

Postopek zaznave sprememb v podatkih LiDAR

Denis Kolednik, Domen Mongus, Borut Žalik

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

E-pošta: denis.kolednik@um.si

Povzetek. V članku predstavimo novo metodo za zaznavo sprememb v oblakih točk zemeljskega površja, posnetih s tehnologijo LiDAR. Zaradi visoke ločljivosti zajetih podatkov je mogoča obdelava na ravni objektov namesto posameznih točk. S tem izkoristimo uporabo metod, temelječih na matematični morfologiji, s katerimi izvedemo analizo oblik ter izluščimo objekte. Iz vhodnih podatkov, zajetih v dveh časovnih trenutkih, določimo tudi njihove razlike, ki jih uporabimo kot osnovo za določitev spremenjenih objektov. Vsak premik objekta se odrazi v obliki pozitivne in negativne spremembe. S povezovanjem teh sprememb lahko določimo položaj premaknjenega objekta na obeh vhodnih podatkih, prav tako pa tudi njegovo pojavitev oz. izginotje. Uspešnost zaznave smo potrdili s testiranjem na treh območjih Slovenije, ki so bila posneta vsaj dvakrat.

Ključne besede: zaznava sprememb, matematična morfologija, LiDAR, obdelava podatkov daljinskega zaznavanja

A new method to detect changes in the LiDAR data

The paper proposes a new method to detect changes in point clouds of the Earth surface acquired by the LiDAR technology. The shape-analysis methods based on mathematical morphology are used. To extract objects, differences are determined from two input datasets, each acquired at different times and serving as the basis for detection of changed objects. Each object motion produces positive and negative changes. By matching them, the object location as well as its appearance or disappearance are determined. The accuracy of the proposed method is confirmed by testing it on three areas in Slovenia that have been minimally twice scanned by LiDAR.

Keywords: change detection, mathematical morphology, LiDAR, processing remote sensing data

1 UVOD

Zaznava sprememb je pomembno področje obdelave podatkov zemeljskih opazovanj, katerih rezultati so ključni za številne ekološke in geodetske študije. Ti postopki lahko pripomorejo k ugotovi trendov urbanizacije območja [1], [2], spreminjanja obale [3], [4], izrabe obdelovalnih površin [5] in zemeljskih premikov [6].

S sodobnimi tehnologijami daljinskega zaznavanja, kot je na primer LiDAR (ang. Light Detection And Ranging) [7], pridobimo podatke o obliki zemeljskega površja. Podatki so predstavljeni kot nestrukturirana množica tridimenzionalnih točk (oblak točk) in vključujejo vse zemeljsko površje, kot so zgradbe, vegetacija, ptice in drugi objekti, ki jih zadane laserski impulz. Poleg vseh objektov pridobimo tudi podatke o reliefu. Slovenija je bila v celoti posneta s tehnologijo LiDAR v okviru projekta Ministrstva za okolje in prostor

z naslovom Lasersko skeniranje Slovenije [8]. Povprečna gostota znaša 5 točk na m^2 [9], kar omogoča zaznavo večjih objektov, kot so hiše in drevesa.

Cilj postopkov za zaznavo sprememb je njihova verodostojna določitev na podatkih LiDAR opazovanega območja, zajetih ob različnih časih. Glavni izziv je razlikovanje med smiselnimi in nesmiselnimi spremembami. Slednje lahko nastanejo zaradi različnih pogojev zajema podatkov ali šuma. Tem pomanjkljivostim pogosto podležejo metode, ki temeljijo na obdelavi osnovnih podatkovnih gradnikov (točke, piksli, vokseli). Zaradi vedno višje ločljivosti zajema podatkov, se vedno bolj uveljavljajo metode, ki delujejo na ravni objektov. Slednje pogosto dosega višjo natančnost [10], [11], saj izkoriščajo prednosti združevanja točk v višjepomenske gradnike (relief, stavbe, vegetacija). Prav s takšno vrsto podatkov pa se ukvarja matematična morfologija [12].

