

ANALIZA KAKOVOSTI DOLOČITVE PARAMETROV KROGLE PRI TERESTRIČNEM LASERSKEM SKENIRANJU

QUALITY ANALYSIS OF THE SPHERE PARAMETERS DETERMINATION IN TERRESTRIAL LASER SCANNING

Tilen Urbančič, Božo Koler, Bojan Stopar, Mojca Kosmatin Fras

UDK: 514.11:528.71

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01

Prispelo: 29.8.2013

Sprejeto: 24.9.2013

SCIENTIFIC PAPER

Received: 29.8.2013

Accepted: 24.9.2013

IZVLEČEK

Rezultat laserskega skeniranja je oblak točk. Pri terestričnem laserskem skeniranju ga pridobimo na podlagi podatkov skeniranja, zajetih z enega ali več stojišč, za kar potrebujemo tako imenovane vezne točke. To so lahko točke objekta (naravne tarče) ali pa prav za ta namen z izbrano signalizacijo stabilizirane tarče (umetne tarče). Za slednje pogosto uporabimo tarče kroglaste oblike, ki jim moramo določiti koordinate središč in polmere. Koordinate središča krogle določimo na podlagi skeniranih točk plašča krogle. V prispevku predstavljamo postopka določitve najboljših regij plašča krogle za določitev njenih parametrov ter postopek določitve optimalne razdalje med skenerjem in kroglo pri skeniranju s terestričnim laserskim skenerjem. Najboljše regijo plašča krogle smo določili na dva načina. Prvi temelji na minimiziranju razlike polmerov krogle, ko v postopku izravnave obravnavamo polmer krogle kot znano in neznano količino. Drugi temelji na standardnem odklonu koordinat središča krogle pri neodvisnih določitvah parametrov krogle iz naključno izbranih skeniranih točk na površju krogle. Najboljše razmerje med površino odtsa laserskega žarka in površino tarče za vsako od krogel izračunamo za najboljšo kombinacijo razdalje skeniranja in najboljše regije. Za najboljšo kombinacijo razdalje skeniranja in regije izberemo tisto z najmanjšim standardnim odklonom koordinat središča krogle.

KLJUČNE BESEDE

terestrično lasersko skeniranje, registracija, vezna točka, krogla

ABSTRACT

A point cloud is the result of laser scanning; in the case of terrestrial laser scanning, the point cloud is composed of points scanned from one or more positions. To register these points into one point cloud, so-called tie points are needed; these may be object points (natural targets) or selected stabilized targets (artificial targets). Spherical targets are often used as artificial targets; these must have their centre coordinates and radius determined. The centre coordinates of a sphere are calculated on the basis of scanned points on the sphere's surface. This paper presents two procedures for determining the best reflection region on the sphere to determine its parameters, and the procedure for determining the optimal distance between the scanner and sphere. The best reflection area on the sphere is determined in two ways. The first is based on minimizing the difference between sphere radii when, in the adjustment process, the radius of the sphere is treated as a known and unknown quantity. The second is based on the standard deviation of the sphere's centre coordinates at the independent determinations of sphere parameters from randomly chosen scanned points on the sphere surface. For each of the spheres, the best ratio between the laser beam footprint area and the target surface area is calculated for the optimal combination of scanning distance and region. For the best combination of scanning distance and region, we chose the one with the smallest standard deviation of the sphere centre coordinates.

KEY WORDS

terrestrial laser scanning, registration, tie point, sphere

1 UVOD

Za množičen in hiter zajem prostorskih podatkov se pogosto uporabljajo tehnologije, ki temeljijo na uporabi laserske svetlobe. Najpogosteje se za ta namen uporabljata terestrično lasersko skeniranje (TLS) in aerolasersko skeniranje (ALS). V oblaku točk, ki ga dobimo s skeniranjem, posamezna točka predstavlja odtis (angl. *footprint*) oziroma odboj elektromagnetnega valovanja od dela površja skeniranega objekta. Zaradi oblike odtisa in nehomogene odbojnosti površine odtisa je vrednost merjene razdalje običajno določena kot utežena sredina razdalj do posameznih delov odtisa. Merjena razdalja je torej odvisna od strukture odbojne površine (Lichti in Harvey, 2002; Kukko, Kaasalainen in Litkey, 2008; Voegtle, Schwab in Landes, 2008). Ta vpliv sta pri zajemu s TLS testirala Pesci in Teza (2008), ki sta ugotavljala kakovost določitve ravnine skozi skenirane točke glede na velikost vpadnega kota laserskega žarka za različne vrste in stopnje hrapavosti materialov odbojnih površin. Vpliv materialov odbojnih površin pri skeniranju na različnih razdaljah in pod različnimi vpadnimi koti sta analizirala tudi Voegtle in Wakaluk (2009). Na kakovost določitve koordinat točk s TLS pa poleg strukture odbojne površine vplivajo tudi tehnične lastnosti skenerja (Zhuang in Roth, 1995; Lichti in Jamtsho, 2006), atmosferski pogoji (Pfeifer sod., 2007; Borah in Voelz, 2007) in geometrijska situacija skeniranja (Lichti, 2007; Soudarissanane sod., 2007; Soudarissanane sod., 2011).

Skeniranje s TLS običajno opravimo z več stojšč. Za združevanje oziroma registracijo (angl. *registration*) se uporabljajo vezne točke (angl. *tie point*), za ocenjevanje kakovosti geometrije oblaka točk pa uporabljamo kontrolne točke (angl. *check point*). Koordinate (položaj) veznih in kontrolnih točk ob izbiri umetnih tarč zagotovimo s skeniranjem geometrijskih teles. Najbolj preprosto in najpogosteje uporabljeno geometrijsko telo umetne tarče je krogla. Karakteristična točka je njeno središče (Zhou sod., 2008; Franaszek sod., 2009; Witzgall sod., 2006; Ačko sod., 2012). Na kakovost določitve koordinat središča krogle in njenega polmera vplivajo vse skenirane točke plašča krogle, ki jih vključimo v izračun parametrov. Za kakovostno določitev parametrov skenirane krogle je zato pomembno, da poznamo in uporabimo območja na krogli, na katerih je kakovost odbojev od krogle najboljša.

