

PREGLED ALGORITMOV IN PROGRAMSKE OPREME ZA SEGMENTACIJO OPTIČNIH DALJINSKO ZAZNANIH POSNETKOV

OVERVIEW OF SEGMENTATION ALGORITHMS AND SOFTWARE FOR OPTICAL REMOTE SENSING IMAGERY

Andreja Švab Lenarčič, Nika Mesner, Kristof Oštir

UDK: 528.8.044.6
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.02
Prispelo: 24. 6. 2015
Sprejeto: 28. 9. 2015

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.709-722
REVIEW ARTICLE
Received: 24. 6. 2015
Accepted: 28. 9. 2015

IZVLEČEK

Sateliti Sentinel in evropska pobuda Copernicus so začeli zagotavljati ogromne količine prostorsko in časovno visokoločljivih posnetkov, ki jih bo za pridobitev končnega rezultata treba obdelati hitro in po možnosti samodejno. Vodilna metoda za interpretacijo optičnih posnetkov z visoko prostorsko ločljivostjo je objektna klasifikacija. To je zahteven postopek razpoznavanja mej objektov (segmentacija) in razvrščanja segmentov v izbrane objektne razrede (klasifikacija). Kakovost rezultatov segmentacije je ključnega pomena, saj neposredno vpliva na kakovost končnih rezultatov objektne klasifikacije. Razviti so številni algoritmi za segmentacijo daljinsko zaznanih podob, ki so – odvisno od namena analize – različno uspešni. Za kakovostno segmentacijo je ključnega pomena poznavanje algoritmov in primernosti njihove uporabe v specifičnih primerih.

V prispevku je predstavljen izbor algoritmov za segmentacijo optičnih posnetkov daljinskega zaznavanja in možnosti njihove uporabe. Podan je tudi pregled programske opreme za objektno klasifikacijo, s poudarkom na postopku segmentacije. Podane informacije o algoritmih in programih za objektno klasifikacijo ne ponujajo klasičnega recepta za najboljšo izbiro, temveč uporabnika »opremijo« z vsem potrebnim znanjem, da bo lahko pri konkretni analizi in v danih okoliščinah pridobil najboljše mogoče rezultate segmentacije.

KLJUČNE BESEDE

daljinsko zaznavanje, segmentacija, objektno usmerjena klasifikacija

ABSTRACT

Satellite Sentinel and the European Copernicus programme have begun to provide huge amounts of high spatial and temporal resolution images, which need to be processed quickly and preferably automatically. Object based classification is the most commonly used method for the interpretation of high spatial resolution optical images. It is a challenging process of object borders recognition (segmentation) and classification of segments in the user-defined classes (classification). The quality of the segmentation is crucial because it has a direct impact on the quality of final classification results. Several algorithms have been developed for optical remote sensing imagery segmentation with varying (depending on the purpose of the analysis) accuracy. Knowledge of algorithms and adequacy of application are crucial for high quality segmentation results.

In this paper, we give an overview of optical remote sensing imagery segmentation algorithms and the possibility of their application. Besides, an overview of object based classification software, with a focus on segmentation process, is given. The intent of this paper is not to provide a recipe for the best algorithm and software selection, but to support users with knowledge they might need to be able to obtain the best possible segmentation results of an analysis in given circumstances.

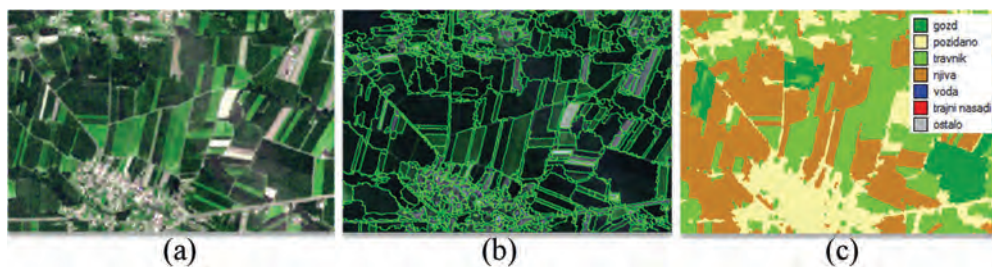
KEY WORDS

remote sensing, segmentation, object based classification

1 UVOD

V svetu, v zadnjem času pa tudi v Sloveniji, se vse bolj množično uporabljajo satelitski posnetki, ki omogočajo pogostejše (tudi vsesezonsko) pridobivanje podatkov na večjih območjih. Informacija (izdelek), ki jo želimo pridobiti iz satelitskega posnetka, je tematska karta, najpogosteje karta pokrovnosti. Karte pokrovnosti imajo velik pomen za številne znanosti o zemeljskem površju. Omogočajo temeljni vpogled v stanje okolja in so ključni podatek za uporabnike, ki potrebujejo ažurne in večkrat posodobljene informacije o površju. Med pomembnimi dejavniki, ki spodbujajo pospešeno rabo podatkov satelitskih sistemov, so tudi novi in izboljšani algoritmi za razpoznavanje in razvrščanje objektov. Nove metode klasifikacije omogočajo pomik od ročne digitalizacije k vse bolj samodejnim postopkom razpoznavanja geografskih objektov.

Zaradi izjemnega povečanja prostorske in delno tudi spektralne ločljivosti satelitskih posnetkov je v zadnjem desetletju tradicionalne pikselske klasifikacijske metode izpodrinila objektno usmerjena klasifikacija. Ta združuje segmentacijo, ki je temeljna faza za razmejevanje elementov geografskih objektov, in klasifikacijo, ki je semantično (kontekstualno) podprta (Veljanovski et al., 2011). Segmentacija razdeli podobo na homogene skupine pikslov (segmente), semantična klasifikacija pa jih nato razvršča v razrede na podlagi njihovih spektralnih, geometričnih, teksturnih in drugih lastnosti (Navulur, 2007) (slika 1).



Slika 1: Postopek objektno usmerjene klasifikacije: predobdelava daljinsko zaznanega posnetka (a), segmentacija (b) in klasifikacija (vektorski sloj pokrovnosti) (c).

Običajno uporabniki več pozornosti namenijo koraku klasifikacije (razvrščanju v razrede). Ta je sicer kompleksna in odvisna od mnogih dejavnikov (uporabljenih podatkov, klasifikacijskega algoritma, izbire učnih vzorcev), a je matematično manj zahtevna in dobro raziskana. Ker s segmentacijo fiksiramo lokacijo, velikost in obliko objektov, ključno in neposredno vpliva na kakovost končne klasifikacije (Blaschke et al., 2008; Marpu et al., 2010). Zato je nikakor ne smemo jemati za trivialen postopek in si zasluži več raziskovalne pozornosti.

