

Razvoj postupaka za mjerenje pomaka nasipa pomoću bespilotnih sustava

Marijan Car¹, prof. dr. sc. **Meho Saša Kovačević**²

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marijan.car@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr

Sažetak

Geotehnička mjerenja deformacija infrastrukturnih nasipa, ključnih za sigurnost prometa, suočavaju se s izazovima zbog visokih troškova i vremenske zahtjevnosti. U Hrvatskoj, nasipi na mekom tlu doživljavaju velika slijeganja, što zahtijeva redovite sanacije. Uz primjenu standardnih geotehničkih mjernih tehnika, nedovoljno istražen potencijal leži u upotrebi bespilotnih sustava za poboljšanje mjernih metoda, s naglaskom na fotogrametrijsku metodu. Napredak u tehnologiji GNSS-a, INS-a, digitalnih kamera, i mobilnih mjernih senzora omogućuje prilagodbu bespilotnih sustava, otvarajući nove mogućnosti za precizno i efikasno prikupljanje podataka.

Ključne riječi: nasip, deformacije, mjerenja, bespilotni sustavi

Development of methods for measuring displacement of embankments using unmanned aerial systems

Abstract

Geotechnical measurements of deformations in infrastructural embankments, crucial for traffic safety, face challenges due to high costs and time requirements. In Croatia, embankments on soft soil experience significant settlements, necessitating regular remediation. Along with the application of standard geotechnical measurement techniques, there is an underexplored potential in the use of unmanned aerial systems (UAS) to improve measurement methods, with a focus on photogrammetric techniques. Advances in GNSS technology, INS, digital cameras, and mobile measurement sensors allow for the adaptation of UAS, opening new possibilities for precise and efficient data collection.

Key words: embankment, deformations, measurements, unmanned systems

1 Uvod

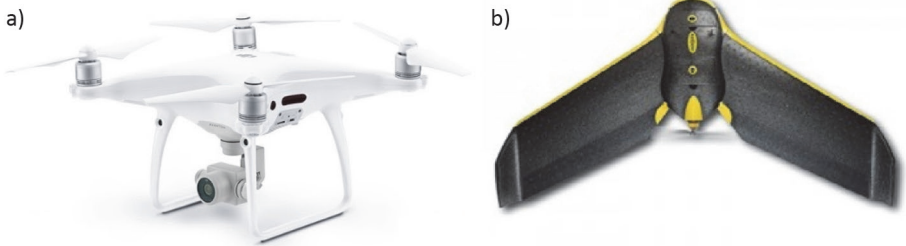
Inženjerski ili prirodni nasipi igraju ključnu ulogu u prometnoj infrastrukturi, a njihove deformacije i nestabilnosti predstavljaju značajan rizik za sigurnost i funkcionalnost prometa. U Hrvatskoj je izgrađeno mnogo infrastrukturnih nasipa na mekom tlu, koji mogu doživjeti slijeganja veća od 30 cm godišnje. Na ovim nasipima redovito se provode sanacijske mjere koje uključuju dodavanje novog materijala, no to dodatno pojačava slijeganja koja će se nastaviti sve dok se ne izvrši sanacija odnosno poboljšanje temeljnog mekog tla [1].

Raznoliki spektar mjernih instrumenata, od jednostavnih do visoko sofisticiranih, razvijen je za geotehnička mjerenja na nasutim konstrukcijama. Najčešće korišteni instrumenti uključuju one za mjerenje pomaka (geodetski instrumenti), naginjanja (klinometri), te uzdužnih i poprečnih deformacija unutar bušotina (inklinometri, ekstenzometri, klizni deformetri, klizni mikrometri), napetosti u tlu (tlačne ćelije, kratki deformetri) i pritiska podzemne vode (piezometri). Svaki od ovih instrumenata karakterizira specifičan opseg mjerenja, točnost, preciznost, rezoluciju, pouzdanost, trajnost i cijenu, što implicira da svaki od njih posjeduje određene prednosti i ograničenja [2].

