

Izboljšana registracija oblakov točk za zaznavanje sprememb površja na primeru Strunjanskega klifa

Klemen Kregar¹, Wolfgang Wiedemann², Marko Vrabc³, Christoph Holst²

Povzetek

Terestrično lasersko skeniranje (TLS) je primerna metoda za zaznavanje sprememb v naravnem in grajenem okolju. V projektu »Erozijski procesi na obalnih flišnih klifih z oceno tveganja« uporabljamo TLS kot referenčno metodo za določitev pravih sprememb površine klifa. Kljub upoštevanju najvišjih standardov pri načrtovanju in zajemu podatkov: uporaba ustrezne metode, zagotovitev najboljše možne geometrije skeniranja, dobra geometrična razporeditev oslonilnih točk, visoka natančnost določitve ter spremljanje stabilnosti in posodabljanje položajev oslonilnih točk ter kakovost registracije znotraj natančnosti slučajnih pogreškov merskih metod, merski rezultati niso zagotovili pričakovane kakovosti. Predlagamo metodo zaznavanja stabilnih območij, ki temelji na segmentaciji rastrskih podob interpoliranih iz oblaka točk. Kriteriji stabilnosti so razlike med položajema oblakov dveh terminskih izmer, ter razlike orientacije površja. Identificirana stabilna območja služijo za registracijo ICP, s katero izboljšamo kakovost registracije in tako dobimo bolj realističen prikaz sprememb površja na klifu.

Ključne besede: Terestrično lasersko skeniranje, spremljanje deformacij, Zaliv svetega Križa, eocenski fliš, obalni klif

Keywords: Terrestrial laser scanning, Deformation monitoring, Zaliv svetega Križa, Eocene flysch, Coastal cliff

Uvod

Terestrično lasersko skeniranje (TLS) se je v zadnjih desetletjih uveljavilo kot izjemno uporabna metoda za zaznavanje sprememb v naravnem in grajenem okolju. Javna agencija za raziskave in razvoj financira triletni projektu »Erozijski procesi na obalnih flišnih klifih z oceno tveganja«. Geodeti v sodelovanju z geologi preverjamo možne metodologije za spremljanje sprememb površja klifov na večjih območjih. TLS uporabljamo kot referenčno metodo za določitev pravih sprememb površine klifa. Na podlagi rezultatov pridobljenih s TLS bomo preverjali kakovost alternativnih metod zaznavanja sprememb površine klifa. TLS je izbran za referenčno metodo zaradi dovolj obširne literature uporabe te metode za spremljanje obalnih klifov v zadnjih dveh desetletjih (Hoffmeister et al., 2012; Kersten et al., 2020; Kuhn & Prüfer, 2014; Poulton et al., 2006; Rosser et al., 2005b). Ugotovitve v literaturi nakazujejo, da je metoda za spremljanje obalnih klifov primerna in znanstveno podprta.

Obalni klif ima za skeniranje s TLS zahtevno konfiguracijo terena. Ozek pas obale med klifom in strmo steno oži izbiro primernih stojišč. Prisotnost rastja v spodnjem delu klifa ter relativna bližina stojišč klifu povzročata sence v zajetih podatkih. Težavo lahko rešujemo s

¹ UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

² TUM, Lehrstuhl für Ingenieurgeodäsie, Arcisstraße 21, 80333 München

³ UL, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana

postavitvijo mnogih stojišč, kar ima za posledico kopičenje pogreškov pri registraciji stojišč. Druga, pomembnejša težava pa je zagotovitev stabilne referenčne osnove, ki bo omogočala primerjavo podatkov zajetih v različnih časovnih epohah.

Iz naštetih razlogov smo za območje obravnave izbrali odsek klifa nad Zalivom svetega Križa pri Strunjanu, kjer se obala na razdalji 500 m ukrivlja iz smeri vzhod – zahod v smer sever – jug. Takšna konfiguracija omogoča postavitev stojišča skenerja vrh klifa na zahodu na način, da z enega stojišča lahko skeniramo celotni predel klifa, ki omejuje zaliv na vzhodu (Slika 1).



