

Analiza metoda georeferenciranja podataka terestričkog laserskog skeniranja

MARKO PEJIĆ, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd

BRANKO BOŽIĆ, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd

BILJANA ABOLMASOV, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Pregledni rad

UDC: 528.711.76

U radu se razmatraju modeli registracije i georeferenciranja oblaka tačaka prikupljenog tehnologijom terestričkog laserskog skeniranja (TLS), imajući u vidu njegovu primenu u inženjersko-tehničkim oblastima. Predstavljani su različiti pristupi georeferenciranju preko funkcionalnih i stohastičkih modela prostorne transformacije i analizirani su uticaji različitih izvora grešaka. Razmatrane su prednosti i nedostaci različitih pristupa i date su preporuke za poboljšanje preciznosti georeferenciranja oblaka tačaka tehnologijom TLS.

Ključne reči: terestričko lasersko skeniranje, inženjerska geodezija, registracija, georeferenciranje, izvori grešaka

1. UVOD

Terestrički laserski skener (TLS) predstavlja instrument koji kao rezultat skeniranja daje skup 3D tačaka koji se naziva *oblak tačaka*. Upotrebom savremenih skenera, više miliona tačaka objekta se snimi u veoma kratkom vremenu, odnosno prikupe se podaci o njihovom prostornom položaju (X , Y , Z 3D koordinate) i intenzitet povratnog zračenja I .

Tehnologija TLS ima potencijal da bude široko prihvaćena geodetska metoda merenja. Skorašnja poboljšanja u vidu funkcionalnosti, brzine, dometa i preciznosti su omogućila sasvim nove oblasti primene ove tehnologije u geodeziji. Uloga TLS u inženjerskoj geodeziji je da se na osnovu 3D modeliranja objekata može sprovesti kontrola njegove geometrije. Brzine skeniranja pojedinih visokopreciznih TLS prelaze i 1.000.000 tačaka u sekundi, što je činjenica koja čini skeniranje metodom kakva do sada nije bila prisutna u geodetskom inženjerstvu.

Razmatranjem i definisanjem TLS tehnologije kao specifične metode merenja u inženjerskoj geodeziji bavili su se uglavnom nemački autori ([5], [15] i

[14]). Značajniji radovi koji tretiraju problematiku skeniranja i obrade podataka u geodetskom inženjerstvu su: [3], [7], [9] i [11]. Radovi koji se bave projektovanjem eksperimenta skeniranja su retki ([12]) i bave se smanjenjem grešaka oblaka tačaka optimizacijom mesta stajališta TLS.

Formulacije modela grešaka registracije i georeferenciranja oblaka tačaka date su u radovima [4], [8] i [10].

Postupci registracije i/ili georeferenciranja oblaka tačaka su značajan korak u obradi podataka terestričkog laserskog skeniranja. U kontekstu zadovoljavajuće geometrije podataka skeniranja, odnosno položajne tačnosti oblaka tačaka, ovi postupci, pored karakteristika instrumenta, igraju presudnu ulogu, te im se stoga mora posvetiti posebna pažnja.

2. FUNKCIONALNI MODELI GEOREFERENCIRANJA OBLAKA TAČAKA

Pod pojmom registracije oblaka tačaka podrazumeva se 3D transformacija susednih oblaka tačaka u jedinstveni koordinatni sistem (KS), odnosno njihovo spajanje u jedan jedinstveni oblak tačaka. Za ovaj zajednički ili globalni KS može se izabrati KS ma kog pojedinog oblaka tačaka (scene) ili nezavisni KS inženjerskog objekta. Postupak kojim se takav registrovan oblak tačaka prevodi u državni KS ili KS kontro-

Adresa autora: Marko Pejić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Rad primljen: 08.02.2013.

lne geodetske mreže naziva se georeferenciranjem oblaka tačaka.

Da bi se izvršila registracija i georeferenciranje podataka skeniranja potrebno je odrediti parametre prostorne transformacije. Za određivanje ovih parametara potrebno je definisati identične elemente u oba KS, i to:

- na osnovu tipskih skenerskih signala i specijalnih algoritama za njihovo prepoznavanje (target recognition) koji su specifični za svaki tip skenera (slika 1);
- identifikacijom po morfološkim detaljima u obe scene (slika 3);
- pomoću algoritama za uklapanje površi (slika 3) i
- na osnovu uklapanja pravilnih geometrijskih oblika (ravan, cilindar, sfera).