Osnovno orodje za izvedbo segmentacije je programska oprema za segmentacijo. Zato je glavni namen članka podati pregled tovrstne programske opreme, primerne za slovenske uporabnike. Ker različna programska oprema vsebuje različne algoritme segmentacije, je v članku podan tudi pregled slednjih. Pri pisanju smo testirali različno programsko opremo in povzeli analize drugih avtorjev, citiranih pri posameznih navedbah. Osredotočili smo se na dosegljivost posamezne programske opreme, njeno zmogljivost, vhodne in izhodne podatke, algoritme segmentacije in uporabniški vidik.

Kakovost, ki jo lahko dosežemo s posamezno programsko opremo, je v članku zajeta le posredno. Bralec si lahko več o oceni kakovosti segmentacije prebere v številnih znanstvenih člankih, tudi preglednih, na primer v Neubert et al., 2008.

Za različne namene klasifikacije so primerne različne značilnosti segmentov. Te so odvisne od algoritma segmentacije, parametrov in vhodnih podatkov, ki jih uporabimo v postopku segmentacije. Primernost algoritmov je opisana v nadaljevanju. Izbira optimalnih parametrov presega okvir tega članka. To velja tudi za izbiro vhodnih podatkov. Omeniti pa velja, da vhodni podatki močno vplivajo na segmentacijo, zato lažje dosežemo dobro kakovost segmentacije s programi, ki poleg osnovnih multispektralnih posnetkov podpirajo tudi različne tematske podatke, kot so digitalni model reliefa, različni vegetacijski indeksi, dejanska raba idr.

2 ALGORITMI SEGMENTACIJE DALJINSKO ZAZNANIH PODOB

Segmentacija se uporablja v daljinskem zaznavanju in številnih drugih vedah (na primer v medicini, strojnemu vidu, prepoznavanju oseb in predmetov). Zato so poznane številne tehnike segmentiranja, pogosto prilagojene posebnemu namenu. Žal večina algoritmov ne upošteva večspektralnih in prostorskih informacij, zato za segmentacijo daljinsko zaznanih posnetkov niso vselej primerni. Razvoj algoritmov segmentacije daljinsko zaznanih podob se je začel, ko so postali dostopni visokoločljivi posnetki (Schiewe, 2002; Blaschke, 2010), saj pikselo usmerjene metode za tovrstne posnetke niso primerne. Pikselo usmerjene metode so bile namreč prvotno razvite za klasifikacijo satelitskih posnetkov srednje in nizke ločljivosti. Če te metode uporabljamo za klasifikacijo visokoločljivih posnetkov (prostorske ločljivosti od 5 do 10 metrov), so geografski objekti prikazani z množico pikselov in številnimi podrobnostmi, kar povzroča učinek soli in popra (Gao in Mas, 2008). Vzrok je v razmerju med velikostjo piksla in geografskim objektom, ki je na visokoločljivih posnetkih bistveno manjše kot na srednje- ali nizkoločljivih posnetkih (Blaschke, 2010). K revolucionarnemu premiku v razvoju segmentacije daljinsko zaznanih posnetkov je leta 2000 pripomogla programska oprema eCognition (Baatz in Schäpe, 2000; Blaschke, 2010). Pred tem letom v strokovni literaturi tako rekoč ni zaznati uporabe tovrstnih segmentacij. Po tem se je razvoj močno pospešil in število algoritmov še vedno narašča.

S hitrim razvojem segmentacije daljinsko zaznanih podob sta postala pomembna tudi kategorizacija in pregled obstoječih algoritmov segmentacij. Dey s sodelavci (2010) v preglednem članku navaja, da so v prvotnih kategorizacijah algoritmov segmentacije daljinsko zaznanih posnetkov (Reed in Buf, 1993; Pal in Pal, 1993; Spirkovska, 1993; Schiewe, 2002; Shankar, 2007) algoritme delili na podlagi robov (angl. edge based), točk/pikselov (angl. point/pixel based), regij (angl. region based) ali njihove kombinacije, to je tako imenovani hibridni pristop (angl. hybrid approach). Guo in njegovi sodelavci (2005) so algoritme kategorizirali na podlagi barve (angl. colour based) in teksture (angl. texture based). Najnovejšo kategorizacijo, uporabljeno zgolj za metode analiz podatkov optičnega daljinskega zaznavanja, so predlagali Dey in sodelavci (2010). Od starejših kategorizacij se razlikuje po tem, da jasno razlikuje metode segmentacije glede na tehnike tvorjenja segmentov. Kategorizacijo so razčlenili na tri skupine, ki jih opisujemo v nadaljevanju. Poudariti je treba, da so medsebojno odvisne, zato lahko posamezen algoritem spada v več različnih skupin. V nadaljevanju podajamo kategorizacije glede na pristop k analizi posnetka, merilo homogenosti in postopek tvorjenja segmentov.

2.1 Kategorizacija glede na pristop k analizi posnetka

Splošni metodi kategorizacije analiz podob, ki se uporabljata tudi zunaj področja segmentacije, sta pristopa od spodaj navzgor (angl. bottom-up) in od zgoraj navzdol (angl. top-down). Na področju

segmentacije daljinsko zaznanih posnetkov ju pogosto navajamo kot slikovno voden pristop (od spodaj navzgor) in modelno voden pristop (od zgoraj navzdol) (Guindon, 1997). Rečemo lahko, da pristop od spodaj navzgor oblikuje objekte na podlagi kombiniranja/združevanja pikslov ali skupine pikslov, medtem ko pristop od zgoraj navzdol izhaja iz razdeljevanja celotnega posnetka v objekte na podlagi merila heterogenosti (Benz et al., 2004).

Slikovno voden pristop operira neposredno s piksli posnetka in zaznava objekte izključno na podlagi statističnih lastnosti podobe (Maxwell, 2005). Ta pristop zajema večino metod segmentacij, ki delujejo na podlagi robov. Z izjemo modela razvodij, ki ga glede na pristop k analizi posnetka za klasifikacijo pokrovnosti uvrščamo tudi v modelno voden pristop, slikovno vodenega pristopa ne uporabljamo za klasifikacijo pokrovnosti. V daljinskem zaznavanju je njegova uporaba omejena na izločanje reprezentativnih objektov, zato posameznih postopkov slikovno vodenega pristopa v tem članku ne opisujemo.