Danes metode matematične morfologije uporabljamo na večjih področjih obdelave podatkov daljinskega zaznavanja. Tako sta Boldt in Schultz [13] predstavila metodo za zaznavo sprememb na radarskih podatkih z uporabo morfološkega izmenjujočega zaporednega filtriranja. Boldt [14] je leto kasneje to metodo še izboljšal. Dalla Mura s sodelavci [15] je predstavil metodo za zaznavo sprememb na satelitskih posnetkih z uporabo morfološkega filtriranja z rekonstrukcijo. Prav tako je Falco s sodelavci [16] na satelitskih posnetkih iskal spremembe z uporabo diferencialnih atributnih profilov. Teo in Shih [17] sta predstavila metodo za zaznavo sprememb nad podatki LiDAR urbanih območij. Z odštevanjem tal od podatkov sta izpostavila objekte ter jih glede na valovitost površja klasificirala na zgradbe in vegetacijo. Sprememba višin zaznanih objektov predsta-

vlja spremembo objekta. Pang s sodelavci [18] je predstavil metodo za zanavo sprememb zgradb iz podatkov LiDAR. Avtorji izpostavijo objekte z odštevanjem tal ter iskanjem ujemanja objektov med dvema množicama podatkov z metodo RANSAC [19]. Xu s sodelavci [20] je predstavil metodo za zaznavo sprememb zgradb in dreves v urbanih območjih. Metoda najprej loči tla od ostalih objektov. Zaznava sprememb poteka na ravni primerjanja posameznih točk iz dveh oblakov točk LiDAR, predstavljenih v osmiškem drevesu.

Tudi v tem članku bomo zaznavali spremembe v podatkih LiDAR z metodami matematične morfologije. Ta združuje koncepte teorije množic, geometrije in topologije z namenom definicije aritmetike oblik. Tako omogoča sistematično obdelavo in analizo oblik objektov. Članek je sestavljen iz štirih poglavij. V poglavju 2 podamo kratek pregled osnov morfoloških operacij, ki smo jih uporabili, medtem ko poglavje 3 vsebuje opis postopka zaznave sprememb. V poglavju 4 predstavimo testne podatke in rezultate uspešnosti predstavljene metode. Na koncu podamo še sklep v poglavju 5.

2 TEORETIČNE OSNOVE

V tem poglavju predstavimo operatorje matematične morfologije, ki jih v naslednjem poglavju uporabimo za zaznavo sprememb. Obširnejše razlage osnov matematične morfologije so predstavljene v [21], [22], [23], [24].

Naj bo G regularna mreža, definirana kot preslikava $G : c \rightarrow \mathbb{R}$. Mreža vsebuje množice povezanih komponent, razvrščenih po višinskih nivojih h . Z uporabo pragovne superpozicije (angl. threshold superposition) [25] ustvarimo dekompozicijo mreže G po nivojih h , kjer vsak nivo označimo s T_h :

$$T_h = \{c \mid G[c] \geq h\}. \quad (1)$$

S $C_h^i \subset T_h$ označimo i -to povezano komponento nivoja h . Poljuben atribut povezane komponente označimo z $\Lambda(C_h^i)$ (npr. ploščina, standardna deviacija, velikost omejujoče škatle). Atributno filtriranje odstranjuje posamezne povezane komponente glede na velikost atributnega filtra λ . Ta operacija ne more vpeljati novih oblik ali spreminjati obstoječih. Tako lahko atributno odpiranje $\gamma_\lambda^\Lambda(G)$ v vsaki točki definiramo kot [26]:

$$\gamma_\lambda^\Lambda G[c] = \bigvee \{h \mid c \in C_h^i, \Lambda(C_h^i) \geq \lambda\}. \quad (2)$$