Metod georeferenciranja oblaka tačaka se određuje na osnovu prethodno definisane metodologije eksperimenta.

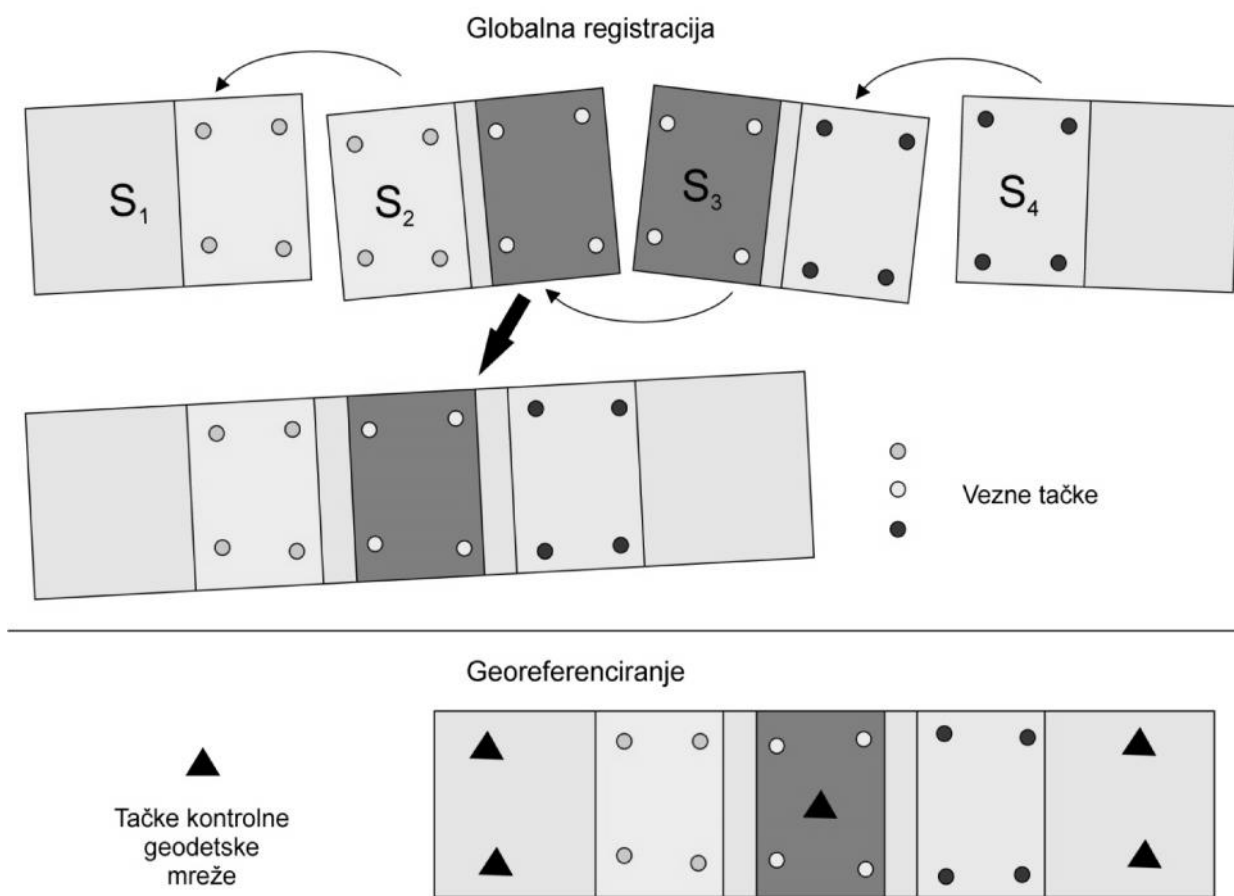
U skladu sa tim postoji indirektna i direktna metoda georeferenciranja oblaka tačaka.