Modelno voden pristop predvideva, da so objekti na posnetku predstavljeni z značilnim vzorcem. Najpogosteje uporabljani postopki modelno vodenega pristopa so:

- Objekt-okolica (angl. object-background) deluje na podlagi praga spektralnega histograma. Je preveč enostaven model in neprimeren za segmentacijo daljinsko zaznanih posnetkov.
- Nevronski (angl. neural) modeli učijo nevronske mreže predvideti rezultat pri neznanih podatkih. Ta model zaradi kompleksnosti za večino uporabnikov ni privlačen.
- Markovsko naključno polje (angl. Markov random field, MRF) upošteva sosedске odnose. Privlačen je zaradi zmožnosti vključitve spektralnih, teksturnih, kontekstualnih in prostorskih lastnosti podobe. Slabost sta zapletena matematična formulacija in visoka računrska kompleksnost.
- Model mehke logike (angl. fuzzy logic model) v segmentaciji izvira iz metode gručenja. Pri segmentaciji predpostavimo, da segment pomeni mejo med dvema gručama. Najbolj znani metodi gručenja sta metoda k-povprečja (angl. k-means) in metoda povprečnega premika (angl. mean shift) ter njune različice, kot je Edisonova metoda povprečnega premika (angl. Edison mean shift). Modele gručenja zlahka vključimo v kakšen drug model.
- Fraktalni (angl. fractal) model je hierarhični postopek segmentacije, ki uporablja lastnost samopodobnosti fraktalov. Postopek se konča, ko območje doseže predviden prag heterogenosti. Ta model ima možnost vključitve vseh meril homogenosti.
- Večstopenski model (angl. multiresolution) upošteva faktor merila. Merilo objekta se navaja kot stopnja združevanja, pri kateri lahko opišemo posamezen objekt (Benz et al., 2004). Postopek gre lahko od zgoraj navzdol ali od spodaj navzgor (Zhong et al., 2005). V obeh primerih določimo prag za združevanje ali razcepljanje. Večstopenski model je eden izmed najpogosteje uporabljenih algoritmov za segmentacijo.
- Model razvodij (angl. watershed) je matematični morfološki pristop, katerega analogijo najdemo v situaciji poplav (Beucher, 1992). Model vhodno podobo najprej transformira v gradientno podobo, ki jo kasneje obravnava kot topografsko površje, kjer sive vrednosti predstavljajo višino površine na tej lokaciji. Začne se postopek poplavljanja in grajenja jezov. Jezovi predstavljajo meje segmentov. Metoda deluje na podlagi zaznave robov (Carleer et al., 2005).

2.2 Kategorizacija glede na merilo homogenosti

Slikovni objekti so dejanski objekti v naravi, predstavljeni na daljinsko zaznanem posnetku. Na zelo visokoločljivih posnetkih (prostorske ločljivosti približno en meter) lahko slikovne objekte enostavno vizualno interpretiramo (Richards in Jia, 2006), pri čemer upoštevamo elemente, ki temeljijo na merilih homogenosti. Najpomembnejše merilo homogenosti je spektralni podatek (barva oziroma ton). Merila homogenosti sekundarnega pomena so prostorske lastnosti, tekstura, oblika in velikost, terciarnega pa kontekstualne in časovne lastnosti ter predznanje (Richards in Jia, 2006). V nadaljevanju podajamo kratek opis posameznih meril.

- Barva. Najosnovnejše merilo homogenosti je primerjava spektralnih vrednosti sosednjih piksllov. Zaradi enostavnosti uporabe in dobrih rezultatov je najpogosteje uporabljano merilo. Dolgo se je uporabljalo samostojno, danes pa ga običajno kombiniramo z drugimi merili, saj je že dolgo znano, da samo s spektralnimi lastnostmi ni mogoče izvesti dobre segmentacije (Zhong et al., 2005).
- Tekstura. Tekstura opisuje lokalno spreminjanje spektralnih vrednosti na posnetku in jo povežemo z različnimi lastnostmi površine, kot so gladkost, usmerjenost, periodičnost idr. Kvantitativno določanje značilnosti teksture ni preprosto (Richards in Jia, 2006), zato se segmentacija na podlagi teksture še vedno kombinira z drugimi značilnostmi/merili.
- Oblika in velikost. Oblika in velikost sta pomembni pri prepoznavanju in ločevanju naravnih objektov s podobnimi barvnimi lastnostmi, na primer reke in ribnika. Merili sta večinoma komplementarni in se vedno uporabljata v kombinaciji s spektralnimi in teksturnimi merili. Pri tem merilu se uporablja večstopenjski pristop segmentacije.
- Kontekst. Kontekst običajno pomeni odnos piksllov z njihovo okolico (Thakur in Dikshit, 1997). Uporabljamo ga skupaj z merili barve ali/in teksture. Kontekst je še posebej uporaben, če želimo večje območje segmentirati kot en segment, na primer pri klasifikaciji pokrovnosti. To merilo vključuje program eCognition, najboljši model za implementacijo tega merila pa je markovsko naključno polje.
- Časovnost. Merilo časovnosti se nanaša na meritve, narejene na posnetkih istega območja in senzorja v različnih časih (Richards in Jia, 2006). Merilo ni neposredno uporabljeno v segmentaciji, ampak se uporablja za zaznavanje sprememb na časovni vrsti posnetkov.
- Predznanje. Predznanje se nanaša na znanje fotointerpretatorja o objektih na posnetku (Richards in Jia, 2006). To je lahko znanje o razredih ali specifičnih objektih na posameznem območju. Vključevanje predznanja v analizo posnetka je korak proti razvoju umetne inteligence (Srinivasan in Richards, 1993). Predznanje je še posebej primerno za segmentacijo kompleksne pokrajine.

2.3 Kategorizacija glede na postopek tvorjenja segmentov

Glede na postopek tvorjenja segmentov govorimo v glavnem o dveh metodah, ki delujeta na podlagi zaznavanja robov (angl. edge detection) in razraščanja območij (angl. region growing).

Metoda na podlagi zaznavanja robov išče močne gradiente na podobi (na primer s Sobelovim filtrom), nato pa zapira območja z algoritmi za ustvarjanje kontur/plastnic, kot je na primer algoritem razvodij (Schiewe, 2002). Metodo uporabljamo pri segmentaciji objektov z značilnimi robovi, kot so zgradbe in vozila. Njena glavna slabost je pojav prekomerne segmentacije, še posebej v gozdu.

Pri metodah, ki temeljijo na razraščanju območij, se podobni piksli postopno združujejo v segmente z upoštevanjem treh meril homogenosti: homogenosti znotraj segmenta, ločenosti od sosednjih elementov in homogenosti oblike (Veljanovski et al., 2011).