Nasprotna operacija, zapiranje, je označena z $\delta_\lambda^\Lambda(G)$. Večnivojsko hierarhično dekompozicijo nad G izvedemo s postopoma naraščujočim atributnim odpiranjem ali zapiranjem. Rezultat je vektor filtriranih G dolžine n , ki so postopoma manj podrobni. S postopkom diferencialnih atributnih profilov nato v vsaki točki izračunamo razlike med zaporedoma filtriranimi G kot

$$\Delta(\gamma_\lambda^\Lambda G[c]) = \left(\gamma_{\lambda_{i-1}}^\Lambda(G[c]) - \gamma_{\lambda_i}^\Lambda(G[c]) \right), \quad (3)$$

kjer je $\lambda_i > \lambda_{i-1}$ in $1 < i \leq n$. Te razlike imenujemo odzivi na filter [27]. Ker odpiranje predstavlja filtriranje $G[c]$ z visokimi vrednostmi celice c , uporabimo za filtriranje temnejših regij atributno zapiranje. Nad vsako celico uporabimo obe operaciji, ki ju nato združimo v vektor diferencialnih atributnih profilov kot

$$DAP(c) = \Delta(\gamma_\lambda^\Lambda(G[c])) \wedge \Delta(\delta_\lambda^\Lambda(G[c])). \quad (4)$$

Z analizo dobljenega vektorja razlik določimo pomen posameznih povezanih komponent. C_h^i z majhnimi ploščinskimi atributi in odzivi smatramo kot šumne, medtem ko tiste z največjimi odzivi v predlagani metodi smatramo kot objekte. Pri tem je največja ploščina objekta omejena z velikostjo največjega atributnega filtra λ_n . Ostale povezane komponente obravnavamo kot ozadje. Za določitev ali je povezana komponenta z najvišjim odzivom svetla ali temna regija, uporabimo večnivojsko shemo izravnave (angl. Multi-Scale Leveling scheme, MSLS) [28]:

$$\Phi(c_i) = \begin{cases} \gamma_\lambda^\Lambda G[c_i] & : t_{\gamma_\lambda^\Lambda}(c_i) > t_{\delta_\lambda^\Lambda}(c_i) \\ \delta_\lambda^\Lambda G[c_i] & : t_{\gamma_\lambda^\Lambda}(c_i) < t_{\delta_\lambda^\Lambda}(c_i) \\ \gamma_\lambda^\Lambda G[c_i] & : t_{\gamma_\lambda^\Lambda}(c_i) = t_{\delta_\lambda^\Lambda}(c_i) \end{cases}, \quad (5)$$

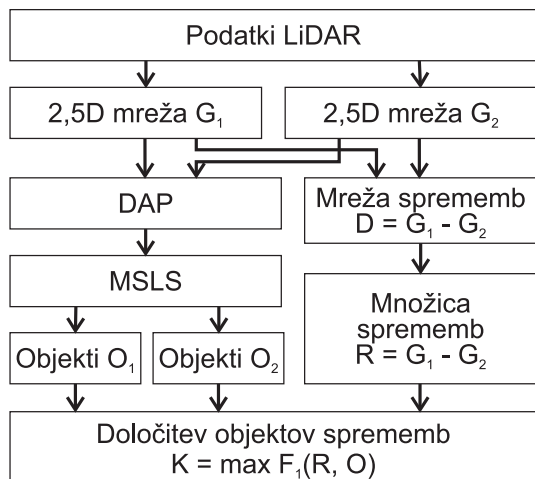
kjer je $\Phi(c_i)$ izbran operator (odpiranje, zapiranje) za celico c_i , t pa predstavlja največji odziv na filter.

3 METODA

V tem poglavju predstavimo metodo za zaznavanje sprememb z uporabo operatorjev, predstavljenih v poglavju 2. Celoten postopek povzema diagram poteka na sliki 1.

