

OBRAZLOŽENJE PRIJEDLOGA TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

Kandidat:

mr.sci Emir Sokić, dipl.el.ing

Radni naslov teme doktorske disertacije:

Algoritmi za analizu oblika na bazi Fourierovih deskriptora

Obrazloženje teme doktorske disertacije

U eri digitalnih računara i mnoštva multimedijalnih informacija, sve više i više digitalnih podataka se pohranjuje u velike baze. Slike, audio i video signali se svakodnevno nagomilavaju i arhiviraju za kasniju upotrebu. Velike baze digitalnih slika koriste vojna industrija, sigurnosni nadzori, multimedijalni sistemi, sistemi za aero i satelitska snimanja, industrija, medicina. Baze privatnih slika (Facebook) ili javno dostupnih slika (Google Images) su također organizirane kao velike baze digitalnih slika.

Svaka slika ili zvuk su značajni, ne zbog svog matematičkog zapisa ili intenziteta pojedinog piksela, već zbog informacije koju nose. Format pohranjenih slika je relativno standardiziran, međutim efikasan način pronalaženja i pretraživanja slika na osnovu željenih karakteristika predstavlja još uvijek veliki izazov. Ovo nameće potrebu da se svaka slika na odgovarajući način indeksira (obilježi), kako bi se po potrebi, što jednostavnije pronašla. Međutim, slika sadrži mnoštvo informacija koje računarski sistemi, uglavnom, ne znaju samostalno interpretirati. Prema tome, potrebno je razviti algoritme koji omogućavaju računar da, na neki način, razumije slike koje posjeduje u pohranjenoj bazi.

Oblik predstavlja najvažniju karakteristiku za semantičko razumijevanje slike i najčešće sadrži mnogo više informacija od boje ili tekstu. Međutim, oblik je istovremeno i najkompliciraniji za opisivanje i komparaciju. Isti objekti mogu imati različit oblik zavisno od veličine, rotacije, ugla gledanja, šuma i drugih parametara, tako da algoritmi kvantifikacije oblika moraju biti robusni na ovakve transformacije. Oblik se kvalitativno opisuje tzv. značajkama oblika. Način opisivanja oblika, odnosno izdvajanja značajki oblika sa slike je aktuelan naučnoistraživački problem. Izdvojene značajke moraju biti takve da omogućavaju razlikovanje pojedinih oblika, ali istovremeno budu dovoljno robusne na određene “dozvoljene” transformacije i izobličenja.

Algoritmi za pronalaženje slika na osnovu sadržaja moraju biti efektivni, ali i efikasni. Skoro je podjednako važno da algoritam funkcioniše bez velikih grešaka, ali i da bude brz radi potencijalnih primjena u realnom vremenu. Ova dva zahtjeva su u praksi najčešće oprečna.

Postoji mnogo razvijenih algoritama za izdvajanje značajki oblika. U ovoj doktorskoj disertaciji, iako će biti pobrojani i diskutovani svi najvažniji postojeći algoritmi za opisivanje oblika, akcenat će biti stavljen na spektralne tehnike, specijalno Fourierove deskriptore (tehnike bazirane na jednodimenzionalnoj i dvodimenzionalnoj diskretnoj Fourierovoj transformaciji). U radu će biti istraživane mogućnosti unapređenja tehnika kvalitativnog i kvantitativnog opisivanja oblika objekata na dvodimenzionalnim slikama, u svrhu identifikacije, verifikacije i klasifikacije objekata analiziranih digitalnom kamerom ili nekih drugim senzorskim sistemom (laserom, sonarom i sl.). Osim toga, pokušat će se uspostaviti veza između značenja slike/oblika i numeričkih vrijednosti značajki oblika.

Disertacija će predstavljati prvenstveno teorijsko i praktično istraživanje iz oblasti analize signala i obrade slike, sa naglaskom na primjenu osobina Fourierove transformacije i spektralnih slika (ne)uniformno uzorkovanih jednodimenzionalnih i višedimenzionalnih signala. Osim teorijskog pregleda i analize postojećih tehnika opisivanja oblika, zajedno sa kritičkim osvrtom na sve prednosti i nedostatke pojedinih metoda, u radu će se nastojati izvršiti i djelimično unapređenje i poboljšanje nekih od postojećih spektralnih tehnika za identifikaciju oblika. Unapređenja će biti bazirana na eksploataciji osnovnih nedostataka postojećih spektralnih metoda. U okviru rada će biti i razvijeno odgovarajuće razvojno softversko okruženje unutar koga bi se omogućila analiza razvijenih algoritama i izvršilo poređenje sa postojećim metodama.

Pregled stanja u oblasti istraživanja

Iako se ova doktorska disertacija bavi prvenstveno analizom jednodimenzionalnih i višedimenzionalnih signala dobivenih iz unaprijed segmentiranih oblika, važno je napomenuti da segmentacija slike na osnovu sadržaja, odnosno izdvajanje oblika koji predstavljaju odgovarajuće objekte na slici također čini jedno novo područje istraživanja. Zbog toga je prirodno u ovom prijedlogu teme prvo dati kratak pregled metoda i tehnika ekstrakcije oblika i segmentacije slike, a potom napraviti pregled tehnika za analizu izdvojenih oblika.

Algoritmi za numeričku analizu oblika se obično svrstavaju u oblast “pronalaženja slika na osnovu sadržaja” (eng. *Content Based Image Retrieval - CBIR*). *CBIR* u svojoj definiciji podrazumijeva primjenu tehnika računarske vizije na pronalaženje digitalnih slika iz velike baze [1]. Pošto oblici nose semantičko značenje i sadrže mnogo informacija o samom objektu, oni se mogu posmatrati i kao “riječ vizuelnog jezika” [2]. Pronalaženje slika na osnovu oblika je najizazovniji aspekt *CBIR*-a. Jedno od prvih istraživanja o prepoznavanju oblika datira još iz davne 1954. godine (tzv. “problem Attneaveove mačke” [3]).

CBIR podrazumijeva da se ekstrakcija značajki, odnosno sadržaja u okviru slike, vrši automatski [4]. Postoji veoma mnogo tehnika za opisivanje oblika, pa se podjela najčešće vrši ili prema dijelu digitalne slike koji se koristi za ekstrakciju informacija o obliku (ovakvu klasifikaciju predlaže i ISO/IEC MPEG-7 Vizuelni Standard [5–7]) na *tehnike bazirane na konturi objekata* i *tehnike bazirane na regiji objekta*, ili prema domenu iz kojeg se izdvajaju značajke na *tehnike prostornog domena* i *tehnike transformiranog (spektralnog) domena*.

Predprocesiranje - ekstrakcija oblika iz slike

Ukoliko se na jednoj slici nalazi više od jednog značajnog objekta/oblika, prije nego se pristupi analizi oblika potrebno je izvršiti segmentaciju slike na dijelove od značaja. Digitalna slika skoro uvijek sadrži određenu količinu šuma, granice objekata su veoma rijetko jasno izražene, regije objekata su obično nehomogene, kontrast nije oštro definiran i sl., pa je problem segmentacije utoliko teži. Zadatak segmentacije slike je neovisno particioniranje domena slike na skup disjunktne regije koje su vizuelno različite, homogene i posjeduju određeno značenje, karakteristike ili izračunate osobine, kao što su nivo sivih tonova, teksturu, specifičnu boju ili oblik, a sve kako bi se omogućila jednostavnija analiza slike (identifikacija, klasifikacija ili procesiranje oblika/objekta) [8–11]. Osnovni cilj segmentacije je zapravo dijeljenje slike na dijelove koji imaju sanžnu korelaciju sa objektima ili područjima iz realnog svijeta koji je opisan na posmatranoj digitalnoj slici [12]. Segmentacija je uspješnija ukoliko je što više informacija o slici unaprijed poznato.

Metode segmentacije se uglavnom dijele na metode praga, konturno bazirane metode i regijski bazirane metode.

Metoda praga je najjednostavnija metoda segmentacije, kod koje se određena konstanta osvjetljenja/intenziteta proglašava pragom i koristi se za segmentaciju (razdvajanje) objekata i pozadine. One se mogu implementirati lokalno (pojedinačno, nad dijelovima slike) ili globalno (nad cijelom slikom).

Pitanje izbora praga je predmet istraživanja mnogih radova [13–15]. Međutim, metode praga koje koriste samo vrijednosti intenziteta, a ne koriste i morfološke informacije o slici, obično neuspješno segmentiraju objekte sa niskim kontrastom ili sa promjenljivom pozadinom [16]. Prag se također može odrediti i metodama detekcije praga (p-prag, histogram analiza, optimalni prag i sl. [12]).