3 PREGLED PROGRAMSKE OPREME ZA SEGMENTACIJO

Uporabnikom je na voljo širok nabor komercialne programske opreme za segmentacijo, na primer eCognition, ENVI FX, ERDAS IMAGINE Objective in drugi. Ta oprema pa je avtorsko zaščitena in se praviloma lahko uporablja le kot črna skrinjica. Nakup komercialnega programa je velik finančni zalogaj, saj se cene licenc gibljejo od nekaj tisoč pa do več kot deset tisoč evrov. Odlična alternativa komercialnim programom so prosti in odprtokodni programi, ki so brezplačni in uporabnikom omogočajo svoboden razvoj, saj prosto razpolagajo z izvorno kodo in vso dokumentacijo. Zaradi transparentnosti algoritmov, možnosti lastnega razvoja in brezplačnosti so programi, kot sta InterIMAGE ali Orfeo Toolbox, zelo priljubljeni predvsem pri raziskovalcih pa tudi pri podjetnikih.

Poleg vidika lastništva se programi za segmentacijo med seboj razlikujejo po izvedbi postopka segmentacije (naboru algoritmov, dodatnih funkcijah za izboljšavo segmentacije, trajanju obdelave, največji velikosti območja ipd.), možnosti predobdelave posnetkov in urejanja rezultatov klasifikacije ter po uporabniški izkušnji. Univerzalnega odgovora na vprašanje o najboljšem programu za segmentacijo v tem prispevku ne moremo in niti ne želimo podati, saj je odvisen predvsem od namena analize, ki se izvaja. V nadaljevanju je podan kratek opis izbranih programov za objektno klasifikacijo, s poudarkom na implementaciji postopka segmentacije. V izbor smo uvrstili programe za segmentacijo daljinsko zaznanih podob, ki jih najpogosteje zasledimo v strokovni literaturi, spletnih iskalnikih ter posebnih iskalnikih prostih in odprtokodnih programov. Programsko opremo smo glede na možnosti dostopa razvrstili v tri kategorije: komercialna, odprtokodna in lastniška. V poglavju opisujemo glavne značilnosti vsake izmed njih ter jih primerjamo.

3.1 Komercialna programska oprema

3.1.1 eCognition

Program eCognition je pomenil revolucijo na področju segmentacije daljinsko zaznanih posnetkov (Blaschke, 2010; Benz et al., 2004), saj se je prav z njim pričela širša uporaba objektno klasifikacije. eCognition je profesionalno orodje, ki omogoča izvedbo vseh korakov objektno klasifikacije: pripravo podatkov, analizo spektralnih značilnosti izbranih objektov, segmentacijo, klasifikacijo, poklasifikacijo, izračun statistik, oceno natančnosti in izvoz podatkov v standardno rastrsko ali vektorsko datoteko.

Bistvene prednosti segmentacije s programom eCognition so možnost kombiniranja različnih rastrskih in tematskih podatkov ter kreiranja hierarhične mreže segmentov, ki pomembno vpliva na kakovost segmentacije. Omogoča namreč izvedbo segmentacije v več korakih s postopnim povečevanjem razpoznanih detajlov in natančnosti segmentacije. Uporabniki imajo na razpolago algoritme segmentacije na podlagi razraščanja območja (večstopenjski model), na podlagi iskanja robov (ločevanje kontrastov, angl. contrast split) ter še nekatere druge algoritme, kot so štiriško drevo (angl. quadtree), šahovnica (angl.

chessboard) in spektralna razlika (angl. spectral difference). Algoritme lahko uporabljamo samostojno ali jih kombiniramo.

Obsežnost funkcij in možnosti, ki jih ponuja eCognition, je hkrati prednost in slabost programa. Prednost je, da lahko uporabnik izvede celoten postopek objektne klasifikacije (od priprave podatkov do ocene rezultatov), slabost pa, da obsežnost funkcij zmanjšuje preglednost in enostavnost uporabe programa. Kot pomembno prednost je treba izpostaviti tudi sposobnost programa za obdelavo obsežnih prostorskih območij (na državni ravni) ter za operativno izvedbo celotnega postopka izdelave končnega izdelka – na primer karte pokrovnosti. Slaba stran eCognitiona je predvsem visoka cena in zaprtost programa, saj uporabnik nima nobenega vpogleda v delovanje posameznih algoritmov.

3.1.2 ENVI – Feature Extraction

ENVI (ENvironment for Visualizing Images) je celovito programsko orodje za obdelavo in analizo daljinsko zaznanih posnetkov. Vsebuje številne postopke in algoritme: od geometričnih in radiometričnih popravkov posnetkov do segmentacije, klasifikacije, poklasifikacije, nadaljnje uporabe klasificiranih podatkov ter mnogih drugih obdelav in analiz. Algoritmi večinoma delujejo v skladu s pristopom, ki vodi uporabnika korak za korakom skozi kompleksne naloge (tako imenovani »čarovnik«).

Modul za segmentacijo ENVI Feature Extraction (ENVI FX) je uporabniško prijazen. Poleg vključenosti v celotno programsko okolje ter enostavnosti uporabe je njegova prednost tudi možnost takojšnjega predogleda rezultatov vsakega koraka. Tako lahko uporabnik takoj preveri vpliv izbranih parametrov na segmentacijo, kar zmanjša čas, potreben za optimizacijo parametrov, ki jih je sicer res malo (običajno en za vsak korak). Dodatne prednosti segmentacije z ENVI FX so hitrost obdelave, neomejenost z velikostjo območja obdelave ter možnost uporabe številnih standardnih vhodnih in izhodnih formatov. Zelo pomembna za uporabnike geografskih informacijskih sistemov (GIS) je tudi popolna povezanost s programom ArcGIS. ENVI in s tem tudi ENVI FX lahko uporabljamo iz programa ArcGIS.

Bistvena pomanjkljivost je število algoritmov za segmentacijo. Vgrajen je zgolj algoritem razvodij (watershed), ki sicer v splošnem zagotavlja visoko kakovost segmentacije. Nagnjenost k prekomerni segmentaciji je mogoče izboljšati z algoritmom za združevanje segmentov. Sam algoritem segmentacije sicer ni odprtokoden, lahko pa v programskem jeziku IDL (v katerem je ENVI razvit in ki je priložen programu) prilagajamo postopek segmentacije in ga vključimo v druge postopke obdelave. Uporabniki z več znanja o programiranju lahko v IDL sami napišejo poljuben algoritem segmentacije in ga vključijo v ENVI.

Modul ENVI FX je treba dokupiti kot dodatek k osnovni licenci programa ENVI.