Indirektno georeferenciranje podrazumeva postojanje dva skupa koordinata identičnih tačaka u KS globalne registracije i u KS kontrolne geodetske mreže (slika 2). Objekat je potrebno prethodno signalisati i sa kontrolne geodetske mreže odrediti koordinate signala u KS inženjerskog objekta (kontrolna geodetska mreža). Kod definisanja položajne tačnosti tačaka kontrolne geodetske mreže neophodno je zadovoljiti princip zanemarljivosti njihovog uticaja na tačnost georeferenciranja. Prethodno projektovanje kontrolne geodetske mreže sa aspektima prethodne ocene tačnosti i doprinosa redundantnosti (pouzdanosti) merenih veličina je obavezno u radovima u inženjersko-tehničkim oblastima. Alternativno se mogu koristiti algoritmi uklapanja površi georeferenciranjem na referentnu epohu merenja (slika 3). Indirektno georeferenciranje se može izvršiti u jednom ili u dva koraka.

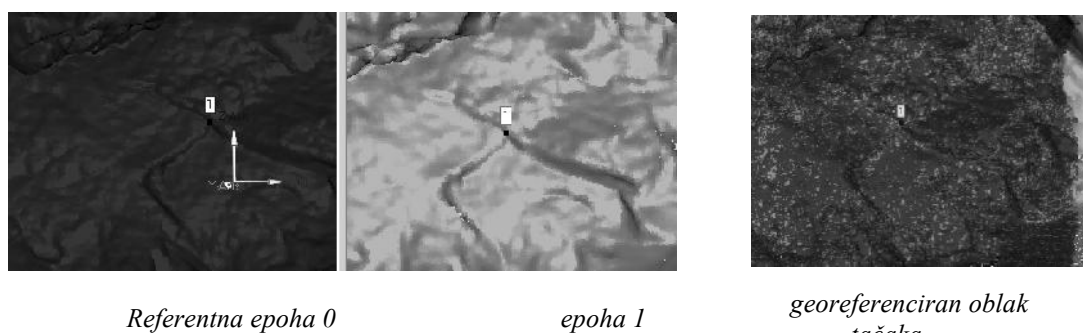
U TLS primenama u modelu transformacije koordinata prilikom registracije i georeferenciranja se po pravilu zanemaruje faktor razmere, odnosno smatra se da je jednak 1.



Slika 1 - Oblak tačaka tunela sa detektovanim Riegl retro-reflektivnim signalima. Vezne tačke na podu tunela i kontrolne tačke na zidu tunela



Slika 2 - Indirektno georeferenciranje u dva koraka (prema [9])



Slika 3 - Primer georeferenciranja epohe 1 identifikacijom morfološkog detalja (translacija sistema) i uklapanjem površi (rotacija sistema). Objekat - nestabilna kosina „Letnja pozornica“ u Beogradu

Model indirektnog georeferenciranja u dva koraka (slika 2) podrazumeva postupke registracije susednih scena na osnovu zajedničkih veznih tačaka, a zatim georeferenciranje globalno registrovanog oblaka tačaka u KS kontrolne geodetske mreže. Registracija scena transformacijom koordinata iz KS skenera X_s u KS globalne registracije scena X_g vrši se na osnovu prostorne rotacije R_s oko koordinatnih osa vektora X_s i translacijom ΔX_{sg} između X_s i X_g :

$$X_g = R_s X_s + \Delta X_{sg} \tag{1}$$

Drugi i poslednji korak je georeferenciranje oblaka tačaka X_g iz KS globalne registracije scena u KS kontrolne geodetske mreže X_k . Za tu namenu, načešće se koristi šestoparametarska Helmertova transformacija koja se sastoji iz prostorne rotacije R_g i translacije ΔX_{gk} i predstavljena je sledećom relacijom:

$$X_k = R_g (R_s X_s + \Delta X_{sg}) + \Delta X_{gk} \tag{2}$$

Metodologija indirektnog georeferenciranja u jednom koraku podrazumeva izuzimanje globalne registracije scena iz postupka, odnosno vrši se direktna transformacija koordinata iz X_s u X_k . Sprovodi se na osnovu prostorne rotacije R_s oko koordinatnih osa vektora X_s i translacije ΔX_{sk} između X_s i X_g . Vektor koordinata u KS geodetske mreže tada glasi:

$$X_k = R_s X_s + \Delta X_{sk} \quad (3)$$

Direktna metoda georeferenciranja uglavnom podrazumeva centrisanje i horizontiranje TLS nad tačkom poznatih koordinata i visine, merenje visine skenera nad tom tačkom i uzimanje orijentacije na drugu „poznatu“ tačku. Najčešće se potrebni podaci pre početka skeniranja unose u softver skenera, pa je otuda skenirani oblak tačaka u KS tačaka kontrolne geodetske mreže, a ovaj postupak se tada naziva direktnim georeferenciranjem. Preduslov za primenu ove metode je da TLS poseduje karakteristike totalne stanice, odnosno: optički ili digitalni visak, centričnu, cevastu ili digitalnu libelu, kompenzator nagiba, kao i mogućnost merenja visine instrumenta i prateći softver.

