

Primjena termovizijskih sustava za nadzor granice, štićenih objekata i prostora

Mate Krišto

RH MUP

matekrishto@gmail.com

Sažetak - Osnovni cilj ovog rada je prikaz postojećih metoda u području primjene infracrvene termovizije u području detekcije osoba. Infracrvena termovizija ima određene prednosti u odnosu na standardno optičko snimanje nadziranih područja, a to je u prvom robusnost na vremenske uvjete, kao i razdoblja dana. Prezentirani su postupci koji daju dobre rezultate detekcije osoba, kao i kraći pregled određenih implementacija u smislu upotrebe infracrvenih termovizijskih kamera na vozilima bez posade i bespilotnim letjelicama. Pored navedenog, opisane su pojedine tehnike i metode detekcije lica i identifikacije osoba temeljem termograma. Također su kraće opisane mogućnosti primjene termovizijskih sustava u nadzoru državne granice, ali i drugih štićenih prostora i objekata s obzirom da su opisane metode generalno primjenjive.

Ključne riječi - infracrvena termovizija, detekcija osoba, detekcija lica, identifikacija osoba, nadzor prostora, nadzor granice, nadzor objekata

I. UVOD

Sigurnost i zaštita predstavljaju možda i najvažnije stavke u suvremenom svijetu u gotovo svakom segmentu ljudskog rada i života. Pitanje sigurnosti i zaštite, poseban značaj imaju kada je u pitanju sigurnost državnih granica te drugih objekata i prostora koji predstavljaju poseban nacionalni interes. Upravo zbog toga se kontinuirano razvija tehnologija, tehnike i metode za provedbu mjera sigurnosti posebice ukoliko je riječ o sigurnosti na državnoj razini. Svaka država nastoji primjenom različitih sigurnosnih mjera i tehnika povećati razine sigurnosti kako svih građana, tako i granice te štićenih područja i objekata koji predstavljaju značaj za državu i njezine građane. U tom kontekstu, razvijaju se metode i tehnike (i načini njihove implementacije) koje omogućavaju lakšu i pravovremenu detekciju mogućih prijetnji, posebice ukoliko se govori o nedozvoljenom i nezakonitom prelasku državne granice, ali i pristupu pojedinim objektima koji predstavljaju nacionalni značaj. U tom kontekstu RH važnim drži suradnju i usklađivanje politike i praktičnog djelovanja u borbi za suzbijanje tzv. asimetričnih sigurnosnih izazova, rizika i prijetnji – terorizma, organiziranog kriminala, ilegalnih migracija i trgovine ljudima, osobito ženama i djecom. Osobito značenje ima učinkoviti nadzor državnih granica [1].

S obzirom na navedeno, u ovom radu će biti riječi upravo o mogućnostima i načinima korištenja termovizijskih sustava, kao senzora računalnog vida, u nadzoru državne granice, ali i drugih štićenih prostora i objekata. Također treba istaknuti da će biti riječi kako o detekciji statičnih objekata (ukoliko je riječ o pretrazi teretnih vozila i sl.), tako i o detekciji, raspoznavanju i identifikaciji mobilnih objekata (ako je riječ o osobama koje pokušavaju nezakonito prijeći državnu granicu - pješice, u odgovarajućem vozilu ili plovilu).

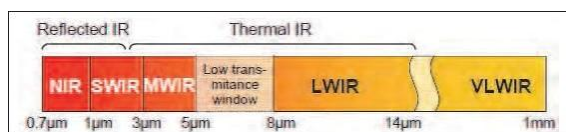
Rad je strukturiran tako da je u II. opisana osnova funkcioniranja infracrvene termovizije, u III. je dan pregled područja i istraživanja koja obrađuju domenu primjene termovizije u području nadzora prostora, odnosno detekcije osoba, dok su u IV. opisane mogućnosti prepoznavanja lica i identifikacije osoba na infracrvenim termovizijskim snimkama.

II. OSNOVE INFRACRVENE TERMOVIZIJE

Upotreba termovizijskih sustava nije novost s obzirom da se termovizijske kamere već naširoko primjenjuju u različitim područjima od već spomenute sigurnosti i nadzora prostora i objekata do medicinske dijagnostike i detekcije različitih anomalija u arhitekturi, građevinarstvu, zgradarstvu, strojarstvu i sl. Termovizijska kamera, odnosno infracrveni termo senzori su tipovi senzora posebno dizajnirani u cilju detekcije infracrvenog zračenja različitih valnih duljina. Infracrveno zračenje omogućuje snimanje objekata ovisno o njihovoj reflektivnosti ili emitivnosti zračenja ovog spektra. S tim u svezi je bitno istaknuti da je emisija infracrvenog zračenja proporcionalna razini zagrijanosti promatranog objekta zbog čega se snimanje u ovom spektru zračenja još naziva i termalno snimanje [2], a dobivena snimka zove se termogram. Značaj primjene termovizijskih sustava u nadzoru državne granice je i u činjenici da suvremene termovizijske kamere imaju izuzetno veliku pouzdanost i domet u kontekstu detekcije osoba. Tako pojedini sustavi imaju mogućnost detekcije osoba na udaljenostima i do 20 km, a vozila i preko 20 km neovisno o atmosferskim uvjetima. Primjena je posebno pogodna tijekom hladnijeg dijela godine kada je temperaturna razlika između okoliša i promatranog objekta još

izraženija. U svezi s rečenim potrebno je naglasiti da su mogućnosti detekcije na velikim udaljenostima isključivo vezane za detekciju termalne siluete osobe, dok je mogućnost primjene u raspoznavanju lica i eventualne identifikacije osobe svedena na udaljenosti do nekoliko desetaka metara [3].

