

Analiza odstopanj izkopa in primarnih površin predora iz fotogrametričnih oblakov točk

Tilen Urbančič*, Jure Česnik**

Povzetek

Med izkopavanjem predorov po novi avstrijski metodi je potrebno za vse izkopne faze in faze izvedbe primerne podgradnje izvesti analizo skladnosti dejanskih površin s teoretičnimi linijami, predpisanimi v podpornih tipih. V članku predstavljamo inovativen pristop, kjer smo z lastnimi programskimi rešitvami v prvi fazi avtomatizirali postopek obdelave podatkov fotogrametričnega zajema in izdelavo oblakov točk površine izkopa in brizganega betona primarne podgradnje predora. Georeferencirane in filtrirane oblake točk smo skupaj z osjo predora in profili teoretičnih linij uporabili v drugi fazi. Le-ta vključuje analizo odstopanj od teoretičnih linij izkopa in brizganega betona primarne podgradnje ter debeline nanešenega betona. S predstavljenim postopkom smo razvili rešitev, ki omogoča neodvisne analize z izrisi različnih profilov in razvitih pogledov odstopanj z numeričnimi izsledki.

Ključne besede: fotogrametrija, oblak točk, analiza odstopanj, izkop predora, brizgan beton
Keywords: photogrammetry, point cloud, deviation analysis, tunnel excavation, shotcrete

Uvod

Razvoj sodobnih tehnologij za masovni prostorski zajem podatkov je med drugim privedel tudi do posodobljenega pristopa za ocenjevanje kakovosti geometrije izkopa in izdelave primarne obloge v predorogradnji. Tovrstne kontrole so potrebne v primeru gradnje predorov po novi avstrijski metodi (NATM) (Wittke et al., 2006). Poleg geometrijskih analiz oblaki točk omogočajo določanje dejanskih pomikov primarne obloge, saj analize oblakov točk omogočajo celovitejšo določitev oblike površine, ki omogoča določitev neizvršenih deformacij. Pomembna prednost metod obdelave oblakov točk v predorogradnji omogoča celovit vpogled v geometrijo celotnega oboda predora in poznavanje podrobne geometrije. Tovrstni rezultati se po natančnosti in uporabnosti močno razlikujejo od rezultatov običajnih tahimetričnih izmer točk merskih profilov.

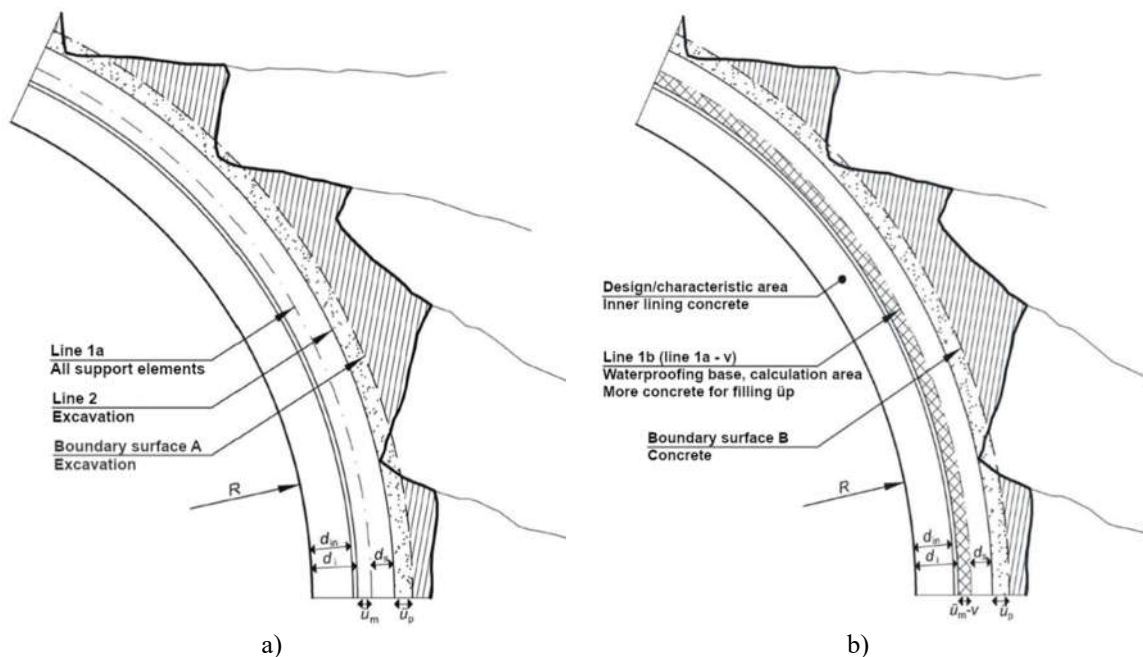
Vsa pravila in geometrijske količine, ki jih je v primeru gradnje z NATM potrebno upoštevati pri analizi izkopavanja predora ali odklonov primarnih oblog, so opredeljene v avstrijskem standardu ÖNORM B 2203-1 (ÖNORM B 2203-1, 2001) (Slika 1). Vse količine povezane z geometrijo izkopa, prekomernim izkopavanjem, izvršenimi deformacijami in podobno so kasneje določene kot pričakovane vrednosti v fazi projektiranja, natančno pa se jih iz nabora možnih variant iz faze projektiranja določa v času gradnje predora na osnovi spremljanja geološke sestave hribine in izvršenih deformacij.

