UDC: 621.397.3 : 004
004.932

UVOD U REGISTRACIJU SLIKA

Kapetan mr *Boban* Bondžulić, dipl. inž., bondzulici@yahoo.com,
Vojna akademija

Rezime:

U radu su dati osnovni pojmovi koji se koriste u registraciji slika, a koja je potrebna u različitim primenama obrade i analize slike. Prikazano je nekoliko primera registracije izvornih slika. Kroz jedan od primera ilustrovani su koraci koji se javljaju u registraciji. U drugom primeru, korišćenjem programskog paketa „Matlab 7.0“, ilustrovana je registracija slika iz baze multisenzorskih slika autora. Ostali primeri preuzeti su iz literature.

Ključne reči: izdvajanje obeležja, uparivanje obeležja, funkcije preslikavanja, registracija slika, sjedinjavanje slika.

IMAGE REGISTRATION INTRODUCTION

Summary:

This paper gives the basic ideas of image registration needed in various applications of image processing and image analysis. A couple of examples of source image registration are given. The image registration steps are illustrated in one example. The „Matlab 7.0“ software is used in another example to illustrate image registration out of the author's multisensor image dataset. The other examples are taken from available literature.

Key words: feature detection, feature matching, transformation functions, image registration, image fusion.

Uvod

Moderni sistemi video nadzora sadrže više od jednog senzora. Na primer, savremene platforme na avionima sadrže najmanje senzore koji rade u vidljivom i infracrvenom delu elektromagnetnog (EM) spektra. Ovakvi sistemi često imaju jedan displej za prikaz podataka sa senzora, pa ne mogu istovremeno prikazati multispektralne podatke. Zbog toga se nakon akvizicije svih spektralnih karakteristika operateru prikazuje sjedinjena slika. Procesi vremenskog i prostornog usaglašavanja podataka sa senzora moraju se rešiti pre pikselnog sjedinjavanja izvornih slika.

Kada se sjedinjavaju slike dva ili više senzora bitno je da pikseli dve slike prikazuju istu tačku scene. Ukoliko to nije slučaj, tačka realne scene može biti prikazana više puta na sjedinjenoj slici i na taj način uneti zabunu pri reprezentaciji scene. Idealan slučaj imali bi kada senzori rade sinhronizovano i imaju isti optički put, ali to često nije moguće [1].

Na sl. 1 prikazane su dve izvorne slike koje su vremenski usaglašene, ali nisu usaglašene prostorno. Na istoj slici prikazani su rezultati aritmetičkog sjedinjavanja izvornih slika.

(a)

(b)

(c)

Slika 1 – (a) (b) izvorne slike; (c) sjedinjena slika

Sa sl. 1 vidi se da sjedinjena slika objekte na sceni prikazuje dva puta (pešaci, vozila na parkingu, ulična svetiljka, ...).

U toku poslednjih dvadeset godina razvijen je veliki broj metoda pikselnog sjedinjavanja slika, ali svi polaze od pretpostavke da su izvorne slike prostorno i vremenski usaglašene. Na taj način kvalitet sjedinjavanja izvornih slika u najvećoj meri zavisi od tačnosti usaglašavanja.

Automatsko usaglašavanje slika je veoma težak zadatak, naročito ukoliko su slike dobijene sa senzora različitog tipa i/ili kada je potrebno izvršiti složene geometrijske transformacije [2, 3]. Tokom godina veliki broj tehnika registracije razvijen je za različite tipove senzora i različite aplikacije.

Registracija slika

Registracija slika je proces prostornog i/ili vremenskog usaglašavanja dve ili više slika scene [4, 5, 6, 7]. Ova široka definicija obuhvata veliki broj problema usaglašavanja. Proces registracije je najbitniji korak u obradi i analizi slike gde se krajnja informacija dobija kombinovanjem različitih tipova podataka, kao što je to slučaj pri sjedinjavanju slika, detekcije promena, restauracije slike iz projekcija... Proces registracije je potreban u daljinskom osmatranju (multispektralna klasifikacija, detekcija promena, prognoza vremena, formiranje superrezolucionih slika, formiranje mozaik slika, integracija informacija u geografske informacione sisteme), u medicini (kombinovanje podataka dobijenih računarskom tomografijom i nuklearnom magnetskom rezonancom, monitoring rasta tumora, poređenje podataka pacijenta sa anatomskim atlasima, verifikacija lečenja), u kartografiji (ažuriranje karata), u računarskim primenama (lokalizacija ciljeva, automatska kontrola kvaliteta), itd. [8].

U lancu digitalne obrade slike sjedinjavanje slika može se dobiti kroz različite arhitekture. Jedna od arhitektura prikazana je na sl. 2 i odgovara jednostavnom sjedinjavanju dve slike, nakon procesa registracije. U ovom slučaju radi se transformacija jedne izvorne slike i sjedinjena slika se prikazuje i/ili koristi za dalju obradu [9].

Slika 2 – Struktura pikselnog sjedinjavanja slika

Na sl. 3 prikazana su tri primera registracije izvornih slika, a na sl. 3a slike Pentagona dobijene senzorima koji rade u različitim delovima infracrvenog dela EM spektra i prikazane su slike nakon registracije. Različit lokalni polaritet je prisutan u centralnom i donjem levom delu izvornih slika. Treba primetiti da su granice struktura i puteva ispravno usaglašene.

Na sl. 3b su prikazane slike dobijene televizijskom (TV) i termovizijskom (IR) kamerom, respektivno, i prikazuju pistu za vreme sletanja aviona. Slike imaju inverzne lokalne polaritete i različite opsege nivoa sivog. Nakon registracije se vidi da su granice puteva i sletne staze usaglašene. Primeri prikazani na sl. 3a i 3b su preuzeti iz [2].

Slika 3 – Primeri registracije izvornih slika

Na sl. 3c prikazane su slike aerodroma pre i nakon vazdušnog napada. U ovom slučaju registracija je potrebna zbog procene štete. Na drugoj izvornoj slici belim strelicama obeleženi su krateri eksplozija. Primer je preuzet iz [7].

Razlike dve ili više slika iste ili slične scene mogu se podeliti u dve kategorije: prostorne (geometrijske) i amplitudske (intenzitetske).

Amplitudske razlike nastaju zbog:

– **razlike na sceni.** Na primer, određeni objekat može biti prisutan na jednoj od slika, menjajući opseg nivoa sivog u određenim regionima slika;

– **različiti tipovi senzora.** Akvizicioni uređaji mogu meriti različite fenomene (temperatura, apsorpcione karakteristike tkiva, osvetljenost objekata na sceni, refleksione karakteristike tkiva, itd.). Na taj način isti fizički fenomen može imati veoma različite prezentacije, što je slučaj kod multimodalnih slika. Ovakve prezentacije obično sadrže korelisane informacije, kao i komplementarne, nekorelisane informacije;

– **različiti uslovi pri kojima je izvršena akvizicija.** Na primer, različita osvetljenost scene kod konvencionalnih kamera, promena atmosferskih uslova, različite osobine uređaja, i sl.