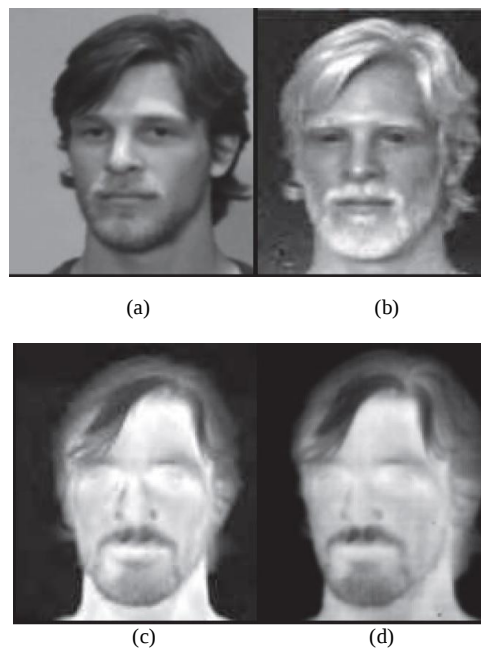
Infracrveni spektar (*eng. infrared - IR*) elektromagnetnog zračenja nije vidljiv ljudskom oku s obzirom da ima veću valnu duljinu, a samim tim i manju frekvenciju. Infracrveni spektar pokriva područje valnih duljina od $0,7$ do $300\ \mu\text{m}$, što odgovara frekvenzijskom pojasu od 1 do $430\ \text{THz}$, zbog čega je valna duljina veća od spektra vidljivog svjetla, a kraća od terahercih valnih duljina mikrovalova [4]. Infracrveni se primarno dijeli u tri podpodručja: IR-A u rasponu od $0,7$ do $1,4\ \mu\text{m}$, IR-B u rasponu od $1,4$ do $3\ \mu\text{m}$ te IR-C u rasponu od 3 do $1000\ \mu\text{m}$. Pored navedenog, spektar infracrvenog zračenja može se podijeliti i prema sljedećoj skali: područje blizu infracrvenog spektra (*eng. near-infrared - NIR*) u rasponu od $0,7$ do $1\ \mu\text{m}$, kratkovalno infracrveno zračenje (*eng. short-wave infrared - SWIR*) u rasponu od 1 do $3\ \mu\text{m}$; srednjevalno infracrveno zračenje (*eng. mid-wave infrared - MWIR*) u rasponu od 3 do $5\ \mu\text{m}$, dugovalno infracrveno zračenje (*eng. long-wave infrared - LWIR*) u rasponu od 8 do $14\ \mu\text{m}$ i vrlo dugovalno infracrveno zračenje (*eng. very long-wave infrared - VLWIR*) u rasponu većem od $14\ \mu\text{m}$ (slika 1. i slika 2.). U tom kontekstu autori ističu da se područje NWIR i SWIR ponekad naziva kao "reflektirano infracrveno zračenje" dok se područja MWIR i LWIR nazivaju "termalno infracrveno zračenje", za koje nije potreban dodatni izvor osvjetljenja odnosno toplinske energije, nego ga senzori mogu očitati potpuno pasivno i na taj način dobiti sliku iz okoliša isključivo očitavanjem emisije toplinske energije promatranog objekta.



Slika 1. Grafički prikaz područja infracrvenog spektra (IR)

Najrašireniji sustavi u upotrebi su tzv. FLIR (*eng. Forward Looking Infrared*) koji se temelji upravo na MWIR i LWIR valnim duljinama infracrvenog zračenja (slike 1 do 4 prikazuju vidljivost lica u različitim spektrima elektromagnetnog zračenja). Svakako treba naglasiti da je, u pravilu, riječ o video kamerama koje sustavu za obradu signala i detekciju osoba šalju kontinuirani video signal što zahtijeva dodatne korake u obradi ulaznog signala i u tom slučaju se govori o detekciji u realnom vremenu, odnosno *online* obradi i detekciji. Takvi rezultati imaju najveću vrijednost s obzirom da omogućuju pravovremenu reakciju. Pored *online* sustava, primjenjuju se i *offline* sustavi koji ulazni

video signal spremaju, a tek nakon završetka razdoblja snimanja slijedi obrada snimljenog materijala u cilju detekcije osoba. Iako rezultati ovakvih sustava imaju manju informacijsku vrijednost u nadzoru državne granice i štićenih prostora, svoju primjenu imaju u drugim područjima kada nije nužno izvještavanje u realnom vremenu o detekciji osoba u nadziranom području [4].



Slika 2. Snimka lica u vidljivom - VIS (a), kratkovalnom - SWIR (b), srednjevalnom - MWIR (c) i vrlo dugovalnom dijelu spektra - LWIR (d)

III. DETEKCIJA OSOBA UPOTREBOM TERMOVIZIJSKIH SUSTAVA

U kontekstu primjene termovizijskih sustava u nadzoru štićenih prostora, odnosno područja, autori [5] opisuju primjenu sustava koji se temelji na kombinaciji više različitih senzorskih ulaza. Naime, spomenuti autori prezentiraju sustav koji koristi kombinaciju radarskog sustava (uz upotrebu radara milimetarske valne duljine koji je objekte snimao s udaljenosti od $780\ \text{m}$), pasivne infracrvene termovizijske kamere (snimanje s udaljenosti od $480\ \text{m}$) te standardne optičke kamere koja pokriva vizualni dio svjetlosnog spektra (snimanje s udaljenosti od $760\ \text{m}$), kao ulaznih senzora za akviziciju slike. Autori ističu da ovakvi sustavi povećavaju vjerojatnost detekcije uljeza u štićenom području. U kontekstu termovizijske kamere, kao jednog od ulaznih senzora, istaknuto je da je ulaznu sliku nužno pretprocesirati upotrebom standardnih tehnika obrade digitalne slike kao što su detekcija objekata, detekcija ruba, detekcija i raspoznavanje boja, tekstura i sl. [2], [6], [7]. Uz navedeno, obrada termograma ima neke specifičnosti u odnosu na obradu standardnih slika snimljenih u vidljivom

spektru. Naime, autori [5] navode da su infracrvene termovizijske snimke binarizirane u smislu da su unaprijed postavljeni detekcijski pragovi temeljem kojih se, upotrebom maski, mogu definirati objekti različite razine emitiranja infracrvenog zračenja. Maske se kreiraju prema razinama osvijetljenosti (odnosno razinama bijele boje) pojedinih segmenata slike koji imaju vrijednost iznad postavljenog praga, dok se svim ostalim segmentima dodjeljuju niže razine osvijetljenosti (prema crnoj boji) i imaju vrijednost ispod postavljenog praga zbog čega ih sustav označava kao pozadinu.