V prispevku so predstavljeni rezultati raziskave, v kateri smo analizirali vpliv različnih območij odbojev na površini krogle ter odnos med oddaljenostjo skenerja od tarče in velikostjo krogle. Rezultati in ugotovitve naših preizkusov so lahko v pomoč pri načrtovanju terenske izmere za določitev optimalne velikosti tarče kroglaste oblike glede na razdaljo skeniranja in za izbiro najboljših območij odbojev za izračun parametrov krogle.

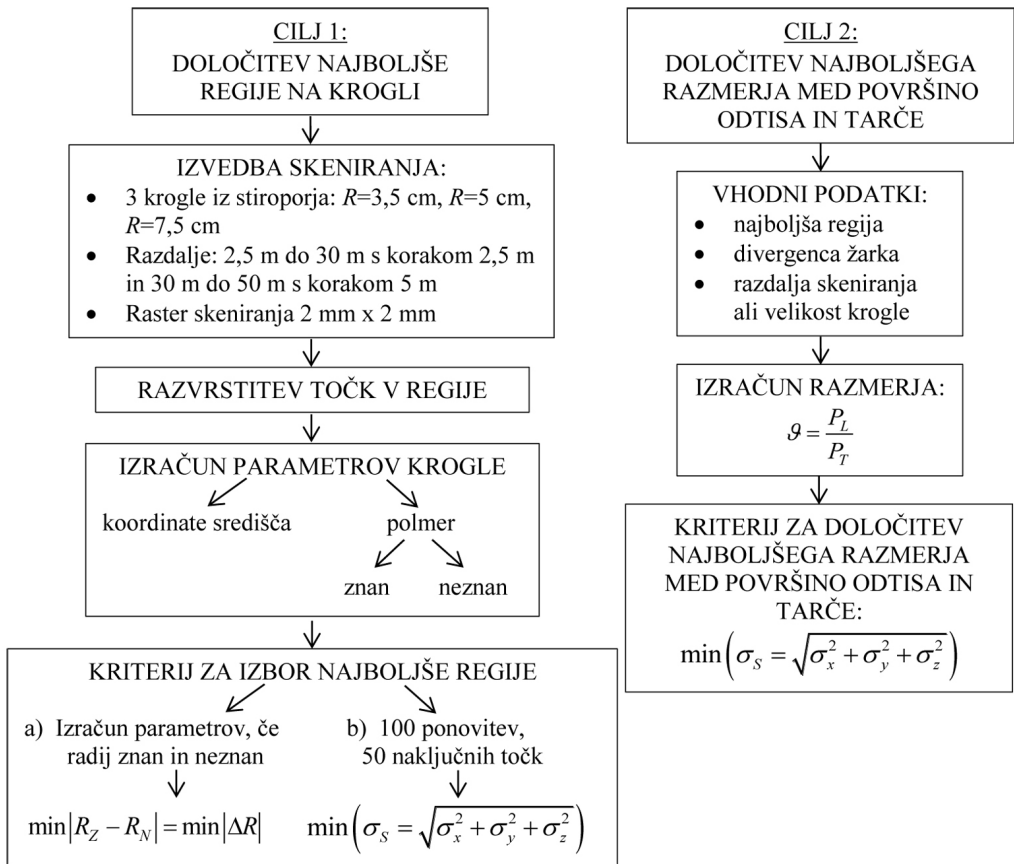
2 METODOLOGIJA RAZISKAVE

V raziskavi smo si zadali dva cilja:

- določitev najboljšega območja odbojev na krogli (izbira regije) za izračun njenih parametrov,
- določitev najboljšega razmerja med površino odtisa in površino tarče za izračun optimalne razdalje skeniranja oziroma velikosti krogle.

Potek raziskave lahko prikažemo v shematski obliki (slika 1).

Skeniranje smo izvedli s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ-400. Testno polje, prikazano na sliki 2, sestavljajo krogle, izdelane iz stiropora in s polmeri $R = 3,5$ cm, $R = 5$ cm in $R = 7,5$ cm. Stiropor



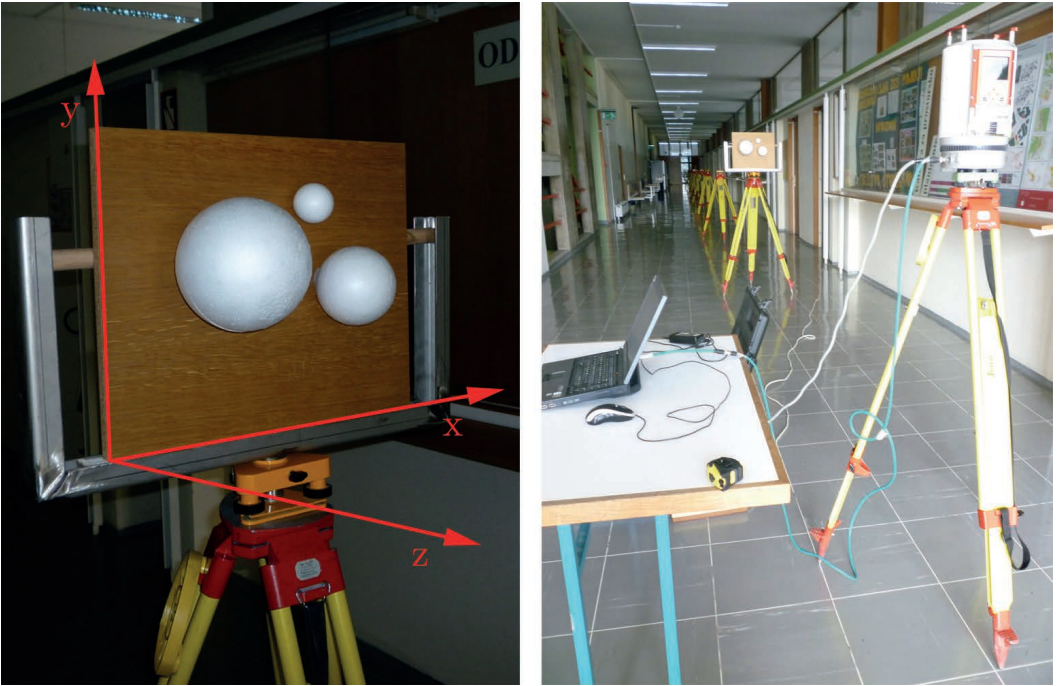
Slika 1: Shematski prikaz poteka raziskave.

smo izbrali zaradi cenovne dostopnosti in zato, ker se pogosto uporablja v praksi. Premeri krogel so bili pred skeniranjem izmerjeni s kljunastim merilom. Krogle so pritrjene na ravno podlago, ki je osnovna ploskev testnega polja. Skeniranje smo opravili na 16 razdaljah od 2,5 m do 30 m s korakom 2,5 m ter od 30 m do 50 m s korakom 5 m. Testno polje ter postavitev skenerja in testnih polj pri skeniranju prikazujemo na sliki 2.