Kar zadeva metode zajema prostorskih podatkov, sta se za zajem oblike geometrije izkopane površine in površine brizganega betona dodobra uveljavili tako metoda terestričnega laserskega skeniranja (TLS) (Sun et al., 2020) kot fotogrametrija (Attard et al.,

* Geotočka d.o.o, Tehnološki park 24, 1000 Ljubljana in UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana

** ELEA iC d.o.o., Dunajska cesta 21, 1000 Ljubljana

2018). Obe metodi sta v predorogradnji primerni predvsem zaradi brezkontaktnega merjenja, hitrosti terenske izmere, zanesljivosti, popolnosti oblakov točk, geometrijske natančnosti in nenazadnje možnosti poznavanja barvnih vrednosti (RGB) posameznih izmerjenih točk.



Slika 1: Računske sheme: a) izkopna dela in b) betonska dela (ÖNORM B 2203-1, 2001)

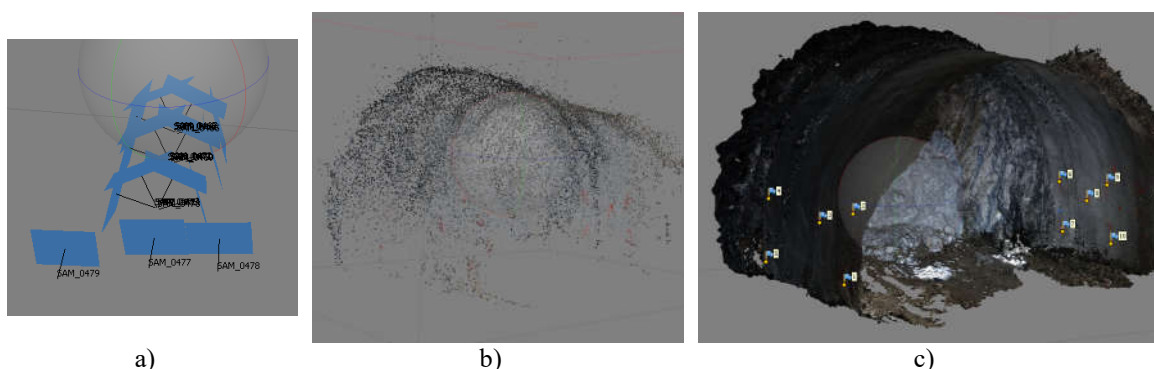
V zadnjem času se v praksi pogosteje uporablja fotogrametrična metoda, zato je intenzivnost razvoja tovrstnih sistemov za zajem podatkov in postopkov obdelave podatkov v zadnjem obdobju v primerjavi s TLS večja. Predvsem s ciljem prihranka časa pri terenskem in pisarniškem delu, je glavna motivacija pri razvoju fotogrametričnega zajemanja tudi maksimalna avtomatizacija postopkov. Vsi koraki avtomatizacije so zasnovani tako, da končni izdelek ali rezultati zagotavljajo vsaj enako kakovost, če ne celo boljšo, kot ročno obdelani podatki.