Nadalje, autori [8] također opisuju kombinirani autonomni sustav nadzora i detekcije osoba (i vozila) upotrebom optičke i termalne snimke. Autori predlažu dvofazni automatski pristup detekciji osoba i vozila s vremenskim filtriranjem. U takvom pristupu primarno se detektiraju početni segmenti unutar scena koje bi mogle sadržavati objekte, nakon čega slijedi ekstrakcija značajki iz izoliranih segmenata temeljem kojih se provodi sekundarna klasifikacija osoba/vozilo. Naime, kako bi se postigla učinkovita detekcija u realnom vremenu, unutar početnih segmenata scene, izoliraju se područja koja moguće sadržavaju objekte, a potom kroz ekstrakciju značajki i klasifikaciju iz odabranih područja moguće je postići obradu u realnom vremenu. Dodatnim iskorištavanjem stacionarnog položaja postavljenog senzorskog sustava navedeno se može postići korištenjem adaptivnog pozadinskog modela temeljenog na tzv. Miješanom Gaussu (*eng. Mixture of Gaussian* - MoG) [8]. Ovaj pristup omogućuje da svaki piksel bude obrađen kao skup Gaussovih distribucija (koji se uobičajeno naziva Gaussov miješani model - MoG), a omogućuje istovremeni zahvat promjena u kretanju ali i šuma svakog piksela svake slike zahvaćene kroz određeni vremenski period. U konačnici, ovaj model omogućuje da se zahvatom svake nove slike stanje prilagodljivo ažurira na način da ocjenjuje svaki piksel s ciljem ocjene da li pripada prednjim (pikselima objekta) ili pozadinskim pikselima koji se odbacuju. Cijeli proces modeliranja se odvija "u pozadini sustava" što omogućuje automatsku identifikaciju prednjih (objektnih) segmenata svake slike koja dolazi iz ulaznog video signala zbog čega je moguće provesti efektivnu ekstrakciju značajki i klasifikaciju svakog novog objekta koji se pojavljuje na sceni, ali i objekata koji se pojavljuju na sceni i ostaju nepomični nakon pojavljivanja (npr. osoba koja se skriva). Nadalje, autori navode da je upotrebom ovog modela i primjenom odabranih klasifikatora (kao što su SVM, Bayesovi klasifikatori, umjetne neuronske mreže, KNN) [9], [10], moguće provoditi klasifikaciju objekata uz pomoć *offline* učenja klasifikatora i izravne *online* primjene na ulaznim snimkama. U navedenom radu [8] autori su kao klasifikatore u zadnjoj fazi identifikacije opisali korištenje SVM-a [11] i

Decision Forest (DF) [12] algoritama. Autori proveli neovisno učenje sustava za primjere raspoznavanja automobila i osoba, kao i za svaki tip slike (optička i termalna), uz primjenu dodatnih klasifikatora za razvrstavanje potkategorija (civil/vojnici). U istom radu [8], autori su poseban naglasak stavili i na vremensko filtriranje u smislu visoke frekvencije ulaznih slika u sustav u odnosu na moguću učestalost pojave osoba na snimkama. Naime, u eksperimentu su koristili kameru koja snima 25 sličica u sekundi, a samim tim je razvidno da određen broj zahvaćenih slika ne sadrži objekt pa ih treba odbaciti. Odbacivanjem piksela pozadine, sustavu za obradu ostaju isključivo slike na kojima su detektirani pikseli objekata (pikseli većeg intenziteta osvjjetljenja, odnosno samo slike koje sadrže osobu i koje su pogodne za daljnju obradu i klasifikaciju). Zahvaćene slike će u procesu obrade biti grupirane u vremenske grupe što zapravo čini tek manji dio ukupnog broja slika i manji dio vremenskog odsječka u odnosu na cijelo razdoblje provođenja nadzora (snimanja). U tom smislu, za pokretne objekte (slično je i za statičke objekte) promjena skale, perspektive u promatranju objekta kao i razine prisutnosti šuma, može značajno utjecati na distribuciju ekstrahiranih značajki iz bilo kojeg segmenta slike koji moguće sadrži objekt. Ove varijacije u velikoj mjeri mogu biti sustavne, u smislu promjena s obzirom na skalu i perspektivu promatranja, ali u jednom dijelu mogu biti i nasumične s obzirom na razinu prisutnog šuma, a samim tim mogu imati i određen utjecaj na detekciju i identifikaciju objekta na selektiranim slikama. Zaključno su u radu [8] istaknuli da je utjecaj jednostavnog vremenskog filtriranja na izvještavanje o detekciji objekta, s obzirom na upotrijebljene senzore, izuzetno značajan. Naime, naglašeno je da se na taj način smanjuje broj ponovljenih izvještaja o detekciji objekata (s obzirom da sustav, u jednom prolazu, analizira sve slike iz vremenskog odsječka video signala na kojima se moguće nalazi objekt kao jedan uzorak), ovakav pristup u konačnici dovodi i do smanjenja broja lažno pozitivnih detekcija. Također je istaknuto da ovakav pristup u velikoj mjeri postavlja okvir za daljnja istraživanja i integraciju multi-modalnih sustava za detekciju objekata te izvještavanje korisnika u post-klasifikacijskoj fazi. Daljnje mogućnosti razvoja su otvorene posebice u kontekstu robusnosti korištenih senzora kao i u području kombiniranja različitih tipova senzora u cilju nesmetanog i kontinuiranog rada sustava koji će biti funkcionalan čak i u slučaju da jedan od korištenih senzora zakaže [8].

Nadalje, u području nadzora širokih prostora s ciljem detekcije osoba i vozila, u [13] je također opisan kombinirani sustav nadzora temeljen na optičkim i termalnim snimkama, a dodatno je kombiniran s radarskim signalom. U spomenutom radu opisana je primjena kombiniranog sustava

instaliranog na vozilima bez posade (*eng. Unmanned ground vehicle - UGV*) i bespilotnim letjelicama (*eng. Unmanned aerial vehicle - UAV*). Naglasak spomenutog rada je na automatskoj obradi, fuziji ulaznih signala te izvještavanju o rezultatima nadzora u klasama osoba/vozilo. Šire o korištenim platformama (UGV i UAV) navedeno je u [13] s detaljnim opisima tehnoloških mogućnosti vozila i instalirane opreme na tim platformama. Fokus spomenutog rada stavljen je na automatsku obradu, detekciju i interpretaciju snimki. Glede uporabe UGV-a, autori navode da je automatizirana detekcija temeljena na dvofaznom sustavu koji se u prvoj fazi oslanja na brzu lokalizaciju područja koje može sadržavati objekt upotrebom Haarova kaskadnog klasifikatora [14] dok se druga faza odnosi na potvrdu prisutnosti objekta upotrebom SVM-a [11]. Sustav opisan u [13] tijekom prve faze, upotrebom Haarova kaskadnog klasifikatora, objekte identificira u pojedinim segmentima ulazne slike. Koncept je zamišljen na način da koristi više povezanih slabih klasifikatora za stvaranje jakog klasifikatora, te u spomenutom radu autori navode primjer upotrebe kaskade ojačanih klasifikatora (*eng. boosted classifiers*) korištenjem Haarovih značajki [14]. Haarove značajke se dobivaju iz prostornog odziva Haarovih baznih funkcija i njezinih derivacija, a u praksi se izračunavaju kao zbroj razlika između varirajućih pravokutnih lokaliziranih podpodručja koja se, iako ograničena na pojedinačne značajke, mogu izuzetno učinkovito izračunati (oslanjajući se samo na cjelobrojnu matematiku). Pojedinačno, ovakve značajke su slabi diskriminativni klasifikatori, međutim kada se povežu u kaskadu dobije se snažan diskriminativni klasifikator koji se temelji na izračunu razlika u osvjetljenosti i boji [13]. Autori nadalje ističu da dobiveni klasifikator uči korištenjem AdaBoost algoritma [15] kako bi se odabrao maksimalni diskriminativni podskup Haarovih značajki iz opširnog cijelog skupa značajki. Konačni Haarov kaskadni klasifikator sastoji se od niza ključnih slabih klasifikatora. Spomenuti jednostavni klasifikatori zapravo predstavljaju degenerativno stablo odlučivanja koje Haarove značajke uzima kao ulaz za slabe klasifikatore i vraća odgovor prolaz/odbacivanje. Odabrani segment slike mora dati pozitivan odgovor svim klasifikatorima u kaskadi kako bi bio klasificiran kao instanca objekta na kojoj se uči jaki klasifikator. Klasifikator može biti testiran na ulaznoj slici na temelju nekoliko razina i položaja upotrebom kliznog potražnog prozora. Priroda kaskada, koje su posložene prema najizraženijoj diskriminativnoj značajki, omogućuje rano odbacivanje većine rezultata potražnih prozora temeljem minimalnog podskupa značajki koji se koristi za evaluaciju kaskade. U konačnici Haarov kaskadni klasifikator uspješno kombinira više klasifikatora te već u početku odbacuje negativne segmente slike i