Relacije između intenziteta piksela slika različitih modaliteta (televizijska kamera, termovizijska kamera, radar, itd.) veoma su kompleksne i nepoznate. Karakteristike prisutne na jednoj slici ne moraju se pojavljivati u drugoj i obrnuto. Takođe, u regionima slike može postojati inverzan polaritet, koga nema u drugim delovima slike. Više vrednosti nivoa sivog jedne slike može odgovarati jednoj vrednosti nivoa sivog na drugoj slici i obrnuto. Drugim rečima, dve slike često nisu korelisane u potpunosti, tj. nisu globalno korelisane [10].

Prostorna neusaglašenost obično nastaje zbog razlika u poziciji senzora, podrtavanja platformi u toku akvizicije, promena objekata i struktura (kretanja, deformacije, rast), razlika u karakteristikama senzora (rezolucija, vidno polje, karakteristike sočiva), šuma senzora, itd. Zbog toga postoje razlike u translaciji, rotaciji, dimenzijama, kao i druge geometrijske razlike [5, 8, 11]. Što je više razlika između izvornih slika teže je postići tačnu registraciju.

Multisenzorski sistem najčešće ima jednu od dve konfiguracije prikazane na sl. 4. Kod prve konfiguracije senzori su postavljeni jedan do drugog i kalibrisani na određenu distancu (obično u beskonačnosti). Ovakvo jednostavno podešavanje ima jedan nedostatak – efekat paralakse (parallax effects). Zbog različitih optičkih puteva senzora nije moguće pronaći fiksnu transformaciju koja će uvek preslikavati jednu sliku na drugu. Umesto toga, transformacija ima kompleksnu zavisnost od daljine senzor – objekat. U praksi, za senzore koji su postavljeni jedan do drugog i kalibrisani na beskonačnost efekat paralakse postaje zanemariv kada distanca prelazi određenu granicu (obično par stotina metara) [11]. Razdvajanje senzora stvara baznu liniju koja je korisna u stereo viziji, ali je nepoželjna kada se sjedinjavaju slike dva senzora. Zbog toga je potrebno da senzori budu što bliže jedan drugom, tako da se, kada je scena daleko od senzora, efekat paralakse manifestuje kao minimalna translacija između dve slike. Između senzora mogu postojati i razlike u rotaciji koje uzrokuju pomeraj ili rotaciju slika. Razlike u veličini zavise od žižnih daljina ili dimenzija piksela.

Efekat paralakse može se izbeći korišćenjem zajedničke aperture (sl. 4b). Kod ove konfiguracije koriste se jedno ili više ogledala kako bi senzori imali isti optički put. U praksi, određeni stepen paralakse može postojati zbog fizičkih ograničenja senzora/ogledala (posebno kod sistema sa više od dve kamere).

Slika 4 – Primeri konfiguracije senzora: (a) jedan do drugog; (b) sa zajedničkom aperturom

Procesom registracije koriguju se neke od razlika, dok se druge zadržavaju [3]. Pri implementaciji algoritma registracije bitno je identifikovati razlike koje se žele korigovati, a to su najčešće geometrijske razlike. U radu se neće razmatrati amplitudske razlike, tj. različiti opsezi nivoa sivog (boje) izvornih slika. Međutim, korisno je poznavati relacije između nivoa sivog zbog identifikacije geometrijskih razlika.

Terminologija

U radu će biti korišćena sledeća terminologija:

- modaliteti. Slike se mogu dobiti iz različitih izvora, koje zovemo modaliteti;
- referentna slika. Jedna od dve izvorne slike. Ova slika u procesu registracije ostaje nepromenjena;
- podešavajuća slika (*sensed image*). Druga iz skupa od dve slike. Ova slika se prilagođava kako bi se izvršila registracija;
- funkcija transformacije. Funkcija koja preslikava podešavajuću sliku na referentnu sliku. Određuje se korišćenjem koordinata određenog broja tačaka izvornih slika.

Koraci u registraciji slika

Pri registraciji slika obično se koriste sledeći koraci [4, 6]:

- predobrada. Obuhvata pripremu slika za izdvajanje obeležja i njihovo uparivanje. Koriste se metode kao što su usaglašavanje dimenzija, eliminacija šuma i segmentacija;

– izdvajanje obeležja. Za registraciju dve slike vrši se izdvajanje obeležja i utvrđuje njihova usaglašenost. Nakon toga moguće je naći funkciju transformacije kako bi se izvršilo prostorno usaglašavanje izvornih slika. Obeležja koja se koriste u registraciji slika su uglovi, linije, konture, templejti (*template*), itd. Obeležja koja se izdvajaju zavise od tipa korišćenih slika;

– **uparivanje obeležja.** Može se postići izdvajanjem obeležja referentne slike i traženjem selektovanih obeležja na podešavajućoj slici ili nezavisnom selekcijom obeležja na obe slike i utvrđivanjem njihovih veza;

– **određivanje funkcije transformacije i registracija.** Poznavanjem koordinata uparenih tačaka na slikama određuje se funkcija transformacije. Tip funkcije transformacije zavisi od tipa geometrijske distorzije između slika. Ukoliko distorzija nije poznata, koriste se transformacije koje se mogu prilagoditi geometrijskoj distorziji (izobličenju). Nakon određivanja funkcije transformacije vrši se usaglašavanje podešavajuće slike sa geometrijom referentne slike.

Na sl. 5 prikazan je primer koji obuhvata korake koji se koriste pri registraciji dve izvorne slike.

Predobrada

Slike koje je potrebno registrovati često imaju različitu prostornu rezoluciju, sadrže šum, razmrljane su zbog pokreta objekata i/ili kamere, postoji nelinearnost senzora, itd. Dimenzija piksela na satelitskim snimcima i medicinskim slikama često je poznata, pa se može menjati prostorna rezolucija jedne od slika, ili se obe slike mogu svoditi na istu rezoluciju. Promena prostorne rezolucije olakšava izdvajanje i uparivanje obeležja. U zavisnosti od obeležja koja se izdvajaju nekada je potrebno vršiti segmentaciju slike.