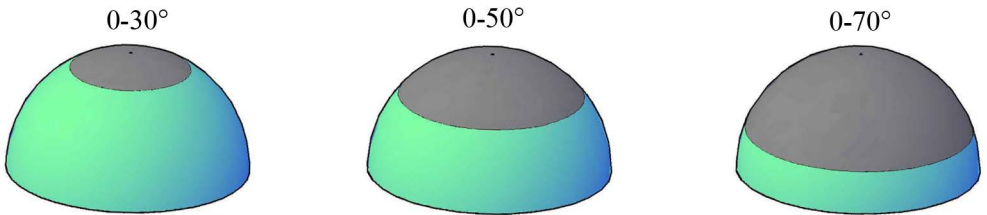
V prvi fazi smo posamezno območje odbojev na krogli (krogelno kapico) definirali kot regijo. Izbrali smo 7 testnih regij od 0–30° do 0–90° s korakom povečevanja 10°. Regijo definiramo s kotom α (glej poglavje 3.3). Primeri regij 0–30°, 0–50° in 0–70° so prikazani na sliki 3. Regiji 0–10° in 0–20° sta zaradi premajhne površine za naš primer neuporabni.

Za določitev regij najboljših odbojev na krogli smo uporabili dve merili:

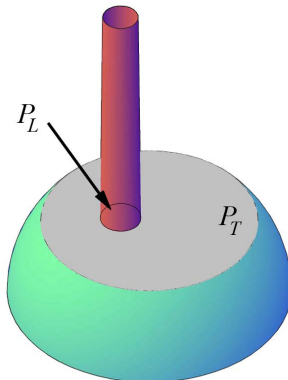
- najmanjšo razliko med vrednostmi parametrov krogle v trirazsežnem prostoru, ocenjenimi z izravnavo, za primera, ko polmer krogle v izravnavi nastopa kot znana oziroma neznana količina, in
- najmanjšo vrednost standardnega odklona koordinat središča krogle pri 100 neodvisnih ponovitvah izračuna parametrov krogle iz 50 naključno izbranih točk v posamezni regiji.



Slika 2: Testno polje s koordinatnim sistemom ter postavitev testnih polj in skenerja.



Slika 3: Primeri regij.



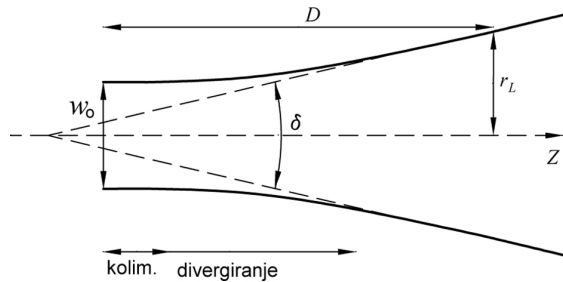
Slika 4: Površini odtisa laserskega žarka (P_L) in tarče (P_T).

Drugi cilj raziskave je bil določiti najboljšo regijo oziroma kombinacijo razdalje skeniranja in velikosti krogle. Merilo je razmerje med površino odtisa laserskega žarka P_L in površino tarče P_T (slika 4). Površino tarče P_T določa površina kroga, ki ga dobimo kot presek ravnine s kroglo pri regiji najboljših odbojev, površino odtisa laserskega žarka P_L pa si za izbrano razdaljo izračunamo na podlagi podatkov laserskega žarka, ki jih zagotavlja proizvajalec (glej poglavje 3.1). Izračun opišemo v poglavju 3.

3 TEORETIČNE IN MATEMATIČNE OSNOVE ZA IZVEDBO RAZISKAVE

3.1 Lastnosti laserskega žarka

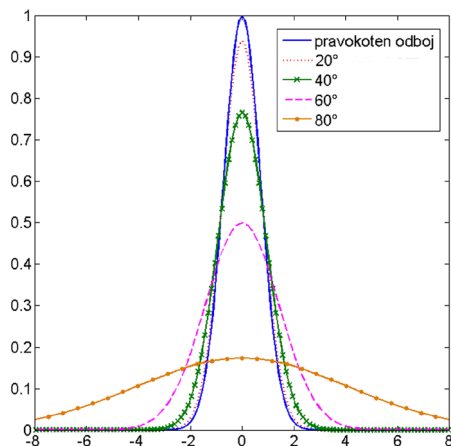
Laserski žarek je ozko usmerjen. Ker ima končen presek, pravimo, da je prostorsko omejen. Površina prečnega preseka laserskega žarka se povečuje oziroma divergira v smeri širjenja valovanja Z (slika 5). Na manjši oddaljenosti od izvora laserske svetlobe s premerom žarka w_0 je premer žarka konstanten. Pravimo, da je laserski žarek na tem območju kolimiran (Paschotta, 2008). Pomembna fizikalna lastnost žarka TLS je tudi, da imata tako oddani kot odbiti laserski žarek približno obliko Gaussovega žarka (Siegman, 1986; Pesci, Teza in Bonali, 2011).



Slika 5: Razširjanje laserskega žarka.