Konturno bazirane metode se zasnivaju na tome da se odrede pikseli koji odgovaraju ivicama/konturama objekata. Tada se pretpostavlja da je granica regije zapravo zatvorena kriva koja definira objekat, a regija je zapravo oblik koji se traži. Također, ako je segmentacija urađena ispravno, očekuje se da je broj zatvorenih kontura jednak broju objekata na slici. Problem se svodi na pronalaženje ivica na slici. Iвица je linearna značajka koja se manifestuje kao nagla promjena ili diskontinuitet u broju koji opisuje pojedini piksel (nivo sive, boju, teksturu i sl.). Ova pojava se uglavnom povezuje sa visokim gradijentom/ekstremima prvog izvoda, ili prolaskom kroz nulu u drugom izvodu. Odatle potiču i metode bazirane na prvom izvodu (Sobel, Prewitt, razvođe (eng. *watershed*) i sl.) odnosno drugom izvodu (Laplasijan) [17]. Ove tehnike pokazuju svoje nedostatke na slikama koje imaju slabo izražene ivice, imaju veoma mnogo šuma, veoma glatke granice, kao i slikama na kojima su granice definirane različitim konturama. Također, ivice se mogu odrediti i heurističkim tehnikama, pretraživanjem grafova ili dinamičkim programiranjem [12], Hough transformacijom i sl.

Regijski bazirana segmentacija predstavlja particioniranje slika u slične/homogene oblasti povezanih piksela preko primjena kriterija homogenosti/sličnosti između skupova piksela. Svaki piksel u regiji je sličan međusobno prema nekim karakteristikama kao što su boja, intenzitet i tekstura. Najčešće tehnike su [11]: postavljanje praga, povećavanje regiona, klasifikatori, klasterizacija i dr. Povećavanje regiona (eng. *Region Growing*) je najpopularnija klasična tehnika segmentacije. Ukoliko se pretpostavi da se vrijednosti intenziteta piksela podvrgavaju nekoj (najčešće Gausovoj) raspodjeli, i da je srednja vrijednost intenziteta svakog regiona (objekta) različita tada se može eliminirati i problem diskontinuiteta ivica kao i objekata bez vidljivih ivica [18]. Granica objekta se može identificirati korištenjem metoda određivanja granice već prethodno identificirane regije od interesa.

Konturno bazirani deskriptori

U velikom broju primjena, unutrašnjost oblika nije toliko važna u usporedbi sa granicom (konturom, obrisom) oblika. Konturno bazirane tehnike opisivanja oblika se baziraju isključivo na analizi konture objekta, a ne i njegove unutrašnjosti [19]. Tipično se ove tehnike dijele na globalne i strukturne [20].

Najjednostavnije globalne tehnike su: centar gravitacije - centroid ili težište [21], osa najmanje inercije [22, 23], energija savijanja [24], ekscentricitet [25], omjer zakrivljenosti [20], cirkularna, odnosno kružna varijantnost, eliptička varijantnost, rektangularnost, konveksnost, čvrstoća [26], Ojlerov broj, profili, omjer površine-šupljine i sl.

Većina globalnih deskriptora baziranih na konturi koristi tzv. *signature oblika* [27–29]. Signatura oblika je (najčešće) jednodimenzionalna funkcija (signal) koja služi za adekvatnu redukciju 2D opisa oblika objekta u 2D prostoru. Signatura oblika najčešće opisuje perceptualne značajke oblika [30]. Do danas, u literaturi je predloženo mnogo signatura oblika: kompleksne koordinate, radijalno rastojanje, ugao tangente odnosno ugao zakretanja konture [29] i odgovarajuće derivacije ovih algoritama [31–33], zatim funkcija zakrivljenosti (kurvature) [34–38], površinska funkcija, reprezentacija trougaonim površinama [39], dužine tetiva [27], polarne koordinate, ugaone radijalne koordinate, rastojanje od najudaljenije tačke [40, 41], funkcija obima površine [42] i mnoge druge. Signatura oblika su, tipično, veoma osjetljive na šum i izobličenja. Osim toga, proces uparivanja oblika direktno na osnovu signatura je kompliciran i može voditi ka velikoj grešci prilikom pronalaženja oblika, pa se signatura oblika ne preporučuje za samostalno korištenje kao deskriptor oblika [21]. Najčešće se nad signaturom vrši neka od transformacija (npr. Fourierova, Wavelet, skala-prostor), kako bi se eliminirali spomenuti nedostaci.

Neizostavne tehnike opisivanja oblika su one vezane za *momente* [12]: Geometrijski invarijantni momenti [43], Algebarski invarijantni momenti, Zernike momenti [44–47], Radijalni Cebiševljevi mo-

menti [47–49], Homocentrični polar-radijus momenti, Ortogonalni Fourier-Mellinovi momenti [50], Pseudo Zernike-Momenti [51] i dr. Spomenuti momenti su najčešće koncizni, robusni i jednostavni za izračunavanje. Često su invarijantni na skaliranje, rotaciju i translaciju oblika, ili se ta invarijantnost relativno jednostavno ostvaruje određenim postupkom. Iako su momenti bazirani na konturi zapravo specijalan slučaj momenata baziranih na regiji, računanje momenata konture smanjuje potrebne količine memorije i broj računarskih izračunavanja [12, 52]. Također, popularne su i hibridne tehnike koje se zasnivaju na kombinaciji, recimo Zernike momenata i Hough transformacije [53].

Važno mjesto u opisivanju oblika zauzimaju spektralne metode. Ove tehnike podrazumijevaju da se slika ili kontura objekta prvenstveno transformira u neki drugi (tipično spektralni) domen, a potom analizira. Značajke oblika su obično predstavljene sa nekoliko najznačajnijih koeficijenata transformacije.

Fourierovi Deskriptori- Ovo je tehnika koja se pojavila još u drugoj polovini prošlog stoljeća, ali se još uvijek efikasno može koristiti kao alat za opis oblika. Ove deskriptore krasi jednostavnost, intuitivnost, robusnost na šum i kompaktnost. Konturno bazirani Fourierovi Deskriptori se baziraju na aplikaciji Fourierove transformacije na signaturu oblika. Fourierovi deskriptori su invarijantni na translaciju, rotaciju i skaliranje. Pokazalo se da se Fourierovi deskriptori ponašaju nešto bolje od ostalih tehnika za analizu oblika [19, 32, 54–56], dok se tek u posljednje vrijeme pojavljuju tehnike koje daju bolje rezultate, ali nauštrb brzine izvršavanja. Performanse Fourierovih deskriptora značajno ovise od korištene signature oblika. Najčešće se koristi funkcija udaljenosti od centroida [19, 27, 29, 55]. Najveća zamjerka Fourierovim deskriptorima je nemogućnost da izvrše lokalizaciju značajki oblika.

Wavelet deskriptori- Korištenjem wavelet transformacije Chuang i Kuo [57] su razvili hijerarhijski deskriptor baziran na Wavelet dekompoziciji. Mnogi algoritmi prepoznavanja oblika su zasnovani na Wavelet analizi [56, 58, 59]. Grublje aproksimacije nose globalne informacije, a finija skala nosi detaljnije informacije. Ovaj deskriptor ima mnoge poželjne osobine kao što su: višerezolucijska reprezentacija, invarijantnost, jedinstvenost, stabilnost i prostorna lokalizacija. Khalil je 2001. godine koristio dijadičnu wavelet transformaciju kako bi izveo afinu invarijantnu funkciju [60]. Chen je predložio deskriptor koji aplicira Fourierovu transformaciju duž polarne ose, a Wavelet transformaciju duž ose radijusa [30]. Kunttu [56] je uveo multi-skalirane Fourierove deskriptore za dohvrat slike na osnovu oblika. Iako ovi deskriptori kombinuju najbolje osobine Fourier i Wavelet deskriptora, njihovo korištenje je ipak nepraktično za online pronalaženje oblika [61]. Značajke dobivene Wavelet analizom mogu biti invarijantne na translaciju, rotaciju i skaliranje. Najveći nedostatak Wavelet pristupa je složeniji postupak upoređivanja, kao i problem poravnavanja početne tačke.

Od ostalih spektralnih tehnika značajne su i *harmonijsko ugrađena signatura oblika* [62], *R-transformacija* (ili kombinacija Radon/Hough transformacije) [63–65], unapređenja R-transformacije u formi hibridne *Fourier-Mellin-Radon transformacije* [66, 67], *Shapelets deskriptori* [68], *UNL Transformacija* [69] i dr.