fokusira se na segmente koji imaju potencijal, što svakako štedi resurse i vrijeme [13]. Isti autori navode da sustav u drugoj fazi traži potvrdu prisutnosti objekta što se temelji na upotrebi SVM-a kao klasifikatora. Testiranje opisanog sustava za detekciju osoba i vozila, autori su proveli na prethodno ručno označenim primjerima za učenje, pri čemu su za detekciju osoba koristili skup od oko 2000 pozitivnih primjera (koji prikazuju osobe) i skup s oko 11000 primjera koji ne prikazuju osobe. Skup negativnih primjera je korišten za stvaranje dodatnih 2000 negativnih primjera za testiranje svake kaskade Haarova klasifikatora dok je cijeli kreirani skup korišten za treniranje SVM-a za čije učenje je dodano još oko 2400 negativnih primjera. Testiranja su provedena u optičkom i termalnom području spektra, no u ovom radu ćemo se baviti isključivo rezultatima testiranja termalnog spektra. S tim u svezi su autori kreirali dodatni dvofazni par klasifikatora samo za gornji dio torza osoba kako bi se olakšala detekcija u slučajevima kada je dio tijela skriven. Na korištenim termalnim slikama osobe su prikazane u različitim okolišnim i vremenskim uvjetima kao i u različitim položajima tijela. Detekciju osoba testirali su u urbanim uvjetima, odnosno detekcija osoba je provedena u odnosu na zgradu i otvore (prozori, vrata) na zgradi. Prije postupka detekcije osoba, na optičkoj slici je provedena detekcija otvora na zgradi upotrebom detekcije rubova, a potom su ravne linije ekstrahirane primjenom PCA metode. Detekcija toplinskog traga osoba u detektiranim otvorima zgrade dobivena je korištenjem prosječne vrijednosti piksela koja je postavljena kao prag, s tim da je prethodno određena podregija termalne slike koja dimenzijom odgovara dimenzijama bilo kojeg otvora na zgradi te skalirana na dimenzije 50 x 50 piksela. Iz ovako dimenzioniranog područja ekstrahiran je svojstveni vektor koji pokriva oblik distribucije termalnog traga u otvoru zgrade i omjer otvora prije skaliranja. Svojstveni vektor je konstruiran ulančavanjem vertikalnih i horizontalnih projekcija histograma skalirane slike s postavljenim pragom i omjerom za svaki otvor. Dobiveni svojstveni vektor stvara ulazni skup za četveroklasnu neuronsku mrežu (cijelo tijelo, pola tijela, prazan otvor, nije osoba) te provodi detekciju da li je vidljiva cijela osoba, pola osobe a ignorira otvore na kojima nema osoba ili nije riječ o osobi. U kontekstu detekcije osoba korištenjem termovizijske kamere postavljene na bespilotnu letjelicu, također je korišten ranije opisani postupak s razlikom što je u drugoj fazi za potvrdu detekcije termalnih obrisa osobe korišten multivarijantni Gaussov detektor oblika [13]. U navedenom radu autori su opisali i postupak utvrđivanja lokacije i mjerenja udaljenosti osobe od senzora. Nakon provedenih eksperimenata i dobivenih rezultata, autori navedenog rada su zaključili da opisani sustav, odnosno predložene tehnike za izgradnju

autonomnog sustava za detekciju osoba daju dobar i pouzdan rezultat u rasponu *od 90 do 100%* s pogreškom u procjeni udaljenosti *od ± 5 m* [13].

Detekcija osoba upotrebom infracrvene termovizije opisana je i u [16], gdje autori opisuju sustav detekcije pješaka u neurbanim područjima, odnosno izvan gradskih zona. Ideju su i implementirali u jednostavan sustav baziran na termovizijskoj kameri, prijenosnom računalu i jeftinom mikrokontroleru uz aplikacijsku potporu razvijenu u Matlabu. Cilj im je bio dostići prepoznavanje osoba skoro pa u realnom vremenu, što se donekle podudara i s temom buduće disertacije. Naime, autori [16] su opisali sustav koji je okvirno temeljen na tri faze. Prva faza je pretprocesiranje kako bi se detektirala mjesta viših temperatura upotrebom metode izjednačavanja histograma i segmentacije slike određivanjem odgovarajućeg praga (*eng. threshold*). Tehnika određivanja praga se uobičajeno koristi da bi se razdvojili promatrani objekti od pozadine temeljem razlike u intenzitetu osvjjetljenja objekta i pozadine. Jednostavniji pristup temelji se na određivanju jednog praga intenziteta binarizacijom originalne slike. Druga faza obuhvaća provedbu morfoloških operacija kako bi se uklonio pozadinski šum sa slike. U spomenutom radu korištene su kombinirane tehnike erozije i dilatacije koje su uspješno uklonile većinu šuma sa slike, a primjenom ovih tehnika uspješno su detektirana i područja interesa na slikama. Treća faza je odabir odgovarajućih značajki ljudskog tijela upotrebom različitih metričkih mjera kao što su omjeri ograničenja, filtri lokalnog histograma i/ili podudaranje morfološkog modela osobe. U navedenom radu [16] u ovoj fazi su, za detekciju osobe, koristili visinu i širinu te su na taj način automatski uklonili sve ne-ljudske objekte na slici. Rezultati provedenih testiranja dali su točnost detekcije *90% uz 10 %* lažnih detekcija, što su autori okarakterizirali kao dobar rezultat s obzirom na opremu korištenu u testiranju te algoritamsku podršku. Kao glavne prednosti, autori su istaknuli mogućnost primjene platforme razvijene u Matlabu i korištenje jednostavnog mikrokontrolera što omogućuje uspješnu provedbu svih koraka u smislu *online* i *offline* obrade podataka, formatiranja, detekcije slika i izračuna razlika te jednostavnost u korištenju, fleksibilnost i efikasnost. Kao nedostatak su istaknuli slabost njihova algoritma za izvođenje analize složenijih slika te nemogućnost istovremene detekcije više osoba s obzirom da je prag postavljen samo za jednu osobu. Veliki nedostatak sustava je i nemogućnost detekcije osoba u različitim položajima (ležanje, pogrbljenost, čučanje i sl.) [16]. U svezi navedenog rada, mišljenja sam da je opisani sustav na dobrom tragu glede detekcije osoba u područjima kao što su šume ili planinska područja posebice zbog svoje jednostavnosti, a samim tim i ekonomske isplativosti s obzirom da je prikazano kako je