Eden izmed pomembnih podatkov za uporabnike rezultatov laserskega skeniranja je velikost odtisa laserskega žarka. Pomembno je poudariti, da proizvajalci instrumentov (skenerjev) poleg premera žarka na izhodu w_0 običajno podajo podatek o divergenci laserskega žarka δ ter o polmeru odtisa laserskega žarka r_L na izbranih razdaljah D (slika 5). Zaradi zgoraj navedenih lastnosti razširjanja laserskega žarka se ta podatek običajno ne ujemata popolnoma, saj uporabnik nima na voljo podatka o območju kolimacije. Z določitvijo velikosti odtisa laserskega žarka na različnih razdaljah se je ukvarjalo več raziskovalcev. Primerjavo med teoretično in dejansko obliko ter velikostjo odboja laserskega žarka terestričnega laserskega skenerja pod različnimi vpadnimi koti so opravili Jutzi, Eberle in Stilla (2003). Centeno idr. (2010) so za določitev velikosti odtisa laserskega žarka predlagali metodi, ki temeljita na skeniranju različnih testnih polj z več razdalj.

Oblika odboja laserskega žarka je odvisna od odbojne površine oziroma vrste tarče. Kadar se žarek odbije pravokotno od površine, je krivulja odbitega žarka v vertikalnem prerezu ozka (slika 6), saj je moč odboja velika in skoncentrirana v osi žarka. Pri odboju od nagnjene površine se polmer odboja žarka poveča, zmanjša pa se moč odboja v osi razširjanja (slika 6). Na sliki 6 abscisa v relativnih enotah prikazuje polmer žarka, ordinata pa relativno moč odbitega žarka.



Slika 6: Vpliv naklona odbojne površine na obliko odtisa laserskega žarka v vertikalnem prerezu.

Pri analizi kakovosti določitve koordinat karakteristične točke (središče krogle) je pomembno, da poznamo pravo obliko odtisa laserskega žarka na različnih delih površine. Če se laserski žarek odbije od ravne površine, ki je pravokotna na žarek, ima odtis na površini obliko kroga. V vseh drugih primerih ima odtis na ravni površini obliko elipse. Matematična povezava med polmerom odtisa laserskega žarka r_L pri znani divergenci δ in razdalji skeniranja D je opisana z enačbo (1).

$$r_L = D * \tan\left(\frac{\delta}{2}\right) \tag{1}$$

3.2 Določitev parametrov krogle v trirazsežnem prostoru

Krogla je definirana kot množica točk v trirazsežnem prostoru, ki so od središča krogle (x_0, y_0, z_0) oddaljene za vrednost polmera krogle R . Zanima nas, kako kakovostno lahko iz podatkov laserskega skeniranja določimo parametre, ki določajo kroglo, tj. njen polmer in koordinate središča. Kadar parametre krogle določamo na podlagi oblaka točk, jih ocenimo z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Enačba krogle v 3D-prostoru ima naslednjo obliko:

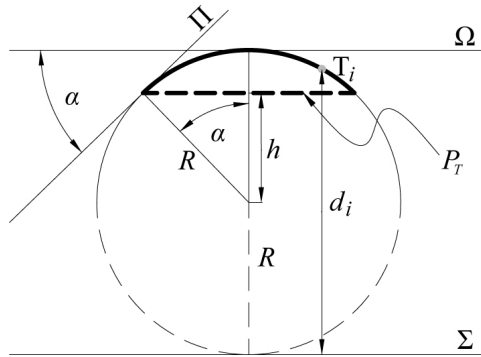
$$F: (x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 + (z_n - z_0)^2 - R^2 = 0, \tag{2}$$

kjer so (x_n, y_n, z_n) koordinate skeniranih točk na krogli. Če imamo na voljo nadštevila opazovanja, problem rešimo z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Ker je funkcijska zveza (2) nelinearna, je sistem enačb (2) nelinearen in ga moramo za uporabo v linearnem matematičnem modelu izravnave linearizirati. Pri ocenjevanju vseh štirih parametrov: koordinate središča krogle (x_0, y_0, z_0) in polmera krogle R potrebujemo za enolično rešitev po tri koordinate (x_n, y_n, z_n) štirih točk, ki pripadajo krogli, zato je $n_0 = 4$. Za rešitev problema izravnave uporabimo splošni model izravnave.

Problem določitve parametrov krogle lahko rešimo tudi tako, da obravnavamo katerega od parametrov krogle kot znanega. V našem primeru smo ga reševali na dva načina, in sicer tako, da smo polmer krogle R obravnavali kot neznano oziroma znano količino.

3.3 Določitev regij na krogli

V prvem preizkusu bomo določili najboljšo regijo na krogli oziroma regijo, ki omogoča izračun parametrov krogle z najvišjo dosegljivo natančnostjo. Regijo definiramo s kotom α med ravnino Ω , ki je vzporedna osnovni ploskvi testnega polja Σ , ter tangencialno ravnino Π na kroglo. Razdalja med ravninama Σ in Ω je enaka premeru krogle. Tangencialna ravnina Π je za vsako točko na krogli različna. Določitev posamezne regije (odebeljeni del krožnice) in njej pripadajoče površine tarče P_T (odebeljena črtkana črta) je v vertikalnem prerezu prikazana na sliki 7.



Slika 7: Določitev regije in njej pripadajoče površine tarče.

Točke, ki pripadajo posamezni regiji, določimo po naslednjem postopku:

- določimo ravnino Σ , ki poteka skozi točke, ki ležijo na osnovni ploskvi,
- za točke T_i , ki ne pripadajo ravnini, izračunamo oddaljenosti d_i od ravnine Σ ,
- poiščemo točke, ki izpolnjujejo pogoj, da so od ravnine Σ oddaljene za več kot $R + h$.

$$|d_i| > R + h = R \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (3)$$

Tak način določitve točk posameznih regij je smiseln, ko je krogla pritrjena na ravno osnovno ploskev testnega polja.

3.4 Določitev najboljše regije na krogli za določitev parametrov krogle

Za izračun parametrov krogle lahko uporabimo vse skenirane točke krogle ali le točke, ki so v posamezni regiji. Parametre krogle, določene na podlagi podatkov različnih regij, lahko primerjamo med seboj. Na podlagi primerjav določimo regijo, pri kateri je določitev parametrov krogle najboljša. Primerjave opravimo na dva načina.