Geotehnička mjerenja deformacija nasutih građevina, uključujući geodetska mjerenja pomaka putem ugrađenih repera, suočavaju se s ozbiljnim ograničenjem jer se izvode na diskretnim mjestima duž nasipa. S obzirom na visoke troškove i vremensku zahtjevnost, nije izvedivo provesti ta mjerenja na dovoljno velikom broju profila, budući da nasipi mogu biti dugi od nekoliko desetaka metara do desetaka kilometara. U takvim okolnostima, korištenje bespilotnih letjelica ili dronova predstavlja velik, ali još uvijek nedovoljno istražen potencijal za poboljšanje mjernih metoda [3].

2 Bespilotni sustavi

Bespilotni sustav (eng. UAS - Unmanned Aerial System) popularnijeg i češće korištenog naziva 'dron' je letjelica ili zrakoplov bez posade, koja se može nadzirati na daljinu pomoću daljinskog upravljača ili letjeti samostalno uporabom unaprijed programiranog plana leta (Jurić-Kačunić-2 i dr. 2015). Dva glavna tipa UAS su "Rotary wing" (slika 1a) i "Fixed wing"(slika 1b) ". Prednosti i nedostaci oba tipa prikazani su tablici 1.



Slika 1. Tipovi bespilotnih sustava: a) "Rotary wing" i b) "Fixed wing"

Tablica 1. Prednosti i nedostaci tipova bespilotnih sustava

Tip drona	Fix wing	Rotary wing
Projekti	Veća područja	Manja područja, inspekcija
Primjena	Kartiranje, GIS, geodezija, agronomija...	Kartiranje urbanih područja, snimanje zgrada, pregledi objekata
Brzina leta	Visoka	Niska
Obuhvat leta	Veliki	Mali
Rezolucija kartiranja	cm po pikselu	mm po pixelu
Polijetanje / slijetanje	Veliko	Malo
Vrijeme leta i otpor vjetru	Veliko	Malo

Točnost analiza deformacija nasipa uvelike ovisi o kvaliteti i detaljnosti računalnog modela tih nasipa. Fotogrametrijska metoda izmjere, koja se odlikuje visokom točnošću, efikasnošću i stupnjem automatizacije, dugo se koristi za takve zadatke i stoga je često metoda izbora. S pojavom ekonomičnih bespilotnih letjelica opremljenih digitalnim kamerama, fotogrametrijske metode postale su dostupne širem spektru korisnika. Iako ove letjelice pružaju značajan mjerni potencijal, primarno su dizajnirane za rekreativno letenje i snimanje videa i fotografija za osobnu upotrebu, te se obično ne koriste za profesionalna mjerenja.

Da bi se bespilotni sustav mogao koristiti u svrhe prikupljanja podataka i kartiranja njegove najvažnije karakteristike su: rezolucija fotoaparata (senzora), vrijeme leta (autonomija), ugrađena GPS antena, stabilizator fotoaparata i mogućnost obavljanja autonomnog leta. Samo upravljanje letjelicom vrši se pomoću daljinskog upravljača koji na sebi ima pričvršćeno tablet računalo, preko kojeg se vrše postavke samog leta.

Korištenjem niskobudžetnih bespilotnih sustava za snimanje u nizovima i blokovima s adekvatnim uzdužnim i poprečnim preklopom između snimaka, stvara se slikovni materijal koji se zatim obrađuje prema fotogrametrijskim principima. Ovi principi su nadopunjeni algoritmima prilagođenim specifičnostima niskobudžet-