3.1.3 Drugi komercialni programi

Med komercialnimi programi segmentacije najdemo tudi BerkleyImgseg, ERDAS IMAGINE Objective, IDRISI (TerrSet) in InfoPACK. V aplikativnih projektih jih zasledimo le redko, čeprav strokovne primerjave programske opreme za segmentacijo (Neubert et al., 2006) kažejo, da po kakovosti izvedbe večinoma ne zaostajajo bistveno za prevladujočima programoma eCognition in ENVI FX. Vsi lahko obdelujejo poljubno veliko območje, do vsaj 32-bitno podobo in vsi imajo možnost klasifikacije. Sla-

bosti so, najpogosteje, omejenost formata vhodne podobe, nepodpiranje vektorskega izhodnega sloja in pomožnih podatkov, predvsem pa daljše trajanje obdelave.

3.2 Odprtokodna programska oprema

3.2.1 InterIMAGE

InterIMAGE je odprtokodni in brezplačni program za večstopenjsko objektno klasifikacijo posnetkov, ki ga razvija skupina pod vodstvom brazilskega inštituta za vesoljske raziskave INPE (National Institute for Space Research). InterIMAGE je pregleden in enostaven za uporabo, za zahtevnejše uporabnike je na voljo tudi izvorna koda, ki omogoča dodaten razvoj programa. Postopek celotne objektno klasifikacije je zelo dobro podprt, izvaja se na podlagi modela znanja, ki ga definira operater. Klasifikacija poteka po posebnem vrstnem redu, in sicer najprej od zgoraj navzdol (definiranje hipotez), nato od spodaj navzgor (potrditev hipotez), kar zagotavlja višjo kakovost rezultatov. Kljub enakemu poimenovanju pristopa klasifikacije v programu InterIMAGE ne gre enačiti z modelno vodenim in slikovno vodenim pristopom segmentacije. Pri programu InterIMAGE se pristop od zgoraj navzdol in od spodaj navzgor nanaša na zaporedje testiranja hipotez v postopku klasifikacije.

Za segmentacijo podobe je v knjižnici TerrAida, ki je vključena v program InterIMAGE, na voljo pet algoritmov segmentacije: večstopenjski (Baatz in Schape, 2000), aritmetični (povprečne vrednosti slikovnih elementov), šahovnica (razdelitev na enake pravokotnike), segmentacija NDVI (na podlagi vrednosti normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa) in algoritem razraščanja območja (Bins et al., 1996).

Prednosti programa InterIMAGE so visoka kakovost klasifikacije, razpoložljivost različnih algoritmov segmentacije, pregleden in enostaven uporabniški vmesnik ter dobra spletna podpora. Bistvena pomanjkljivost je predvsem omejenost velikosti območja obdelave in nestabilno delovanje programa, predvsem pri obdelavi velikih datotek. Pri večjih območjih je zato rastrsko podobo treba obdelovati po podobmočjih, kar podaljša čas in stroške obdelave. Program je namenjen izključno objektni klasifikaciji, zato mora uporabnik za predobdelavo posnetkov, poklasifikacijo in oceno natančnosti uporabiti druge programe, kar je razmeroma velika pomanjkljivost.

3.2.2 OrfeoToolbox

Orfeo Toolbox (OTB) je hitro rastoča odprtokodna knjižnica za obdelavo daljinsko zaznanih podatkov, ki jo deloma financirata oziroma podpirata francoska vesoljska agencija CNES (Centre national d'études spatiales) in Evropska vesoljska agencija (ESA). V knjižnici je zbrana vrsta algoritmov za celotno obdelavo in analizo daljinsko zaznanih posnetkov. OTB vključuje ortorektifikacijo, transformacije in filtriranje posnetkov, segmentacijo, pikselo in objektno klasifikacijo, obdelavo časovnih vrst posnetkov idr. Knjižnica je na voljo v nekaterih brezplačnih programih (GRASS GIS, QGIS in Monteverdi), lahko pa se implementira v lastne programe. V OTB je za segmentacijo na voljo niz osnovnih algoritmov: algoritem povprečnega premika (angl. mean shift), Edisonov algoritem povprečnega premika (angl. Edison mean shift), algoritem razvodij, algoritem na podlagi vrednosti pikselov z možnostjo definiranja pogojev glede barve, velikosti in oblike segmentov ter algoritem na podlagi morfoloških profilov (Pesaresi in Benediktsson, 2001).

Segmentacija sicer ni omejena z velikostjo območja obdelave, toda pri testiranju programa smo ugotovili, da se pri segmentaciji velikih posnetkov pojavljajo težave. Rezultate je mogoče zapisati v standardno vektorsko (shape) ali rastrsko datoteko.

Bistvena prednost knjižnice algoritmov OTB je, da vsebuje orodja za celostno izvedbo objektne klasifikacije: od predobdelave podobe do segmentacije, poklasifikacije in drugih rastrskih operacij, ter ponuja različne algoritme segmentacije in orodja za oceno kakovosti segmentacije.

3.2.3 Drugi prosti in odprtokodni programi

Med prostimi in odprtokodnimi programi za segmentacijo bi izpostavili tudi programe SPRING (algoritem razraščanja območja in algoritem zaznavanja robov), EDISON (algoritem povprečnega premika), PARBAT (algoritem razraščanja območja), SAGA (algoritem razvodij) in MSEG (generični večstopenski algoritem območij; angl. generic region based multi scale). Po kakovosti rezultata segmentacije včasih uspešno konkurirajo drugim brezplačnim programom, imajo pa vsak svoje omejitve, od katerih so najpogostejše velikost območja obdelave, radiometrična ločljivost, formati vhodnih in izhodnih podob, skromen grafični uporabniški vmesnik in nepodpiranje klasifikacije. Izjema je program SPRING (Spring user guide, 2013), zmogljivo GIS-orodje, ki omogoča obdelavo tako rastrskih kot tudi vektorskih slojev. Zato lahko v tem programu izvedemo celoten postopek objektne klasifikacije, od priprave podatkov do urejanja rezultatov. Slabost pa je, da se zaradi številnih funkcionalnosti programa zmanjšujeta njegova preglednost in enostavnost uporabe. Poleg tega je program SPRING le delno preveden iz portugalskega jezika.