Pri prvem na podlagi vseh točk posameznega območja določimo koordinate središča za primera, ko v postopku izravnave obravnavamo polmer krogle R kot znano oziroma neznan količino. Pri znanem polmeru R_Z z izravnavo določimo le koordinate središča krogle (x_Z, y_Z, z_Z) , v drugem primeru pa poleg koordinat središča krogle (x_N, y_N, z_N) določimo tudi neznan polmer R_N . Kot najboljšo regijo izberemo tisto, za katero so razlike ocenjenih parametrov krogle med obema primeroma najmanjše:

$$\min \left| (x_Z - x_N)^2 + (y_Z - y_N)^2 + (z_Z - z_N)^2 \right| = \min \left| \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 \right|, \quad (4)$$

$$\min |R_Z - R_N| = \min |\Delta R|. \quad (5)$$

Pri drugem načinu poiščemo najmanjši standardni odklon koordinat središča krogle. Izvedemo 100 izračunov parametrov krogle, kjer pri vsakem izračunu uporabimo 50 naključno izbranih točk v regiji (število ponovitev in število izbranih točk smo določili empirično). Standardni odklon posamezne koordinate izračunamo iz odstopanj od aritmetične sredine 100 poskusov. Najboljša regija za določitev parametrov krogle je tista, za katero je standardni odklon koordinat središča krogle najmanjši:

$$\min \left(\sigma_S = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \right). \quad (6)$$

3.5 Določitev najboljšega razmerja med površino odtisa in površino tarče

S poznanim najboljšim razmerjem med površino odtisa laserskega žarka in površino tarče lahko v fazi načrtovanja izmere izračunamo najboljšo (optimalno) oddaljenost skeniranja oziroma najboljšo (optimalno) velikost krogle, ki jo uporabimo kot vezno, oslonilno ali kontrolno točko. Za določitev najboljšega razmerja med površinama odtisa in tarče predlagamo naslednji postopek. Razmerje \mathcal{G} med površino odtisa laserskega žarka P_L in površino tarče P_T izračunamo kot:

$$\mathcal{G} = \frac{P_L}{P_T}. \quad (7)$$

Površina tarče P_T je odvisna od regije oziroma kota α (slika 7):

$$P_T = \pi (R \cdot \sin \alpha)^2. \quad (8)$$

Pri osnosimetričnem Gaussovem laserskem žarku ter tarči kroglaste oblike lahko razmerje \mathcal{G} nadomestimo z razmerjem kvadratov polmerov kroga odtisa r_L in kroga tarče r_T :

$$\mathcal{G} = \frac{r_L^2}{r_T^2}. \quad (9)$$

Razmerje med velikostjo odtisa in velikostjo tarče za vsako kroglo določimo le za najboljšo kombinacijo regije in razdalje skeniranja. Med vsemi rezultati kot najboljše razmerje določimo tisto, za katero je standardni odklon določitve koordinat središča σ_S najmanjši:

$$\min(\sigma_S) \rightarrow \text{najboljše razmerje } \mathcal{G}.$$

Na podlagi razmerja (9) ter z upoštevanjem dejstva, da poznamo divergenco laserskega žarka δ , lahko z uporabo izraza (1) ob znanem polmeru krogle R določimo optimalno razdaljo skeniranja D in obratno.

4 IZVEDBA PREIZKUSA, REZULTATI IN NJIHOVA ANALIZA

Za določitev najboljšega razmerja med površinama odtisa in tarče smo izvedli skeniranje testnega polja treh krogel s 16 različnih oddaljenosti (poglavje 2). V prispevku zaradi preglednosti prikazujemo rezultate le za razdalje 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m in 50 m. Predstavitev in analiza rezultatov na teh razdaljah zadoščajo za ustrezno razlago in interpretacijo rezultatov.

4.1 Velikost odtisa laserskega žarka skenerja Riegl VZ-400

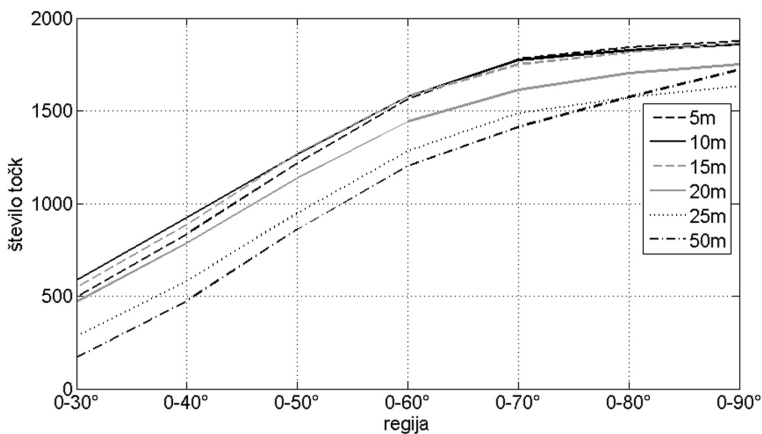
Laserski žarek uporabljenega skenerja ima, po navedbah proizvajalca, obliko osnosimetričnega Gaussovega žarka. Premer žarka na izvoru meri 7 mm. Laserski žarek ima valovno dolžino $\lambda = 1550$ nm (bližnja infrardeča svetloba) ter divergenco 0,3 mrad. Na ravni površini, ki je pravokotna na smer žarka, ima na razdalji 50 m odtis laserskega žarka premer 18 mm (<http://www.geo-matching.com>) oziroma, po podatkih proizvajalca, 30 mm na razdalji 100 m (<http://riegl.com>). Polmer odtisa žarka za poljubno razdaljo lahko izračunamo z linearno interpolacijo med navedenima premeroma ali z upoštevanjem divergence z enačbo (1). Polmeri odtisov r_L za različne razdalje, določeni z linearno interpolacijo, so podani v preglednici 1.

Preglednica 1: Polmer odtisa laserskega žarka skenerja Riegl VZ-400 na različnih razdaljah.