Veoma popularne tehnike su i tzv. višeskalne tehnike [19, 35]. Koncept *osnovne skice zakrivljenosti* (dat u [70]) predstavlja višeskalni opis oblika baziran na zakrivljenosti. Najpoznatija tehnika za predstavljanje oblika korištenjem skala zakrivljenosti je uspostavljena od strane Mokhtariana i Machwortha, a bazirana je na tzv. *prostoru skala-zakrivljenost* (eng. *Curvature Scale Space - CSS*) [38]. Ovakvi deskriptori oblika se dobijaju konvolucijom Gaussovog jezgra (kernela) sa parametarskom reprezentacijom konture oblika, kada standardna devijacija Gaussovog jezgra varira od male do velike vrijednosti. Značajna istraživanja su usmjerena u ovom smjeru jer je CSS odabran za korištenje kao konturni deskriptor za MPEG-7 standard. Veoma mnogo istraživača je modificiralo i na neki način prilagodilo CSS metodu [34, 37, 71, 72]. Robusnost ove metode je velika. Metoda je kompaktna, invarijantna na skaliranje, relativno brza, pouzdana, i zadržava lokalne informacije oblika (svaka konkavnost ili konveksnost oblika ima svoju odgovarajuću konturu na CSS slici).

Metoda presječnih tačaka (eng. *Intersection Point Method*), slično kao CSS, koristi Gaussov kernel da progresivno izgladi linije konture. El-Rube je predložio višeskalnu *MTAR* (eng. *Multi-Triangular Area Representation*) signaturu, koja se računa kao površina formirana sa 4 tačke na granici oblika

[73, 74]. Umjesto korištenja Gausovog filtera, višeskalna prezentacija je napravljena korištenjem Wavelet transformacije. MTAR kao ni CSS nisu izvorno rotacijski invarijantne tehnike, osim ako se ne koristi cirkularno pomjeranje u fazi uparivanja.

Najveći problem višeskalnih tehnika je proces uparivanja na različitim skalama. Poel je 2005. predložio korelacijski koeficijent kao mjeru sličnosti između dvije CSS reprezentacije [75]. Obzirom da se čitava CSS reprezentacija koristi u procesu poklapanja, dimenzije vektora značajki postaju izuzetno velike, pa samim tim i nepraktične za indeksiranje i pronalaženje slike. Kako bi se prevazišli ovi problemi, El-Ghazal i ostali [40] su predložili korištenje 2D Fourierove transformacije kako bi se pojednostavio proces poklapanja CSS dijagrama.

CSS je veoma kompaktan, ali ima problem kod razlikovanja konveksnosti i konkavnosti [76]. Nadalje, inherentno nije rotaciono invarijantan što predstavlja problem kod "online" uparivanja (pretrage u realnom vremenu). U radu [19] su Zhang i Lu eksperimentalno pokazali da se Fourierovi deskriptori ponašaju značajno bolje nego predloženi MPEG-7 CSSD (eng. *Curvature Scale-Space Descriptor*) u smislu robusnosti, lakšeg računanja, hijerarhijske reprezentacije, performansi i pogodnosti za efikasnije indeksiranje. Zbog nedostataka CSSDa, MPEG-7 predlaže uključivanje i globalnih deskriptora oblika kao što su ekscentricitet i cirkularnost [12], kako bi se unaprijedio postojeći deskriptor. Zhang je također pokazao i da je i vrijeme računarske obrade za FD kraće.

Strukturalne metode baziraju na segmentiranju granice na dijelove tzv. primitive. Postoji više tipova strukturalno baziranih deskriptora. Uglavnom se baziraju na poligonalnoj aproksimaciji i dekompoziciji granice (konture) oblika [77–79]. Najpoznatije su *poligonalne aproksimacije*. Postoje dva generalna tipa poligonalnih aproksimacija: poligonalne aproksimacije sa stapanjem (*Metod praga udaljenosti*, *Metod tunela*, *Evolucija poligona* [80]) i poligonalne aproksimacije sa dijeljenjem [79]. Od ostalih strukturalnih tehnika su značajni: *konveksni trupovi* [12, 52, 81], *lančani kodovi* [20, 51, 82–86], *razlaganje na glatke krive* [78], *statistike snopa uglova* [87], *distribucija tetiva* [88] i *tehnika konteksta oblika* [89–93].

Posebno mjesto zauzimaju i *stohastičke metode*, specijalno *autoregresivno modeliranje* [94–98]. U navedenim radovima se ipak spominje da su tehnike bazirane na Fourierovim transformacijama bolje od autoregresivnih modela, zbog poteškoće da se jednostavno odredi tačan red sistema. Osim toga, u slučaju kompleksnog oblika konture, nizak red sistema nije dovoljan za opis oblika [20].

Nova metoda, koja je u posljednje vrijeme prihvaćena, a može ostvariti visoku tačnost je i *dinamičko programiranje* [33, 39, 99, 100]. Iako se pokazalo da ove tehnike imaju generalno bolje performanse nego ostale, njihov najveći nedostatak - nešto veća kompleksnost računanja čini ih nepraktičnim za veće baze.

PCA (eng. Principal Component Analysis) i *ICA* (eng. Independent Component Analysis) su popularne tehnike koje su pokušale naći i primjenu u oblasti uparivanja slika [101].

Regijski bazirani deskriptori

Mnoge tehnike koje se koriste kao konturni deskriptori oblika se koriste i kao regijske npr. *momenti*. Mnogo globalnih regijski-baziranih tehnika koristi tzv. invarijantne momente za opis oblika [30, 102]. Prvi rad oko analize oblika na osnovu momenata je napisan još davne 1962. godine [43]. Različite varijante momenata su tipično invarijantne na skaliranje, translaciju i rotaciju [103–105]. Da bi se prevazišli nedostaci geometrijskih momenata (informacijska redundantnost), Teague uvodi *ortogonalnu bazu momenata* [106] zasnovanih na korištenju ortogonalnih polinoma, kao što su Legendre i Zernike polinomi, da bi izveo Legendre (LM), odnosno Zernike momente (ZM). Ovi momenti su korišteni za mnoge primjene, ne samo za prepoznavanje oblika, već i za prepoznavanje karaktera ili lica [50, 107, 108], i rekonstrukciju slike [109]. Mnoga unapređenja navedenih tehnika su data u radovima [45, 107, 110, 111].

Diskretni ortogonalni momenti (Čebišev, Kravčuk, Racah, Hahn...), proizašli iz korespondentnih familija polinoma, se također koriste kao deskriptori oblika [47, 112–115]. Rotacijski invarijantne momente je predložio Mukundan [48, 49], dok Ping razvija Jakobi-Fourier (JF) momente [116, 117]. Ping je također pokazao da se skoro svi ortogonalni momenti mogu izvesti iz JF momenata sa određenim parametrima.

Sheng je izveo i invarijantni Fourier-Mellinov deskriptor [118, 119], a zatim ga unaprijedio formiranjem ortogonalnih Fourier-Mellinovih momenata [120]. Posebna vrsta momentnih tehnika je i tzv. *Ugaona radijalna transformacija* (eng. *ART - angular radial transform*) [121].

Fourierova transformacija je odličan alat za analizu oblika, koji već ima mnogobrojne primjene. Većina tehnika bazirana na Fourierovoj transformaciji je bazirana na konturi oblika, i jednodimenzionalnoj Fourierovoj transformaciji. Međutim, u značajnom radu [122] Zhang i Lu su koristili dvodimenzionalnu Fourierovu transformaciju da izvedu skup invarijantnih deskriptora, nazvanih Generički Fourierovi Deskriptori (GFD). Kod ove metode, 2D oblik je transformiran u polarne koordinate, a onda je primijenjena 2D Fourierova transformacija kako bi se dobili deskriptori oblika. Prednost GFD je što oni sadrže spektralne značajke oblika i u radijalnom i u cirkularnom smjeru [123]. GFD su invarijantni na translaciju, rotaciju i skaliranje.

Međutim, iako su spektralni deskriptori robusni, neosjetljivi na šum i kompaktni, kratkotrajna FT ili Wavelet deskriptori imaju iste nedostatke kao i sama signatura oblika u fazi uparivanja [58, 59, 124].

Ranije spomenute tehnike koriste matematičke transformacije da bi izveli deskriptore oblika. Druge, nešto manje popularne tehnike su one koje koriste matrične ili grid deskriptore oblika [125–127], kao što su *adaptivni grid* [128], *matrice oblika* [129], *polarni model matrica oblika* [126], *šok grafove* [52, 130, 131] i *ograničavajuće okvire*.

Pregled tehnika baziranih na Fourierovoj transformaciji

Obzirom da će se ova doktorska disertacija prvenstveno baviti unapređenjima spektralnih tehnika za opisivanje oblika, naročito jednodimenzionalnim i višedimenzionalnim Fourierovim deskriptorima, u narednom tekstu će biti dato više detalja iz ove oblasti.