Poboljšanje kvaliteta slike

Osnovni cilj metoda za popravku kvaliteta slike jeste da se obradom polazne slike dobije slika koja je pogodnija za dalju primenu. Ukoliko se polazna slika popravljala da bi se dobio bolji prikaz na monitoru, najčešće je potrebno istaći ivice i popraviti kontrast. Popravkom kvaliteta slike ne povećava se informacioni sadržaj slike, već se omogućava posmatraču, ili sistemu za analizu slike, lakše uočavanje nekih obeležja.

Najvažnije metode za popravku kvaliteta slike obuhvataju transformacije nivoa sivog, transformacije kontrasta, isticanje ivica, bojenje slike, itd. Većina metoda za popravku kvaliteta slike je empirijskog karaktera i iterativne prirode.

Za uklanjanje šuma iz slike koristi se prostorno usrednjavanje., koje se obavlja zamenom vrednosti nivoa sivog svakog piksela sa težinskom srednjom vrednošću lokalnog susedstva tog piksela. Prostorno usrednjavanje ima i negativne posledice. Usrednjavanjem se gubi oštrina slike, jer se oštri prelazi (ivice) ublažavaju [12].

Segmentacija slike

Termin segmentacija slike odnosi se na grupu postupaka za podelu slike na regione sa sličnim atributima. Od atributa se najčešće koristi osvetljenost,

kod monohromatskih slika, ili boja, kod slika u boji. Metode segmentacije mogu se grupisati u tri klase: metode segmentacije pomoću praga, metode segmentacije pomoću granica regiona i metode segmentacije pomoću rasta regiona.

Slika 5 – Koraci pri registraciji dve izvorne slike

Metoda segmentacije pomoću praga zasnovana je na poređenju osvetljenosti piksela sa jednim ili više pragova i svrstavanjem piksela u dve ili više kategorija. Ako se koriste obeležja izračunata na prostornom susedstvu piksela dobijaju se regionalne metode segmentacije. Segmentacija scene može se izvršiti i određivanjem granica objekata. Za određivanje granica mogu se iskoristiti mnogobrojne metode izdvajanja ivica. Međutim, ako postoji šum u slici, ili ako se obeležja pojedinih regiona malo razlikuju, granice objekata biće isprekidane i neće predstavljati zatvorene krive. Kako bi se formirale neprekidne granice regiona mora se primeniti i neki od postupaka za spajanje ivica [12]. Osnovna ideja segmentacije pomoću rasta regiona jeste da se izvrši grupisanje susednih piksela sličnih osvetljenosti i tako formiraju regioni.

Izdvajanje obeležja

Obeležja slike su jedinstvene osobine koje se mogu koristiti za uspostavljanje veza između dve slike. Najpoželjnija obeležja su tačke, jer se njihove koordinate mogu direktno koristiti za određivanje parametara funkcije transformacije. U nekim situacijama nije moguće izdvojiti tačke, pa se obeležja izdvajaju od linija i regiona. Na primer, tačke za uparivanje izdvajaju se iz preseka parova linija ili centara mase odgovarajućih regiona.

Relevantne tačke

Relevantne tačke su najpoželjnija obeležja. Ukoliko su poznate koordinate odgovarajućih tačaka dve slike, funkcija transformacije može se odrediti, a geometrija jedne slike usaglasiti sa geometrijom druge slike. Tačke od interesa su poznate i kao granične tačke, kontrolne tačke, ugao one tačke. Tačke od interesa mogu se dobiti iz preseka linija, centroida regiona, lokalnih ekstrema frekvencijskih transformacija slike i sl.

Linijski segmenti

Slike veštačkih objekata sadrže veliki broj linijskih obeležja, koja se mogu koristiti za registraciju slika. Ukoliko šum nije izražen i postoji mali broj linija, za njihovu detekciju može se koristiti Houghova transformacija. Veza se može uspostaviti korišćenjem parova krajnjih ili središnjih tačaka.

Regioni

Slike dobijene sa uređaja za daljinsko osmatranje i medicinsku dijagnostiku često sadrže jasno definisane regione. Na primer, na satelitskim i aerofoto snimcima jezera javljaju se kao veoma homogena površina i veoma se razlikuju od okolnog zemljišta, pa se mogu izdvojiti korišćenjem metoda segmentacije pomoću praga. Na slikama dobijenim računarskom tomografijom (CT – *computed tomography*) koštana tkiva predstavljaju skoro homogene regione koji se razlikuju od okolnog mekog tkiva. Regioni se često predstavljaju preko centra mase koji je otporan na uticaj šuma i varijacije nivoa sivog.

Templejti

Templejt čini skup susednih piksela slike. Kao templejt može da se koristi skup piksela slike koji se nalaze u pravougaonom ili kružnom prozoru. Kada se templejt izdvoji sa referentne slike na podešavajućoj slici traži se površina koja ima sličan izgled.

Kao alternativa metodima koji koriste prostorne relacije koriste se invarijantna obeležja u odnosu na očekivanu deformaciju slike. Obeležja moraju ispunjavati nekoliko uslova. Najbitniji uslovi su invarijantnost (opis odgovarajućeg obeležja obe slike treba da bude isti), jedinstvenost (dva različita obeležja moraju imati različit opis), stabilnost (opis malo promenjenog obeležja je sličan opisu originalnog obeležja) i nezavisnost (ukoliko je opis obeležja vektor, njegovi elementi moraju biti nezavisni). Međutim, obično svi uslovi nisu ili ne mogu biti istovremeno ispunjeni.

Uparivanje obeležja

Prisustvo komplementarnih karakteristika multisenzorskih slika uslovljava poteškoće i za tehnike uparivanja obeležja. Kako obeležja jedne slike ne moraju postojati na drugoj traženje parova odgovarajućih obeležja postaje teško [5,6].

Uparivanje kontrolnih tačaka

Pretpostavimo da su nam dostupni skupovi kontrolnih tačaka na obe slike. Zbog uticaja šuma i drugih faktora, moguće je da se određene tačke pojavljuju u samo jednom od skupova. Ovakve tačke potrebno je izbaciti iz razmatranja i utvrditi veze između preostalih tačaka.

Uparivanje linija

Linijski segmenti određeni su pozicijom, orijentacijom i dužinom. Uticaj šuma se najmanje odražava na orijentaciju linije. Ukoliko između izvornih slika postoji razlika u translaciji, rotaciji i dimenzijama, tada se na osnovu linijskih segmenata prvo određuju razlike koje postoje zbog promene u rotaciji, a nakon toga se određuju parametri translacije i skaliranja.

Uparivanje regiona

Uparivanje regiona može se svesti na uparivanje tačaka, ukoliko se koriste centriodi regiona. Pri uparivanju regiona, osim položaja, dostupne su informacije i o dimenzijama i obliku regiona. Dodatne informacije mogu se koristiti za definisanje dopunskih kontrolnih tačaka.