D [m]	r_L [mm]
0	3,50
5	4,05
10	4,60
15	5,15
20	5,70
25	6,25
50	9,00

4.2 Izbor najboljše regije

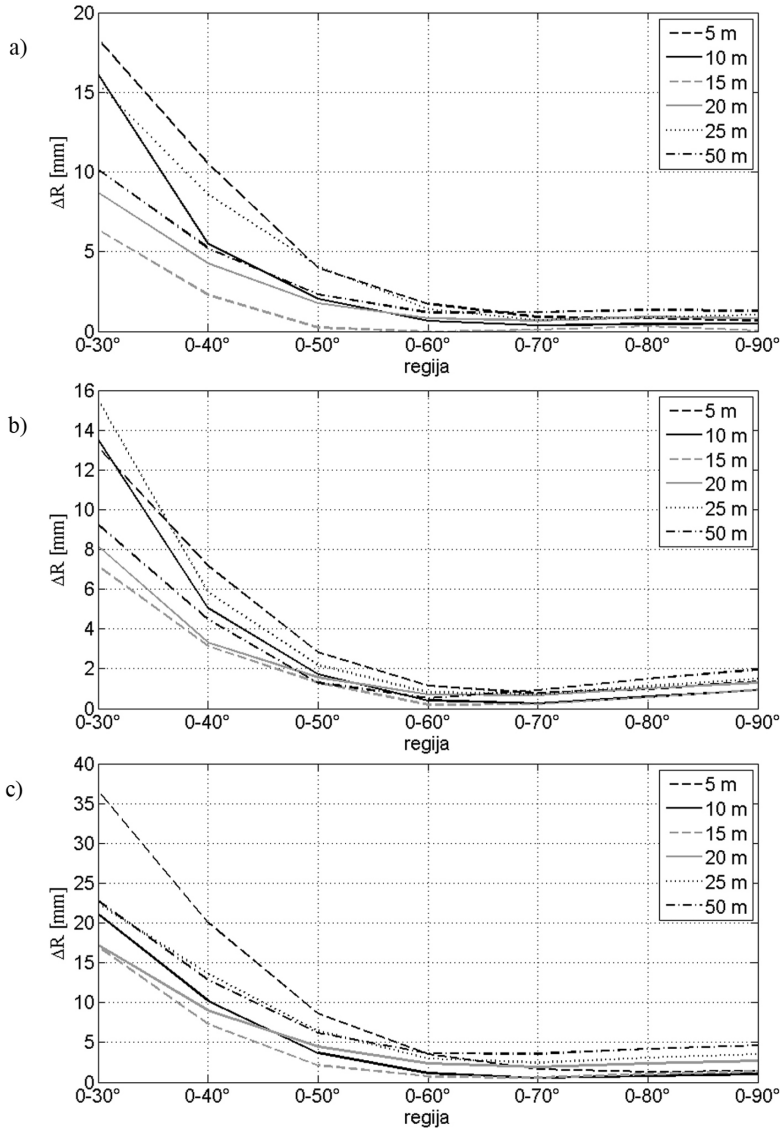
Najboljšo regijo smo določali med sedmimi testnimi regijami (poglavje 2). Gostota skeniranih točk na tarči je bila v vseh razdaljah enaka. S povečevanjem razdalje skeniranja se povečuje odtis laserskega žarka in zmanjšuje število točk na posamezni krogli. Na krogli s polmerom $R = 3,5$ cm je tako 1088 točk pri razdalji skeniranja 5 m in 948 točk pri razdalji 50 m, na krogli s polmerom $R = 5$ cm je od 1866 (pri 5 m) do 1632 točk (pri 50 m) in na krogli polmera $R = 7,5$ cm od 4278 (pri 5 m) do 4012 točk (pri 50 m). Spreminja pa se tudi število točk v posamezni regiji. Na sliki 8 je prikazano spreminjanje števila točk za posamezno regijo glede na razdaljo skeniranja za kroglo s polmerom $R = 5$ cm.



Slika 8: Število točk za posamezno regijo pri različnih razdaljah skeniranja za kroglo $R = 5$ cm.

Med sedmimi testnimi regijami je najboljša tista, pri kateri so parametri krogle določeni najbolj kakovostno. Najboljšo regijo smo določili na načina, opisana v poglavju 3.4.

Pri prvem načinu smo najboljšo regijo opredelili po enačbah (4) in (5). Postopek smo opravili za vse regije. Izračunane razlike koordinat središča krogle so v smeri koordinatnih osi x in y velikosti desetinke milimetra. Pričakovano pa so razlike koordinat večje v smeri koordinatne osi z . Spremembe ΔR so zato posledica skoraj izključno sprememb Δz . Razlike Δz se od razlik ΔR povprečno razlikujejo le za 8,3 %. Na sliki 9a so prikazane razlike ΔR za kroglo polmera $R = 3,5$ cm, na sliki 9b razlike ΔR za kroglo polmera $R = 5$ cm in na sliki 9c razlike ΔR za kroglo polmera $R = 7,5$ cm.



Slika 9: Razlike ΔR : a) krogla polmera $R = 3,5$ cm, b) krogla polmera $R = 5$ cm in c) krogla polmera $R = 7,5$ cm.

Na podlagi razlik ΔR sklepamo, da so za kroglo polmera $R = 3,5$ cm dobre regije med $0-60^\circ$ in $0-80^\circ$. Za večino razdalj skeniranja (vseh, razen za 50 m) so za te regije razlike polmerov najmanjše (slika 9a). Pri krogli polmera $R = 5$ cm sta najboljši regiji $0-60^\circ$ in $0-70^\circ$ (slika 9b). Pri izračunu razlik ΔR se najboljše regije z večanjem polmera krogle pomikajo proti regiji $0-90^\circ$. Za primer krogle polmera $R = 7,5$ cm lahko na sliki 9c vidimo, da je najboljša regija $0-70^\circ$. Najboljši razdalji skeniranja sta 10 in 15 m. Razlike polmerov se za to kroglo povečujejo z večanjem razdalje skeniranja.