Pravi pomen prostorski podatki velike gostote, ki so rezultat množičnih zajemov, dobijo šele ob pravilni interpretaciji ter izvedbi smiselnih analiz ter včasih celo grafičnih prikazov. Vzporedno z uvajanjem sodobnih sistemov zajema prostorskih podatkov v predorih je torej pomembno, da se je prilagodila oz. izdelala tudi ustrezna programska oprema. Prilagoditi je bilo potrebno programe za obdelave podatkov, izdelati orodja za izrisovanje prečnih profilov in ostalih grafičnih prikazov iz oblakov točk. Geometrično analizo površin iz oblakov točk s primerjano med različnimi projektiranimi in izvedenimi površinami sodobne programske rešitve izvajajo z izrisovanjem razvitega plašča predora ter prečnimi prerezi na izbranih stacionažah. V tem članku predstavljamo pristop za izvedbo tovrstnih analiz v lastno razviti rešitvi OTIS.

V prvem delu članka predstavljamo študijo primera nadgradnje ali delne avtomatizacije postopka obdelave zajetih fotografij za generiranje oblakov točk v programskem okolju Agisoft Metashape. V drugem delu članka predstavljamo geometrijsko analizo površin iz fotogrametričnih oblakov točk. Proces obdelave izvede primerjave teoretičnih projektiranih profilov z realno izvedenimi površinami z namenom izdelave grafičnih predstavitev razvite predorske obloge in prečnih prerezov na izbranih stacionažah. V tem članku predstavljamo naš pristop k izvajanju tovrstnih analiz z lastno programsko rešitvijo OTIS.

Fotogrametrični zajem

S tehničnega vidika je pogoj za zajem fotografij zadovoljive prostorske ločljivosti in ostrine uporaba ustrezne kamere in osvetlitve. Za izdelavo oblaka točk potrebujemo fotografije z ustreznim vzdolžnim in prečnim preklopom. V trenutnih predorskih projektih v Sloveniji se za zajeme površine izkopa in betonskih oblog uporabljajo kamere kot je npr. dicit FSC 5100-SRsF1x (Urbančič et al., 2021) in dodatna umetna svetloba na ločenem nosilcu. Sistem za zajem ima vgrajen kalibriran fotoaparati, za upravljanje pa vgrajeni ločeni funkciji za fotografiranje med rotacijo in za običajno fotografiranje. S serijo fotografij s treh ali štirih stojišč zagotovimo zadosten preklop za izvedenotenje oblaka točk. Z izravnavo bloka fotografij določimo elemente zunanje orientacije fotografij. Najbolj uveljavljena metoda je zaradi svoje učinkovitosti grajenje strukture iz gibanja oz. SfM fotogrametrija (angl. Structure from Motion) (Schönberger in Frahm, 2016). Končni rezultat obdelave fotografij je modeliranje gostega oblaka točk (Slika 2).



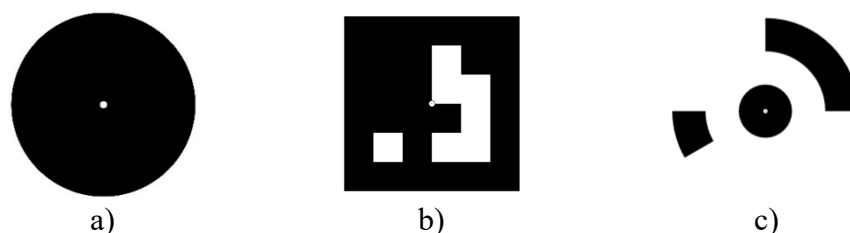
a) b) c)
Slika 2: Postopek obdelave podatkov: a) fotografije, b) redki oblak točk in c) gost oblak točk in oslonilne točke.

Merilo in lego oblaka točk v izbranem koordinatnem sistemu zagotovimo z oslonilnimi točkami. Na geometrijsko pravilnost oz. notranjo kakovost oblaka točk imajo velik vpliv število in razporeditev danih točk ter način signalizacije (Śledź in Ewertowski, 2022). Kakovost končnega rezultata in samega postopka obdelave lahko v nekaterih programskih paketih izboljšamo z uporabo kodiranih tarč.