Slika 1: Pogled na obravnavano področje s stojišča skenerja

Obravnavani obalni klif gradi eocenski fliš, v katerem se menjujejo trdne plasti peščenjaka z vmesnimi mehкими plastmi laporovca. Erozijska odstranitev predvsem laporovca, vmesne trdne plasti peščenjaka pa funkcionirajo kot barriere, ki deloma zadržujejo erodiran laporast material. Erozijska odstranitev plasti peščenjaka, ki se nato rušijo ob tektonskih razpokah. Zaradi tega je erozijska odstranitev klifa, gledano v majhnem merilu, nestacionaren proces s počasnim zveznim odstranjevanjem mehkega laporovca z občasnimi nenadnimi večjimi spremembami površja.

Meritve na klifu izvajamo dvakrat letno, spomladi in jeseni. Predpostavljamo, da se med posameznimi terminskimi izmerami ne deformira celotno področje obravnave ampak se zaznavne spremembe zgodijo na lokalnih omejenih območjih.

Za zagotovitev stabilne referenčne osnove se praviloma uporablja oslonilne točke na stabilnih območjih (Rosser et al., 2005a). Centre tarč na oslonilnih točkah iz vrednotimo iz oblaka točk in s podobnostno transformacijo skenogram transformiramo v referenčni koordinatni sistem. V obravnavanem primeru smo referenčne točke stabilizirali s kovinskimi sidri v plasteh flišnega peščenjaka na obravnavanem območju, ki je podvrženo spremembam. Rešitev ni optimalna, saj ne moremo predpostaviti popolne stabilnosti oslonilnih točk. Vendar položaj skenerja na tako veliki oddaljenosti od obravnavanega območja onemogoča boljše rešitve. Okolica stojišča je poraščena z vegetacijo, v okolici ni stabilne podlage, točke blizu stojišča bi povzročile prevelik vpliv ekstrapolacije pri transformaciji stojišča.

Položaje oslonilnih točk pred vsako izmero izmerimo s polarno metodo s preciznim geodetskim instrumentom. Pred vklopom oblaka točk preverimo stabilnost oslonilnih točk s primerjavo z njihovimi položaji v prejšnjih izmerah. Kljub vsemu se je izkazalo, da oslonilne točke ne zagotavljajo dovolj dobro stabilne koordinatne osnove. Možni sta dve razlagi: dejanska nestabilnost trdih peščenjakovih plasti in/ali pogreški določitve položaje centrov tarč iz oblaka točk zaradi velike razdalje skeniranja.

Predlagana rešitev je vklop skeniranega oblaka točk na oblak predhodne izmere na območjih, ki se med epohami niso spremenila (Wujanz et al., 2018).

Metode

Zajem in priprava podatkov

Doslej smo izmero izvedli sedemkrat zapored v jesenskem in spomladanskem času. Skeniranje izvajamo s skenerjem Riegl VZ-400, z nominalno prostorsko natančnostjo zajema točk 3 mm in dosegom do 600 m (Riegl LMS, 2014). Z izbranega stojišča skeniramo območje klifa na razdalji 300 do 550 m z ločljivostjo 1,6 cm na 400 m v načinu »long range«. Oslonilne točke skeniramo z aplikacijo za fino skeniranje tarč znotraj programa RiSCAN PRO, ki avtomatsko nastavlja prostorsko ločljivost in način skeniranja.

Oslonilne točke so realizirane z okroglimi ploščicami premera 5 cm z retroreflektivno površino. Centre tarč iz skenograma iz vrednotimo kot povprečje točk na tarči uteženo z intenziteto odbojev, ki presegajo izbrani prag. Vklop izvedemo s podobnostno 6-parametrično transformacijo, pri kateri dosegamo odstopanja točk po transformaciji do 6 mm. Položaji oslonilnih točk so bili v prvi izmeri določeni v državnem koordinatnem sistemu D96/TM z elipsoidnimi višinami. V vsaki izmeri s precizno polarno izmero preverjamo položaje oslonilnih točk in jih ob zaznanih premikih popravljamo.