Najboljšo regijo na krogli smo nato določili še na podlagi vrednosti standardnih odklonov koordinat središč krogel σ_s (enačba (6)), določenih za več ponovitev določitve parametrov krogle. Za vsako kombinacijo razdalje instrument–krogla in vse regije smo opravili 100 neodvisnih izračunov parametrov krogle z uporabo 50 naključnih točk. Izračunane vrednosti standardnih odklonov koordinat središč krogle σ_s za vse kombinacije razdalj skeniranja D in regije prikazujemo v preglednici 2 ter v grafični obliki na sliki 10. Najboljšo regijo za posamezno kroglo na sliki 10 označuje križ.

Preglednica 2: Standardni odkloni koordinat središč skeniranih krogel σ_s , določenih za 100 ponovitev in 50 naključno izbranih točk v vsaki ponovitvi.

D [m]	α [°]	σ_s [mm]		
		$R = 3,5$ cm	$R = 5$ cm	$R = 7,5$ cm
5 m	0–30°	1,13	0,96	2,07
	0–40°	1,04	0,86	1,86
	0–50°	0,77	0,65	1,51
	0–60°	0,71	0,61	1,20
	0–70°	0,58	0,51	1,09
	0–80°	0,59	0,55	0,93
10 m	0–90°	0,59	0,55	0,88
	0–30°	0,96	0,80	1,66
	0–40°	0,80	0,76	1,27
	0–50°	0,62	0,63	0,93
	0–60°	0,63	0,55	0,78
	0–70°	0,57	0,49	0,69
15 m	0–80°	0,58	0,51	0,74
	0–90°	0,58	0,50	0,74
	0–30°	0,94	0,84	1,45
	0–40°	0,86	0,78	1,06
	0–50°	0,69	0,63	0,91
	0–60°	0,62	0,53	0,81
20 m	0–70°	0,56	0,54	0,67
	0–80°	0,57	0,50	0,66
	0–90°	0,57	0,55	0,71
	0–30°	1,02	0,87	1,32

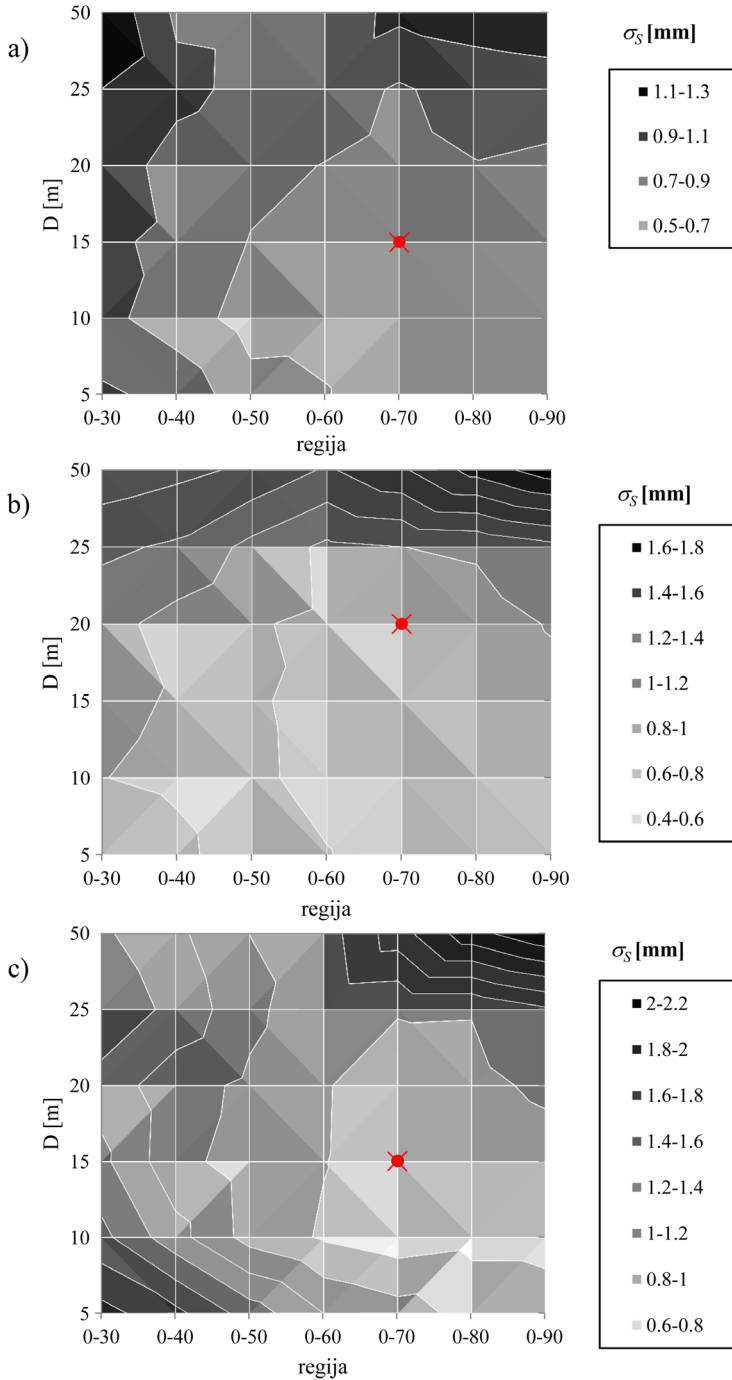
D [m]	α [°]	σ_s [mm]		
		$R = 3,5$ cm	$R = 5$ cm	$R = 7,5$ cm
25 m	0–40°	0,82	0,72	1,08
	0–50°	0,75	0,61	0,96
	0–60°	0,69	0,57	0,81
	0–70°	0,63	0,49	0,72
	0–80°	0,69	0,53	0,75
	0–90°	0,65	0,61	0,84
	0–30°	1,10	1,04	1,56
	0–40°	0,96	0,97	1,34
	0–50°	0,84	0,74	1,06
50 m	0–60°	0,80	0,56	0,84
	0–70°	0,68	0,60	0,81
	0–80°	0,79	0,62	0,82
	0–90°	0,82	0,73	0,96
	0–30°	4,46	1,33	1,43
	0–40°	0,86	1,25	1,24
	0–50°	0,84	1,17	1,00
	0–60°	0,79	0,97	0,90
	0–70°	0,95	1,17	1,31
0–80°	0,99	1,48	1,73	
0–90°	1,02	1,72	1,97	