Konturno bazirani Fourierovi Deskriptori

Konturno bazirani FD se formiraju tako što se prvo nad signaturom oblika pravi jednodimenzionalna diskretna Fourierova transformacija (DFT), a potom, da bi se ostvarila invarijantnost na translaciju i rotaciju, faze ovih koeficijenata se zanemaruju, odnosno koristi se samo modul koeficijenata DFT. Kod signatura oblika baziranim na kompleksnoj funkciji, centroidu i dužini tetive normalizacija se vrši sa istosmjernom komponentom, dok se ostale signature normaliziraju sa modulom amplitude osnovnog harmonika [27]. Mjera sličnosti između oblika se zasniva najčešće na Euklidskom ili Manhattan rastojanju između deskriptora [27]. Signatura oblika na bazi centroida se u velikom broju primjena pokazala superiornom, jer je to jedina signatura koja objedinjuje kako konturne, tako (donekle) i regijske informacije o obliku, dok su druge signature uglavnom bazirane samo na konturnim informacijama.

Da bi navedeni koeficijenti bili robusniji na affine transformacije, Arbter [132] je predložio unapređenje Fourierovih deskriptora korištenjem nešto složenijeg afnog invarijantnog oblika.

Većina Fourier-baziranih tehnika koristi amplitudu Fourierove Transformacije, a ignorira informacije koje daje faza kako bi ostvarila invarijantnost na rotaciju, kao i na centralnu tačku. Međutim, Bartolini [100] je opisao tehniku kojom se koriste i informacije koje nosi faza, a zasnovanu na tehnici dinamičkog poređenja (eng. *Dynamic Time Warping*). Li i Lee su predložili tehniku koja koristi i fazne koeficijente, a ne samo amplitudne [133].

Fourierovi deskriptori značajno nadmašuju momentne deskriptore, jer imaju bolju sposobnost razlikovanja oblika, manju osjetljivost na šum, i jednostavniji su za normalizaciju. Wavelet deskriptori imaju prednost što mogu ostvariti lokalizaciju značajki, ali je ostvarivanje invarijantnosti na rotaciju numerički zahtjevnija operacija, naročito kod viših dimenzionalnosti deskriptora [29].

Obzirom da u opštem slučaju kontura objekta ima proizvoljan broj tačaka, broj tačaka konture (signature) se tipično normalizuje na odgovarajući broj. Kod izbora broja tačaka, veći broj izabranih tačaka konture podrazumijeva više detalja, ali manji broj tačaka popravља računarsku efikasnost. Postoje tri

metoda kod izbora broja tačaka [29]: *Metod jednakog ugla*- uzimaju se tačke na konturi koje su $2\pi/N$ radijana razmaknute na konturi u odnosu na centroid kao početak, *Metod jednakog broja tačaka*- uzima se svaka $\lfloor K/N \rfloor$ - ta tačka na konturi, *Metod jednakog luka*- uzimaju se tačke na razmaku P/N gdje je P obim konture. U literaturi je navedeno da metod jednakog luka daje najbolje rezultate. Kao što se vidi iz navedenog, izbor tačaka je prvenstveno baziran na prostornoj segmentaciji, dok se uopšte ne vodi računa o specifičnosti same konture.

Bilo je dosta uspješnih pokušaja za poboljšavanje Fourierovih Deskriptora. U radu [134], predlaže se da se osim informacija koje dobivamo iz geometrije, koriste i informacije iz tzv. negeometrijskog domena. Osim invarijantnosti na skaliranje, translaciju i rotaciju, Fourierove deskriptore koji imaju osobinu invarijantnosti na slike u ogledalu je razvio Agarwal [135].

U posljednje vrijeme, El-Ghazal i ostali [40, 41, 76, 136] predlažu hibridnu strukturu Fourierovih deskriptora baziranu na zakrivljenosti (eng. *Curvature Based Fourier Descriptor*- Cbfd). Invarijantnost Cbfd deskriptora se izvodi iz 2D Fourierove transformacije CSS slike dobivene iz polaznog oblika.

Ono što se najviše zamjera Fourierovim Deskriptorima je nemogućnost da lokaliziraju određene lokalne značajke, jer FD je zapravo globalni deskriptor. Prvi rad u ovom smjeru je od Eichmanna [137], i korištenje kratkotrajne Fourierove transformacije [124] (skr. SFD). Obzirom da SFD nisu rotaciono invarijantni, sličnost mjerenja zahtijeva pomjeranje radi uparivanja oblika, tako da se mjera udaljenosti numerički komplicirana. Zhang je pokazao da iako se SFD ponašaju bolje od FD za neke specifične oblike, za većinu ostalih primjena FD su superiorniji. Naime, razlog bi mogao biti taj što SFD iako obuhvati lokalne karakteristike oblika, ne obuhvati globalne karakteristike. Zhang je pokušao sa unapređenjem SFD-ova tako što je uz SFD dodao i niskofrekventne FD koji bi trebali obuhvatiti i globalne karakteristike, ali i ovako unaprijeđeni SFD su bili lošiji od običnih FD.

Regijski bazirani Fourierovi Deskriptori

Osnovni nedostatak konturno baziranih deskriptora je taj što oni daju samo informaciju o konturi objekta, a ne i o unutrašnjosti. Također, zahtijevaju postojanje kontinualne (neprekidne) i zatvorene konture, što često nije slučaj. Zbog toga su regijski deskriptori mnogo tačniji u određenim primjenama.

Prvi predloženi Fourierov deskriptor je tzv. *Generički Fourierov deskriptor* (GFD). On se formira tako što se od osnovne slike napravi polarna slika sa centrom u centroidu slike. Ova slika se zatim preslika u rektangularnu formu, a nad ovom slikom se pravi Fourierova transformacija (tzv. *modificirana polarna transformacija*) [61]. Dobiveni koeficijenti Fourierove transformacije se normaliziraju sa tzv. masom oblika, odnosno površinom kruga u kojem se polarna slika nalazi. Ovo je analogon normalizaciji sa amplitudnim koeficijentima nultog i prvog harmonika kod konturno baziranih Fourierovih deskriptora.

Poređenja vektora značajki se vrše nekom od mjera rastojanja, i to tipično Euklidskim rastojanjem.

Nedostatak generičkih Fourierovih deskriptora je što oni razmatraju sliku korištenjem radijalnih rastojanja, pa će za oblike koji su značajno izduženi ili iskrivljeni to predstavljati problem. Da bi se poboljšale karakteristike GFD, Zhang je razvio poboljšani GFD (eng. *Enhanced Generic Fourier Descriptor*) [123]. Naime, korištenjem tzv. *velike ose* objekta prvo se napravi normalizacija rotacije (orijentacije), a zatim se pravi skaliranje tako da slika, što je moguće bolje, poklopi kružnicu [30, 123]. Nakon toga se radi modificirana polarna transformacija i nastavlja postupak kao kod GFD. Važno je uočiti da je i Zhang primijetio da se količina informacija o obliku povećava kako se približava granici kružnice [123], a rezolucija u radijalnom smjeru je zadržana istom.

Unapređenja Fourierovih deskriptora su također napravljena projiciranjem 2D slika u 3D prostor, a potom računanjem sfernih deskriptora. Ova tehnika daje nešto bolje rezultate uz složeniji algoritam računanja i upoređivanja [138].

Motivacija za istraživanje

Jasno je da u ovoj oblasti postoji široka paleta različitih pristupa, pri čemu svaki od njih ima određene prednosti, ali i niz nedostataka. Globalne tehnike imaju mnoge prednosti koje ih čine efektivnijim i efikasnijim tehnikama u primjenama pronalaženja slika na osnovu oblika. Ove tehnike se baziraju na matematičkim transformacijama koje pojednostavljaju ekstrakciju invarijantnih značajki. Proces uparivanja je često veoma jednostavan (recimo primjena Euklidskog rastojanja), što ih čini efikasnijim od strukturnih tehnika.

Tehnike bazirane na Fourierovoj transformaciji su uglavnom tehnike sa najvećim potencijalom, jer su bazirane na poznatoj Fourierovoj teoriji, jednostavnije za implementaciju i interpretaciju rezultata, veoma efikasne i efektivne. Također, mnoge metode koje nisu nužno zasnovane na spektralnom pristupu, direktno ili indirektno koriste Fourierovu transformaciju.

Za opise oblika, uvijek će morati postojati neki kompromis između tačnosti i efikasnosti [21]. S jedne strane, opis treba biti što je moguće tačniji, a s druge strane, treba biti što je moguće kompaktniji, kako bi pojednostavio indeksiranje i pronalaženje slika. Spektralne tehnike imaju veoma veliku fleksibilnost u ovom smislu: omjer između tačnosti i efikasnosti se jednostavno mijenja izborom broja spektralnih koeficijenata.