Pod pretpostavkom da skener poseduje pun potencijal za direktno georeferenciranje, model transformacije koordinata iz KS skenera u KS kontrolne geodetske mreže X_k glasi:

$$X_k = R_{s(\varepsilon)} X_s + \Delta X_{sk} \quad (4)$$

pri čemu se indeks k odnosi na KS kontrolne geodetske mreže, a indeks s na KS skenera. Vektor ΔX_{sk} čine vrednosti translacije sistema po koordinatnim osama. Matrica rotacije $R_{s(\varepsilon)}$ je u funkciji samo jednog parametra rotacije ε oko z -ose. Parametar ε se određuje orijentacijom TLS na drugu tačku kontrolne geodetske mreže, što je u ovom slučaju bio preduslov.

Pod pojmom metode direktnog georeferenciranja može se podrazumevati i korišćenje procedure „presecanja nazad“. Zahvaljujući razvoju softvera implementiranih u TS i TLS novije generacije, u realnom vremenu se dobijaju parametri MNK transformacije koordinata, odnosno najverovatnije koordinate stajne tačke u prostoru, sa ocenom reziduala transformacionih parametara i koordinata stajališta, po modelu:

$$X_k = R_s X_s + \Delta X_{sk} \quad (5)$$



Slika 4 - Rigl VZ 6000 terestrički laserski skener sa ugrađenim L1 GPS prijemnikom (levo) i Leica ScanStation P20 uređaj sa omogućenim kalibracionim procedurama (desno)

3. STOHAŠTIČKI MODELI

GEOREFERENCIRANJA OBLAKA TAČAKA

Pretpostavka je da na preciznost georeferenciranja utiču slučajne instrumentalne greške TLS i preciznost određivanja transformacionih parametara. Ove nisu uzete u obzir greške usled reflektivnosti objekta, različitih poremećajnih uticaja sredine, objekta i uticaja upadnog ugla laserskog zraka, koje su razmatrane u [6]. U geodetskom inženjerstvu se ti dodatni uticaji, planiranjem eksperimenta i njegovim izvođenjem u optimalnim uslovima atmosfere, mogu svesti na zanemarljivu veličinu. Ako to nije slučaj i oni se mogu implementirati u model grešaka konačno georeferenciranog oblaka tačaka, odnosno u kovarijacioni model opažanja rastojanja i pravaca C_{op} .

Vektor koordinata tačke j u KS skenera X_s je u funkciji izvornih opažanja dužine ρ_{ij} i pravaca θ_{ij} i α_{ij} i ima oblik:

$$X_s = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij} \\ \rho_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij} \\ \rho_{ij} \cdot \sin \alpha_{ij} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Kovarijaciona matrica ocene vektora koordinata u KS skenera C_x glasi:

$$C_x = A_{op} C_{unt} A_{op}^T \quad (7)$$

pri čemu A_{op} predstavlja matricu parcijalnih izvoda koordinata po opažanjima ρ_{ij} , θ_{ij} i α_{ij} .

U [10] razmatrani su instrumentalni (unutrašnji) izvori grešaka TLS, greške direktnih opažanja, σ_p , σ_θ , σ_α i greške nastale od obima laserskog snopa na objektu σ_{ls} [4], odnosno odgovarajuće kovarijacione matrice, respektivno C_{op} i C_{ls} . Kovarijaciona matrica unutrašnjih izvora grešaka TLS ima oblik:

$$C_{unt} = C_{op} + C_{ls} = \text{diag}(\sigma_\rho^2, \sigma_\theta^2 + \sigma_\alpha^2 + \sigma_{ls}^2) \quad (8)$$

Pored ovih grešaka, u model se u daljem razmatranju uključuju i greške transformacionog modela koje zavise od geometrije skeniranog objekta i broja kontrolnih tačaka.