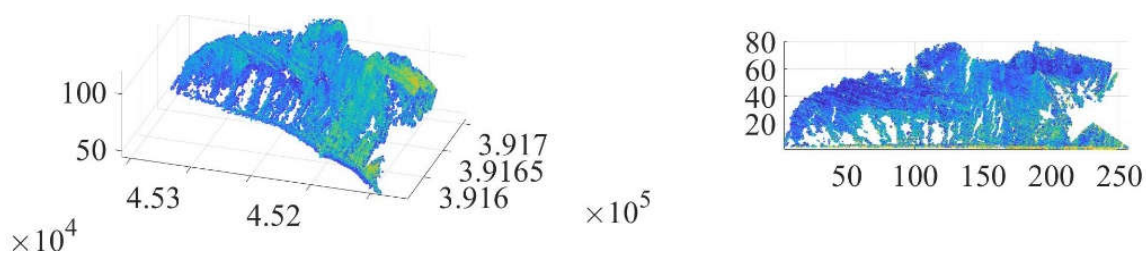
Rezultat je georeferenciran oblak točk velikosti približno 30 milijonov točk. Pred nadaljnjimi postopki obdelave oblak grobo obrežemo in filtriramo, da odstranimo čim večji del moteče vegetacije. Uporabljamo metodo filtriranja geometričnih značilk (features) in sicer odstranimo točke z manj kot 2000 sosedi v radiju 1 m in točke s faktorjem ravninskosti (planarity) v okolici 0,2 m manjšim od 0,3. Konfiguracija terena je za filtriranje izjemno zahtevna, zato s filtriranjem odstranimo tudi nekaj točk na klifu, nekaj vegetacije pa ostane. Ročno obrezovanje tako velikega območja v toliko ponovljenih terminih bi bilo časovno preveč potratno.

Zadnji korak priprave podatkov je izračun normal ravnin skozi točke v okolici 6 cm za vsako točko. Enako orientacijo normal zagotovimo s pogojem, da je tretja komponenta vedno pozitivna.

Predstavitev sprememb površja – koordinatni sistem

Obstaja več metod predstavitve sprememb površja iz dveh oblakov točk zaporednih terminskih izmer. Najosnovnejša je prikaz razdalj med najbližjimi pari točk v obeh oblakih, t. i. »Cloud2Cloud« razdalja. Pri takšnem načinu ne moremo razločevati med erozijo in sedimentacijo, pozitivnimi in negativnimi spremembami površja. Druga metoda je t. i. M3C2 (James et al., 2017; Lague et al., 2013), ki prikazuje spremembe v smeri normalnih vektorjev površja. Novejše metode prikazujejo spremembe s pomočjo vektorskih polj (Gojčić et al., 2020; Holst et al., 2021).

Glede na naravo spreminjanja površja, podiranje celotnih blokov iz trdih in posipanje peska iz mehkih plasti ocenjujemo, da bomo spremembe najbolj realistično lahko prikazovali kot spremembo digitalnih modelov površja (Wheaton et al., 2010). Za tak način je potrebno oblak klifa transformirati tako, da višinska komponenta kaže pravokotno iz povprečne ravnine stene klifa. Os x pa naj bo orientirana vodoravno. Oblaku pred transformacijo odštejemo zaokroženo vrednost najmanjših koordinat.



Slika 2: Transformacija oblaka točk v koordinatni sistem stene klifa

Identifikacija stabilnih področij

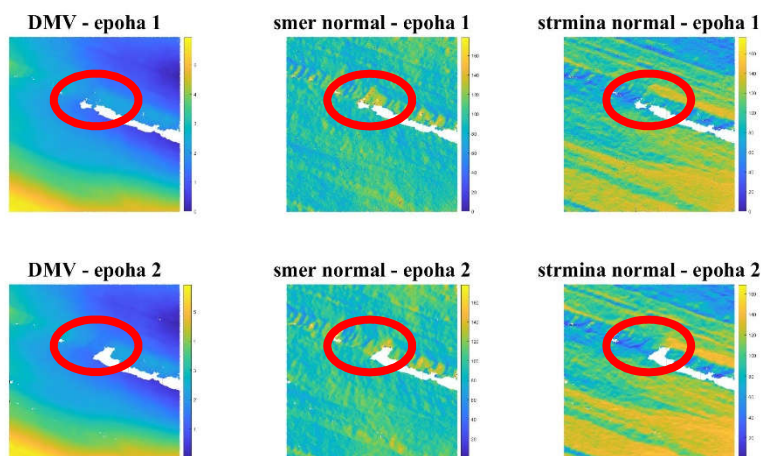
Približno registriran oblak točk terminske izmere lahko vklopimo na oblak predhodne izmere s postopkom ICP (Iterative Closest Point) (Besl & McKay, 1992). V primeru, da pričakujemo, da so se med epohama zgodile spremembe površja, postopka ne smemo uporabiti. Če bi vklopili celoten deformiran oblak druge izmere, bi na vklop vplivale dejanske spremembe, ki jih zaradi tega ne bi mogli neodvisno določevati. Za vklop smemo uporabiti samo odseke na katerih ni prišlo do spremembe.