Nad nestrukturiranimi podatki LiDAR najprej vzpostavimo topološko strukturo 2,5D mreže. Vrednost vsake celice $c_i = (x_i, y_i)$ je določena z višino najvišje točke znotraj celice. Rezultat preslikave v celicah brez vsebovanih točk je določena z interpolacijo IDW (Inverse Distance Weighting) [29]. Z G_1 in G_2 označimo mreži poravnanih podatkov istega območja, posnetih ob različnih časih. Iz obeh G najprej pridobimo objekte, ki jih bomo uporabili kot osnovo za zaznavo sprememb. Z uporabo diferencialnih atributnih profilov (angl. differential attribute profiles, DAP) [30] nad mrežo izvedemo večnivojsko analizo oblik. Rezultat je množica O povezanih komponent z najvišjimi odzivi, ki predstavljajo objekte (slika 2c).

Za zaznavo sprememb med dvema G , najprej izpostavimo njune razlike z odštevanjem. Rezultat tega je mreža sprememb $D = \{D_p, D_n\}$, kjer sta D_p in D_n podmnožici pozitivnih in negativnih vrednosti. Po preprosti binarizaciji $D_p > 0$ in $D_n > 0$ dobimo množico sprememb R , predstavljenih z binarnimi povezanimi komponentami (slika 2d). Ker zgolj iz sprememb ne moremo vedno ugotoviti celotnega objekta, ki se je spremenil, je ideja postopka povezati ustrezne spremembe z objekti, ki so spremembo povzročili. Med



Slika 1: Diagram poteka predlagane metode

prehodom iz G_1 v G_2 lahko objekti preidejo v tri stanja spremembe: pojavitev, izginotje in premik. Pri prvih dveh stanjih so spremembe enake obliki objektom, ki so jo povzročili. Takšen primer je gradnja ali rušenje zgradbe. O premikih objektov govorimo, kadar se objekt nahaja tako v G_1 kot tudi v G_2 , vendar na drugem položaju. Objekta imata lahko kratko medsebojno razdaljo (npr. sprememba struge reke) kot tudi daljšo (npr. kotaljenje skale). En premik povzroči dve spremembi, in sicer iz G_1 objekt izgine (pozitivna sprememba D_p) medtem ko se na G_2 pojavi (negativna sprememba D_n). Množico spremenjenih objektov označimo s K (slika 2f). Spremenjene objekte določimo tako, da za vsako povezano komponento spremembe R_i poiščemo objekt O_i , s katerim se ploščina najbolje prekriva po metriki F_1 :

$$K = \{O_i \mid \arg \max_j F_1(R_j, O_i)\}. \quad (6)$$

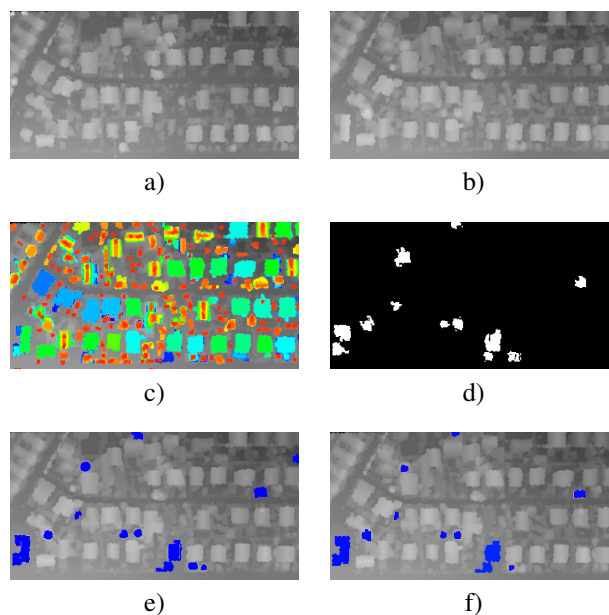
V primeru pojavitve in izginotja, je K končna množica spremenjenih objektov. Takšen postopek uporabljamo predvsem v urbanih območjih, kjer se zgradbe običajno zgolj postavijo ali porušijo. Ker imamo v naši metodi v tem trenutku dostop do oblikovnih atributov objektov in vemo, katere spremembe so jih povzročile, lahko spremljamo tudi premikajoče se objekte, kot so zemeljski ledeniki ali morene [31].