3.1. Model grešaka indirektno metode georeferenciranja

Kovarijaciona matrica transformacije koordinata tačke u KS kontrolne geodetske mreže C_{X_k} na osnovu metodologije indirektnog georeferenciranja u dva koraka ima oblik:

$$C_{X_k} = A_p^{gk} C_p^{gk} (A_p^{gk})^T + R_g \left(A_p^{sg} C_p^{sg} (A_p^{sg})^T + R_s C_{X_k} R_s^T \right) R_g^T \quad (9)$$

pri čemu se indeks s odnosi na KS skenera, g na KS globalne registracije i k na KS kontrolne geodetske mreže. C_p^{sg} je kovarijaciona matrica transformacionih parametara između skenerskog i globalnog KS. Matricu dizajna A_p^{sg} čine koeficijenti, odnosno parcijalni izvodi koordinata X_g po transformacionim parametrima. C_p^{gk} je kovarijaciona matrica transformacionih parametara između KS globalne registracije i KS kontrolne geodetske mreže. Matrica A_p^{gk} je matrica parcijalnih izvoda koordinata X_k po tim transformacionim parametrima.

Metodologija indirektnog georeferenciranja u jednom koraku podrazumeva izuzimanje globalne registracije scena iz postupka, odnosno vrši se direktna transformacija koordinata iz X_s u X_k . Sprovodi se na osnovu prostorne rotacije R_s oko koordinatnih osa vektora X_s i translacije ΔX_{sk} između X_s i X_k . Kovarijaciona matrica transformacije koordinata tačke u KS kontrolne geodetske mreže C_{X_k} na osnovu metodologije indirektnog georeferenciranja u jednom koraku glasi:

$$C_{X_k} = A_p^{sk} C_p^{sk} (A_p^{sk})^T + R_s C_{X_s} R_s^T \quad (10)$$

C_p^{sk} je kovarijaciona matrica transformacionih parametara između KS skenera i KS kontrolne geodetske mreže. Matrica A_p^{sk} je matrica parcijalnih izvoda koordinata X_k po transformacionim parametrima iz X_s u X_k .

3.2. Model grešaka direktne metode georeferenciranja

Ukoliko se koristi metoda direktne georeferenciranja oblaka tačaka, uzorak podataka skeniranja je opterećen dodatnim slučajnim izvorima grešaka u odnosu na indirektnu metodu. Pored unutrašnjih grešaka TLS, koje su zajedničke i za indirektno georeferenciranje, prisutni su i dodatni izvori grešaka transformacionih parametara. To su uticaji nesigurnosti određivanja centra skenera (uticaji datih tačaka geodetske mreže, centrisanja i merenja visine TLS) i određivanja parametara horizontalne orijentacije (uticaji datih tačaka geodetske mreže, centrisanje TLS i signala, viziranje signala - samo za horizontalnu komponentu). Imajući u vidu nabrojane uticaje izvora gre-

šaka na ove tri komponente, kovarijaciona matrica koordinata u KS (kontrolne) geodetske mreže X_k , na osnovu direktne georeferenciranja oblaka tačaka procedurom centrisanja i orijentisanja TLS, ima oblik:

$$C_{X_k} = C_0 + (R_{s(\varepsilon)} A_{op} (C_{unt} + C_{ini}) A_{op}^T R_{s(\varepsilon)}^T) + \frac{\partial X_k}{\partial \varepsilon} \left(\frac{\partial X_k}{\partial \varepsilon} \right)^T \partial \varepsilon^2 \quad (11)$$

Forma A_{op} i C_{unt} je data respektivno u, dok je matrica rotacije $R_{s(\varepsilon)}$ u funkciji parametra rotacije ε oko z -ose KS skenera (ovde je ε poistovećen sa vrednošću orijentacionog ugla) data u (4)

Nesigurnost translacije sistema se ogleda u kovarijacionoj matrici C_0 koja se odnosi na nesigurnost pozicije optičko-mehaničkog centra skenera, i može se izraziti kao suma uticaja nesigurnost referentne osnove, centrisanja i merenja visine TLS. Kovarijaciona matrica C_{ini} predstavlja uticaje inicijalizacije TLS na rezultate opažanja uglova, odnosno sadrži uticaje grešaka horizontaliranja TLS.

Poslednji član zbira u generalnom izrazu moduluje uticaj varijanse orijentacije (direkcionog ugla) sa stajne na datu tačku geodetske osnove na vektor koordinata X_k . Varijansa direkcionog ugla σ_ε^2 podrazumeva uticaj grešaka datih koordinata kontrolne geodetske mreže stanice i signala ([4], [9] i [10]), ali neizbežno i grešku viziranja signala, grešku centrisanja TLS i grešku signalisanja date tačke.