Za vsako točko izračunamo smer in strmino normalnega vektorja skozi ravnino njenih najbližjih sosedov.

$$smer = \text{atan}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

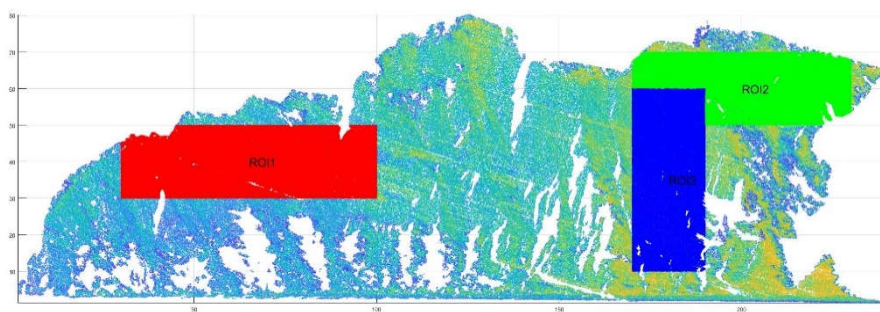
$$strmina = \text{asin}(n_3)$$

kjer so n_1 , n_2 in n_3 komponente normalnega vektorja. Pri izrisu oblaka točk pobarvanega glede na višino, smer in strmino normal, lahko opazimo, da so spremembe lepo izražene predvsem pri slednjih dveh izrisih (Slika 3). Iščemo postopek, s katerim bomo lahko razlike, ki jih opazujemo na izrisih zaznali avtomatsko in na ta način nepristransko identificirali nestabilna območja.



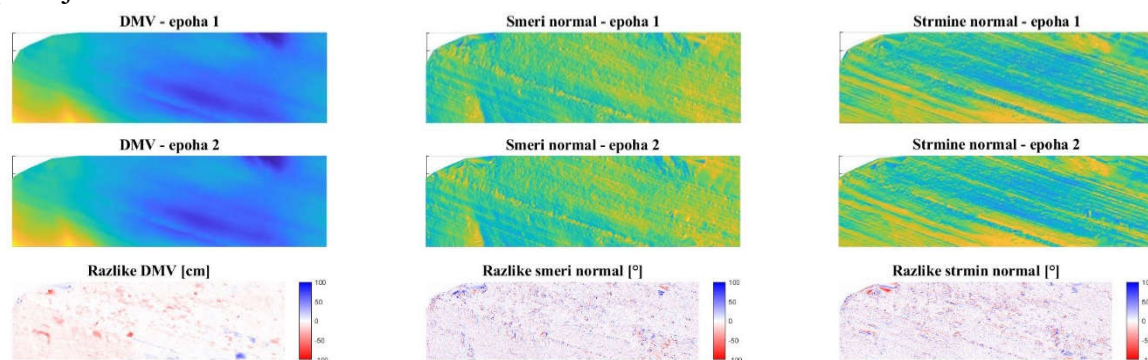
Slika 3: Vizualno opažene spremembe na oblaku točk pobarvanem glede na višino ter smer in strmino normal.

Zaradi velikosti oblaka točk smo analizo za identifikacijo stabilnih območij izvedli na treh podobmočjih, v katerih se nadejamo najti stabilne segmente.