termovizijski sustav za detekciju osoba moguće izgraditi korištenjem prilično jednostavnih tehnika i jeftinih komponenti. Također je izuzetno značajno da sustav unatoč svojoj jednostavnosti ima visoki postotak detekcije. Nedostatak je, kao što su i sami autori naveli, nemogućnost istovremene detekcije više osoba, što je moguće postići primjenom naprednijih klasifikacijskih algoritama, a upitno ostaje i koliko sustav baziran na komponentama ovog tipa može biti dugotrajno pouzdan, s obzirom da nadzor državne granice i drugih štićenih prostora zahtijeva visoku pouzdanost tijekom neprestanog dugotrajnog korištenja.

Pristup detekciji osoba upotrebom termovizijskih video sustava niske rezolucije opisan je u [17], gdje autori opisuju sustav detekcije osoba upotrebom skupa značajki temeljenih na rekurzivnom modelu "zakrpa" (*eng. recursive model patches*). Ekstrakcija značajki temeljena je na orijentaciji histograma rubova bez stvaranja guste rešetke. Osnovna premisa skupa značajki je ekstrahirati podatke o gradijentu i prikazati ih kao integralnu sliku za brzo računanje razlika između "zakrpa". Jedan skup "zakrpa" je definiran kao relativna pozicija u potražnom prozoru, dok se isti skup "zakrpa" primjenjuje na prinos više lokalnih deskriptora. Detalji o detekciji i varijacijama pojavnosti osobe pojavljuju se računanjem omjera histograma između različitih "zakrpa", nakon čega je linearni SVM naučen na termogramima osoba. U prvoj fazi, slika je konvertirana u crno bijelu (ukoliko ulazna slika nije crno bijela), a nakon toga slijedi računanje gradijenta ruba za svaki piksel koji se sastoji od gradijenta skale i orijentacije. Potom slijedi konstrukcija 3D slike na način da svaki djelić 3D slike predstavlja jednu orijentacijsku "kantu" označenu kao integralna slika, odnosno zbroj piksela. Ovakva reprezentacija omogućuje brzu ekstrakciju značajki histograma gradijenta podprozora ulazne slike bilo kojih dimenzija korištenjem stalnog pristupa integralnoj slici. Za svaki potražni prozor, računa se skup modela lokacija "zakrpa", a odgovarajući vektor histograma izračunava se iz dobivene 3D slike. Omjer između histograma svakog skupa modela "zakrpa" postaje svojstveni vektor. Ulančane svojstvene vektore svih skupova iz modela "zakrpa" unutar potražnog prozora, linearni SVM klasificira kao osoba/ne-osoba [17]. U istom radu autori su istaknuli da je za izračun svojstvenih vektora potrebno proći nekoliko koraka, a prvi je detekcija ruba za koju su predložili upotrebu konvolucijskih okomitih i vodoravnih Sobelovih maski [18] koje se uobičajeno koriste kod detekcije objekata. Mišljenja sam da bi primjena drugog modela za detekciju ruba dala jednako dobre rezultate, primjerice Canny detektora ruba [19] koji je jedan od najčešće korištenih detektora ruba za što bi trebalo provesti odgovarajuća mjerenja i usporedbe s predloženim Sobelovim maskama. Zaključno je u navedenom

radu [17] istaknuto da je primjena opisanih modela - upotreba gradijenta histograma za konstrukciju 3D slike, kao i modela histogramskih omjera, rekurzivnih modela za izračun svojstvenih vektora te upotreba linearnog SVM-a kao klasifikatora daje dobre rezultate u području detekcije osoba na infracrvenom termovizijskom videu niske rezolucije. Unatoč tomu, riječ je o području koje još uvijek ostavlja široku lepezu mogućnosti za buduća istraživanja.

IV. DETEKCIJA I RASPOZNAVANJE LICA NA IR TERMovIZIJSKIM SNIMKAMA

Pored ranije opisane detekcije osoba još jedno obećavajuće područje primjene infracrvene termovizije u području sigurnosti, odnosno nadzora štićenih objekata je prepoznavanje lica na termovizijskim snimkama i eventualna identifikacija osoba temeljem termograma lica. Glede detekcije i raspoznavanja lica na termovizijskim snimkama uočljiva je određena prednost u odnosu na standardne optičke slike, a to je neosjetljivost na razine i uvjete osvjetljenja. Naime, standardni foto i video senzori sliku bilježe temeljem refleksije vidljivog dijela spektra od snimanih objekata. S druge strane, infracrvena termovizija koristi infracrveno područje spektra i ovisno o količini zračenja detektira objekte, u ovom slučaju ljudsko tijelo, odnosno lice. S tim u svezi treba istaknuti da infracrveni termovizijski senzori imaju mogućnost snimanja strukture krvnih žila i tkiva na licu što se može dodatno iskoristiti u području detekcije lica i identifikacije osoba [20]. Nadalje, u [21] je navedeno da je struktura krvnih žila i tkiva lica jedinstvena za svaku osobu, poput otiska prsta, odnosno traga papilarnih linija. Međutim, da bi struktura krvnih žila i tkiva bila vidljiva na termogramu, snimke moraju biti visoke rezolucije. U navedenom radu za eksperiment su korištene snimke rezolucije 160×120 piksela na kojima je struktura bila tek umjereno vidljiva. No unatoč tome, rezultati eksperimenta su dali izuzetno dobre rezultate u području prepoznavanja lica - 96% za en face slike, 96% za poluprofilne slike (pogled na lice pod kutom od 45°) i 100% za profilne slike. Nadalje, u [20] autori ističu cijeli niz nedostataka glede upotrebe termograma za prepoznavanje lica. Naime, iako je infracrvena termovizija robusna na široki spektar utjecaja na snimanje jer je fokus na hvatanju toplinskog zračenja promatrane osobe, značajni nedostaci leže u ekonomskoj isplativosti zbog visoke cijene termovizijskih sustava (što ne mora biti nužno s obzirom da je u [17] prikazan primjer jednog vrlo jeftinog termovizijskog sustava za detekciju osoba), zatim kao druge vrste problema autori [20] navode nisku rezoluciju termalnih senzora i visoki šum u snimljenim fotografijama (iako su prethodno opisane pojedine tehnika koje uspješno rješavaju problem šuma), a dodatni problem predstavlja i