Standardno odstupanje ocene MNK parametara transformacije tokom procedure „presecanja nazad“ definiše kovarijaciona matrica C_{ppn}^{sk} . Veličina ovih odstupanja zavisi od varijansi određivanja koordinata skenerskih signala u KS skenera, varijansi datih koordinata tačaka u KS kontrolne geodetske mreže i od geometrije kontrolnih tačaka. Konačna forma nesigurnosti prostornog položaja oblaka tačaka u KS kontrolne geodetske mreže može se sračunati na osnovu zakona prenosa grešaka u odnosu na funkciju. Stohastički model, odnosno kovarijaciona matrica direktne georeferenciranja po principu „presecanja nazad“ C_{X_k} ima oblik:

$$C_{X_k} = A_{ppn}^{sk} C_{ppn}^{sk} (A_{ppn}^{sk})^T + R_s C_{X_s} R_s^T \quad (12)$$

pri čemu matrica A_{ppn}^{sk} predstavlja matricu parcijalnih izvoda po parametrima transformacije. Kovarijaciona matrica koordinata u KS skenera - C_{X_s} data je

u dok matrica R_s predstavlja matricu rotacije u KS skenera.

4. PREDNOSTI I NEDOSTACI METODA GEOREFERENCIRANJA

Zavisno od karakteristika radilišta, zahtevane tačnosti skeniranja, kao i od ekonomskih, tehničkih i operativnih aspekata eksperimenta bira se način registracije i georeferenciranja. Ovde su razmatrane prednosti i nedostaci dva pristupa isključivo sa aspekta primene u inženjersko-tehničkim oblastima, gde je tačnost podatka jedan od važnijih kriterijuma.

Prednosti indirektno metode georeferenciranja:

- Potencijalno visoka tačnost georeferenciranja, od nekoliko milimetara;
- Položaj stajne tačke ne mora biti poznat što omogućava slobodu u izboru stajališta;
- Nema potrebe za centrisanjem, merenjem visine i horizontiranjem skenera Horizontiranje se može obaviti samo pomoću centrične libele instalirane na postolje skenera, ili se uopšte ne mora sprovesti i
- Sa više od minimalnog broja od tri tačke na objektu, moguće je unaprediti pouzdanost i tačnost transformacionog modela i imati punu kontrolu nad rezultatima georeferenciranja.

Nedostaci indirektno metode georeferenciranja:

- Nameće se potreba za planiranjem prostorne konfiguracije skenerskih signala i projektovanja geodetske osnove georeferenciranja. Potrebno je uvođenje preciznijeg instrumenta i dodatne terenske ekipe, izuzev u slučajevima georeferenciranja uklapanjem površi;
- Komplikovano signalisanje inženjerskih objekata poput brana, visokih zgrada, nestabilnih kosina, itd. Često se objekat u istoj epohi dva puta signalise, markicama za skener i totalnu stanicu. Ovo ne važi u slučajevima georeferenciranja uklapanjem površi);
- Potreban je preklap između susednih scena;
- Poteškoće kod skeniranja linijskih objekata. Javlja se efekat multiplikacije grešaka registracije idući dalje od inicijalnog stajališta i
- Javlja se potreba za georeferenciranjem nakon terenskih radova, u kancelariji.

Prednosti direktne metode georeferenciranja:

- Jednostavnije planiranje i realizacija geodetske osnove georeferenciranja. Moguće je osloniti se na postojeću geodetsku osnovu i/ili koristiti GNSS tehnologiju pozicioniranja stajališta i orijentacije, ukoliko postignuta tačnost zadovoljava kriterijume tačnosti eksperimenta;

- Nema potrebe za preklapom između susednih scena;
- Nema potrebe za dodatnom kancelarijskom obradom. Podaci skeniranja su georeferencirani na terenu i
- Analogija sa tahimetrijskom metodom snimanja detalja obezbeđuje lakšu implementaciju u tradicionalnu geodetsku praksu.