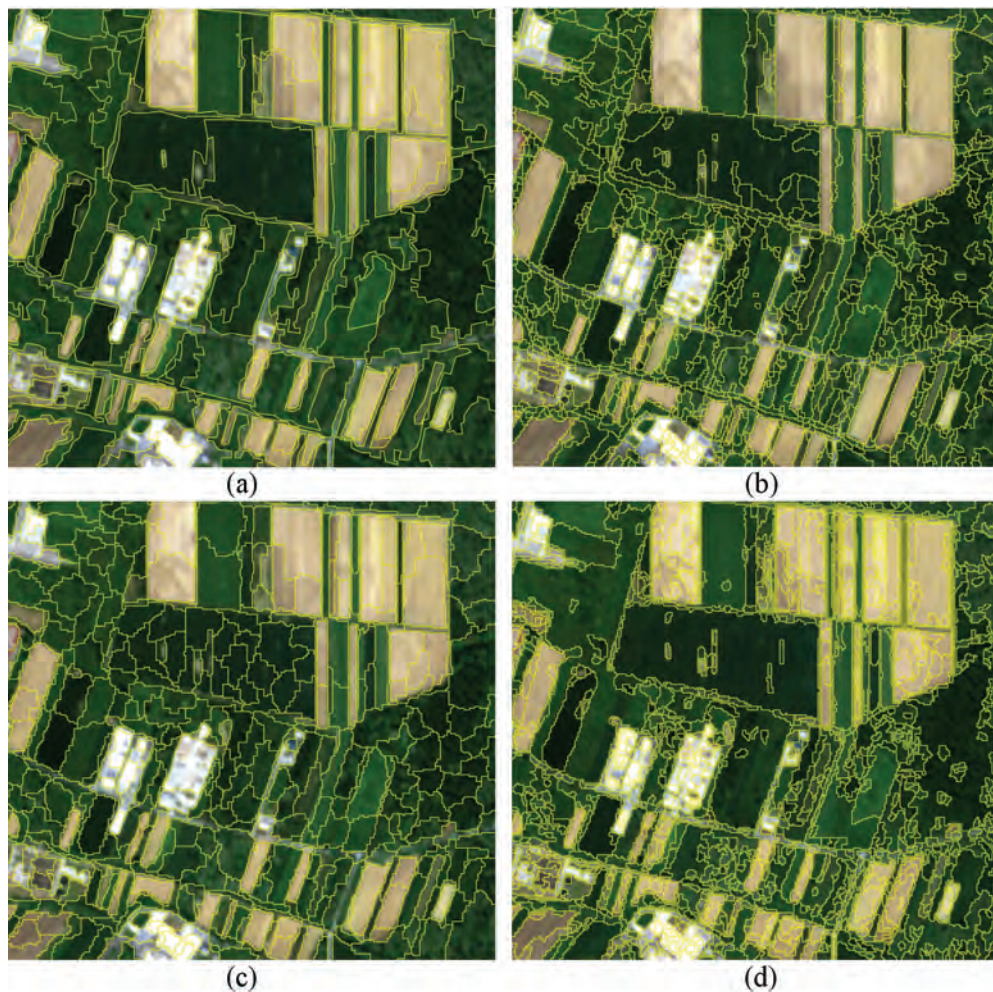
3.3 Lastniški programi

Poleg komercialnih in odprtokodnih programov za segmentacijo obstaja množica programov, ki so jih posamezni uporabniki razvili samostojno. Nekateri lastniški programi so prostodostopni za raziskovalne namene, to so na primer HalconSEG, EWS (Extended WaterShed), RHSEG (Recursive Hierarchical Segmentation), SCRIM (Size-Constrained Region Merging), SegSAR in SEGEN. Delujejo na enakih ali podobnih algoritmih kakor komercialni ali brezplačni programi. Zanje so značilne tudi podobne prednosti in slabosti. Neubert et al. (2006) ocenjujejo, da so segmentacije teh programov večinoma zelo kakovostne. Žal pa so njihovi uporabniški vmesniki zelo različnih kakovosti, včasih so celo v tujem jeziku, ki ga ne znamo, recimo kitajščini (EWS).

3.4 Primerjava programov za segmentacijo

Neubert et al. (2006) je opravil obširno raziskavo programske opreme za segmentacijo, v katero je vključil kar 21 programov. Ugotovil je, da so zaradi raznolikosti vgrajenih algoritmov rezultati segmentacije izredno različni. Primernost posameznega programa je zelo odvisna od namena segmentacije. Kljub tehnološkemu napredku v zadnjih desetih letih ostajajo najbolj pereča težava programov za segmentacijo tehnične težave, kot so pomanjkanje procesne stabilnosti in robustnost uvoznih rutin, ki so odvisne od velikosti in formata podobe, radiometrične ločljivosti, podatkovne strukture in parametrov projekcije. Podrobnejši rezultati raziskave in ocene nekaterih novejših različic programov so na voljo na spletni strani <http://www.ioer.de/segmentation-evaluation/results.html>.

Sami smo na primeru posnetka RapidEye izbranega območja v Sloveniji preizkusili delovanje vseh programov za segmentacijo, do katerih smo imeli dostop. Preizkusili smo 16 programov: eCognition, ENVI FX, InterIMAGE, OrfeoToolbox, ERDAS IMAGINE Objective, BerkleyImseg, IDRISI (TerrSet), SPRING, EDISON, PARBAT, SAGA, MSEG, EWS, RHSEG, SCRUM in SegSAR. Izkazalo se je, da večina ni primerna za namen objektno usmerjene klasifikacije, saj se pri njihovi uporabi kaj hitro srečamo z nevšečnostmi, kot so: izhodni format segmentacije je raster, vhodni posnetek lahko ima zelo omejeno velikost in format, za segmentacijo je na voljo zgolj koda, brez uporabniškega vmesnika, programi so nestabilni, v nam neznanem jeziku, potrebni so vzorci idr. V nadaljevanju zato podrobneje opisujemo delovanje štirih programov, ki so se izkazali kot najboljši. Primere njihovih segmentacij prikazujemo na sliki 2.



Slika 2: Primeri segmentacij posnetka RapidEye, izvedenih s podobnimi nastavitvami in z različno programsko opremo: eCognition (a), ENVI FX (b), InterIMAGE (c) in OrfeoToolbox (d).

V tem prispevku smo pod drobnogled vzeli dva komercialna – eCognition in ENVI FX – in dva odprtokodna programa – InterIMAGE in OrfeoToolbox (knjižnica, implementirana v program MonteVerdi).

Izbrane programe smo analizirali predvsem glede ocene zmogljivosti in podpore pri izvedbi postopka segmentacije. Posamezne programe smo med seboj primerjali glede vhodnih in izhodnih podatkov, segmentacije in uporabniškega vidika.