visoka osjetljivost termovizijskih kamera na staklo (ili naočale) s obzirom da staklo predstavlja prepreku za snimanje termograma visoke rezolucije. Kao jedan od značajnijih problema pri detekciji lica i eventualnoj identifikaciji osoba, isti autori su istaknuli visok stupanj utjecaja emotivnog i zdravstvenog stanja snimane osobe na rezultate termograma. Naime, ovo je možda i jedan od najznačajnijih problema termovizijskog snimanja osoba u cilju identifikacije temeljem termograma s obzirom da različita emotivna i zdravstvena stanja u velikoj mjeri utječu na tjelesnu temperaturu zbog čega je te probleme jako teško i zahtjevno računalno ukloniti. Rješenja spomenutih nedostataka termograma lica moguće je pronaći u kombiniranju tehnika infracrvenog termovizijskog snimanja sa optičkim snimanjem osoba s obzirom da navedene tehnike bilježe potpuno različite karakteristike lica [22]. U navedenom radu [22] predložen je pristup koji se temelji na istovremenom snimanju optičke i termovizijske slike te njihovog kasnijeg spajanja kako bi se dobio maksimum karakteristika s obje slike. Autori su opisali dva pristupa, jedan je temeljen na analizi piksela (*eng. pixel-based*) a drugi na ekstrakciji značajki (*eng. feature-based*). Za izračun optimalne granice spajanja dobivenih snimki autori su predložili upotrebu genetskih algoritama (GA). Autori su također proveli opširno istraživanje na dostupnim bazama podataka, a rezultati su pokazali da je pristup temeljen na analizi piksela dao bolje rezultate nego pristup temeljen na izračunu svojstvenih značajki, iako je ovaj pristup računalno zahtjevniji. Pristup detekciji lica na termogramima u svom radu su opisali i autori [23] koji su usporedno provodili analizu na termalnim i optičkim slikama s jednom posebnosti. Naime, navedeni autori su, za potrebe provođenja pokusa, razvili poseban senzor koji ima mogućnost istovremenog snimanja optičke i termalne snimke (CCD i LWIR mikrobolometar). Dobivene snimke imaju poseban značaj s obzirom da prikazuju identičnu snimku u dva različita područja spektra, što nije slučaj kod ranije opisanih tehnika gdje su u pravilu korištene snimke snimane odvojeno. Detekciju lica na dobivenim snimkama testirali su upotrebom dva algoritma - metodom svojstvenih lica (*eigenface*) i korištenjem ARENA algoritma koji je nešto jednostavniji od metode svojstvenih lica i opisuje ga kao algoritam s jednim najbližim susjedom (1-NN). ARENA algoritam najprije reducira dimenzionalnost slika pikselizacijom na vrlo grubu rezoluciju zamjenom svakog piksela odgovarajućom srednjom vrijednosti sive nijanse na kvadratu susjednih piksela. Testne slike su snimljene pod različitim uvjetima osvjetljenja s tim da je za svaku postavku osvjetljenja osoba mijenjala nekoliko izraza lica. Rezultati su pokazali da oba testirana algoritma daju lošiji rezultat na optičkim slikama kada se mijenjaju postavke

osvjetljenja (dok kod termograma osvjetljenje nije imalo utjecaj), međutim kod termograma su se pojavili problemi kada je osoba nosila naočale, iako se i taj problem uspješno riješio upotrebom metode svojstvenih lica s obzirom da je smanjen utjecaj područja oko očiju na ukupni rezultat. U konačnici, bolji rezultati su postignuti upotrebom termograma nego optičke slike i uz upotrebu metode svojstvenih lica u odnosu na ARENA algoritam [23].

Automatizirana identifikacija osoba temeljem termograma lica, odnosno slike strukture krvnih žila lica opisana je u [24]. U navedenom radu prezentirana su najnovija postignuća iz područja identifikacije osoba upotrebom termograma. U radu je prezentiran novi pristup identifikaciji osoba temeljem strukture krvnih žila lica polazeći od pretpostavke da je ta struktura jedinstvena za svaku osobu. Opisana je primjena tri metode za dobivanje slike strukture krvnih žila lica iz termograma lica. Prva je rezanje slike na nekoliko slojevnih bit-ravnina (*eng. bit-plane slicing*) i transformacija oko medijalne osi, druga je morfološka erozija nijansi sive boje s transformacijom oko medijalne osi i treća je primjena Sobelovih operatora za ekstrakciju podataka o protoku krvi. Metoda rezanja slike na više slojevnih bit-ravnina je metoda kod koje je svaki piksel crno bijele slike prikazan u 8 bita što znači da je slika sastavljena od osam jedno-bitnih ravnina (1-bit) počevši od 0-bitne ravnine koja je najmanje značajna (*eng. Least significant bitplane*-LSB) do bit-ravnine 7 koja je najznačajnija ravnina (*eng. most significant bitplane* - MSB). Prednost ove metode je u tome što se dobije relativni značaj svakog bita u pikselu. Svakako treba naglasiti da samo četiri bit-ravnine višeg reda (4 do 7) sadrže većinu vizualno značajnih podataka, dok bit-ravnine nižeg reda sadrže manju količinu vizualno značajnih podataka s obzirom da su dobivene iz nižeg kontrasta. U konačnici, ova je metoda korištena za ekstrakciju termalnih fizioloških značajki lica iz crno bijele slike i stvaranje mape kontura područja s konstantnom ili stalnom temperaturom. Transformacija po medijalnoj osi se koristi za ekstrakciju linija koje povezuju sve točke jednake temperature s ciljem dobivanja slike strukture krvnih žila (slično primjeni izotermalnih linija koje povezuju područja jednakih temperatura na kartama vremenske prognoze) [23]. Druga korištena metoda je morfološka erozija nijansi sive boje, a također se koristi kako bi se ekstrahirale termalne fiziološke značajke lica i kreirala regija konstantnih ili jednakih temperatura, nakon čega se, kao i kod prethodne metode primjenjuje transformacija po medijalnoj osi kako bi se dobila slika strukture krvnih žila lica. Treća predložena metoda je primjena Sobelovih operatora za dobivanje slike strukture krvnih žila lica, a temelji se na detekciji diskontinuiteta na slici. U ovom slučaju, to su isprekidane promjene u intenzitetu piksela, a operator se sastoji od para 3 x 3 maski.