Nedostaci direktne metode georeferenciranja:

- Manja tačnost georeferenciranja u odnosu na indirektan pristup. Tipična tačnost je centimetarska i u inženjerstvu je zbog toga manje zastupljena;
- Skener se mora centrisati, horizontirati, orijentisati i mora se meriti visina nad tačkom geodetske osnove. To komplikuje i produžava terensku proceduru pre samog početka skeniranja;
- Nije moguće koristiti GNSS pozicioniranje stajališta skenera i orijentacije u zatvorenom prostoru i u prisustvu izvora jakog elektromagnetnog zračenja, odnosno ukoliko se vrši skeniranje inženjerskih objekata poput tunela, magistralnih cevovoda, podzemnih iskopa i specifičnih industrijskih postrojenja;
- Primenljivost u inženjerstvu je uslovljena, između ostalog i korišćenjem skenera koji poseduju dvoosni kompenzator i pouzdano horizontiranje instrumenta. To sužava praktičnu evaluaciju ove metode ukoliko se koriste pojedini tipovi skenera, naročito oni starije proizvodnje; i
- Mala pouzdanost georeferenciranja oblaka tačaka. Nemoguće je naknadno uticati na rezultate georeferenciranja. Moguće je da eventualna grupa greška, npr. u postupku orijentisanja skenera, ne bude primećena na terenu. U takvim slučajevima vrlo verovatan je ponovni izlazak na teren.

S obzirom da je metoda indirektnog georeferenciranja u inženjerstvu zastupljenija, radi poboljšanja njene preciznosti potrebno je obezbediti:

- Da poziciona tačnost kontrolnih tačaka određenih u okviru kontrolne geodetske mreže bude takva da se greške datih veličina mogu zanemariti u transformacionom modelu;
- Da broj kontrolnih tačaka bude veći od minimalnih tri, kako bi se unapredila preciznost i pouzdanost transformacije;
- Minimalno 30% preklopa između susednih scena prilikom registracije ([2]);
- Dobar prostorni raspored kontrolnih tačaka sa varijacijom po dubini, uz uslov da kontrolne tačke nisu kolinearne u pravcu laserskog zraka ([13]);
- Da se kod georeferenciranja i registracije podataka skeniranja izduženih objekata obezbede tačke za

georeferenciranje minimalno nakon svakog trećeg stajališta ([2]);

- Da tipski skenerski signali budu, ukoliko je moguće, locirani što bliže poziciji TLS, i da, ako se koriste ravni signali, ulazni ugao laserskog zraka bude približno ortogonalan u odnosu na ravan signala ([1]) i
- Da se koristi arbitrarni postupak georeferenciranja linijskih objekata kako bi se smanjio efekat multiplikacije grešaka registracije.

Na primeru test objekta u vidu dugačkog železnog tunela je pokazano da arbitrarni pristup georeferenciranju doprinosi da se veličina greške registracije zadrži u dozvoljenim granicama. U tunelu dužine 1.36 km, ostvarena je apsolutna tačnost oblaka tačaka korišćenjem metodologije arbitrarnog georeferenciranja i iznosi oko 11 mm, dok korišćenjem standardne procedure indirektnog georeferenciranja, pojedini reziduali prostorne transformacije oblaka tačaka idu i do 1 m. Ova eksperimentalna istraživanja su izvršena u okviru projekta tehnološkog razvoja – Primena GNSS i LIDAR tehnologije u monitoringu stabilnosti infrastrukturnih objekata i terena (TR36009) koji se finansira od strane Ministarstva za nauku u periodu od 2010. do 2014. godine.

Preciznost određivanja pozicije tipskog skenerskog signala je parametar koji može značajno uticati na preciznost georeferenciranja. Proizvođači uglavnom daju ovaj parametar kao karakteristiku TLS sistema. Na primer, za seriju impulsnih skenera Leica Geosystems preciznost određivanja centra signala je 2 mm/50 m.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu prethodno iznetog, a posebno sa aspekta korišćenja skenera u inženjerskim radovima visoke tačnosti, može se reći da bez obzira na tendenciju usavršavanja hardvera i različitih korekcionih algoritama, metoda direktnog georeferenciranja će uvek biti nižeg ranga tačnosti u odnosu na indirektnu metodu. Analogija orijentisanju skenera je orijentisanje totalnom stanicom u premeru, i to u jednom položaju durbina. Skener naravno nije moguće koristiti analogijom dva položaja durbina, što ostavlja značajan skup sistematskih grešaka prilikom orijentisanja na datu tačku koje se ne mogu metodom rada neutralisati (efekat horizontalne i vertikalne kolimacije). Takođe, merenje visine skenera ima sve negativne implikacije kao merenje visine totalne stanice u trigonometrijskom nivelmanu. Centrisanje i horizontiranje dodatno opterećuju uzorak merenja. Ukoliko se koristi indirektni pristup georeferenciranju, praktično ove greške ne postoje uz očiglednu analogiju sa prisilnim centrisanjem totalne stanice.