Stopnjo avtomatizacije procesa obdelav je možno dvigniti z izdelavo dodatnih orodij in skript, vendar je popolno avtomatizacijo zelo težko doseči. V preteklosti je bil dosežen znaten napredek pri učinkovitosti algoritmov za prepoznavanje umetnih ali naravnih tarč (Remondino, 2006). Kljub tem napredkom imajo umetno signalizirane točke jasne prednosti, saj imajo nedvoumno določeno središče in na splošno dosegajo boljšo natančnost 3D položaja (Fraser, 1997; Fryer et al., 2007). Prav zaradi tega je večina proizvajalcev programske opreme namenila veliko časa razvoju in testiranju kodiranih tarč za zmanjšanje porabljenega časa in uporabo v visoko natančnih aplikacijah. Različne primere kodiranih tarč prikazujemo na Slika 3.

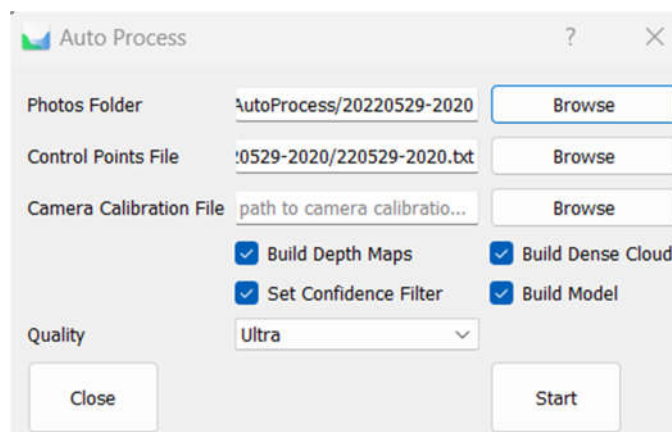
Enako velja za program Agisoft Metashape, kjer so procesi prepoznavanja središča optimizirani z umetnimi kodiranimi cilji. Običajno gre za črno-bele vzorce in s pomočjo ustreznih algoritmov ali rešitev računalniškega vida lahko v koordinatnem sistemu slike določimo značilne točke. Z ustreznim poimenovanjem kontrolne točke program samodejno dodeli koordinate v izbranem koordinatnem sistemu projekta vsaki kontrolni točki (Slika 2). Rešitve, ki vključujejo kodirane cilje, so na voljo tudi v drugi programski opremi za

obdelavo podatkov o fotogrametriji, kot so 3Dsurvey, PIX4D, ReCap Photo, PhotoModeler itd.



Slika 3: Primeri kodiranih tarč: a) okrogla črno-bela tarča, b) kodirana tarča 3DSurvey, c) kodirana tarča Agisoft Metashape.

Drugi korak pri optimizaciji obdelave fotogrametričnih podatkov vključuje uporabo ustreznih in po meri razvitih vtičnikov in skript. V programski opremi, kot je npr. Agisoft Metashape, so avtorji in številni uporabniki programa že ustvarili najrazličnejše skripte, ki so prosto dostopne (<https://github.com/agisoft-llc/metashape-scripts>). Primarni pristopi pri obdelavi terenskih podatkov, ki jih uporabljajo naprednejši uporabniki, so paketna obdelava in ustvarjanje skript v programskem jeziku Python (Slika 4).



Slika 4: Primer izdelanega vtičnika Auto Process.

Z ustrezno polavtomatsko obdelavo lahko uporabnik dokaj hitro ustvari oblak točk območja, ki ga je bil predhodno pravilno fotografiral in opremil s kodiranimi tarčami. Tudi, če je korake modeliranja georeferenciranega oblaka točk mogoče popolnoma avtomatizirati, je za kasnejše korake potrebno še vedno nekaj ročnega dela. Gre predvsem za postopek segmentacije oblaka točk na območja, ki pripadajo posameznim površinam – izkopni površini, prvemu sloju betona, končnemu sloju betona itd.

Analiza odstopanj izvedenih površin

Zagotovitev geometrijsko popolnega in pravilnega oblaka točk, ki predstavlja dejansko izkopano površina ali površino brizganega betona, je le prvi korak v celotni analizi. Za izvedbo analiz iz oblakov točk so potrebna posebna programska orodja, ki omogočajo primerjavo s teoretičnimi profili, opredeljenimi v projektni dokumentaciji predora. Na trgu obstaja več programskih rešitev, kot sta TMS Tunnelscan ali Cyclone 3DR, vendar so te

rešitve drage in naprednejše uporabnike odvrtaajo zaradi tako imenovanega problema "črne skrinjice". Uporabljeni algoritmi in metode niso znane in programov zato ni mogoče pravilno preskusiti in nadzorovati. Razvili smo lastno rešitev, ki nam omogoča izdelavo neodvisnih analiz, ki jih lahko spreminjamo glede na potrebe posameznega projekta.