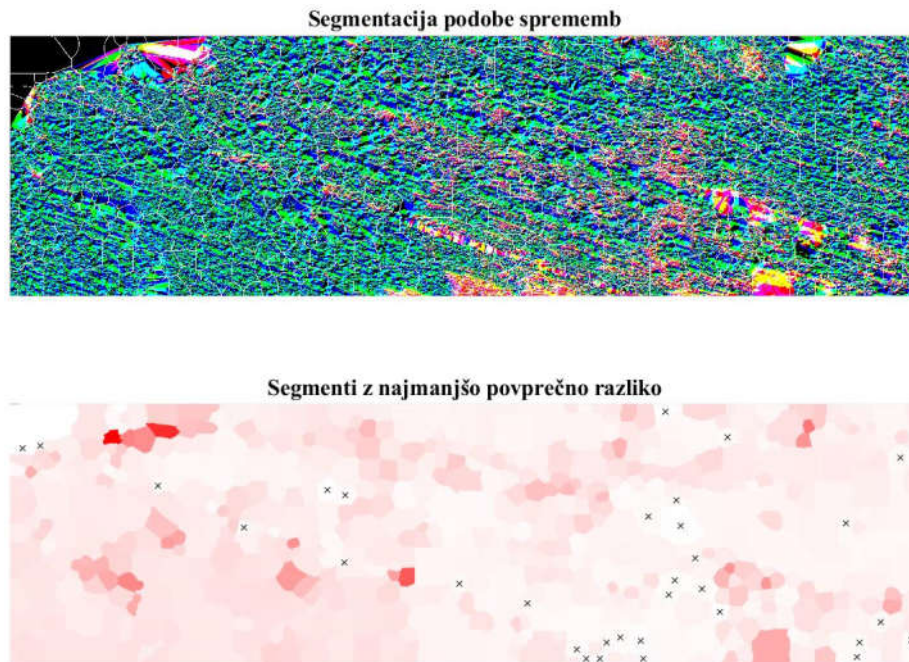
Slika 4: Podobmočja za iskanje stabilnih segmentov

Z linearno interpolacijo med točkami izdelamo po tri rastrske podobe za obe primerjani terminski izmeri: podobo višin točk (DMV), podobo smeri in podobo strmin normalnih vektorjev. Izbrana je bila ločljivost 2 cm, ki približno ustreza ločljivosti skeniranja na površju.



Slika 5: Rastrske podobe DMV, smeri in strmin normalnih vektorjev ter njihove razlike med zaporednima epohama

Glede na to, da sta oblaka dovolj dobro približno registrirana (z oslonilnimi točkami) lahko ocena stabilnosti temelji na razlikah vseh treh podob. Če bi bila približna registracija slabša, bi lahko uporabili le podobi normal. Izračunamo razlike med podobami prve in druge primerjane terminske izmere in jih kot kanale R, G in B vnesemo v skupno podobo razlik. Podobo z razlikami v treh kanalih nato segmentiramo na območja podobnih vrednosti z metodo SLIC (Achanta et al., 2012; Moore et al., 2008). Za vsak segment izračunamo povprečno vrednost razlik vseh treh kanalov. Izbrani delež segmentov (v našem primeru smo vzeli 5%) z najmanjšimi povprečnimi razlikami označimo kot stabilne segmente



Slika 6: SLIC segmentacija skupne podobe razlik in identifikacija segmentov z najmanjšo povprečno spremembo

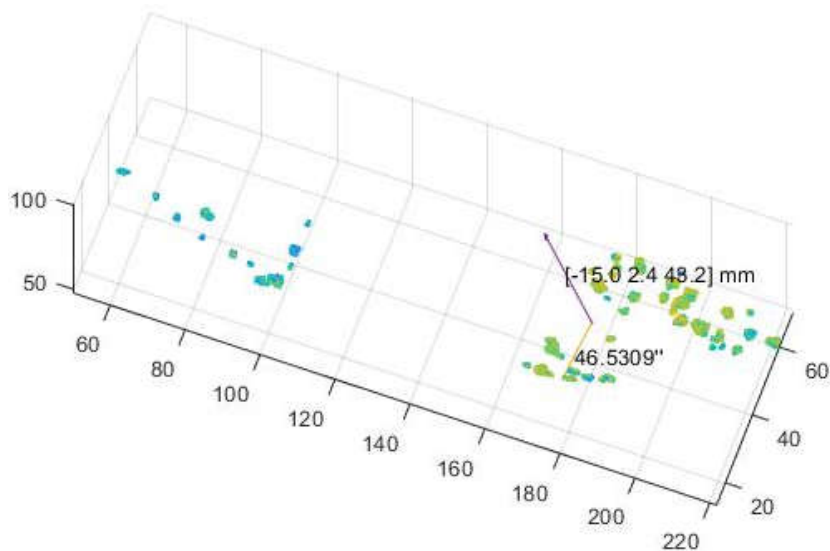
Na podobah, ki smo jih z interpolacijo pridobili iz oblaka točk smo uspešno identificirali segmente, kjer so razlike med zaporednima terminskima izmerama najmanjše. Naslednji korak je poiskati točke v oblaku, ki sovpadajo s stabilnimi območji iz podobe. Koordinatama x , y točk iz oblaka odštejemo izhodiščno koordinato podobe, to je položaj spodnjega levega vogala. Koordinati nato delimo z dimenzijo rastrske celice in zaokrožimo navzdol. Na ta način dobimo indekse celic podobe katerim pripada vsaka točka oblaka. Nato za vsako točko preverimo ali leži v enem od stabilnih območij, ki smo jih identificirali s SLIC segmentacijo.