Tehnike bazirane na Fourierovoj transformaciji posjeduju mnoge prednosti, koje im omogućavaju da postignu bolje rezultate pri rješavanju problema pretraživanja na osnovu oblika. Bit će navedene neke od njih:

- Bazirane su na poznatoj, i istraženoj Fourierovoj teoriji,
- Relativno su jednostavne za implementaciju,
- Jednostavno se postiže invarijantnost na translaciju, rotaciju i skaliranje,
- Iako su algoritamski kompliciranije od nekih drugih tehnika, korištenje brze Fourierove transformacije (FFT) im omogućava brže izračunavanje,
- Posjeduju inherentnost u tumačenju finih i grubih detalja (više i niže frekvencije),
- Jednostavne su u pogledu računanja kriterija sličnosti.

Nedostaci ovih metoda su:

- Nemaju mogućnost identifikacije lokalnih značajki (jer se fokusiraju na globalni pristup),
- Imaju veliki stepen gubitka informacije (npr. odbacivanjem faznih koeficijenata).

Posmatrajući iz ovog ugla, jasno je da postoji određeni prostor za unapređenje postojećih tehnika baziranih na Fourierovoj transformaciji. Neka od pitanja koja se postavljaju su:

- Da li je moguće efikasnije iskoristiti fazne koeficijente Fourierovih deskriptora za opisivanje oblika? Poznato je da faza bez amplitude (međusobni položaj komponenti) sadrži mnogo više informacija o obliku od amplitude bez faze.
- Da li su sve frekventne komponente jednako značajne za interpretaciju oblika? Svaka pojedina frekventna komponenta ne mora nositi istu količinu informacija. To znači da bi uspostavljanje težinske funkcije ili alternativne funkcije sličnosti povećalo kvalitet klasifikacije.
- Da li je uniformna normalizacija broja tačaka (za jednodimenzionalne Fourierove deskriptore) i normalizovano prostorno uzorkovanje (za dvodimenzionalne Fourierove deskriptore) prednost ili nedostatak pri klasifikaciji?

- Da li neuniformna uzorkovanja konture kod formiranja signature oblika mogu dati bolje rezultate, i ostvariti još veću otpornost na izobličenja oblika?
- Da li se unapređenjem kratkotrajnih Fourierovih deskriptora ili načina komparacije može dobiti bolji kvalitet klasifikacije, a istovremeno zadržati globalnost u pristupu?
- Da li je moguće definirati i mjeru dozvoljenih izobličenja oblika objekta, obzirom da ta mjera u literaturi još nije adekvatno kvantificirana?

Ciljevi i plan istraživanja

Osnovni cilj doktorske disertacije, koji proizilazi iz detaljne analize stanja u oblasti istraživanja i lične motivacije, je unapređenje osobina postojećih Fourierovih deskriptora oblika korištenjem elemenata Fourierove analize i teorije procesiranja signala.

Kako bi se ostvario osnovni cilj, istraživanje će biti koncipirano prema sljedećem planu:

1. Izrada detaljnog pregleda stanja u oblasti istraživanja, zajedno sa kritičkim osvrtom na postojeće prednosti i nedostatke svih metoda opisivanja oblika, a naročito onih baziranih na Fourierovoj transformaciji.
2. Sistematično ispitivanje utjecaja faznih koeficijenata Fourierove transformacije pri opisivanju oblika, i razmatranje mogućnosti unapređenja kvaliteta deskriptora oblika korištenjem informacija koje nosi fazni spektar.
3. Sistematično ispitivanje značaja pojedinih frekventnih komponenti pri opisivanju oblika. Obavljanje analize postojećih mjera sličnosti, i formiranje težinske funkcije ili alternativne mjere sličnosti koja iskorištava eventualni različit značaj pojedinih frekventnih komponenti, te povećava tačnost i/ili brzinu klasifikacije.
4. Obrada postojećih tehnika normalizacije broja tačaka konture. Potrebno je definirati okvir za opšti opis modela oblika, mjere sličnosti, mjere značaja pojedinih tačaka konture i dozvoljene mjere izobličenja oblika. Nakon toga, neophodno je predložiti tehnike neuniformnog uzorkovanja konture kako bi se smanjio broj tačaka konture, a zadržale informacije o obliku, i/ili formirali deskriptori otporni na “dozvoljena” izobličenja oblika.
5. Identificiranje prednosti i nedostataka Fourierovih deskriptora baziranih na kratkotrajnoj Fourierovoj transformaciji, te predlaganje poboljšanja istih (npr. korištenjem drugačijih prozorskih funkcija ili novih mjera sličnosti).
6. Formiranje simulacionog okruženja koje će omogućiti evaluaciju deskriptora i funkcija sličnosti (upoređivanja).

Metodologija istraživanja

Kako bi se izvršila pomenuta istraživanja u okviru disertacije, kao i uporedili algoritmi razvijeni u doktorskoj disertaciji sa postojećim algoritmima, biti će kreirano odgovarajuće testno okruženje korištenjem programskog paketa MATLAB. Razvijene tehnike će biti prvenstveno testirane na *MPEG-7 Core Experiment dataset B* testnom skupu slika/oblika. Ovaj skup, kao i neki njegovi podskupovi su u literaturi općeprihvaćeni za testiranje tačnosti i robusnosti deskriptora oblika, i ne umanjuju opštost pristupa.

Za evaluaciju preciznosti razvijenih algoritama, biti će korišteni dijagrami preciznosti i odziva, koji predstavljaju najpopularniju metodu evaluacije algoritama za dohvata informacija (u ovom slučaju, slika na osnovu sadržaja, odnosno oblika na osnovu upita).

Dugo je većina istraživača vlastite algoritme ispitivala na sopstvenim bazama slika, što je predstavljao ozbiljan problem kod evaluacije i komparacije algoritama [139]. Kada je uočen ovaj problem, MPEG-7 Vizuelnim Standardom je predloženo formiranje testnog skupa slika koje bi omogućile evaluaciju algoritama za pronalaženje slika na osnovu sadržaja, i što je još važnije, njihovo međusobno poređenje.

Danas se većina algoritama međusobno poredi na MPEG-7 testnom skupu slika za analizu oblika [140], tako da će i algoritam razvijen u ovom radu biti kompariran na isti način.

MPEG-7 testni skup (*Core Experiment dataset*) kontura oblika se sastoji od ilustrovanih sličica (oblika) iz stvarnog života, i uzima u obzir moguće distorzije u prirodi i netačnost oblika od segmentiranih oblika. Baza se sastoji iz tri dijela: Skup A, Skup B i Skup C. *Skup A* ima dva dijela, skup A1 i skup A2, svaki se sastoji od 420 oblika iz 70 klasa (svaka klasa ima 6 varijacija oblika). Skup A1 služi za testiranje invarijantnosti na skaliranje, a skup A2 služi za testiranje invarijantnosti na rotaciju. *Skup B* ima 1400 oblika koji su klasificirani u 70 klasa (po 20 oblika u svakoj klasi). Skup B služi za ispitivanje pronalaženja na osnovu sličnosti (eng. *similarity-based retrieval*), i za testiranje robusnosti deskriptora oblika na različita izobličenja oblika. *Skup C* se sastoji od 200 afinih transformacija slika djeverike (vrsta ribe) i 1100 morskih riba koje su neklasificirane. Prvih 200 riba se koriste kao upiti. Skup C se koristi za ispitivanje deskriptora oblika na nerigidna izobličenja objekata.

U zadnje vrijeme, uglavnom se kao skup za evaluaciju u literaturi koristi samo skup B, jer se pokazalo da skup A i C daju nedovoljno reprezentativne rezultate (većina algoritama postiže veoma kvalitetne rezultate na skupovima A i C).

Kada je u pitanju metoda evaluacije, najčešća (tipična, definirana) metoda evaluacije su dijagrami preciznosti i odziva (eng. *precision and recall diagrams*) [141]. Ova metoda će biti korištena za evaluaciju svih algoritama u radu. Rezultati unaprijeđenih metoda razvijenih u disertaciji će se uporediti sa postojećim metodama. Metode razvijene u disertaciji će se smatrati boljim ako je kriva dijagrama preciznost i odziva poboljšanih algoritama podignuta u odnosu dijagrame postojećih algoritama, odnosno, ako je pri većem dijelu ose odziva povećana preciznost pretraživanja. Također neki od dodatnih parametara se mogu odrediti radi dodatnog kvalitativnog ocjenjivanja tačnosti algoritama [139, 142].