Izdelali smo programski dodatek OTIS, ki je izdelan s programskim jezikom Grasshopper in kot vtičnik deluje znotraj programa Rhino. Vtičnik omogoča analiziranje in primerjave oblakov točk izkopov ter oblakov točk brizganega betona reta s teoretičnimi profili predora. OTIS-ov proces lahko razdelimo na naslednje korake (Slika 5):

1. Vnos in izbor podatkov (oblak točk, os predora, geometrija profila, stacionaža, dolžina odseka analize)
2. Segmentacija oblakov točk in izbor točk, ki so potrebne za analizo.
3. Projekcija izbranih oblakov točk na teoretične profile, ekstrudirane vzdolž osi.
4. Izdelava mreže nepravilnih trikotnikov in določitev prečnih profilov.
5. Analiza odstopanj na prečnih profilov in mreži nepravilnih trikotnikov.
6. Analiza debeline betona na podlagi izkopa in mreže trikotnikov.
7. Risba končnih rezultatov (profili in razviti pogledi) v pdf formatu.

Slika 5: Uporabniški vmesnik za vnos numeričnih podatkov in izbiro parametrov predora.

Vse te glavne korake je mogoče nadalje segmentirati na postopoma manjše korake do posameznih matematičnih, logičnih ali pretočnih operacij. Te operacije bi se lahko izvajale tudi v kakšni drugi programski opremi ki uporabniku omogoča ustvarjanje in zagon lastnih

skriptov. Razlog za izbor programa Rhino je veliko število predhodno že izdelanih dodatnih knjižnic za kompleksne geometrijske operacije znotraj Grasshopperja. Skupno se med celotno analizo znotraj OTIS-a izvede približno 2500 operacij.

Rezultati

Fotogrametrični oblaki točk vključujejo vse točke, ki jih je bilo iz preklapov fotografij možno zmodelirati. Gre torej tudi za točke, ki predstavljajo šum in ostale površine, ki niso pomembne za potrebe kontrole kakovosti izkopa oboka oz. izvedbe brizganih betonov – čelo predora, tla predora, nedokončani izkopi oz. brizganje ipd. Iz surovih oblakov točk tako najprej ročno odstranimo vse neželene točke, oblak točk razdelimo na ločene sloje, npr. izkopna površina in površina betona (Slika 6) in jih ločeno po slojih zložimo iz zaporednih odsekov v celovit predor (Slika 7).



Slika 6: Segmentacija oblaka točk na območje, ki pripada izkopni površini in površini brizganega betona.



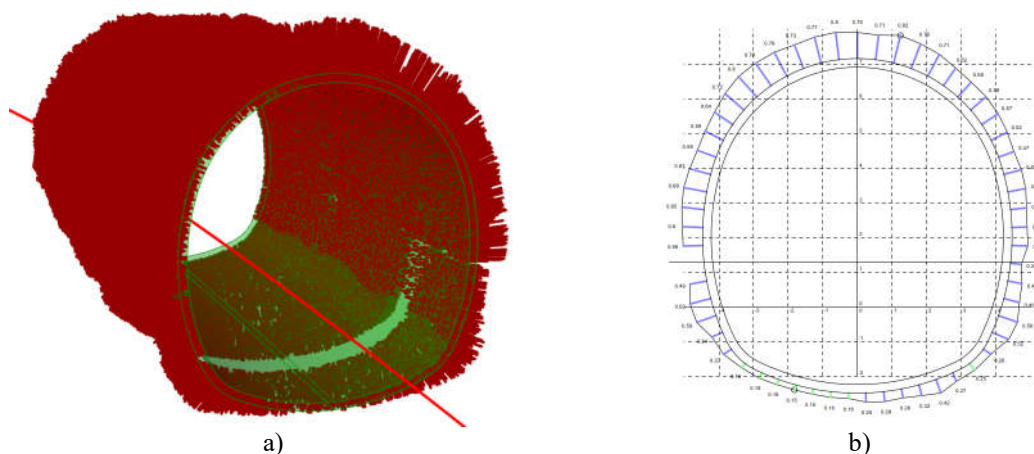
Slika 7: Združen oblak točk izkopne površine.

Tako urejeni prostorski podatki so vhodni podatek za izvedbo geometrijskih analiz in izračun odstopanj od projektiranih linij.