Točke, ki sovpadajo s stabilnimi območji nato uporabimo za registracijo ICP. Za registracijo ICP lahko uporabimo komercialne programe kot so Cyclone Core, Cyclon 3DR ali celo Matlab, najpogosteje pa se uporablja odprtokodni CloudCompare. Pričakujemo majhno transformacijo drugega oblaka točk, ki bo omogočila pravilno primerjavo obeh oblak in realno predstavitev dejanskih sprememb med oblakoma.

Na slikah 5 in 6 smo zaradi nazornosti prikazovali le eno od treh izbranih podobmočij. Na sliki 7 prikazujemo točke, ki ležijo znotraj 5% najstabilnejših segmentov v vseh treh podobmočjih. Na sliki 7 lahko vidimo, kako se na območju desno zgoraj oblaka že dovolj dobro prilegata eden drugemu, medtem ko je na levi očitno en oblak dvignjen nad drugim. Registracija ICP bo poskrbela, da se oblaka čim boljše prilegata povsod.



Slika 7: Točke, ki ležijo znotraj najbolj stabilnih segmentov: modro prva in rdeče druga epoha

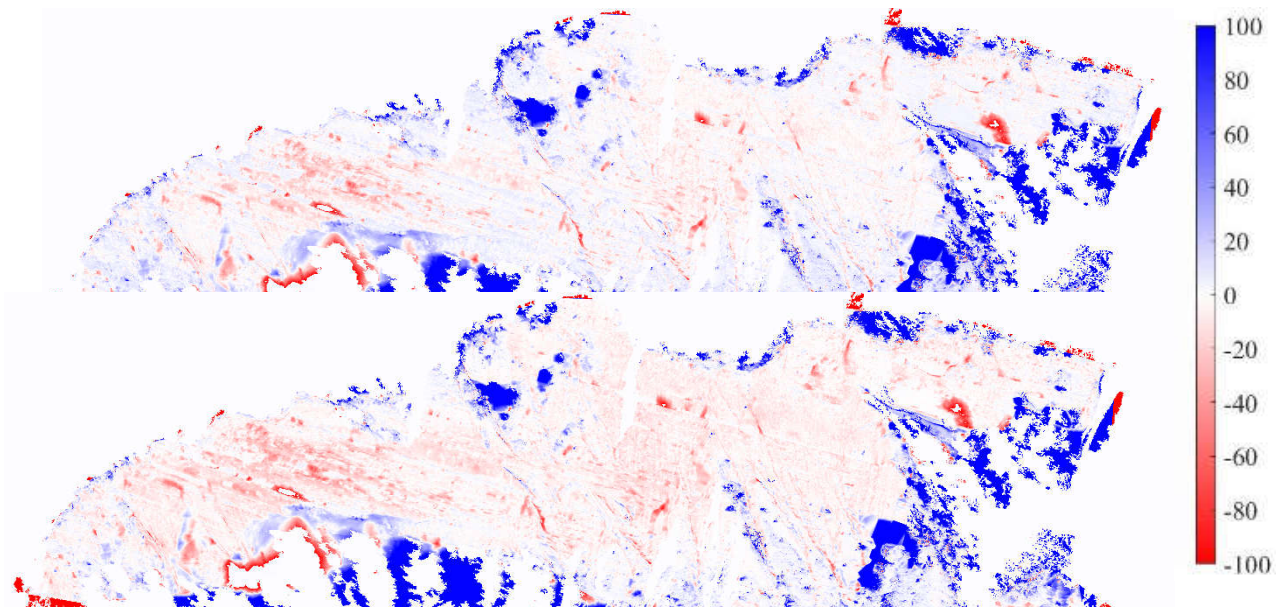


Slika 8: Transformacija ICP, prikazana sta zasuk okrog rumene osi in translacija za vijolični vektor

Na sliki 8 prikazujemo rezultat transformacije s parametri, izračunanimi z ICP registracijo na točkah stabilnih območij. Zasuk okoli rumene osi je relativno majhen (46,5") in na dimenziji klifa povzroči premike manjše od 40 mm. Translacija znaša 15 mm, 2 mm in 43 mm po koordinatnih oseh. V naslednjem poglavju bomo pokazali, kako izvedena transformacija izboljša zaznavanje sprememb na celotnem obravnavanem območju klifa.