Uparivanje templejta

Uparivanje templejta je proces lociranja templejta na slici. Templejt se može posmatrati kao deo referentne i podešavajuće slike. Lociranjem tem-

plejta sa referentne na podešavajućoj slici određuje se veza tačaka dve slike. Proces templejt mečinga (*template matching*) obuhvata pomeranje templejta na podešavajućoj slici, nakon čega se za svaki pomeraj određuje sličnost templejta i dela slike i određuje pozicija maksimalne sličnosti.

Nedostatak ovakvog pristupa leži u samoj ideji. Korišćenje pravougaonog prozora je pogodno samo ukoliko postoji razlika u translaciji. Ukoliko je razlika složenija, ovakav tip prozora nije u mogućnosti da pokrije iste delove obe slike. Nekoliko autora je predložilo da se koristi kružni oblik prozora za slike kod kojih postoji razlika u rotaciji. Međutim, kompatibilnost prozora narušava se ukoliko postoje složenije geometrijske deformacije.

Drugi nedostatak ovih metoda odnosi se na sadržaj prozora. Postoji velika verovatnoća da će se prozor koji sadrži ravnu površinu bez istaknutih detalja usaglasiti sa drugim ravnim površinama bez vidnih detalja.

Funkcije transformacije

Izbor funkcije transformacije zavisi od tipa i mere geometrijskih razlika slika, tačnosti izdvajanja i uparivanja obeležja, gustine i organizacije kontrolnih tačaka i sl. Pomoću ove funkcije vrši se registracija referentne i podešavajuće slike. Zadatak koji se rešava sastoji se od izbora funkcije preslikavanja i njenih parametara.

Zbog nelinearne prirode procesa akvizicije slike i prirode scene, slike koje je potrebno registrovati imaju nelinearne geometrijske razlike. Neka-da su nelinearne geometrijske razlike između dve slike male i zanemari-ve, pa se mogu koristiti linearne transformacije. Nasuprot tome, ukoliko su geometrijske razlike između slika velike i kompleksne, pri registraciji se koriste složene lokalne transformacije.

Ukoliko se poznaju kontrolne tačke dve slike veliki broj funkcija transformacije može se koristiti za uparivanje kontrolnih tačaka. Neke funkcije transformacije mogu tačno preslikati kontrolne tačke jedne u kontrolne tačke druge slike, ali i previše deformisati podešavajuću sliku, unoseći greške u registraciji tačaka koje se nalaze dalje od kontrolnih tačaka. Kako se parametri funkcije transformacije računaju na osnovu veza kontrolnih tačaka, greška u uparivanju će usloviti i grešku parametara funkcije transformacije.

Na osnovu podataka koje koriste funkcije preslikavanja mogu se svrstati u dve široke kategorije. Globalni modeli koriste kontrolne tačke za estimaciju parametara funkcije preslikavanja slika. Sa druge strane, lokalne funkcije preslikavanja tretiraju sliku kao kompoziciju delova i parametri funkcije preslikavanja se menjaju od dela do dela slike.

U svakom slučaju, osnovni problem je isti – pronaći preslikavanje:

$$(x, y) \rightarrow (u, v) \quad (1)$$

između piksela na poziciji (x, y) jedne slike i piksela na poziciji (u, v) druge slike. Složenost rešenja zavisi od aplikacije koja se razmatra. U najjednostavnijem slučaju translacija ili rotacija su dovoljne za prostorno usaglašavanje dve slike. Složeniji pristupi uključuju afinu (*affine*), projektivnu i polinomijalnu transformaciju. Pomenute transformacije su globalne transformacije. Kod njih se jedan matematički izraz koristi za usaglašavanje kompletne slike. Kod lokalnih transformacija različiti matematički izrazi primenjuju se na različite regione slike.

Pre rešavanja izraza (1) potrebno je odrediti uzrok zbog kojeg slike nisu usaglašene i nakon toga izabrati transformaciju kojom će se raditi usaglašavanje [5].

Transformacija sličnosti

Jedan od najčešće korišćenih globalnih modela preslikavanja koristi polinome nižeg reda. Najjednostavniji model – transformacija sličnosti, obuhvata rotaciju, translaciju i skaliranje i definisana je sa:

$$\begin{aligned} u &= s(x \cos \theta + y \sin \theta) + t_x \\ v &= s(-x \sin \theta + y \cos \theta) + t_y \end{aligned} \quad (2)$$

gde su s , θ i (t_x, t_y) veličinske, rotacione i translatorne razlike slika, respektivno. Ova četiri parametra mogu se odrediti ukoliko su poznate koordinate dva para tačaka izvornih slika. Ugao rotacije može se odrediti na osnovu ugla linija koje povezuju dve tačke slika. Razlika u veličini može se odrediti na osnovu distance između tačaka slika. Ukoliko su poznate vrednosti s i θ , parametri translacije (t_x, t_y) se određuju zamenom koordinata kontrolnih tačaka u gornje izraze i njihovim rešavanjem.

Ukoliko je poznato da korespondencija tačaka sadrži šum ili je netačna, za određivanje parametara preslikavanja potrebno je koristiti više od dva para kontrolnih tačaka i to metodom najmanjih kvadrata ili klasterizacijom. Metoda najmanjih kvadrata koristi se kada se odstupanja mogu modelovati kao šum nulte srednje vrednosti, dok se klasterizacija koristi kada se između korespondencija mogu javiti velike greške.

Funkcija sličnosti može se koristiti za registraciju aerofoto i satelitskih snimaka gde je scena skoro ravna, platforma veoma daleko od scene i senzor gleda normalno na scenu. U medicini se koštane strukture mogu registrovati korišćenjem ove transformacije.

Projektivna i afina transformacija

Proces akvizicije slike je projekтивni proces i ukoliko ne postoje nelinearnosti sočiva i senzora, relacija između dve slike scene može se opisati preko projekтивne transformacije:

$$\begin{aligned} u &= \frac{ax + by + c}{dx + ey + 1} \\ v &= \frac{fx + gy + h}{dx + ey + 1}. \end{aligned} \quad (3)$$

U prethodnoj relaciji $a-h$ su osam nepoznatih parametara transformacije, a mogu se odrediti ukoliko su poznate koordinate četiri para nekolinearnih tačaka izvornih slika.

Izraz (3) opisuje deformacije ravne scene snimljene pomoću kamere čija optička osa nije normalna na scenu. Ukoliko je scena veoma daleko, projektivna aproksimacija može se aproksimirati afinom transformacijom:

$$\begin{aligned} u &= ax + by + c \\ v &= dx + ey + f. \end{aligned} \quad (4)$$

Afina transformacija ima šest parametara koji se mogu odrediti ukoliko su poznate koordinate najmanje tri para nekolinearnih tačaka izvornih slika. Afina transformacija najčešće se koristi u registraciji satelitskih i aerofoto-snimaka.