Očekivani izvorni naučni doprinosi disertacije

Osnovni potencijalni naučni doprinosi disertacije su:

- Poboljšanje postojećih ili formiranje novih deskriptora oblika, baziranih na eksploataciji jedne ili više inherentnih osobina prostorne forme, frekvencije, faze i amplitude Fourierove transformacije signature oblika, a sve u cilju što kvalitetnije ekstrakcije informacija o posmatranom obliku.
- Poboljšanje postojećih ili uvođenje novih mjera sličnosti (funkcija rastojanja, metrike za procjenu sličnosti) deskriptora oblika, u cilju postizanja veće tačnosti pretraživanja na osnovu sličnosti oblika.

Osim ovih doprinosa, očekuje se definiranje novih pravaca za dalja istraživanja u ovoj oblasti. Naime, rezultati dobiveni na osnovu istraživanja značenja pojedinih frekventnih i/ili faznih komponenti, ili pak prostorno-frekventnog zapisa i neuniformno uzorkovanih signatura oblika, kao i njihovog sveukupnog međuođnosa na opisivanje oblika, mogu pomoći u ostvarivanju sličnih modifikacija radi unapređenja i drugih deskriptora oblika, a ne samo onih baziranih na Fourierovoj transformaciji.

Polazna literatura

- [1] M.S. Lew, N. Sebe, C. Djeraba, and R. Jain. Content-based multimedia information retrieval: State of the art and challenges. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMCCAP)*, 2(1):1–19, 2006.
- [2] Luciano da Fontoura Da Costa and Roberto Marcondes Cesar, Jr. *Shape Analysis and Classification: Theory and Practice*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 1st edition, 2000.
- [3] F Attneave. Some informational aspects of visual perception. *Psychological review*, 61(3):183–93, May 1954.
- [4] K. Hirata and T. Kato. Query by visual example. In *Science*, pages 56–71. Springer, 1992.
- [5] Thomas Sikora. The MPEG-7 Visual standard for content description-an overview. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE*, 11(6):696–702, 2001.
- [6] S.F. Chang, Thomas Sikora, and A. Purl. Overview of the MPEG-7 standard. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 11(6):688–695, 2001.
- [7] Mirosław Bober. Mpeg-7 visual shape descriptors. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 11(6):716–719, 2001.
- [8] Tranos Zuva, O Olugbara Oludayo, Sunday O Ojo, and Seleman M Ngwira. Image segmentation, available techniques, developments and open issues. *Canadian Journal on Image Processing and Computer Vision*, 2(3):20–29, 2011.
- [9] Jordi Freixenet, Xavier Muñoz, David Raba, Joan Martí, and Xavier Cufí. Yet another survey on image segmentation: Region and boundary information integration. In *Computer Vision-ECCV 2002*, pages 408–422. Springer, 2002.
- [10] L Lucchese and SK Mitray. Color image segmentation: A state-of-the-art survey. *Proceedings of the Indian National Science Academy (INSA-A). Delhi, Indian: Natl Sci Acad*, 67(2):207–221, 2001.
- [11] Yonggang Wang, Qiang Guo, and Yun Zhu. Medical image segmentation based on deformable models and its applications. In *Deformable Models*, pages 209–260. Springer, 2007.
- [12] M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle, and Others. *Image processing, analysis, and machine vision*, volume 2. PWS publishing Pacific Grove, CA, 1999.
- [13] Mohamed Cheriet, Joseph N Said, and Ching Y Suen. A recursive thresholding technique for image segmentation. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 7(6):918–921, 1998.

- [14] Amer Dawoud and Mohamed S Kamel. Iterative multimodel subimage binarization for handwritten character segmentation. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 13(9):1223–1230, 2004.
- [15] Shiyang Hu, Eric A Hoffman, and Joseph M Reinhardt. Automatic lung segmentation for accurate quantitation of volumetric x-ray ct images. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 20(6):490–498, 2001.
- [16] Ahmed Rekik, Mourad Zribi, Ahmed Ben Hamida, and Mohamed Benjelloun. An optimal unsupervised satellite image segmentation approach based on pearson system and k-means clustering algorithm initialization. *methods*, 8:9, 2009.
- [17] Tony F Chan and Luminita A Vese. Active contours without edges. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 10(2):266–277, 2001.
- [18] Li Wang, Lei He, Arabinda Mishra, and Chunming Li. Active contours driven by local gaussian distribution fitting energy. *Signal Processing*, 89(12):2435–2447, 2009.
- [19] Dengsheng Zhang and Guojun Lu. A comparative study of curvature scale space and Fourier descriptors for shape-based image retrieval. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 14(1):39–57, 2003.
- [20] D Zhang. Review of shape representation and description techniques. *Pattern Recognition*, 37(1):1–19, January 2004.
- [21] M. Yang, K. Kpalma, J. Ronsin, and Others. A survey of shape feature extraction techniques. *Methods*, 2008, 2008.
- [22] D.M. Tsai and Ming-fong Chen. Object recognition by a linear weight classifier. *Pattern recognition letters*, 16(6):591–600, 1995.
- [23] D.S. Guru and H.S. Nagendraswamy. Symbolic representation of two-dimensional shapes. *Pattern Recognition Letters*, 28(1):144–155, January 2007.
- [24] Sven Loncaric. A survey of shape analysis techniques. *Pattern recognition*, 31(8):983–1001, 1998.
- [25] M. Peura and J. Iivarinen. Efficiency of simple shape descriptors. In *Proceedings of the third international workshop on visual form*, pages 443–451. Citeseer, 1997.
- [26] Cheng Chang, Liu Wenyin, and Hongjiang Zhang. Image retrieval based on region shape similarity. In *13th SPIE symposium on Electronic Imaging Storage and Retrieval for Image and Video Databases*, 2001.
- [27] Dengsheng Zhang and Guojun Lu. A comparative study of Fourier descriptors for shape representation and retrieval. In *Proceedings of the Fifth Asian Conf. on Computer Vision*, number January, pages 646–651. Citeseer, 2002.
- [28] H. Kauppinen, T. Seppanen, and M. Pietikainen. An experimental comparison of autoregressive and Fourier-based descriptors in 2D shape classification, 1995.
- [29] Dengsheng Zhang and Guojun Lu. A comparative study on shape retrieval using Fourier descriptors with different shape signatures. In *Proc. of international conference on intelligent multimedia and distance education (ICIMADE01)*, pages 1–9, 2001.
- [30] R Yadav, N Nishchal, a Gupta, and V Rastogi. Retrieval and classification of shape-based objects using Fourier, generic Fourier, and wavelet-Fourier descriptors technique: A comparative study. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(6):695–708, June 2007.

- [31] Kerr-jia Lu and Sridhar Kota. Compliant Mechanism Synthesis for Shape-Change Applications : Preliminary Results. *Structures and Materials*, 4693, 2002.
- [32] CT Zahn. Fourier descriptors for plane closed curves. *Computers, IEEE Transactions on*, 850(August), 1972.
- [33] Longin Jan Latecki, Rolf Lakaemper, and Diedrich Wolter. Optimal partial shape similarity. *Image and Vision Computing*, 23(2):227–236, February 2005.
- [34] F. Mokhtarian and A.K. Mackworth. A theory of multiscale, curvature-based shape representation for planar curves. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(8):789–805, 1992.
- [35] AC Jalba and MHF Wilkinson. Shape representation and recognition through morphological curvature scale spaces. *Image Processing, IEEE*, 15(2):331–341, 2006.
- [36] Farzin Mokhtarian. Silhouette-based object recognition with occlusion through curvature scale space. pages 566–578, 1996.
- [37] Farzin Mokhtarian, Sadegh Abbasi, and Josef Kittler. Efficient and robust retrieval by shape content through curvature scale space. *Series on Software Engineering and Knowledge Engineering*, 8:51–58, 1997.
- [38] F Mokhtarian and a Mackworth. Scale-based description and recognition of planar curves and two-dimensional shapes. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 8(1):34–43, January 1986.
- [39] Naif Alajlan, I. El Rube, M.S. Kamel, and George Freeman. Shape retrieval using triangle-area representation and dynamic space warping. *Pattern Recognition*, 40(7):1911–1920, 2007.
- [40] Akrem El-ghazal, Otman Basir, and Saeid Belkasim. Farthest point distance: A new shape signature for Fourier descriptors. *Signal Processing: Image Communication*, 24(7):572–586, August 2009.
- [41] A. El-Ghazal, O. Basir, and S. Belkasim. A new shape signature for Fourier descriptors. In *Image Processing, 2007. ICIP 2007. IEEE International Conference on*, volume 1, pages I—161. IEEE, 2007.
- [42] Bin Wang. Shape retrieval using combined Fourier features. *Optics Communications*, 284(14):3504–3508, July 2011.
- [43] MK Hu. Visual pattern recognition by moment invariants. *Information Theory, IRE Transactions on*, pages 66–70, 1962.
- [44] M.E. Celebi and Y.a. Aslandogan. A comparative study of three moment-based shape descriptors. *International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'05) - Volume II*, pages 788–793 Vol. 1, 2005.
- [45] WY Kim. A region-based shape descriptor using Zernike moments. *Signal Processing: Image Communication*, 16, 2000.
- [46] Shan Li, M.C. Lee, and C.M. Pun. Complex Zernike moments features for shape-based image retrieval. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 39(1):227–237, 2009.