Rezultati

Na sliki 9 prikazujemo končne spremembe med oblakoma točk z in brez uporabe izboljšane registracije na osnovi identifikacije stabilnih območij. Spremembe površja so izrisane kot razlike DMV (Wheaton et al., 2010). Rdeča barva predstavlja negativne spremembe oziroma erozijo, modra barva pa pozitivne oziroma sedimentacijo. Ker so spremembe majhne, smo jih za obstoječi format članka umetno poudarili. Velike spremembe na robovih območja so posledica nepopolnega prekrivanja območij oblakov dveh terminskih izmer ter nepopolnega filtriranja vegetacije, zato jih je potrebno ignorirati.



Slika 9: Spremembe površja klifa, zgoraj brez, spodaj z izboljšano registracijo. Enote na barvni lestvici so centimetri

Pričakovano je, da se na strmih odsekih pojavlja rdeča barva, saj se material s teh področij podira. Modro barvo pričakujemo na meliščih pod stenami, kamor se material nasipa. Realni so tudi modri pasovi v steni, kjer se sediment nabira na trših plasteh. Na zgornji sliki opazimo obsežnejša modrikasta področja na strmih delih klifa, ki so posledice pogoškov pri registraciji z oslonilnimi točkami. S postopkom izboljšave registracije so takšna območja odpravljena, kar kaže spodnja slika.

Razprava

Motivacija za opisano raziskavo je bilo nezadovoljstvo z rezultati opravljenih izmer. Pri načrtovanju in izvedbi smo upoštevali naslednje kriterije:

- uporaba metode, ki je glede na opravljeni pregled literature ustrezna za namen spremljanja sprememb klifa,
- zagotovitev najboljše geometrije skeniranja na danem terenu,
- dobra geometrija razporeditve oslonilnih točk,
- visoka natančnost določitve ter spremljanje stabilnosti in posodabljanje položajev oslonilnih točk,
- kakovost registracije, ki je znotraj natančnosti slučajnih pogoškov merskih metod,

Kljub vsem naštetim kriterijem, ki so mnogo višji od tistih uporabljenih v literaturi (Hoffmeister et al., 2012; Kersten et al., 2020; Kuhn & Prüfer, 2014; Poulton et al., 2006; Rosser et al., 2005b) pridobljeni rezultati niso dosegli pričakovane kakovosti. Glavno težavo so predstavljala območja rahlih pozitivnih sprememb, na področjih, kjer se zanje nikakor ne da najti smiselne razlage.

Menimo, da je predlagana dovolj splošna in lahko deluje tudi v drugih aplikacijah zaznavanja sprememb površja, kjer ne moremo zagotoviti zadostne kakovosti stabilnega referenčnega sistema. Uporaba orientacije normal oblaka točk je dovolj robustna, da lahko

deluje tudi pri slabo predregistriranih oblakih točk. Razlike višin, ki nastopajo kot eden od treh kriterijev stabilnosti lahko pri slabo predregistriranih oblakih zamenjamo z odstopanjem od povprečne razlike ali pa jo tudi izpustimo. Pri izračunu povprečne vrednosti razlik vsakega segmenta iz vseh treh kriterijev smo za razlike DMV uporabljali centimetre za razliko smeri in strmin normal pa stopinje. Možno bi bilo uporabiti tudi normirane enote in raziskovati vpliv večjih ali manjših uteži na posameznem kanalu.

Metoda predvideva projekcijo oblaka točk v ravnino podob, kar zna biti pri bolj razgibanem terenu ovira. Kljub temu se oblak lahko razdeli na več približno ravninskih segmentov.