Polinomijalna transformacija

Pretpostavimo da je efekat paralakse zanemariv u sistemu (ili zbog toga što su objekti na sceni dovoljno daleko ili zbog zajedničke aperture). Dodatna pretpostavka o sinhronizaciji senzora omogućava da se pronađe fiksna transformacija preslikavanja jedne slike u drugu. Na ovaj način neusaglašenost postoji zbog razlika u karakteristikama senzora (rezolucija, optička distorzija, vidni ugao) i generalno se može predstaviti korišćenjem polinomijalne transformacije N -tog reda [11]:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i a_{i,j} x^j y^{i-j} \\ v(x, y) &= \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i b_{i,j} x^j y^{i-j}, \end{aligned} \quad (5)$$

gde su $a_{i,j}$ i $b_{i,j}$ konstante koje je potrebno odrediti. Ukoliko je $N = 1$ izraz (5) svodi se na afinu transformaciju. Dodavanje članova viših redova omogućava kompenzaciju kompleksnih distorzija sočiva, kao što su „pin-cushion“ i „barrel“ distorzija.

Na sl. 6 prikazani su navedeni tipovi geometrijskih transformacija izvornih slika. Prikazane su i relacije koje povezuju koordinate izvornih sli-

ka, minimalan broj parova kontrolnih tačaka potrebnih za određivanje parametara preslikavanja, kao i neke od geometrijskih osobina.

Tip distorzije i broj kontrolnih tačaka	Preslikavanje	Distorzija	Geometrijske osobine
Translacija (1 par)	$u = x + c$ $v = y + f$		<ul style="list-style-type: none"> • Pozicija se menja • Dimenzije, nagib i uglovi ostaju isti • Paralelne linije ostaju paralelne • Prave linije ostaju prave
Rotacija, skaliranje i translacija (RST) (2 para)	$u = ax + by + c$ $v = -bx + ay + f$		<ul style="list-style-type: none"> • Pozicija, dimenzije i nagib se menjaju • Uglovi ostaju konstantni • Paralelne linije ostaju paralelne • Prave linije ostaju prave
Afina (3 para)	$u = ax + by + c$ $v = dx + ey + f$		<ul style="list-style-type: none"> • Pozicija, dimenzije, nagib i uglovi se menjaju • Paralelne linije ostaju paralelne • Prave linije ostaju prave • Pravougaonici postaju paralelogrami
Projektivna (4 para)	$u = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1}$ $v = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1}$		<ul style="list-style-type: none"> • Pozicija, dimenzije, nagib i uglovi se menjaju • Prave linije ostaju prave • Paralelne linije ne ostaju paralelne
Polinomijalna 6 parova (drugi red) 10 parova (treći red) 15 parova (četvrti red)	$u(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i a_{i,j} x^j y^i$ $v(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i b_{i,j} x^j y^i$		<ul style="list-style-type: none"> • Pozicija, dimenzije, nagib i uglovi se menjaju • Prave linije ne ostaju prave • Paralelne linije ne ostaju paralelne

Slika 6 – Tipovi geometrijskih transformacija i neke od osobina

Radijalna distorzija sočiva

Distorzija sočiva je poznat fenomen [13] koji se javlja u nekim primenama digitalne obrade slike. Ovaj fenomen u znatnoj meri utiče na geometriju slike. Postoji nekoliko tipova distorzije, od kojih radijalna distorzija najčešće ima najveći uticaj na ukupnu distorziju, naročito ukoliko se koriste široko-ugaona sočiva.

Postoje dva tipa radijalne distorzije [14]. Kada se tačka slike pomera sa željene pozicije na poziciju koja je bliža optičkoj osi sočiva (negativan pomeraj) javlja se „barrel“ distorzija. Ukoliko se tačka slike pomera sa željene pozicije na poziciju koja je dalje od optičke ose sočiva (pozitivan pomeraj) javlja se „pincushion“ distorzija.

Na sl. 7 prikazane su „barrel“ i „pincushion“ distorzije slike realne scene, gde se vidi da se distorzija slike povećava sa udaljavanjem od centra slike.

Slika 7 – (a) „barrel“ distorzija; (b) „pincushion“ distorzija slike realne scene

Neki autori pri korekciji distorzije sočiva polaze od polinomijalnog modela distorzije [15, 16, 17]:

$$\begin{aligned} u &= x(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots) \\ v &= y(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots), \end{aligned} \quad (6)$$

gde je (u, v) pozicija tačke na slici bez distorzije, (x, y) pozicija tačke na slici sa distorzijom i:

$$r_d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (7)$$

radijus distorzije.

Nekoliko testova je pokazalo da je za većinu postupaka korekcije dovoljno koristiti samo parametar distorzije k_1 [16]. Parametar distorzije k_1 zavisi od sočiva i može se proceniti primenom bispektralne analize [15] ili pomoću test-slika [16, 17].

Određivanje optimalnih koeficijenata globalne transformacije multimodalne registracije nije jednostavno zbog kompleksnih relacija između spektralnih opsega. Intenzitet piksela slike nije određen samo karakteristikama kamere, već zavisi i od fizičkih karakteristika (karakteristike materijala scene, atmosferski uslovi, zračenje pozadine). Zbog toga se mnoge tehnike registracije ne mogu direktno primeniti kod multimodalnih slika.

Transformacija slike i interpolacija nivoa sivog

Funkcija transformacije, koja je definisana kroz prethodne korake, koristi se za transformaciju podešavajuće slike i na taj način se vrši registracija slika. Transformacija:

$$\begin{aligned} u &= u(x, y) \\ v &= v(x, y), \end{aligned} \quad (8)$$

povezuje koordinate referentne slike sa koordinatama odgovarajućih tačaka podešavajuće slike. Za koordinate (x, y) podešavajuće slike, prethodne relacije određuju koordinate tačke referentne slike (u, v) . Očitavanjem vrednosti nivoa sivog na poziciji (x, y) podešavajuće slike i snimanjem na poziciju (u, v) nove slike, podešavajuća slika se tačku po tačku preslikava na geometriju referentne slike. U prethodnom izrazu (x, y) su celobrojne vrednosti dok su (u, v) necelobrojne. Ovakva transformacija naziva se transformacija unapred.