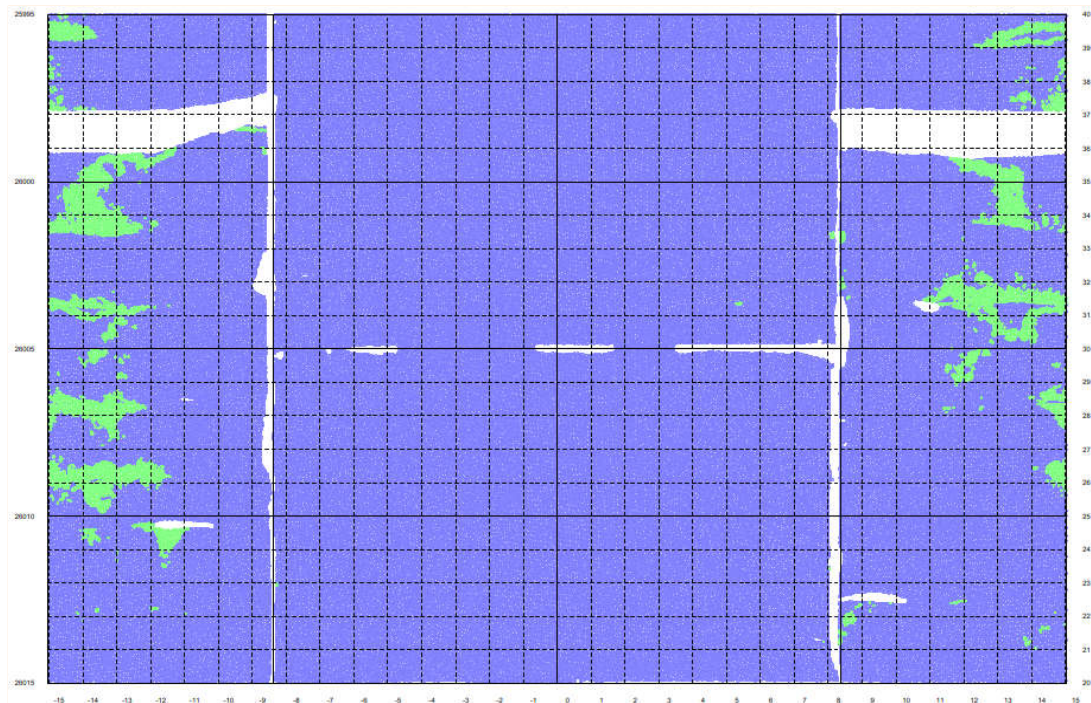
Končni rezultati obdelav so prikazani v dveh oblikah, ki sta pomembni za nadzor del predora: prečni profili z enakomernim korakom vzdolž osi (0,5 m ali 1,0 m) in razviti pogled plašča predora od zgoraj navzdol (Slika 8 in Slika 9). Obe obliki rezultatov prikazujeta naslednje tri vrste analiz:

- barvno označene razdalje od izmerjene površine izkopa do teoretične črte izkopa.
- barvno označene razdalje od merjenja končne površine posnetka do teoretične črte brizganega betona,
- barvno označene debeline od izmerjene površine izkopa do izmerjene končne površine.

Te rezultate uporabi izvajalec ali nadzornik, da oceni kakovost in natančnost postopkov izkopavanja in izvedbe primarnega podporja predora ter jasno pokaže, kje je prišlo do prekomernega ali premajhnega izkopavanja ali kje je treba nabrizgati dodaten beton.



Slika 8: Grafični prikaz izračuna odstopanj: a) 3D pogled na izračunana odstopanja med teoretično in dejansko izkopno linijo in b) izrisan prečni profil odstopanj.



Slika 9: Razviti pogled na plašč predora z obarvanimi vrednostmi odstopanj od teoretične linije.

Zaključek

Pomemben dejavnik pri različnih gradbeno inženirskih projektih je izvajanje kontrol in spremljanje kakovosti izvedbe del. V predorogradnji se temeljito preverja vse izvedene izkope in betonerska dela, saj je potrebno zagotoviti s projektom določene tolerance posameznih gradbenih faz. V članku predstavljamo razvit postopek oz. celotno metodologijo od zajema terenskih podatkov do izdelave končnih grafičnih prikazov.