Pri premikajočih objektih se pojavijo primeri, kjer se njegova oblika spremeni tekom premika. Te težave smo rešili z uporabo ujemanja atributov, ki niso vezani na obliko. Tako vzamemo množici D_p in D_n ter med objekti iščemo najboljše ujemanje oblikovno-neodvisnih atributov. Zemeljska gmota ali padle skale ne morejo kar izginiti in se volumen dveh sprememb mora ujemanjati. Ker imamo že vzpostavljene relacije med D in K , lahko določimo ujemanje objekta med G_1 in G_2 , ki se je skozi čas premaknil in morda tudi spremenil obliko. Hitro iskanje ujemanj atributov dosežemo z drevesom

Tabela 1: Število objektov in sprememb v podatkih

Nabor podatkov	Št. sprememb
Maribor center	105
Pekre	18
Beltinci	100

k-d [32], medtem ko implementacija morfoloških operatorjev temelji na računsko učinkoviti drevesni strukturi Max-Tree [33].

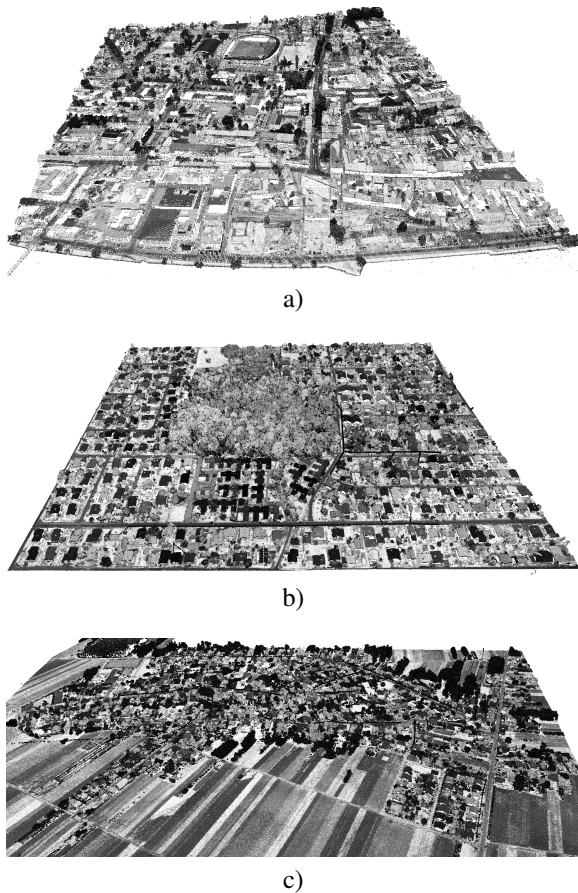
Slika 2: Koraki zaznave sprememb: a) in b) 2,5D mreže podatkov G_1 in G_2 , c) objekti O dobljeni iz DAP, d) množica sprememb R , e) referenčne spremembe, f) rezultat zaznave sprememb s predlagano metodo

4 REZULTATI

Uspešnost zaznave predlagane metode smo ovrednotili s testiranjem na treh območjih Slovenije. Ker je Slovenija bila v celoti posneta s tehnologijo LiDAR zgolj enkrat (manjši del leta 2011, večina pa 2014 in 2015), smo bili omejeni na območja, ki so bila posebej posneta že prej. Naša testna množica obsega center mesta Maribor in predmestja Pekre, oba posneta v letih 2011 in 2014, ter območje občine Beltinci, posnete leta 2013 in 2014. Nabor podatkov je prikazan na sliki 3. Mreža G je ustvarjena z metrsko ločljivostjo. Pri podatkih urbanih območij se spremembe večinoma odražajo v zgradbah in posameznih drevesih. Izpostaviti je potrebno, da predstavljena metoda ne klasificira podatkov in zato tudi ne določi pomena zaznane spremembe. V tabeli 1 je za vsak nabor podatkov navedeno število spremenjenih objektov.