- [47] R Mukundan, S H Ong, and P a Lee. Image analysis by Tchebichef moments. *IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society*, 10(9):1357–64, January 2001.
- [48] Ramakrishnan Mukundan. Radial Tchebichef invariants for pattern recognition. *TENCON 2005 2005 IEEE Region 10*, (5), 2005.
- [49] Ramakrishnan Mukundan. A new class of rotational invariants using discrete orthogonal moments. In *Honolulu, USA: 6th IASTED Conference on Signal and Image Processing-SIP2004*, number 2, pages 23–25, 2004.
- [50] Chao Kan and Mandyam D. Srinath. Invariant character recognition with Zernike and orthogonal Fourier-Mellin moments. *Pattern Recognition*, 35(1):143–154, January 2002.
- [51] B.M. Mehtre, M.S. Kankanhalli, and W.F. Lee. Shape measures for content based image retrieval: a comparison. *Information Processing & Management*, 33(3):319–337, 1997.
- [52] R.C Gonzalez. *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, 2009.
- [53] Chandan Singh. Improving image retrieval using combined features of Hough transform and Zernike moments. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(12):1384–1396, December 2011.
- [54] E Persoon and K S Fu. Shape discrimination using fourier descriptors. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 8(3):388–97, March 1986.
- [55] D Zhang and G Lu. Study and evaluation of different Fourier methods for image retrieval. *Image and Vision Computing*, 23(1):33–49, January 2005.
- [56] I Kunttu, L Lepisto, J Rauhamaa, and a Visa. Multiscale Fourier descriptors for defect image retrieval. *Pattern Recognition Letters*, 27(2):123–132, January 2006.
- [57] GCH Chuang. Wavelet descriptor of planar curves: Theory and applications. *Image Processing, IEEE*, 1996.
- [58] Q.M. Tieng and WW Boles. Recognition of 2D object contours using the wavelet transform zero-crossing representation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 19(8):910–916, 1997.
- [59] Hee Soo Yang, Sang Uk Lee, and Kyoung Mu Lee. Recognition of 2D Object Contours Using Starting-Point-Independent Wavelet Coefficient Matching. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 9(2):171–181, June 1998.
- [60] MI Khalil. A dyadic wavelet affine invariant function for 2D shape recognition. *Pattern Analysis and Machine*, 23(10):1152–1164, 2001.
- [61] D Zhang. PHD Image retrieval based on shape, 2002.
- [62] S.M. Lee, A.L. Abbott, N.A. Clark, and P.A. Araman. A shape representation for planar curves by shape signature harmonic embedding. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on*, volume 2, pages 1940–1947. IEEE, 2006.
- [63] GS di Baja. Skeletonization algorithm running on path-based distance maps. *Image and Vision Computing*, 1996.
- [64] S Tabbone, L Wendling, and J Salmon. A new shape descriptor defined on the Radon transform. *Computer Vision and Image Understanding*, 102(1):42–51, April 2006.

- [65] S Tabbone and L Wendling. Technical symbols recognition using the two-dimensional radon transform. In *Pattern Recognition, 2002. Proceedings. 16th International Conference on*, volume 3, pages 200–203. IEEE, 2002.
- [66] Thai V. Hoang and Salvatore Tabbone. Invariant pattern recognition using the RFM descriptor. *Pattern Recognition*, 45(1):271–284, January 2012.
- [67] Thai V. Hoang and Salvatore Tabbone. The generalization of the R-transform for invariant pattern representation. *Pattern Recognition*, 45(6):2145–2163, June 2012.
- [68] Aleksandr Dubinskiy and Song Chun Zhu. A multi-scale generative model for animate shapes and parts. *Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*, (3):249–256 vol.1, 2003.
- [69] W. Rauber and S. Steiger-Gilci. 2-D form descriptors based on a normalized parametric polar transform (UNZ transform). *IAPR Workshop on Machine Vision Application*, 1992.
- [70] H. Asada and M. Brady. The curvature primal sketch. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (1):2–14, 1986.
- [71] F Mokhtarian. Silhouette-based isolated object recognition through curvature scale space. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(5), 1995.
- [72] Sadegh Abbasi, Farzin Mokhtarian, and Josef Kittler. Curvature scale space image in shape similarity retrieval. *Multimedia Systems*, 7(6):467–476, November 1999.
- [73] I. El Rube, N. Alajlan, M. Kamel, M. Ahmed, and G. Freeman. Robust multiscale triangle-area representation for 2D shapes. *IEEE International Conference on Image Processing 2005*, pages I-545, 2005.
- [74] I. El Rube, N Alajlan, M Kamel, M Ahmed, and G Freeman. Efficient multiscale shape-based representation and retrieval. *Image Analysis and Recognition*, pages 415–422, 2005.
- [75] J. van der Poel, C.W.D. de Almeida, and L.V. Batista. A new multiscale, curvature-based shape representation technique for image retrieval based on dsp techniques. In *Hybrid Intelligent Systems, 2005. HIS'05. Fifth International Conference on*, pages 6–pp. IEEE, 2005.
- [76] A.S. El-ghazal. *Multi-technique fusion for shape-based image retrieval*. PhD thesis, 2009.
- [77] Ernesto Bribiesca. A new chain code. *Pattern Recognition*, 32(2):235–251, February 1999.
- [78] Stefano Berretti, A. Del Bimbo, and Pietro Pala. Retrieval by shape similarity with perceptual distance and effective indexing. *Multimedia, IEEE Transactions on*, 2(4):225–239, 2000.
- [79] E Attalla. Robust shape similarity retrieval based on contour segmentation polygonal multiresolution and elastic matching. *Pattern Recognition*, 2005.
- [80] LJ Latecki. Convexity rule for shape decomposition based on discrete contour evolution. *Computer Vision and Image Understanding*, 73(3):441–454, 1999.
- [81] E.R. Davies and ER Davies. *Machine vision: theory, algorithms, practicalities*. Elsevier, 2005.
- [82] Yong Kui Liu, Wei Wei, Peng Jie Wang, and Borut Žalik. Compressed vertex chain codes. *Pattern Recognition*, 40(11):2908–2913, November 2007.

- [83] H. Freeman. On the encoding of arbitrary geometric configurations. *Electronic Computers, IRE Transactions on*, (2):260–268, 1961.
- [84] Herbert Freeman. Computer Processing of Line-Drawing Images. *ACM Computing Surveys*, 6(1):57–97, January 1974.
- [85] ABM Salem and AA Sewisy. A vertex chain code approach for image recognition. , *Vision and Image Processing*, (1), 2005.
- [86] J. Iivarinen and A. Visa. Shape recognition of irregular objects. *Intelligent Robots and Computer Vision XV: Algorithms, Techniques, Active Vision, and Materials Handling, Proc. SPIE*, 2904:25–32, 1996.
- [87] N Arica. BAS: a perceptual shape descriptor based on the beam angle statistics. *Pattern Recognition Letters*, pages 1–16, 2003.
- [88] Anil K. Jain and Aditya Vailaya. Shape-Based Retrieval: a Case Study With Trademark Image Databases. *Pattern Recognition*, 31(9):1369–1390, September 1998.
- [89] S. Belongie, J. Malik, and J. Puzicha. Shape context: A new descriptor for shape matching and object recognition. *Advances in neural information processing systems*, pages 831–837, 2001.
- [90] Serge Belongie, Jitendra Malik, and Jan Puzicha. Shape matching and object recognition using shape contexts. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 24(4):509–522, 2002.
- [91] G. Mori and J. Malik. Estimating human body configurations using shape context matching. pages 150–180, 2002.
- [92] Hao Zhang. Learning a discriminative classifier using shape context distances. *Computer Vision and Pattern Recognition*,, 2003.
- [93] a. Thayananthan, B. Stenger, P.H.S. Torr, and R. Cipolla. Shape context and chamfer matching in cluttered scenes. *2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings.*, pages I–127–I–133.
- [94] R. Kashyap and R. Chellappa. Stochastic models for closed boundary analysis: Representation and reconstruction. *IEEE Transactions on Information Theory*, 27(5):627–637, September 1981.
- [95] S.R. Dubois and F.H. Glanz. An autoregressive model approach to two-dimensional shape classification. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (1):55–66, 1986.
- [96] SR Dubois. Correction to“An Autoregressive Model Approach to Two-Dimensional Shape Classification”. *Pattern Analysis and Machine*, (4):8828, 1986.
- [97] M. Das, M.J. Paulik, and NK Loh. A bivariate autoregressive technique for analysis and classification of planar shapes. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 12(1):97–103, 1990.
- [98] I. Sekita, T. Kurita, and N. Otsu. Complex autoregressive model for shape recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(4):489–496, April 1992.
- [99] E.G.M. Petrakis, A. Diplaros, and E. Milios. Matching and retrieval of distorted and occluded shapes using dynamic programming. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 24(11):1501–1516, 2002.