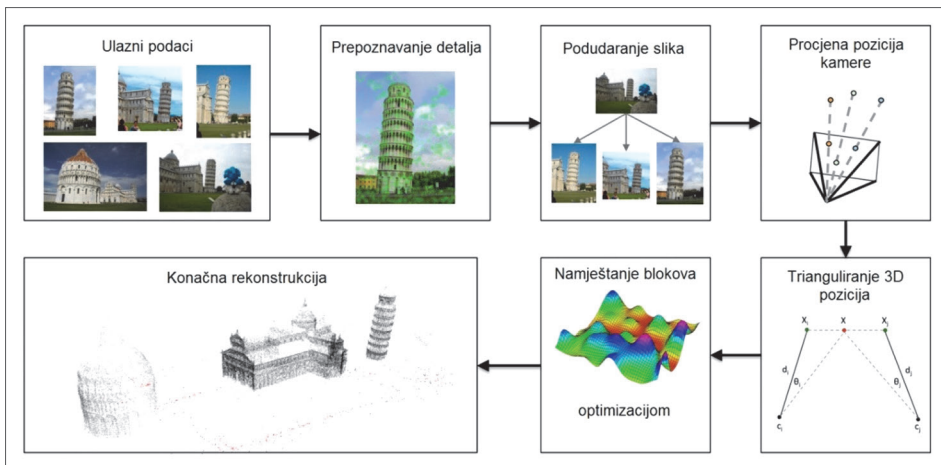
nih bespilotnih letjelica. Mjerenje se izvodi pomoću metode slikovnih korelacija, koja automatski detektira homologne detalje na područjima gdje se snimke preklapaju, omogućujući fotogrametrijsku rekonstrukciju. Konačni produkt je trodimenzionalni računalni model nasipa i njegove okoline, s točnošću i detaljnošću koja je zadovoljavajuća za računalnu analizu deformacija tog nasipa.

Razvoj tehnologija poput GNSS-a (Global Navigation Satellite System), INS-a (Inertial Navigation System), digitalnih kamera i različitih mobilnih mjernih senzora omogućio je prilagodbu bespilotnih sustava s opremom specijaliziranom za različite svrhe. Ovaj napredak opravdava ekonomske i ostale zahtjeve za kvalitetnim prikupljanjem podataka iz zraka [4].

Osnovni zahtjevi koje bespilotne letjelice moraju ispuniti za snimanje terena uključuju sposobnost izvođenja unaprijed definiranog leta, kapacitet za nošenje opreme potrebne za snimanje i navigaciju, autonomiju u letu te sposobnost apsorpcije vibracija i drugih vanjskih utjecaja tijekom leta [5].

3 Snimanje trodimenzionalnog modela

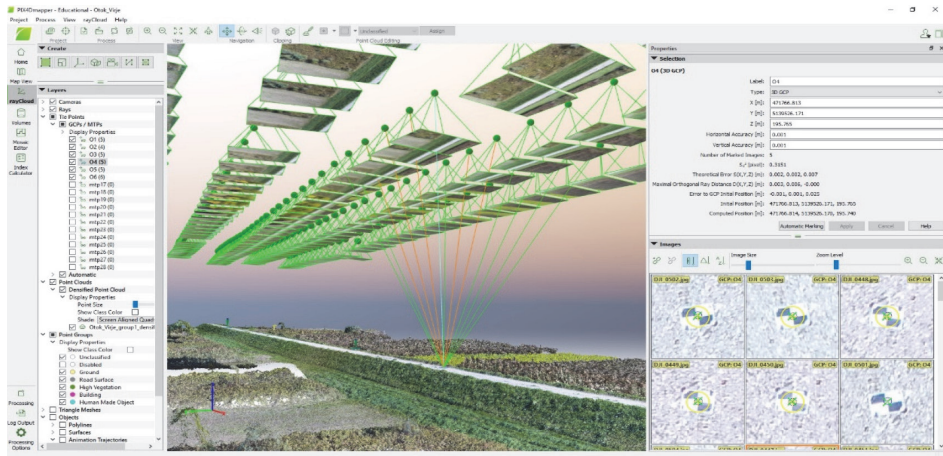
Za dobivanje trodimenzionalnog modela terena ili nekog objekta potrebno je snimiti veliki broj fotografija koje se međusobno uzdužno i poprečno preklapaju u cilju povezivanja tih fotografija u jedinstvenu cjelinu te generiranje oblaka točaka (slika 2).



Slika 2. Procedura dobivanja trodimenzionalnog modela [6]

Proces započinje pronalaženjem zajedničkih 2D piksela između snimljenih fotografija [6]. Svaki skup piksela koji se podudara tijekom usporedbe više fotografija omogućuje stvaranje jedne 3D točke u prostoru (slika 3). Povezivanje piksela pro-

vodi se tako da se identificiraju i povežu objekti na paru fotografija, koji se zatim usklađuju s istim objektima na ostalim fotografijama. Na temelju tog modela, koristeći odgovarajući algoritam, generira se oblak točaka.