Metoda ICP deluje na principu minimizacije razdalj med točkami. V primeru klifa vsi stabilni sektorji ležijo na bolj ali manj podobno usmerjenih ravninah. ICP lahko dobro definira samo premike v smeri normal ravnine, premiki vzdolž ravnine so določeni slabše. Zato bi bilo optimalno izbirati območja tudi s kriterijem zagotovitve čim bolj raznovrstno orientiranih lokalnih ploskev segmentov.

Uporabljena metoda predvideva ročno izbiro podobmočij, s čimer lahko vsilimo boljše geometrijsko razporeditev segmentov za registracijo ICP.

Nadaljnje raziskave bodo potekale v smeri popolne avtomatizacije postopka. Namesto interpolacije in segmentacije podob bi bilo smiselno nadaljevati v smeri popolnoma 3D postopka s segmentacijo oblaka točk na super voksle (Lin et al., 2018; Papon et al., 2013; Verdoja et al., 2017). Pri velikem številu potencialno stabilnih segmentov bi lahko uporabljali tudi metodo naključnega vzorčenja RANSAC.

Literatura

- Achanta, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P., Susstrunk, S. (2012). SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34(11), 2274–2281.
- Besl, P. J., McKay, N. D. (1992). A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>
- Gojcic, Z., Zhou, C., & Wieser, A. (2020). F2S3: Robustified determination of 3D displacement vector fields using deep learning, *Journal of Applied Geodesy*, 14(2), 177–189. <https://doi.org/10.1515/jag-2019-0044>
- Hoffmeister, D., Tilly, N., Curdt, C., Aasen, H., Ntageretzi, K., Hadler, H., Willershäuser, T., Vött, A., Bareth, G. (2012). Terrestrial Laser Scanning for Coastal Geomorphologic Research in Western Greece, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B5(June 2018), 511–516. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxix-b5-511-2012>
- Holst, C., Janßen, J., Schmitz, B., Blome, M., Dercks, M., Schoch-Baumann, A., Blöthe, J., Schrott, L., Kuhlmann, H., Medic, T. (2021). Increasing spatio-temporal resolution for monitoring alpine solifluction using terrestrial laser scanners and 3d vector fields, *Remote Sensing*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/rs13061192>
- James, M. R., Robson, S., Smith, M. W. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys, *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 1769–1788. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>
- Kersten, T. P., Lindstaedt, M., Mechelke, K. (2020). Coastal cliff monitoring using UAS photogrammetry and TLS, *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*. <https://doi.org/10.23784/HN116-02>
- Kuhn, D., Prüfer, S. (2014). Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany, *Geomorphology*, 213, 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.005>

- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82(February 2013), 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Lin, Y., Wang, C., Zhai, D., Li, W., Li, J. (2018). Toward better boundary preserved supervoxel segmentation for 3D point clouds, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 143(May), 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.05.004>
- Moore, A. P., Prince, S. J. D., Warrell, J., Mohammed, U., Jones, G. (2008). Superpixel lattices. 26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587471>
- Papon, J., Abramov, A., Schoeler, M., Worgotter, F. (2013). Voxel cloud connectivity segmentation - Supervoxels for point clouds, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2027–2034. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2013.264>
- Poulton, C. V. L., Lee, J. R., Hobbs, P. R. N., Jones, L., Hall, M. (2006). Preliminary investigation into monitoring coastal erosion using terrestrial laser scanning: case study at Happisburgh, Norfolk, *Bulletin of the Geological Society of Norfolk*, 56, 45–64. <http://www.norfolkgeology.co.uk/index.htm>
- Riegl LMS. (2014). Riegl Vz-400 - datasheet (p. 4).
- Rosser, N. J., Petley, D. N., Lim, M., Dunning, S. A., Allison, R. J. (2005a). Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38(4), 363–375. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/05-008>
- Rosser, N. J., Petley, D. N., Lim, M., Dunning, S. A., Allison, R. J. (2005b). Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38(4), 363–375. <http://dro.dur.ac.uk/2823/>
- Verdoja, F., Thomas, D., Sugimoto, A. (2017). Fast 3D point cloud segmentation using supervoxels with geometry and color for 3D scene understanding, *Proceedings - IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 1285–1290. <https://doi.org/10.1109/ICME.2017.8019382>
- Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 136–156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>
- Wujan, D., Avian, M., Krueger, D., Neitzel, F. (2018). Identification of stable areas in unreferenced laser scans for automated geomorphometric monitoring, *Earth Surface Dynamics*, 6(2), 303–317. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-303-2018>