- [100] Ilaria Bartolini, Paolo Ciaccia, and Marco Patella. WARP: accurate retrieval of shapes using phase of fourier descriptors and time warping distance. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 27(1):142–7, January 2005.
- [101] Ye Mei and Dimitrios Androutsos. Affine invariant shape descriptors: the ICA-Fourier descriptor and the PCA-Fourier descriptor. In *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2008.
- [102] Sven Loncaric. A survey of shape analysis techniques. *Pattern recognition*, 31(8):983–1001, 1998.
- [103] SS Reddi. Radial and angular moment invariants for image identification. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 75(2):240–242, 1981.
- [104] B Bamieh. A general moment-invariants/attributed-graph method for three-dimensional object recognition from a single image. *Robotics and Automation, IEEE*, (1), 1986.
- [105] Yaser S. Abu-Mostafa and Demetri Psaltis. Recognitive Aspects of Moment Invariants. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-6(6):698–706, November 1984.
- [106] M.R. Teague. Image analysis via the general theory of moments. *JOSA*, 70(8):920–930, 1980.
- [107] S.O. Belkasim, M. Shridhar, and M. Ahmadi. Pattern recognition with moment invariants: a comparative study and new results. *Pattern recognition*, 24(12):1117–1138, 1991.
- [108] R.R. Bailey and M. Srinath. Orthogonal moment features for use with parametric and non-parametric classifiers. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 18(4):389–399, 1996.
- [109] a. Khotanzad and Y.H. Hong. Invariant image recognition by Zernike moments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(5):489–497, May 1990.
- [110] Dengsheng Zhang and Guojun Lu. Evaluation of MPEG-7 shape descriptors against other shape descriptors. *Multimedia Systems*, 9(1):15–30, 2003.
- [111] P Rosin. Shape Description by Bending Invariant Moments. *Computer Analysis of Images and Patterns*, pages 253–260, 2011.
- [112] R Mukundan and SH Ong. Discrete Orthogonal Moment Features Using Chebyshev Polynomials. *New Zealand: International*, (ii):20–25, 2000.
- [113] Pew-Thian Yap, Raveendran Paramesran, and Seng-Huat Ong. Image analysis by Krawtchouk moments. *IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society*, 12(11):1367–77, January 2003.
- [114] Hongqing Zhu, Huazhong Shu, Jun Liang, and Limin Luo. Image analysis by discrete orthogonal Racah moments. *Signal Processing*, 87(4):687–708, 2007.
- [115] Hongqing Zhu, Huazhong Shu, Jian Zhou, and Limin Luo. Image analysis by discrete orthogonal dual Hahn moments. *Pattern Recognition Letters*, 28(13):1688–1704, 2007.
- [116] ZiLiang Ping, RiGeng Wu, and YunLong Sheng. Image description with Chebyshev-Fourier moments. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 19(9):1748–54, September 2002.
- [117] Ziliang Ping and et al. Generic orthogonal moments: Jacobi-Fourier moments for invariant image description. *Pattern Recognition*, 40:1245–1254, 2007.

- [118] Y Sheng and J Duvernoy. Circular-Fourier-radial-Mellin transform descriptors for pattern recognition. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and image science*, 3(6):885–8, June 1986.
- [119] Y Sheng and H H Arsenault. Experiments on pattern recognition using invariant Fourier-Mellin descriptors. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and image science*, 3(6):771–6, June 1986.
- [120] Yunlong Sheng and Lixin Shen. Orthogonal Fourier-Mellin moments for invariant pattern recognition. *JOSA A*, 11(6):1748–1757, 1994.
- [121] Julien Ricard, David Coeurjolly, and Atilla Baskurt. Generalizations of angular radial transform for 2D and 3D shape retrieval. *Pattern Recognition Letters*, 26(14):2174–2186, October 2005.
- [122] Dengsheng Zhang and Guojun Lu. Shape-based image retrieval using generic Fourier descriptor. *Signal Processing: Image Communication*, 17(10):825–848, 2002.
- [123] D. Zhang and G. Lu. Enhanced generic fourier descriptors for object-based image retrieval. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1993. ICASSP-93., 1993 IEEE International Conference on*, volume 4, pages IV–IV. IEEE, August 1993.
- [124] Dengsheng Zhang and Guojun Lu. A comparison of shape retrieval using Fourier descriptors and short-time Fourier descriptors. *Image (Rochester, N.Y.)*, pages 855–860, 2001.
- [125] A. Goshtasby. Description and discrimination of planar shapes using shape matrices. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (6):738–743, 1985.
- [126] A. Taza and C.Y. Suen. Discrimination of planar shapes using shape matrices. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 19(5):1281–1289, 1989.
- [127] Guojun Lu and Atul Sajjanhar. Region-based shape representation and similarity measure suitable for content-based image retrieval. *Multimedia Systems*, 7(2):165–174, March 1999.
- [128] Kaushik Chakrabarti, M. Ortega-Binderberger, Kriengkrai Porkaew, and S. Mehrotra. Similar shape retrieval in MARS. In *Multimedia and Expo, 2000. ICME 2000. 2000 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 709–712. IEEE, 2000.
- [129] J Flusser. Invariant shape description and measure of object similarity. *Image Processing and its Applications, 1992.*, 1992.
- [130] Kaleem Siddiqi, A Shokoufandeh, and SJ Dickinson. Shock graphs and shape matching. *International Journal of*, 1999.
- [131] Thomas B Sebastian, Philip N Klein, and Benjamin B Kimia. Recognition of shapes by editing their shock graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(5):550–571, 2004.
- [132] K. Arbter, W.E. Snyder, Hans Burkhardt, and G. Hirzinger. Application of affine-invariant Fourier descriptors to recognition of 3-D objects. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 12(7):640–647, 1990.
- [133] Shan Li, Moon-Chuen Lee, and Donald Adjeroh. Effective invariant features for shape-based image retrieval. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 56(7):729–740, May 2005.

- [134] G. Zhang, Z. Ma, L. Niu, and C. Zhang. Modified Fourier descriptor for shape feature extraction. *Journal of Central South University of Technology*, 19(2):488–495, 2012.
- [135] Maruti Agarwal, Vikram Venkatraghavan, Chandan Chakraborty, and Ajoy K. Ray. A mirror reflection and aspect ratio invariant approach to object recognition using Fourier descriptor. *Applied Soft Computing*, 11(5):3910–3915, July 2011.
- [136] Akrem El-ghazal, Otman Basir, and S. Belkasim. A Context-Based Fusion Algorithm for Shape Retrieval. In *Information Fusion, 2008 11th International Conference on*, number 2, pages 1–8. IEEE, 2008.
- [137] George Eichmann, Chao Lu, Mariusz Jankowski, and Richard Tolimieri. Shape representation by Gabor expansion. In *Proc. SPIE 1297, Hybrid Image and Signal Processing II*, volume 86, 1990.
- [138] Atul Sajjanhar, Guojun Lu, and Dengsheng Zhang. Spherical harmonics descriptor for 2D-image retrieval. In *Multimedia and Expo, 2005. ICME 2005. IEEE International Conference on*, pages 105–108. IEEE, 2005.
- [139] Henning Müller, Wolfgang Müller, David McG. Squire, Stéphane Marchand-Maillet, and Thierry Pun. Performance evaluation in content-based image retrieval: overview and proposals. *Pattern Recognition Letters*, 22(5):593–601, April 2001.
- [140] L.J. Latecki, R. Lakamper, and T. Eckhardt. Shape descriptors for non-rigid shapes with a single closed contour. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2000. Proceedings. IEEE Conference on*, volume 1, pages 424–429. IEEE, 2000.
- [141] Alberto Del Bimbo. Visual information retrieval. 1999.
- [142] Julia Vogel and Bernt Schiele. Performance evaluation and optimization for content-based image retrieval. *Pattern Recognition*, 39(5):897–909, May 2006.