Maske su kreirane tako da odgovaraju maksimalnim diskontinuitetima u vrijednostima intenziteta, a kreću se okomito i vodoravno s obzirom na mrežu piksela s tim da se koristi po jedna maska za svaki smjer (jedna za okomito, jedna vodoravno kretanje). Maske se kombiniraju kako bi se pronašla maksimalna magnituda gradijenta na svakoj orijentacijskoj točki gradijenta. Nakon primjene neke od prezentiranih metoda slijedi ekstrakcija detaljnih (ključnih) točaka, odnosno minucija¹ koja se uobičajeno koristi kod identifikacije osoba otiskom prsta i tu je glavna sličnost identifikacije osoba pomoću strukture krvnih žila lica. Naime, struktura krvnih žila lica daje raspored sličan grebenima otiska prsta (kod otiska prsta analizira se struktura grebena na otisku) temeljem čega se dobije jedinstveni termalni otisak lica. Dodatnom obradom i ekstrakcijom svojstvenih vektora iz strukture minucija koje povezuju područja jednakih temperatura tako dobiveni vektori će imati različite duljine za svaku osobu te je za klasifikaciju svojstvenih vektora predložen višeslojni perceptron kojim je postignuta točnost prepoznavanja 95,24 %. U svezi navedenog treba istaknuti da je lice snimano termovizijskom kamerom iz neposredne blizine (s udaljenosti od oko 60 cm) kako bi se dobio maksimalno razlučiv termogram lica. Kao glavnu prednost ovog pristupa autori su istaknuli jednostavnost implementacije s tim da nije potrebno znanje o geometriji ili specifičnim značajkama lica, međutim nedostatak je nužnost snimanja lica iz neposredne blizine, primjenjivost sustava samo na en face s konstantnom pozadinom, s obzirom da se kod promjenjive pozadine mogu dobiti loši rezultati. [24]. Iako ovakav sustav zbog svojih ograničenja nije primjenjiv za identifikaciju osoba s većih udaljenosti, prema rezultatima koje su autori dobili testiranjem tri opisane metode izgledno je da može biti uspješno implementiran u kontekstu autentifikacije pristupa štićenim objektima.

Zaključno će biti prezentirani rezultati istraživanja u svezi problema koji se pojavljuju prilikom intra-spektralnog i inter-spektralnog snimanja za prepoznavanje lica u različitim uvjetima i s različitim udaljenosti snimanja [25]. U navedenom radu su istražene prednosti i nedostaci prepoznavanja lica na slikama koje su snimljene u različitim dijelovima infracrvenog spektra u odnosu na slike snimljene u vidljivom dijelu spektra u kontroliranim i nekontroliranim uvjetima. Infracrvene slike su snimane u vanjskom prostoru u noćnim uvjetima s udaljenosti od 30 do 120 m. Također je provedeno testiranje prepoznavanja

¹Minucije su identifikacijska obilježja papilarnih linija koje se koristi prilikom identifikacije osobe temeljem otiska prsta, gdje su osnovni oblici papilarnih linija luk, oblik zamke i oblik kruga (<http://hr.wikipedia.org/wiki/Daktiloskopija>, uvid 15.10.2013.god.)

između različitih udaljenosti s kojih su snimane slike, kao i odnosi između slika snimljenih u različitim spektrima te različitim udaljenostima. Usporedbe uspješnosti prepoznavanja lica su provedene između slika snimljenih u kratkovalnom infracrvenom spektru (SWIR) u odnosu na slike iz vidljivog dijela spektra, zatim između slika snimljenih u srednjevalnom infracrvenom spektru (MWIR vs. MWIR), kao i između slika snimljenih u MWIR spektru i vidljivom dijelu spektra u kontroliranim uvjetima te između slika snimljenih u dijelu spektra blizu infracrvenog područja (NIR) kao i između NIR slika i slika iz vidljivog dijela spektra s promjenom udaljenosti snimanja. Rezultati testiranja su pokazali da je inter-spektralno prepoznavanje lica na razini 100% između slika iz vidljivog dijela spektra i SWIR slika kada su sve slike iz baze podataka snimljene u kontroliranim uvjetima s udaljenosti od 30 m. Kada se radi o polukontroliranim uvjetima i snimanju s udaljenosti od 50 m, postotak prepoznavanja se smanjuje na 90%, a kada se udaljenost dodatno poveća (na 106 m) postotak prepoznavanja se smanjuje na 80%. U najzahtjevnijem scenariju, odnosno u potpuno nekontroliranim uvjetima, rezultati su bili na granici nezadovoljavajućih, a uglavnom zbog činjenice da su snimane osobe bile nekooperativne i da su snimane u različitim uvjetima. Smanjeni postotci prepoznavanja u različitim scenarijima su se pokazali i u testiranju srednjevalnog dijela infracrvenog spektra (MWIR) u odnosu na druge dijelove spektra, međutim obećavajući rezultati se postižu kada se radi o usporedbi između MWIR snimki u razumnim uvjetima kada su usporedivi s rezultatima usporedbe slika iz vidljivog dijela spektra, a dodatna korist je to što je ove slike moguće snimati u potpunom mraku. Testiranje provedeno u NIR dijelu IR spektra koje je provedeno na različitim udaljenostima od 30 do 120 m, prema očekivanjima autora [25] pokazalo je lošije rezultate pogotovo kada je udaljenost snimanja povećana na preko 90 m kada su značajke lica znatno manje istaknute zbog vremenskih uvjeta. Isti trend je bio vidljiv i kod testiranja između različitih dijelova spektra i između različitih udaljenosti snimanja kada ih se uspoređivalo sa slikama iz NIR spektra snimljenih s 30 m. Unatoč tomu, kada su uspoređene slike iz vidljivog dijela spektra i NIR područja koje su snimljene sa udaljenosti od 120 m, uz korištenje Bayesova ML algoritma, postignuta je točnost prepoznavanja od 92 %. Opisani eksperiment samo je jedan u nizu eksperimenata i istraživanja koja je moguće provesti glede prepoznavanja lica u zahtjevnijim okolnostima i uvjetima snimanja [25].

V. ZAKLJUČAK

Temeljem pregleda opisanih metoda razvidno je da primjena infracrvene termovizije u kontekstu detekcije osoba na velikim područjima daje dobre rezultate, kako u urbanim područjima tako i u područjima izvan urbanih zona. S tim u svezi treba istaknuti da je u kontekstu nadzora velikih područja primjena svedena isključivo na razinu detekcije osobe bez ikakvih mogućnosti identifikacije s obzirom da termovizijske kamere prilikom snimanja s velikih udaljenosti imaju mogućnost snimanja samo termalne siluete osobe. S druge strane, da bi se infracrvena termovizija uspješno primjenjivala u cilju identifikacije osoba temeljem termograma lica snimanje lica mora biti provedeno iz neposredne blizine i to isključivo en face jer se jedino na taj način može dobiti slika cjelokupne strukture krvnih žila lica.