Zbog diskretizacije i zaokruživanja u izlaznoj slici mogu se pojaviti rupe i/ili preklapanja, pa se zbog toga koristi inverzna funkcija preslikavanja koja se naziva transformacija unazad. Koristeći inverznu funkciju preslikavanja, od podešavajuće slike dobija se registrovana slika, pa se u izlaznoj slici neće pojaviti rupe i/ili preklapanja. Kako su nivoi sivog podešavajuće slike dostupni samo za celobrojne koordinate tačaka (x, y) , vrednost nivoa sivog nove slike određuje se na osnovu vrednosti nivoa sivog određenog broja piksela u neposrednom okruženju – interpolacija nivoa sivog.

Na sl. 8 ilustrovana je inverzna funkcija preslikavanja i postupak interpolacije nivoa sivog na osnovu najbližih suseda.

Slika 8 – (a) parovi uparenih tačaka segmenata dve slike; (b) interpolacija nivoa sivog na osnovu najbližih suseda

Sa sl. 8b vidi se da se u jednom smeru vrši prostorna transformacija, a u drugom smeru pridruživanje nivoa sivog.

Najčešće korišćene funkcije za interpolaciju nivoa sivog su funkcija najbližeg suseda, bilinearna i kubna funkcija. Iako je bilinearna interpolacija po pitanjima tačnosti i vizuelnog utiska lošija od metoda viših redova, ona predstavlja najbolji kompromis između tačnosti i računarske kompleksnosti i zbog toga je jedan od najčešće korišćenih metoda. Kubna interpolacija predlaže se ukoliko geometrijska transformacija zahteva bitno uvećanje podešavajuće slike. Metoda najbližih suseda se izbegava zbog lošeg vizuelnog utiska nakon interpolacije. Izuzetak predstavljaju situacije u kojima je potrebno transformisati slike koje imaju mali broj nivoa sivog.

Procena kvaliteta registracije

Veoma je poželjno da korisnik ima informaciju o kvalitetu metoda registracije i mogućim primenama. Procena kvaliteta registracije nije jednostavna, delimično zbog toga što se greške mogu javiti u svakom od koraka registracije (izdvajanje obeležja, uparivanje obeležja, funkcija transformacije), a delimično zbog toga što je teško razlikovati greške u registraciji i aktuelne fizičke razlike sadržaja slika.

Greška lokalizacije. Pomeraj koordinata kontrolnih tačaka zbog pogrešne detekcije naziva se greška lokalizacije. Srednja preciznost metoda detekcije kontrolnih tačaka poznata je za različite tipove slika i dobija se računarskom simulacijom i pomoću različitih idealnih poređenja.

Greške u uparivanju. Greške u uparivanju mogu se meriti brojem lažnih uparivanja kontrolnih tačaka. Pogrešno uparivanje može se identifikovati dodatnom verifikacijom, gde se dva različita metoda uparivanja koriste na istom skupu kontrolnih tačaka. Samo parovi tačaka koji su upareni po oba metoda uzimaju se kao validni parovi, dok se neuparene tačke isključuju iz dalje obrade. U slučaju da ne postoji drugi validan metod uparivanja, pogrešni parovi mogu se identifikovati kroz sledeći proces. U svakom koraku isključuje se jedan par iz skupa kontrolnih tačaka i računaju parametri preslikavanja. Nakon toga se proverava kako su sa funkcijom preslikavanja isključene tačke preslikane jedna u drugu. Ukoliko je pomeraj tačaka manji od zadatog praga, tačke se prihvataju kao validan par kontrolnih tačaka.

Greška u registraciji. Pod greškom u registraciji podrazumeva se razlika između modela preslikavanja koji se koristi i stvarnog modela geometrijske distorzije. Dva su glavna razloga za prisustvo greške u registraciji. Tip funkcije preslikavanja ne mora odgovarati stvarnom modelu distorzije i/ili parametri modela nisu tačno izračunati. Prvi razlog je posledica nedostatka apriornih znanja o geometrijskoj distorziji, dok je drugi razlog posledica nedovoljnog broja kontrolnih tačaka, grešaka u lokalizaciji i uparivanju.

Greška u registraciji može se izračunati na nekoliko načina. Najjednostavnija mera za izračunavanje je srednja kvadratna greška pozicija kontrolnih tačaka. Iako se često koristi, ona nije dobra mera za računanje greške registracije. Ova mera govori samo o prilagođavanju koordinata kontrolnih tačaka primenom funkcije preslikavanja. Za bilo koji skup kontrolnih tačaka nulta srednja kvadratna greška može se dobiti izborom modela preslikavanja sa dovoljno velikim stepenom slobode. Sa druge strane, velika srednja kvadratna greška može biti prouzrokovana greškama u lokalizaciji i u tom slučaju ne odslikava verno kvalitet registracije.

Drugi pristup koji se koristi za određivanje tačnosti registracije jeste korišćenje više različitih načina registracije. U ovom slučaju, slika koja se registruje pomoću metoda koji se ispituje poredi se (na osnovu metrike u domenu slike) sa istom slikom registrovanom sa drugim komparativnim metodom. Kao komparativni metod koristi se metod za koji se veruje da daje najbolje rezultate u aplikaciji. Ukoliko ovakav metod ne postoji, kao komparativni metod koristi se bilo koji metod koji ima različitu prirodu od prirode metoda koji se ispituje. Male razlike u rezultatima registracije pokazuju, mada i ne garantuju, tačnost registracije.

Najstariji metod određivanja kvaliteta registracije je subjektivna procena stručnjaka iz oblasti registracije. Ovaj metod se i dalje koristi kao dopuna objektivnih mera procene.

Za procenu kvaliteta registracije obično se koriste sledeći kriterijumi: tačnost, pouzdanost, robustnost i računarska kompleksnost. Tačnost predstavlja razliku između pravih i estimiranih vrednosti. Ukoliko je manja razlika, estimacija će biti tačnija. U registraciji slika tačnost se odnosi na srednju vrednost, medijanu, maksimum ili srednju kvadratnu grešku između tačaka na referentnoj slici i odgovarajućih tačaka podešavajuće slike nakon registracije. Tačnost se može određivati korišćenjem sintetičkih slika na kojima su koordinate tačaka uparivanja poznate. Alternativno, mogu se koristiti i markeri koji se postavljaju na scenu i njihova pozicija se koristi u proceni. Tačnost se meri u pikselima/vokselima.

Pouzdanost se odnosi na broj uspešnih u odnosu na ukupan broj sprovedenih testova. Neka je n broj parova slika koje se testiraju pri registraciji i neka je m broj zadovoljavajućih rezultata registracije. Ukoliko je n dovoljno veliko, tada količnik m/n predstavlja pouzdanost algoritma registracije. Ukoliko je ovaj odnos bliži jedinici algoritam je pouzdaniji.