Uporabljeni parametri predstavljene metode so se razlikovali za tip območja. Tako smo v urbanem območju

uporabili manjše vrednosti λ , ki poudarijo večinoma stavbe in posamezna drevesa, medtem ko smo za neposeljena območja uporabili λ večjih vrednosti.



Slika 3: Testni podatki območij: a) Maribor, b) Pekre, c) Beltinci

Uspešnost zaznave predstavljene metode smo ovrednotili z metrikami natančnost (angl. precision), pravilnost (angl. recall) in mero F_1 . Ker metoda temelji na zaznavi objektov, je tudi za določitev uspešnosti potekala na ravni pravilne zaznave spremenjenih objektov. Referenčne podatke je ročno označil strokovnjak. V tabeli 2 so prikazani rezultati. Večino sprememb v naboru podatkov so povzročila posamezna drevesa (rast, posek, posaditev) in redkeje zgradbe. Zaznava je bila uspešnejša pri zgradbah kot pri vegetaciji, saj postavitve oz. rušitev zgradbe daje večji odziv na sliki sprememb kot prirastek drevesa. Slabša natančnost pri središču Maribora je večinoma posledica lažnih zaznav v primerih, ko se je spremenilo drevo, ki raste zelo blizu in na enaki višini kot streha hiše, saj ju metoda razpozna kot en objekt.

5 SKLEP

Predstavili smo novo metodo za zaznavo sprememb iz podatkov LiDAR z uporabo metod, temelječih na matematični morfologiji. Predlagana metoda zaznava spremembe na ravni objektov, ki jih pridobimo z višinskim

Tabela 2: Rezultati ovrednotenja natančnosti, pravilnosti in mere F_1 za zaznavo sprememb

Nabor podatkov	Natančnost	Pravilnost	Mera F_1
Maribor center	70,3 %	92,4 %	79,8 %
Pekre	82,4 %	77,8 %	80 %
Beltinci	87,6 %	78 %	82,5 %
Povprečje	80,1 %	82,7 %	80,8 %

filtriranjem povezanih komponent 2,5D mreže, ustvarjene iz oblaka točk podatkov LiDAR. Zaznavo sprememb dosežemo z iskanjem najboljše mere F_1 med množico razlik dveh vhodnih mrež in naborom objektov. Iz rezultatov je razvidno, da metoda uspešno zazna pojavitve in izginotje objektov, kot so zgradbe in drevesa.

Uspešnost metode smo ovrednotili na podatkih treh območij Slovenije. Rezultati so pokazali, da je metoda v povprečju natančna 80,1-odstotno, pravilna 82,7-odstotno in dosega mero F_1 80,8-odstotno. Napake večinoma nastanejo na predelih, kjer se stika več objektov z enako višino. To se pri metodi namreč odraža kot zgolj en objekt namesto več objektov.

ZAHVALA

Raziskovalni program št. P2-0041 in projekt Algoritmni modeliranje dinamike ekosistemov z metodami matematične morfologije in teorije mrež, št. J2-6764, je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Prav tako se zahvaljujemo podjetju GEOIN, d.o.o., in Agenciji Republike Slovenije za okolje za dostop do podatkov LiDAR.