Opisana područja primjene svakako otvaraju široki spektar glede budućih istraživanja u ovom području, posebice u kontekstu identifikacije osoba temeljem termograma lica. Nadalje, u kontekstu nadzora državne granice opisane tehnike i metode moguće je, uz određenu prilagodbu koristiti i na graničnim prijelazima u cilju detekcije skrivenih predmeta, odnosno prilikom pregleda prtljage ili teretnih prostora. U tom kontekstu treba istaknuti da termovizija ima određene prednosti u odnosu na druge metode koje se aktualno primjenjuju. Svakako je najznačajnija primjena u cilju detekcije skrivenih osoba (ilegalnih imigranata) unutar tereta što je učestali način pokušaja ilegalnog prelaska državne granice.

Gore opisani modeli i pristupi detekciji osoba na infracrvenim termovizijskim snimkama nisu jedini, ali su u pojedinim segmentima najbliži zamislima u svezi izrade buduće disertacije. Naime, tema disertacije će biti primarno usmjerena na opis automatskog nenadziranog sustava detekcija osoba upotrebom infracrvene termovizijske kamere. Nadalje, zamisao je i da se u sklopu takvog istraživanja provede analiza dobivenih snimaka temeljem kojih će biti moguće izračunati svojstvene vektore za cijelu osobu i najčešće položaje tijela prilikom ilegalnih pokušaja prelaska granice ili neovlaštenog pristupa štićenim područjima (uspravljeno, pogrbljeno, polusagnuto tijelo, puzeći, polupuzeći i sl.). Također će dodatna pažnja biti usmjerena na detekciju osoba temeljem parcijalne vidljivosti, odnosno nastojat će se definirati svojstvene vektore pomoću kojih će biti moguće nedvojbeno utvrditi da je riječ o osobi. U sklopu buduće disertacije biti će opisani i provedeni odgovarajući pokusi u pogledu praćenja kretanja objekata (osobe, vozila, plovila) od prve detekcije do prelaska granice, odnosno nadziranog perimetra.

LITERATURA

1. Strategija Nacionalne Sigurnosti Republike Hrvatske, Narodne Novine 32/02, 2002.
2. Chris Solomon and Toby Breckon; Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab; John Wiley & Sons, Ltd. 2011.
3. <http://www.flir.com/cs/emea/en/view/?id=42061>, FLIR Systems Inc., uvid 10.10.2013. god.
4. Mrinal Kanti Bhowmik, Kankan Saha, Sharmistha Majumder, et al.; Thermal Infrared Face Recognition – A Biometric Identification Technique for Robust Security system; Reviews, Refinements and New Ideas in Face Recognition, Dr. Peter Corcoran (Ed.), 2011.; <http://www.intechopen.com/books/reviews-refinements-and-new-ideas-in-face-recognition/thermal-infrared-face-recognition-a-biometric-identification-technique-for-robust-security-system>; uvid 10.10.2013. god.
5. R. Dulski; M. Kastek; P. Trzaskawka et al.; Concept of data processing in multisensor system for perimeter protection; Proc. SPIE 8019, Sensors, and Command, Control, Communications and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense X, 80190X; June 02, 2011.
6. Huiyu Zhou, Yiahua Wu, Jianguo Zhang: Digital Image Processing - Part one; Ventus Publishing; 2010.
7. Huiyu Zhou, Yiahua Wu, Jianguo Zhang: Digital Image Processing - Part two; Ventus Publishing; 2010.
8. Toby P. Breckon; Ji W. Han, Julia Richardson; Consistency in multi-modal automated target detection using temporally filtered reporting; Proc. SPIE 8542, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VI, 85420L; November 19, 2012.
9. Ian H. Witten, Eibe Frank, Mark A. Hall; Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques; Third Edition; Morgan Kaufmann Publishers, 2011.
10. Peter Harrington; Machine Learning in Action; Manning; 2012.
11. Christopher J.C. Burges; A tutorial on support vector machines for pattern recognition; Data mining and knowledge discovery, 2(2):121–167, 1998.
12. Leo Breiman; Random Forests; Machine Learning, vol. 45, No. 1; 2001.
13. Toby P. Breckon, Anna Gaszczak, Jiwan Han, et al.; Multi-Modal Target Detection for Autonomous Wide Area Search and Surveillance; Proc. SPIE Security and Defence: Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks; 2013.
14. P. Viola, M. Jones; Rapid object detection using a boosted cascade of simple features; Proc. Int. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; vol. 1, pp. 1–511–I–518, 2001.
15. Piotr Dollar, Zhuowen Tu, Hai Tao, Serge Belongie; Feature Mining for Image Classification; CVPR 2007.
16. Erwin Thomas Gilmore, Chukwunweike Ugbome, Charles Kim; An IR-based Pedestrian Detection System Implemented with Matlab-Equipped Laptop and Low-Cost Microcontroller; International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCISIT) Vol 3, No 5, Oct 2011.
17. Roland Mieziako, Dragoljub Pokrajac; People detection in low resolution infrared videos; cvprw, pp. 1-6, 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008.
18. K. Levi and Y. Weiss; Learning object detection from a small number of examples: The importance of good features; In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 53–60, 2004.
19. Ehsan Nadernejad, Sara Sharifzadeh, Hamid Hassanpour; Edge Detection Techniques: Evaluations and Comparisons; Applied Mathematical Sciences, Vol. 2, No. 31, 1507 - 1520; 2008.
20. Rabia Jafri, Hamid R. Arabnia; A Survey of Face Recognition Techniques; Journal of Information Processing Systems, Vol. 5, No. 2, June 2009.
21. Ross Cutler; Face Recognition Using Infrared Images and Eigenfaces; 1996.
22. George Bebis, Aglika Gyaourova, Saurabh Singh, Ioannis Pavlidis; Face recognition by fusing thermal infrared and visible imagery; Image and Vision Computing 24, 727–742; 2006.
23. Diego A. Socolinsky, Lawrence B. Wolff, Joshua D. Neuheisel, Christopher K. Eveland; Illumination invariant face recognition using thermal infrared imagery; Computer Vision and Pattern Recognition; CVPR 2001, Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on; Volume 1; 2001.
24. Ayan Seal, Suranjan Ganguly, Debotosh Bhattacharjee, Mita Nasipuri and Dipak Kr., Basu; Automated thermal face recognition based on minutiae extraction; in Int. J. Computational Intelligence Studies, 2, 133-156, 2013.
25. Thirimachos Bourlai, Bojan Čukić; Multi-Spectral Face Recognition: Identification of People in Difficult Environments; Intelligence and Security Informatics (ISI), 2012 IEEE International Conference on; 2012.