Robustnost predstavlja stepen stabilnosti tačnosti ili pouzdanosti algoritma registracije pri promeni jednog ili više ulaznih parametara. Robustnost se može gledati u odnosu na uticaj šuma, amplitudske i geometrijske varijacije slika i sl. Ukoliko postoji više ulaznih parametara, svaki od njih utiče na tačnost i pouzdanost, pa se robustnost algoritma određuje u odnosu na svaki od parametara. Jedan algoritam može biti robustan u odnosu na uticaj šuma, ali ne i u odnosu na geometrijske razlike. Za neki algoritam registracije se kaže da je robustan ukoliko se performanse algoritma znatno ne menjaju sa promenom ulaznih parametara.

Računarska kompleksnost govori o brzini sprovođenja registracije i pokazuje primenljivost algoritma u realnim situacijama. Računarska kompleksnost meri se brojem sabiranja/množenja u zavisnosti od dimenzija slike. Poželjno je da računarska kompleksnost algoritma registracije linearno zavisi od dimenzija slike.

Klasifikacija metoda registracije

Algoritmi registracije mogu se klasifikovati po različitim kriterijumima [3]:

- modalitet. Monomodalna registracija odnosi se na situacije u kojima su izvorne slike dobijene sa istog senzora ili senzora istog tipa, tako da ne postoje bitne razlike u opsezima nivoa sivog koji odgovaraju istom fizičkom/fiziološkom fenomenu. Kod multimodalne registracije opsezi nivoa sivog se mogu znatno razlikovati;

- dimenzionalnost. Odnosi se na broj dimenzija izvornih slika. Slike imaju dve prostorne dimenzije – 2D. Danas, različite tehnike vizuelizacije omogućavaju prikaz trodimenzionalnih (3D) volumena. Takođe, senzori mogu davati i sekvence slika, gde se vreme posmatra kao dodatna dimenzija, odnosno, po dogovoru, kao 0,5 dimenzija. Na taj način registraciju možemo označavati kao 3D (tri prostorne dimenzije), 2D (dve prostorne dimenzije) i 2,5D (dve prostorne dimenzije + vreme). Današnje aplikacije najčešće obuhvataju 2D/2D i 3D/3D registraciju.

- brzina. Registracija može biti „offline“ i „online“. „Offline“ registracija odnosi se na aplikacije u kojima vreme trajanja registracije nije ograničeno. Kod „online“ aplikacija postoji vremensko ograničenje trajanja registracije.

- subjekat. U medicini se može obavljati registracija slika koje su dobijene od istog subjekta – pacijenta (intrasubjektna) ili različitih subjekata (intersubjektna).

- priroda usaglašavanja. Razlike izvornih slika postoje zbog različitih faktora, uključujući različite pozicije i orijentacije senzora, vremenske razlike, i sl.

- korišćeni informacioni sadržaj. Mogu se identifikovati dva tipa metoda: pristupi koji koriste kontrolne tačke i pristupi zasnovani na sadržaju slike. Kontrolne tačke mogu imati jasno fizičko tumačenje (pouzdati markeri vidljivi na svim modalitetima) ili mogu biti samo od teoretskog interesa (linije, uglovi, itd.). Pristupi zasnovani na korišćenju sadržaja slike koriste nivoe sivog, vektore gradijenata, vejevlet (*wavelet*) koeficijente i sl. Obično su sporiji od prethodnih pristupa, ali mogu biti tačniji i robustniji.

- lokalitet mere usaglašavanja. Usaglašavanje se može raditi na nivou čitave slike, korišćenjem globalnih mera, npr. srednja kvadratna greška nivoa sivog ili korišćenjem grupe susednih piksela i korišćenjem lokalnih mera, npr. lokalna korelacija.

– transformacija. Postoje dva tipa geometrijskih transformacija: parametarske (afina, projektivna, polinomijalna, itd.), kod kojih mali broj parametara određuje transformaciju i neparametarske (optički protok), kod kojih je pomeraj piksela nezavisan, pa slika može biti slična sa bilo kojom slikom koja ima isti opseg nivoa sivog kao i izvorna slika.

– optimizacija. Zbog brzine registracije iterativni metodi se koriste zajedno sa multirezolucionim pristupima.

– određivanje parametara metoda. Kod direktnih metoda parametri transformacije određuju se iz podataka. Kod metoda pretraživanja u procesu optimizacije kvaliteta registracije vrednosti se dobijaju pretraživanjem skupa mogućih vrednosti.

– tip podataka. Podaci koji se koriste u procesu registracije mogu biti sirovi podaci – vrednosti nivoa sivog piksela (voksela) ili se koriste obeležja izdvojena iz podataka – ivice, pokretni objekti, i sl. Među metodima koji koriste sirove podatke najviše se koriste metodi zasnovani na zajedničkoj informaciji [19, 20]. Zajednička informacija dva skupa elemenata (piksela, voksela) jeste maksimalna kada su dva skupa registrovana.

– nivo automatizacije. Metod je automatski ukoliko nije potrebna ili je potrebna mala intervencija korisnika. Ukoliko je neophodna intervencija korisnika metod je poluautomatski.

Primer registracije slika iz baze autora

U eksperimentu su korišćene termovizijske i televizijske slike iste scene. Slike scene dobijene su pomoću televizijske kamere firme Samsung, tip SCL860, u vidljivom delu spektra (0,4–0,7) μm i termovizijske kamere firme ATIS (Advanced Thermal Imaging System), u dalekom infracrvenom delu spektra (8–12) μm . Baza slika formirana je sa nepokretnim kamerama postavljenim na platformu. Optička vidljivost bila je ograničena zbog oblačnosti i sumaglice [21]. Slike sa raspoloživih senzora su vremenski usaglašene, a zbog različitih karakteristika senzora postoji prostorna neusaglašenost.

Za registraciju slika korišćen je programski paket „Matlab 7.0“, koji omogućava da se ručno odaberu parovi kontrolnih tačaka i tip transformacije. Nakon toga program određuje vrednosti parametara preslikavanja. Pri pokretanju funkcije za registraciju slika dobija se radni prozor prikazan na sl. 9. Slika 9a daje prikaz radnog prozora pre izbora kontrolnih tačaka, a na sl. 9b uočavaju se četiri para kontrolnih tačaka koje su obeležene znakom $\oplus$.

Pri registraciji slika odabrana je projektivna transformacija, a za izbor koeficijenata transformacije koriste se četiri para kontrolnih tačaka.