LITERATURA

- [1] H. Taubenbock, T. Esch, A. Felbier, M. Wiesner, A. Roth, and S. Dech, "Monitoring urbanization in mega cities from space," *Remote Sensing of Environment*, vol. 117, pp. 162–176, 2012. Remote Sensing of Urban Environments.
- [2] J. S. Deng, K. Wang, Y. Hong, and J. G. Qi, "Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization," *Landscape and Urban Planning*, vol. 92, no. 3–4, pp. 187–198, 2009.
- [3] A. A. Alesheikh, A. Ghorbanali, and N. Nouri, "Coastline change detection using remote sensing," *International Journal of Environmental Science & Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 61–66, 2007.
- [4] X. Li and M. C. Damen, "Coastline change detection with satellite remote sensing for environmental management of the pearl river estuary, china," *Journal of Marine Systems*, vol. 82, Supplement, pp. 54–61, 2010. Pearl River Estuary related sediments as response to Holocene climate change and anthropogenic impact (PECAI).
- [5] O. A. El-Kawy, J. Rød, H. Ismail, and A. Suliman, "Land use and land cover change detection in the western Nile delta of Egypt using remote sensing data," *Applied Geography*, vol. 31, no. 2, pp. 483–494, 2011.
- [6] P. Lu, A. Stumpf, N. Kerle, and N. Casagli, "Object-oriented change detection for landslide rapid mapping," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, pp. 701–705, July 2011.

- [7] J. C. Suarez, C. Ontiveros, S. Smith, and S. Snape, "Use of airborne lidar and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry," *Computers & Geosciences*, vol. 31, no. 2, pp. 253–262, 2005. Geospatial Research in Europe: {AGILE} 2003.
- [8] B. Pegan Žvokelj, V. Bric, and M. Triglav Čekada, "Lasersko skeniranje Slovenije," *Geodetski vestnik*, vol. 58, no. 2, pp. 349–351, 2014.
- [9] M. Triglav Čekada and V. Bric, "Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije," *Geodetski vestnik*, vol. 59, no. 3, pp. 586–592, 2015.
- [10] K. Johansen, L. Arroyo, S. Phinn, and C. Witte, "Object-oriented change detection of riparian environments from high spatial resolution multi-spectral images," in *Geographic Object Based Image Analysis for the 21st Century* (G. Hay, T. Blaschke, and D. Marceau, eds.), vol. XXXVIII-4/C1, (Calgary, Canada), International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), August 2008.
- [11] G. Yan, J. Mas, B. Maathuis, Z. Xiangmin, and P. Van Dijk, "Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches - a case study in a coal fire area, wuda, inner mongolia, china," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 18, pp. 4039–4055, 2006.
- [12] J. Serra, "Introduction to mathematical morphology," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 35, no. 3, pp. 283–305, 1986.
- [13] M. Boldt and K. Schulz, "Change detection in time series of high resolution sar satellite images," in *Proc. SPIE 8538, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications III* (S. Habib, D. Messinger, A. Maltese, U. Michel, C. D.L., M. Ehlers, K. Schulz, and K. Nikolakopoulos, eds.), vol. 8538, (Edinburgh, United Kingdom), Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), October 2012.
- [14] M. Boldt, K. Schulz, A. Thiele, and S. Hinz, "Using morphological differential attribute profiles for change categorization in high resolution sar images," in *ISPRS Hannover Workshop 2013* (C. Heipke, K. Jacobsen, F. Rottensteiner, and U. SÀrgerl, eds.), vol. XL-1/W1, (Hannover, Germany), pp. 29–34, International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), May 2013.
- [15] M. Dalla Mura, J. Benediktsson, F. Bovolo, and L. Bruzzone, "An unsupervised technique based on morphological filters for change detection in very high resolution images," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5, pp. 433–437, July 2008.
- [16] N. Falco, M. Mura, F. Bovolo, J. Benediktsson, and L. Bruzzone, "Change detection in vhr images based on morphological attribute profiles," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 10, pp. 636–640, May 2013.