Slika 3. Podudaranje piksela s različitim fotografija

Slijedi provođenje SfM (Structure from motion) algoritma koji pomoću nizova točaka iz prethodnog koraka, određuje geometriju objekta pronalazeći trodimenzionalne koordinate točaka koje najbolje odgovaraju označenim nizovima [8]. SfM algoritam predstavlja koordinate dobivenih točaka unutar koordinatnog sustava koji se koristi tijekom planiranog leta, a to je obično WGS84 koordinatni sustav. Ovaj sustav, čije je ishodište u centru Zemljine mase, koristi se kao referentni koordinatni sustav za GPS satelite. Iako je ovakav prikaz koristan za vizualizaciju snimljenog područja, za smještaj na kartu ili u službeni koordinatni sustav potrebno je provesti georeferenciranje. To se može ostvariti postavljanjem orijentacijskih točaka na području leta ili upotrebom letjelice opremljene GNSS RTK tehnologijom koja se povezuje s CROPOS sustavom [9].

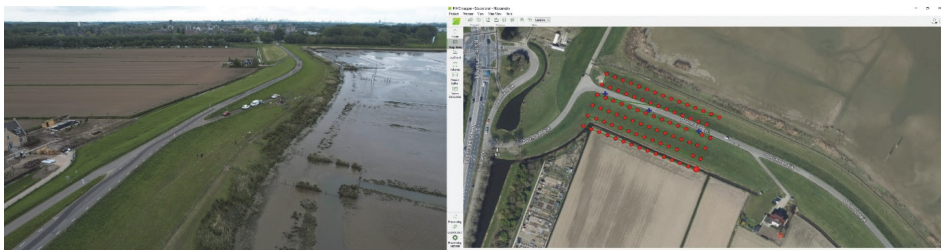
Konačni ishod opisanog postupka je oblak točaka, koji čini skup točaka unutar određenog koordinatnog sustava. U trodimenzionalnom koordinatnom sustavu, te točke su definirane koordinatama X, Y i Z, i obično predstavljaju vanjsku površinu objekta (slika 4).



Slika 4. Oblak točaka definiran koordinatama X, Y i Z

4 Primjer primjene bespilotnih sustava

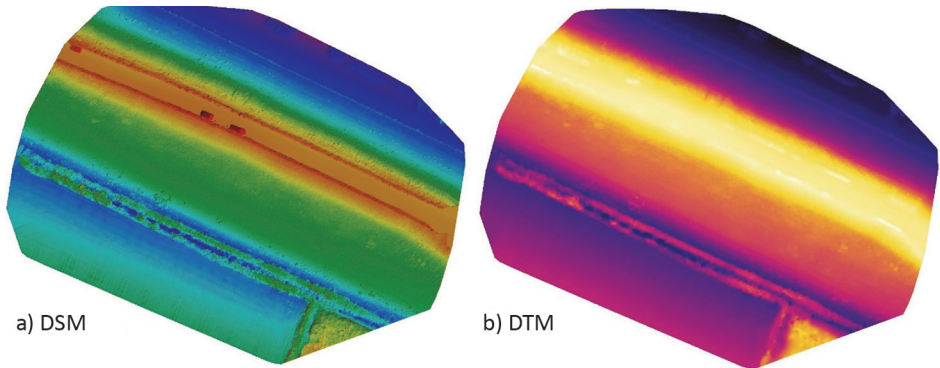
Za potrebe pisanja ovog članka kao primjer prikupljanja podataka primjenom bespilotnih sustava za fotogrametrijsku rekonstrukciju odabran je nasip za obranu od poplava "Oostmolendijk" smješten jugozapadno od Rotterdama u mjestu Ridderkerk, Nizozemska (slika 5).