V kategoriji vhodni in izhodni podatki smo proučili zmogljivost glede formatov zapisa podatkov, velikosti datoteke (velikost območja obdelave) in radiometričnih ločljivosti podatkov. V drugi kategoriji smo ocenili podporo izvedbi postopka segmentacije z razpoložljivostjo različnih algoritmov segmentacije in orodij za oceno kakovosti segmentacije ter s hitrostjo segmentiranja podob in možnostjo uporabe raznovrstnih podatkov (tematski podatki). V zadnji kategoriji smo ocenili splošno uporabniško izkušnjo s posameznim programom. Rezultati analize so podani v naslednjih podpoglavjih.

3.4.1 Vhodni in izhodni podatki

Vsi štirje programi omogočajo uporabo rastrskih in vektorskih podatkov v standardnih zapisih, kot so TIF, IMG, SHP in drugi. Omejitev glede radiometrične ločljivosti ima samo InterIMAGE, v katerem je mogoče obdelovati največ 8-bitne posnetke. eCognition omogoča tudi uporabo oblaka točk laserskega skeniranja, zapisanega v formatu LAS. V vseh programih je mogoče zapisati rezultate segmentacije v datoteko SHP. Velikost območja obdelave ni omejena v komercialnih programih ENVI FX in eCognition, medtem ko obstajajo omejitve glede velikosti datoteke za segmentacijo pri obeh odprtokodnih programih. Za segmentacijo s programom InterIMAGE se priporoča uporaba datotek velikosti do 3.000 x 3.000 pikslov, OTB omogoča segmentacijo nekoliko večjih datotek, vendar teoretično manjših od 10.000 x 10.000 pikslov (v praksi pa nismo mogli obdelati posnetka, večjega od 1.000 x 1.000 pikslov).

Preglednica 1: Primerjava značilnosti vhodnih in izhodnih podatkov štirih programov za segmentacijo.

	eCognition	ENVI FX	InterIMAGE	OTB/Monteverdi
Format vhodnih podatkov	standardni rastrski, vektorski podatki in podatki laserskega skeniranja (LAS)	standardni rastrski in vektorski podatki	standardni rastrski in vektorski podatki	standardni rastrski podatki (celoštevilski tip podatka)
Največja velikost rastrske datoteke	ni omejitve	ni omejitve	3.000 x 3.000 pikslov	10.000 x 10.000 pikslov, v praksi manj
Format izhodne datoteke	rastrski podatki (IMG) in vektorski podatki (SHP)	rastrski podatki (HDR) in vektorski podatki (SHP)	vektorski podatki (SHP)	rastrski podatki (TIF) in vektorski podatki (SHP)
Največja globina	32 bitov	32 bitov	8 bitov	32 bitov

3.4.2 Segmentacija

Z izjemo programa ENVI FX, ki ima za segmentacijo na voljo le en algoritem, imajo preostali trije programi na voljo niz različnih algoritmov, ki jih je mogoče tudi kombinirati med seboj. Vsi programi razen OTB omogočajo uporabo dodatnih tematskih podatkov v postopku segmentacije. eCognition podpira uporabo tematskih podatkov v rastrski in vektorski obliki, InterIMAGE le v vektorski obliki, ENVI FX pa samo v rastrski, vendar lahko v programu ENVI vektorski podatek zlahka pretvorimo v

rastrskega. Hitrost segmentacije je najvišja v programih ENVI FX in OTB. V programu eCognition je malo počasnejša, v programu InterIMAGE pa občutno počasnejša. Kakovost segmentacije je mogoče oceniti samo z orodji, vključenimi v OTB.

Preglednica 2: Primerjava značilnosti postopka segmentacije štirih programov za segmentacijo.

	eCognition	ENVI FX	InterIMAGE	OTB/Monteverdi
Algoritmi segmentacije	različni algoritmi, možnost kombinacije	en algoritem	različni algoritmi, ni možnosti kombinacije	različni algoritmi, možnost kombinacije
Trajanje postopka (glede na ENVI FX)	2	1	4	1
Uporaba tematskih podatkov pri segmentaciji	da, vektorski in rastrski podatki	da, rastrski podatki	da, vektorski podatki	ne
Ocena kakovosti segmentacije	ne	ne	ne	da

3.4.3 Uporabniški vidik

Vsi štirje programi omogočajo izvedbo vseh faz objektivne klasifikacije, tj. segmentacije in klasifikacije. Z izjemo programa InterIMAGE drugi omogočajo tudi celotno predobdelavo posnetkov in izdelavo končnega izdelka na podlagi klasifikacije. Zaradi obsežnosti funkcionalnosti, ki jih podpirata, sta eCognition in OTB manj pregledna in zahtevnejša za uporabo, medtem ko ENVI FX kljub obsežni funkcionalnosti ostaja uporabniku prijazen.

Slabost obeh komercialnih programov je seveda tudi visoka cena. OTB in InterIMAGE poleg tega, da sta brezplačna, dovoljujeta uporabnikom uporabo izvorne kode in lasten razvoj programa.

Preglednica 3: Primerjava uporabniškega vidika štirih programov za segmentacijo.

	eCognition	ENVI FX	InterIMAGE	OTB/Monteverdi
Preglednost	nepregleden	pregleden	pregleden	srednje pregleden
Uporaba	zelo zahtevna	nezahtevna	nezahtevna	srednje zahtevna
Cena	zelo visoka (več kot 10.000 EUR)	visoka cena programa ENVI (do 10.000 EUR, doplačilo za modul ENVI FX)	brezplačen	brezplačen
Možnost lastne nadgradnje algoritmov	ne	ne	da, na voljo je izvorna koda programa	da, na voljo je izvorna koda programa

4 SKLEP

Zaradi raznolikosti vgrajenih algoritmov in celotnih postopkov segmentacije so rezultati segmentacije izredno različni. Enostavnega recepta za izbiro najprimernejše programske opreme za segmentacijo ni

– vsaka ima tako prednosti kot slabosti. Primernost posameznega programa je zelo odvisna od namena segmentacije, znanja o obdelavi satelitskih posnetkov, obvladanja posameznega programskega jezika, sredstev, ki jih imamo na voljo, velikosti območja obdelave in potrebe po hitrosti procesiranja. Pomembno je tudi, ali že imamo na voljo programsko opremo za predobdelavo posnetkov, za klasifikacijo rezultata segmentacije idr.

Pri vsem skupaj se je treba zavedati še nečesa. Četudi ima uporabnik na voljo najprimernejšo programsko opremo za posamezno aplikativno nalogo, so rezultati segmentacije še vedno zelo odvisni od njegovega znanja (vsestranskega razumevanja delovanja posamičnih korakov v postopku segmentacije) in izkušenj. Brez zadržkov lahko trdimo: slabo ali pomanjkljivo znanje – slaba segmentacija. Ne moremo pa trditi, da velja tudi nasprotno. Zelo verjetno je, da bo uporabnik s primernim znanjem tudi brez finančnega vložka izvedel segmentacijo zavidljive kakovosti.