- [17] T.-A. Teo and T.-Y. Shih, "Lidar-based change detection and change-type determination in urban areas," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. 3, pp. 968–981, 2013.
- [18] S. Pang, X. Hu, Z. Wang, and Y. Lu, "Object-based analysis of airborne lidar data for building change detection," *Remote Sensing*, vol. 6, no. 11, pp. 10733–10749, 2014.
- [19] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Commun. ACM*, vol. 24, pp. 381–395, June 1981.
- [20] H. Xu, L. Cheng, M. Li, Y. Chen, and L. Zhong, "Using ocrees to detect changes to buildings and trees in the urban environment from airborne lidar data," *Remote Sensing*, vol. 7, no. 8, pp. 9682–9704, 2015.
- [21] B. S. D. Sagar, *Mathematical Morphology in Geomorphology and GISci*. Chapman & Hall/CRC, 1st ed., 2013.
- [22] F. Y. Shih, *Image Processing and Mathematical Morphology: Fundamentals and Applications*. CRC Press, 2009.
- [23] P. Soille, *Morphological image analysis: principles and applications*. Springer-Verlag, 2 ed., 2003.
- [24] P. Salembier and M. H. F. Wilkinson, "Connected operators," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 26, pp. 136–157, November 2009.
- [25] P. Maragos and R. Ziff, "Threshold superposition in morphological image analysis systems," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 5, pp. 498–504, 1990.
- [26] G. Ouzounis and P. Soille, "Differential area profiles," in *20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pp. 4085–4088, IEEE Computer Society, August 2010.
- [27] G. K. Ouzounis, M. Pesaresi, and P. Soille, "Differential area profiles: Decomposition properties and efficient computation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 34, pp. 1533–1548, Aug 2012.
- [28] M. Pesaresi and J. Benediktsson, "A new approach for the morphological segmentation of high-resolution satellite imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 2, pp. 309–320, 2001.
- [29] V. Chaplot, F. Darboux, H. Bourennane, S. Leguedois, N. Silvera, and K. Phachomphon, "Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density," *Geomorphology*, vol. 77, no. 1–2, pp. 126–141, 2006.
- [30] M. D. Mura, J. A. Benediktsson, B. Waske, and L. Bruzzone, "Morphological attribute profiles for the analysis of very high resolution images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 3747–3762, Oct 2010.
- [31] M. Triglav Čekada, M. Zorn, and R. R. Colucci, "Changes in the area of the Canin (Italy) and Triglav glaciers (Slovenia) since 1893 based on archive images and aerial laser scanning," *Geodetski vestnik*, vol. 58, no. 2, pp. 274–313, 2014.
- [32] J. L. Bentley, "Multidimensional binary search trees used for associative searching," *Commun. ACM*, vol. 18, pp. 509–517, Sept. 1975.
- [33] P. Salembier, A. Oliveras, and L. Garrido, "Antiextensive connected operators for image and sequence processing," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 7, no. 4, pp. 555–570, 1998.

Denis Kolednik je diplomiral in magistriral iz računalništva in informacijskih tehnologij v letih 2011 in 2013 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Od leta 2013 je zaposlen kot asistent. Njegovo raziskovalno področje je obdelava geometrijskih podatkov, natančneje zaznava sprememb in iskanje vzorcev v 3D oblakih točk.

Domen Mongus je prejel doktorat znanosti iz računalništva leta 2012. Od leta 2013 je zaposlen kot docent za predmetno področje računalništva na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Njegovo raziskovalno področje je v večini povezano z obdelavo podatkov LiDAR. Preostala področja so matematična morfologija, razpoznavanje vzorcev, računalniška geometrija in stiskanje podatkov.

Borut Žalik je na Univerzi v Mariboru diplomiral iz elektrotehniko leta 1985 in magistriral ter doktoriral iz računalništva v letih 1989 in 1993. Je redni profesor računalništva na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, kjer je tudi vodja Laboratorija za geometrijsko modeliranje in algoritme multimedijev. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo računalniško geometrijo, stiskanje geometrijskih podatkov, znanstveno upodabljanje in geografske informacijske sisteme.