Slika 5. Nasip "Oostmolendijk"

Prilikom dolaska na lokaciju pripremljena je misija autonomnog (programiranog) leta za određenu dionicu nasipa. Unutar same pripreme definirano je više parametara u koji spadaju visina leta, postotak uzdužnog i poprečnog preklapanja fotografija, brzina leta, nagib kamere i drugih, o kojima će ovisiti buduća fotogrametrijska rekonstrukcija i sama rezolucija oblaka točaka. Za odabranu dionicu prikupljeno je ukupno 90 fotografija koje su prilikom ekspozicije geo-locirane, pokrivajući površinu nasipa i okolice od približno 1Ha. Sami let trajao je približno 10 minuta. Nakon fotogrametrijske obrade prikupljenih fotografija generiran je 3D oblak točka u rezoluciji 8mm/pixel koji se sastoji od ukupno 63 milijuna točaka prosječne gustoće 17 tisuća točaka po m^3 . Za potrebe geotehničkih analiza nasi-

pa na temelju fotogrametrijskog snimanja, odnosno dobivenog 3D oblaka točaka generirano je više izlaznih modela nasipa, kao digitalni model površine (DSM, slika 6a) i digitalni model terena (DTM, slika 6b). Na temelju takvih modela mogu se odrediti poprečni i uzdužni presjeci nasipa u beskonačnom broju profila, precizno izračunati volumen nasipa, odrediti slojnice i slično [10].



Slika 6. a) Digitalni model površine i b) Digitalni model terena

5 Zaključak

Geotehnička mjerenja deformacija linijskih objekata kao što su infrastrukturni nasipi imaju značajan nedostatak u činjenici da se ona provode na diskretnim lokacijama odnosno mjernim profilima duž nasipa. U takvim uvjetima primjena bespilotnih letjelica ili dronova ima velike i nedovoljno istražene perspektive. U zadnje vrijeme razvijaju se postupci za mjerenje prostornih deformacija nasipa pomoću bespilotnih letjelica čime se klasični načini diskretnog mjerenja deformacija nasipa (reperi, inklinometri, klinometri, klizni mikrometri) zamjenjuju bržim, jeftinijim i efikasnijim kontinuiranim mjerenjem pomoću bespilotnih sustava. To se postiže sustavnom analizom i interpretacijom svih parametara koji utječu na primjenjivost i ponovljivost mjerenja promjene oblika i volumena nasipa u vremenu, uspoređujući rezultate mjerenja pomoću bespilotnih letjelica s terestričkom fotogrametrijskom izmjerom.

Literatura

- [1] Jurić-Kačunić, D., Bačić, M., Kovačević, M.S.: Ocjena stanja željezničkih nasipa pomoću georadarskih ispitivanja, Dani prometnica 2015: *Kvaliteta prometne infrastrukture - ključ razvoja gospodarstva*, (ur. Lakušić, S.), Zavod za prometnice, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 171-202, 2015.

- [2] Kovačević, M.S.: The Observational Method and the use of geotechnical measurements, Proc. Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds, *XIII European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, pp. 575-582, 2003.
- [3] Librić, L., Car, M., Kovačević, M.S.: Methods of surveying in rockfall protection, Proceedings of Conference CETRA 2014, *Road and Rail Infrastructure III*, Split, pp. 617-622, 2014.
- [4] Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., Allemand, P.: Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform, *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (2007), pp. 1705–1725.
- [5] Vallet, J, Panissod, F., Strecha, C., Tracol, M. Photogrammetric Performance of an Ultra Light Weight Swinglet "UAV", *UAV-g conference*, Zurich, Switzerland. 2011.
- [6] Erikson, A.: Optimisation in Multiple View Geometry, The L-infinity Way, Queensland University of Technology, 2018.
- [7] Snavely, K.N.: *Scene reconstruction and visualization from internet photo collections*, PhD thesis, 210 p. University of Washington, 2008.
- [8] Westoby, M.J. Brasington, J. Glasser , N.F. Hambrey, M.J. Reynolds, J.M.: 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179 (2012), pp. 300–314.
- [9] Tahar, K.N., Ahmad, A., Akib, W.A.A.W.M., Mohd, W.M.N.W. (2013). Unmanned Aerial Vehicle, Photogrammetric Results Using Different Real Time Kinematic Global Positioning System Approaches, *Developments in Multidimensional Spatial Data Models. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [10] Car, M., Gajski, D., Kovačević, M.S.: Remote surveying of flood protection embankments/15th International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering / Bekić, Damir ; Dalibor, Carević ; Vouk, Dražen (ur.). Zagreb: Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia, University of Zagreb Kačićeva 26, Zagreb, 2017. str. 224-232