(a)

(b)

Slika 9 – Radni prozor programskog paketa „Matlab 7.0“: (a) pre izbora kontrolnih tačaka; (b) nakon izbora kontrolnih tačaka

Na sl. 10 prikazane su izvorne slike i rezultati registracije. Zbog boljeg uočavanja rezultata registracije, sl. 10c prikazuje vertikalne segmente izvornih slika, a sl. 10d vertikalne segmente registrovanih slika. Uočava se da je uspešno obavljeno usaglašavanje izvornih slika.

(a)

(b)

(c)

(d)

Slika 10 – (a) (b) izvorne slike; (c) (d) vertikalni segmenti slika pre i nakon registracije

Zaključak

Registracija slika sa kompleksnim, nelinearnim i lokalnim distorzijama, multimodalna registracija i registracija N -D slika ($N > 2$) spadaju u najveće izazove u registraciji.

Kod multimodalne registracije zajednička informacija koristi se kao standardna tehnika, naročito u obradi medicinskih slika. Ova tehnika ima određena ograničenja. Kako bi se ova ograničenja prevazišla, neki autori kombinuju zajedničku informaciju sa drugim metodima, kako bi se povećala robustnost i pouzdanost. Da bi se povećala brzina registracije često se koriste piramidalne reprezentacije slike sa različitim algoritmima optimizacije. Međutim, ukoliko postoje znatne razlike u rotaciji i/ili skaliranju, ovakvi metodi ili daju pogrešan rezultat ili traju dugo. Pretpostavka od koje se kreće pri piramidalnoj (multirezoluciono) registraciji jeste da odgovarajući signali na svim rezolucionim nivoima sadrže dovoljno korelisanih struktura koje omogućavaju stabilnu registraciju. Ova pretpostavka je generalno tačna, ukoliko se koriste slike sa istog senzora ili različitih kamera istog modaliteta. Međutim, kod multisenzorskih parova slika (tj. slika sa različitih modaliteta) signali su najpre korelisani na višim rezolucionim nivoima, dok se korelacija signala smanjuje sa smanjenjem prostorne rezolucije. Do toga dolazi zbog toga što viši rezolucioni nivoi sadrže više prostorne učestanosti, koje odgovaraju fizičkim strukturama scene, zajedničkim za obe slike. Niži rezolucioni nivoi, sa druge strane, zavise od osvetljenosti, fotometrijskih i fizičkih karakteristika senzora i znatno se razlikuju kod multimodalnih slika.

Dalji trendovi uključuju i različita razmatranja metoda koje koriste obeležja slike invarijantna i neosetljiva na modalnost.

Glavnu težinu registracije N -D slika predstavlja računarska kompleksnost. Zbog toga postoji potreba za smanjenjem vremena sprovođenja registracije. Osim kompleksnosti povećava se i količina podataka (veća rezolucija, veća dimenzionalnost, veće dimenzije skeniranih površina). Potreba za većom robustnošću i tačnošću registracije obično zahteva rešenja zasnovana na iterativnim postupcima, ili postupcima sa vraćanjem unazad, što takođe povećava računarsku kompleksnost metoda.

Ubuduće će istraživači raditi na metodu registracije koji može da prepozna tip deformacije i da odluči koje je najprikladnije rešenje. Metod bi predstavljao kombinaciju različitih pristupa.

Zbog raznovrstnosti slika koje je potrebno registrovati i zbog različitih degradacija nemoguće je dizajnirati univerzalni metod registracije.

Literatura

[1] Dwyer, D., Smith, M., Dale, J., Heather, J., *Real time implementation of image alignment and fusion*, Proceedings of the Defense and Security Symposium 2005, Orlando, FL, 2005.

- [2] Sharma, R. K., *Probabilistic Model-Based Multisensor Image Fusion*, PhD Thesis, Oregon Graduate Institute of Science and Technology, October 1999.
- [3] Sabuncu, M. R., *Entropy-based image registration*, PhD Thesis, Princeton University, November 2006.
- [4] Zitova, B., Flusser, J., *Image registration methods, a survey*, Image and Vision Computing 21 (2003), 977–1000.
- [5] Zhang, Z., Blum, R., *A hybrid image registration for a digital camera image fusion application*, Information Fusion 2 (2001), 135–149.
- [6] Gostasby, A., 2-D and 3-D image registration for medical, remote sensing, and industrial applications, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [7] Peng, X., Ding, M., Zhou, C., Ma, Q., *A practical two-step image registration method for two-dimensional images*, Information Fusion 5 (2004), 283–298.
- [8] Brown, L. G., *A Survey of Image Registration Techniques*, ACM Computing Surveys, Vol. 24, No. 4, pp. 325–376, 1992.
- [9] Riley, T., Smith, M. I., *Image fusion technology for security and surveillance applications*, Proceedings of the Security & Defense 2006 Conference, Stockholm, Sweden, 11–14 September, 2006.
- [10] Irani, M., Anandan, P., *Robust Multi-Sensor Image Alignment*, Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision, pp. 959–966, 1998.
- [11] Heather, J. P., Smith, M. I., *Multimodal Image Registration with Applications to Image Fusion*, Proceedings of the 8th International Conference on Information Fusion (Fusion 2005), Philadelphia, PA, USA, July 2005.
- [12] Popović, M., *Digitalna obrada slike*, Akademski misao, Beograd, 2006.
- [13] Rosenfeld, A., Kak, A. K., *Digital Picture Processing*, Volume 2, 2nd Edition, Academic Press, Inc., 1982.
- [14] Perš, J., Kovačić, S., *Nonparametric Model-Based Radial Lens Distortion Correction Using Tilted Camera Assumption*, Proc. of the Computer Vision Workshop 2002, Austria, pp.286–295, 2002.
- [15] Farid, H., Popescu, A. C., *Blind Removal of Lens Distortion*, Journal of the Optical Society of America, Vol. 18, No. 9, 2001.
- [16] Devernay, F., Faugeras, O., *Straight lines have to be straight*, Machine Vision and Applications (2001) 13, 14–24.
- [17] Gribbon, K. T., Johnston, C. T., Bailey, D. G., *A Real-time FPGA Implementation of a Barrel Distortion Correction Algorithm with Bilinear Interpolation*, Proc. Image and Vision Computing, pp.402–407, 2003.
- [18] Bondžulić, B., Zrnić, B., *Korekcija barel distorzije*, Konferencija TELFOR, 2005.
- [19] Viola, P., *Alignment by Maximization of Mutual Information*, MIT Artificial Intelligence Laboratory, Technical Report 1548, June, 1995.
- [20] Maes, F., Collignon, A., Vandermeulen, D., Marchal, G., Suetens, P., *Multimodality Image Registration by Maximization of Mutual Information*, IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 16, No. 2, April 1997.
- [21] Bondžulić, B., *Detekcija pokreta na slici scene*, magistrski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2005.