Pored postignute tačnosti važan aspekt favorizovanja indirektnih metode u odnosu na direktnu je konceptualne prirode. Tradicionalno, u projektovanju eksperimenata u inženjerskoj geodeziji se mora obezbediti pouzdanost rezultata, sprovođenje kontrole i dokazivanja adekvatnosti rezultata.

ZAHVALNOST

Ovaj rad je nastao kao deo Projekta TR36009 „Primena GNSS i LIDAR tehnologije u monitoringu stabilnosti infrastrukturnih objekata i terena“, koji se finansira od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Alba, M., Roncoroni, F., Scaioni, M. (2008): Investigations about the accuracy of target measurement for deformation monitoring. IASPRS, XXXVII(B5):1053–1059.
- [2] Bornaz, L., Lingua, A., Rinaudo F. (2003): Multiple scan registration in LIDAR close-range applications. Proceedings of the ISPRS International Workshop WG V/4 and INTCOM III/V “Vision Techniques for Digital Architectural and Archaeological Archives”. Ancona, Italy, July 1 – 3.
- [3] Eling D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 641, München
- [4] Lichti, D.D., Gordon, S.J., (2004): Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. In: Proceedings of FIG Working Week, Athens, Greece, 22-27 May. Available online: http://www.fig.net/pub/athens/papers/wsa2/WSA2_6_Lichti_Gordon.pdf. (pristupljeno septembra 2009)
- [5] luhmann, T. (2012): Photogrammetrie und Laserscanning. Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management, Heidelberg: H. Wichmann Verlag.
- [6] pejić, M. (2010): Primena tehnologije terestričkog laserskog skeniranja u geodeziji. Tehnika - Naše građevinarstvo, 64/1 (2010), str. 13-18.
- [7] Rabbani, T. (2007): Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images. PhD thesis, Delft University of Technology.
- [8] Reshetyuk, Y. (2006): Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Licentiate thesis in Geodesy, Royal Institute of Technology, Division of Geodesy, Stockholm.
- [9] Reshetyuk, Y. (2009): Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Docto-

- ral thesis in Infrastructure, Geodesy. Royal Institute of Technology, Division of Geodesy. Stockholm.
- [10] Scaioni, M. (2005): Direct georeferencing of TLS in surveying of complex sites. In: Proceedings of the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3D-ARCH "Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", Mestre-Venice, Italy, August 22 – 24. Available online: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W17/pdf/23.pdf>. (pristupljeno juna 2011)
- [11] Schulz, T. (2007): Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Dissertation. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.
- [12] Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Gorte, B. (2008): Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up, Proc. of the XXI Congress, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS2008, Vol. XXXVII, Commission V, 3–11 July 2008, Beijing, China, pp 615–620.
- [13] Tait, M., Fox, R., Teskey WF. (2004): A Comparison and Full Error Budget Analysis for Close Range Photogrammetry and 3D Terrestrial Laser Scanning with Rigorous Ground Control in an Industrial Setting. In: Proceedings of INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia, November 11 – 13. Available online: http://www.fig.net/pub/bratislava/papers/ts_05/ts_05_tait_et.al.pdf. (pristupljeno januara 2010)
- [14] Wunderlich, T.A. (2006): Der Anwendungsreichtum des terrestrischen Laserscannings. In: Flächenmanagement und Bodenordnung (fub), Vol. 4/2006, pp. 170-174.
- [15] Zogg, H.M. (2008): Investigations of High Precision Terrestrial Laser Scanning with Emphasis on the Development of a Robust Close-Range 3D-Laser Scanning System. Dissertation. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE TERRESTRIAL LASER SCANNING GEOREFERENCING METHODS

From the point of engineering geodesy this paper discusses registration and georeferencing methods of the terrestrial laser scanning (TLS) data. The different functional and stochastic spatial transformation models of the registration and georeferencing are presented and different sources of the errors are analyzed. Advantages and disadvantages of the various approaches are analyzed and recommendations for improving the precision of georeferencing are given.

Key words: *terrestrial laser scanning, engineering geodesy, registration, georeferencing, model, errors*