnostmi operaterja. V aplikacijah bližnjeliskovne fotogrametrije je digitalna korelacija še kompleksnejša zaradi različnih konfiguracij postavitve kamer in kompleksnosti snemanja scene. Nadaljnje raziskave bodo morale podati osnove za boljše razumevanje natančnosti

digitalne korelacije in na podlagi tega predstaviti nove sposobnejše algoritme.

- Samo-kalibracija in samo-orientacija

Da bodo lahko digitalni sistemi čimbolj neodvisni od človeka kot operaterja, bo potrebno izdelati algoritme za avtomatsko prepoznavanje oslonilnih točk in na podlagi njih samo-določitve parametrov notranje in zunanje orientacije znotraj posamezne aplikacije.

- Splošni algoritmi za multi-slikovno fotogrametrijo

V aplikacijah bližnjelikovne fotogrametrije je pogost primer, da posamezen objekt posnamemo z več kot treh stojišč, pri čemer pa so lahko kamere na posameznih stojiščih različne. Analitične rešitve za take primere so v svetu že izdelane. Za digitalne sisteme bo potrebno razviti sposobnejše algoritme, ki bodo sposobni v realnem času opraviti naslednje operacije:

- identifikacijo oslonilnih in kontrolnih točk,

- identifikacijo najboljšega stereopara za kartiranje dela objekta,
- zvesti digitalno korelacijo za konjugiran par digitalnih posnetkov,
- povezavo prostorskih podatkov enega stereopara v 3-D model objekta,
- absolutno orientacijo za generiranje digitalnega modela,
- analizo pogrškov in natančnosti,
- tvorjenje grafičnih in numeričnih izhodov.

- Sistemi z umetno inteligenco

Končni cilj razvoja digitalnih fotogrametričnih sistemov bodo oz. so sistemi, ki bodo znali sami rešiti vse fotogrametrične naloge in sprejemati logične odločitve v mikrosekundah. Taki sistemi bodo zasnovani na bazah znanja, ki bodo predstavljale v prihodnosti seveda ob ustrezni programski podpori "umetno inteligenco".

LITERATURA:

Agnard, J. P., Gagnon, P. A. & Nolette, C. (1988): "Microcom-puters and Photogrammetry A New Tool: The Videoplotter", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, 8/1988, stran 1165 - 1167.

El-Hakim, S. F. (1986): "A real-time system for object measurement with CCD cameras", članek predstavljen na simpoziju "Real-Time Photogrammetry - A New Challenge", 16. - 19.06. 1986, Ottawa, Canada, IAPRS Vol.26, Part 5, stran 363 - 373.

El-Hakim, S. F. (1988): "Limiting factors of real-time image metrology", članek predstavljen na kongresu ISPRS, Kyoto, Japonska, IAPRS Vol. 27/B2, stran 97 - 109.

Gruen, A. W. (1989): "Digital Photogrammetric Processing Systems: Current Status and Prospects", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 55, 5/1989, stran 581 - 586.

Haggren, H. (1986): "Real-time photogrammetry as used for machine vision applications", članek predstavljen na simpoziju "Real-Time Photogrammetry - A New Challenge", 16. - 19.06. 1986, Ottawa, Canada, IAPRS Vol.26, Part 5, stran 374 - 382.

Luhman, Th. (1986): "Automatic point determination in a reseau-scanning system", članek predstavljen na simpoziju "Real-Time Photogrammetry - A New Challenge", 16. - 19.06. 1986, Ottawa, Canada, IAPRS Vol.26, Part 5, stran 400 - 408.

Luhman, Th., Wester-Ebbinghaus, W. (1987): "Digital image processing by means of reseau-scanning", 41. Photogrammetrischen Woche, Stuttgart, 14. - 19.09.1987, str. 123 - 130.

Novak, K. (1988): "Application of a Still Video Camera in Architectural Photogrammetry", članek na XI. International Symposium of CIPA, 4. - 7.10. 1988, Sofija, Bolgarija, 12 strani.

Petrie, G. (1983): "The philosophy of digital and analytical photogrammetric systems", University of Glasgow, Scotland, 1983, 28 strani.

Pomaska, G. (1988): "Rolleimetric - ein Systemkonzept fuer photogrammetrische Ingenieurwendungen", Bildmessung und Luftbildwesen, 56. Jahrgang, 6/1988, stran 189 - 198.

Real, R. R. (1986): "Components for video-based photogrammetry of dynamic processes", članek predstavljen na simpoziju "Real-Time Photogrammetry - A New Challenge", 16. - 19.06. 1986, Ottawa, Canada, IAPRS Vol.26, Part 5, stran 432 - 444.

Shortis, M. R. (1988): "Precision Evaluations of Digital Imagery for Close-Range Photogrammetric Applications", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, 10/1988, stran 1395 - 1401.

Torlegard, K. (1987): "New challenges of close range photogrammetry", 41. Photogrammetrischen Woche, Stuttgart, 14. - 19.09.1987, str. 57 - 64.

Wester-Ebbinghaus, W. (1986): "CCD reseau-scanning - a new principle for digital image processing", članek predstavljen na simpoziju "Real-Time Photogrammetry - A New Challenge", 16. - 19.06. 1986, Ottawa, Canada, IAPRS Vol.26, Part 5, stran 432 - 444.

Wong, K. W. (1986): "Stereo solid state camera systems", članek predstavljen na simpoziju "Real-Time Photogrammetry - A New Challenge", 16. - 19.06. 1986, Ottawa, Canada, IAPRS Vol.26, Part 5, stran 454 - 458.