Celoten proces obdelave fotografij in analiz iz oblakov točk smo skušali čim bolj avtomatizirati. Kljub avtomatizaciji posameznih korakov je še vedno kar nekaj možnosti za prisotnost napak, predvsem zaradi možnosti človeške napake:

- Na končne rezultate imajo lahko vpliv napaka pri geodetskem merjenju in določanju koordinat kontrolnih točk zaradi netočne in nenatančne geodetske mreže - nepravilno georeferenciranje oblakov točk posameznih izkopnih korakov. Večji problem se lahko pojavi v predorih z manjšimi premiki po izkopavanju in obratno. Potreben je stalen nadzor kakovosti geodetskih referenčnih točk oz. ustrezna transformacija oblakov točk.
- Neustrezni preklopi fotografij povzročajo luknje v oblaku točk, torej lahko dobimo nepopolne in manj zanesljive končne rezultate. Težave zmanjšamo z izkušenim operaterjem in pravilna izbira položajev kamere.
- V oblakih točk se lahko pojavijo sence, čemur se na aktivnem gradbišču zelo težko izognemo. Ker so na nekaterih območjih oblaki zaradi tega brez točk, tam ni mogoče opraviti analiz (glej Slika 8 in Slika 9).
- Slabo prekrivanje oblakov točk med zaporednimi koraki zajemov po izkopavanju ali po vgradnji primarne podpore.
- Nekatero druge težave izhajajo iz različnih človeških napak med obdelavo slik ali izvajanjem analize, vendar jih je mogoče zmanjšati z ustreznim usposabljanjem in več izkušnjami uporabnikov programske opreme. Zato se te napake večinoma pojavijo le v začetni fazi.

Razvili smo skripte in vtičnike za polavtomatsko izdelavo fotogrametričnih oblakov točk izkopne površine in površine primarnih oblog v predoru ter za analizo oblaka točk glede na teoretične linije. To smo naredili z dodatnim skriptiranjem v dveh obstoječih programskih rešitvah (Agisoft Metashape in Rhino), s katerimi smo nadgradili njune prvotne funkcionalnosti. Velika prednost tovrstnega pristopa je, da je postopek možno nadzorovati in ga prilagajati ter nadgrajevati tudi v prihodnje.

Literatura in viri

- Attard, L., Debanò, C. J., Valentino, G., Di Castro, M. (2018). Tunnel inspection using photogrammetric techniques and image processing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 180-188.
- Fraser, C. S. (1997). Innovations in automation for vision metrology systems, *The Photogrammetric Record*, 15, 90: 901-911.
- Fryer, J. G., Mitchell, H. L., Chandler, J. H. (2007). *Applications of 3D Measurements from Images*, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, 304 p.
- ÖNORM B 2203-1. (2001). Underground works - Works contract - Part 1: Cyclic driving (conventional tunnelling). https://shop.austrian-standards.at/action/en/public/details/93793/OENORM_B_2203-1_2001_12_01. Pridobljeno 20. 10. 2023.
- Remondino, F. (2006). Detectors and descriptors for photogrammetric applications, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36, 3: 49-54.
- Schönberger, J. L., Frahm, J. M. (2016). Structure-from-Motion Revisited, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, 4104-4113.

- Śledź, S., Ewertowski, M. W. (2022). Evaluation of the Influence of Processing Parameters in Structure-from-Motion Software on the Quality of Digital Elevation Models and Orthomosaics in the Context of Studies on Earth Surface Dynamics, *Remote Sensing*, 14, 1312.
- Sun, H., Xu, Z., Yao, L., Zhong, R., Du, L., Wu, H. (2020). Tunnel Monitoring and Measuring System Using Mobile Laser Scanning: Design and Deployment, *Remote Sensing*, 12, 730.
- Urbančič, T., Čuk, T., Burja, T., Dolenc, R., Pajnič, M. (2021). Vpliv glavnih dejavnikov za kakovosten fotogrametrični zajem v predorih. Zbornik referatov, 13. mednarodna konferenca o predorih in podzemnih objektih, Ljubljana, 17.-19. 11. 2021. https://www.ita-slovenia.si/wp-content/uploads/2021/11/13_mkppo_zbornik.pdf. (20.10.2023)
- Wittke, W., Pierau, B., Erichsen, C. (2006). New Austrian tunneling method (NATM)-stability analysis and design. Essen, Germany, WBI, 419 p.