Ker uporabniki objektne klasifikacije običajno niso strokovnjaki za segmentacijo, je treba programsko opremo čim bolj poenostaviti in avtomatizirati. Ta potreba ne izvira zgolj iz pomanjkanja znanja uporabnikov, temveč tudi iz potrebe po hitrosti segmentacije (in klasifikacije). Sateliti Sentinel in evropska pobuda Copernicus so namreč začeli zagotavljati ogromne količine prostorsko in časovno visokoločljivih posnetkov, ki jih bo treba do končnega rezultata obdelati hitro in po možnosti samodejno.

Zahvala

Avtorji se za pomoč pri testiranju programske opreme zahvaljujemo Nataši Đurić. Hvala tudi recenzentoma za prispevek k boljši kakovosti objave.

Literatura in viri:

- Baatz, M., Schäpe, A. (2000). Multiresolution segmentation: An optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. V J. Strobl in T. Blaschke (ur.), *Angewandte geographische informationsverarbeitung*, Heidelberg: Wichmann-Verlag, Vol. XII, str. 12–23.
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Heynen, M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58(3–4), 239–258.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002>
- Beucher, S. (1992). The watershed transformation applied to image segmentation. *Scanning Microscopy Supplement*, 6, 299–314.
- Bins., L. S., Fonseca, L. M. G., Erthal, G. J., li, F. M. (1996). Satellite Imagery Segmentation: a region growing approach. *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador, Brasil, 14–19 abril 1996, INPE, str. 677–680.
- Blaschke, T., Lang, S., Hay, G. J. (ur.) (2008). *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2–16.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>
- Carleer, A. P., Debeir, O., Wolff, E. (2005). Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(11), 1285–1294.
DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/pers.71.11.1285>
- Dey, V., Zhang, Y., Zhong, M. (2010). A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective. V W. Wagner, B. Székely (ur.), *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS*, July 5–7, Dunaj, Avstrija.
- Gao, Y., Mas, J. F. (2008). A comparison of performance of pixel-based and object-based classifications over images with various spatial resolution. *Online Journal of Earth Science*, 2, 27–35.
- Guindon, B. (1997). Computer-based aerial image understanding: a review and assessment of its application to planimetric information extraction from very high resolution satellite images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 23(1), 38–47.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07038992.1997.10874676>
- Guo, D., Atluri, V., Adam, N. (2005). Texture-based remote sensing image segmentation. V *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 1472–1475.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/icme.2005.1521710>
- Marpu, P.R., Neubert, M., Herold, H., Niemyer, I. (2010). Enhanced evaluation of image segmentation results. *Journal of Spatial Science*, 55(1), 55–68.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14498596.2010.487850>

- Maxwell, T. (2005). Object-oriented classification: Classification of pan-sharpening quickbird imagery and a fuzzy approach to improving image segmentation efficiency. MScE Thesis. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Canada, str. 157.
- Navulur, K. (2007). Multi-spectral image analysis using the object oriented paradigm. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Neubert, M., Herold, H., Meinel, G. (2006). Evaluation of remote sensing image segmentation quality – further results and concepts. Proceedings of the 1st International Conference on Object-Based Image Analysis.
- Neubert, M., Herold, H., Meinel, G. (2008). Assessing image segmentation quality—concepts, methods and application. V. T. Blaschke, S. Lang in G. J. Hay (ur.), Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, str. 769–784. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_42
- Pal, N. R., in Pal, S. K. (1991). Entropy: a new definition and its applications. IEEE Transactions on System man and Cybernetics, 21(5), 1260–1270. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/21.120079>
- Pesaresi, M., Benediktsson, A. (2001). A New Approach for the Morphological Segmentation of High-Resolution Satellite Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(2), 309–320. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/36.905239>
- Reed, T. R., du Buf J. M. H. (1993). A review of recent texture segmentation and feature extraction techniques. Computer Vision Graphics and Image Processing: Image Understanding, 57(3), 359–372. DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/cviu.1993.1024>
- Richards, J. A., Jia, X. (2006). Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer-Verlag, Heidelberg, New York, str. 67–68, 128–130, 342–352. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-29711-1>
- Schiewe, J. (2002). Segmentation of high-resolution remotely sensed data—concepts, applications and problems. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(4), 358–363.
- Shankar, B. U. (2007). Novel classification and segmentation techniques with application to remotely sensed images. V: J. F. Peters, A. Skowron, V. W. Marek, E. Orlowska, R. Słowiński in W. Ziarko (ur.), Transactions on Rough Sets VII. Lecture Notes on Computer Science Series 4400. Berlin in Heidelberg: Springer, str. 295–380. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71663-1_19
- Spirkovska, L. (1993). A summary of image segmentation techniques: NASA technical memorandum; 104022, California, USA. [http stran ne obstaja več](http://stran.ne.obstaja.vc). Vir je bil povzet po Dey et al., 2010.
- Spring User Guide. <http://docs.spring.io/spring/docs/current/spring-framework-reference/htmlsingle>, pridobljeno: 20. 1. 2015.
- Srinivasan, A., Richards, J. A. (1993). Analysis of GIS spatial data using knowledge-based methods. International Journal of Geographic Information Systems, 7(6), 479–500. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02693799308901978>
- Thakur, R. S., Dikshit, O. (1997). Contextual classification with IRS LISS-II imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 52(2), 92–100. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-2716\(97\)83004-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-2716(97)83004-3)
- Veljanovski, T., Kanjir, U., Oštir, K. (2011). Objektno usmerjena analiza podatkov daljinskega zaznavanja. Geodetski vestnik, 5(4), 641–688. DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2011.04.665-688>
- Zhong, C., Zhongmin, Z., DongMei, Y., Renxi, C. (2005). Multi-scale segmentation of the high resolution remote sensing image. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 5, 3682–3684. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/igars.2005.1526648>

Švab Lenarčič A., Mesner N., Oštir K. (2015). Pregled algoritmov in programske opreme za segmentacijo optičnih daljinsko zaznanih posnetkov. Geodetski vestnik, 59 (4): 709-722. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.709-722

mag. Andreja Švab Lenarčič, univ. dipl. inž. geod.
Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije
Aškerčeva cesta 12, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: andreja.svab@space.si

izr. prof. dr. Krištof Oštir, univ. dipl. inž. fiz.
ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije
Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: kristof@zrc-sazu.si, kristof.ostir@space.si

Nika Mesner, univ. dipl. inž. geod.
Geodetski inštitut Slovenije
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: nika.mesner@gis.si