Pri iskanju najboljše regije za izračun parametrov krogle na podlagi standardnih odklonov koordinat središč krogel, izračunanih iz stotih ponovitev, smo dobili naslednje rezultate:

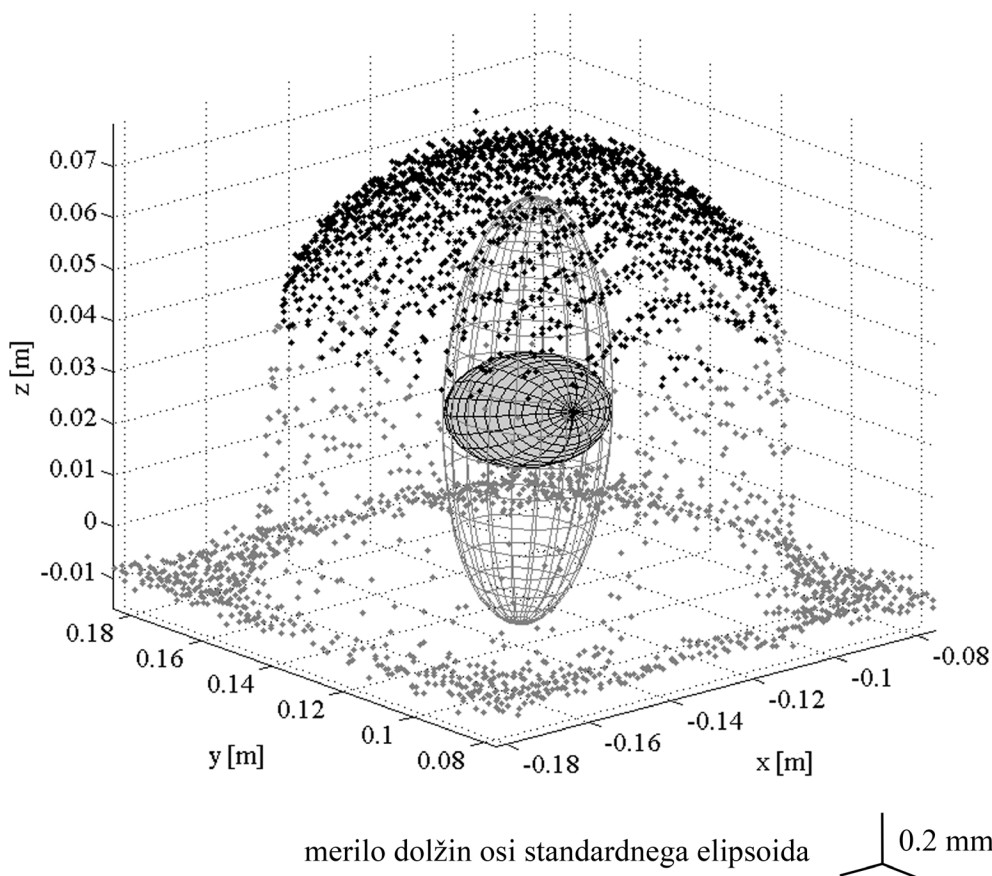
- kroglja polmera $R = 3,5$ cm, $D = 15$ m, regija 0–70°, $\sigma_s = 0,56$ mm (slika 10a),
- kroglja polmera $R = 5$ cm, $D = 20$ m, regija 0–70°, $\sigma_s = 0,49$ mm (slika 10b),
- kroglja polmera $R = 7,5$ cm, $D = 15$ m, regija 0–70°, $\sigma_s = 0,66$ mm (slika 10c).

Pričakovali bi, da se bo z večanjem polmera krogle tudi optimalna razdalja skeniranja povečevala. Glede na to, da smo uporabili krogle iz stiropora, je verjetno glavni vzrok za dobljene rezultate material.

Na sliki 10 lahko vidimo, kako se spreminjajo vrednosti standardnega odklona σ_s glede na regijo in razdaljo skeniranja. Rezultate za najboljšo kombinacijo izmed vseh opisanih primerov skeniranja krogel (kroglja polmera $R = 5$ cm, regija 0–70° in razdalja skeniranja 20 m) grafično prikazujemo na sliki 11. Črne točke so točke regije 0–70°, sive točke predstavljajo druge točke v oblaku točk, standardni elipsoid pogreškov koordinat središč krogle pri izravnavi z neznanim polmerom je izrisan v sivi barvi, standardni elipsoid pogreškov koordinat središč krogle pri izravnavi z znanim polmerom pa v črni barvi.



Slika 10: Standardni odkloni koordinat središča krogle σ_S v odvisnosti razdalje skeniranja in regije: a) kroglja $R=3,5$ cm, b) kroglja $R=5$ cm in c) kroglja $R=7,5$ cm.



Slika 11: Standardna elipsoida koordinat središča krogle, določena za 100 ponovitev izračuna, za 50 naključno izbranih točk za kroglo polmera $R = 5$ cm, za regijo $0-70^\circ$ in razdaljo skeniranja 20 m.

V postopku izravnave parametrov krogle lahko polmer krogle nastopa kot znana ali neznan količina. Standardna elipsoida koordinat središča krogle za oba primera izravnave in najboljšo kombinacijo razdalje skeniranja ter regije za kroglo s polmerom $R = 5$ cm prikazujemo na sliki 11. Ugotovimo lahko, da se z uporabo krogle znanega polmera precej izboljša kakovost določitve komponente položaja središča krogle v smeri skeniranja, medtem ko je kakovost določitve koordinat v smereh pravokotno na smer skeniranja v obeh primerih podobna.

4.3 Izračun najboljšega razmerja med površino odtisa in površino tarče

V poglavju 4.2 smo ugotovili, da na kakovost določitve parametrov vplivajo velikost krogle, razdalja skeniranja in regija na krogli. Pri posamezni krogli smo kot najboljšo rešitev dobili različne kombinacije razdalje skeniranja in regije. Za znano velikost krogle in najboljšo razdaljo skeniranja posamezne krogle izračunamo razmerje med površino odtisa in površino tarče. Dobljeno razmerje je podlaga za izračun najboljših razdalje skeniranja pri znani velikosti krogle oziroma tudi obratno. Ta podatek nam je v pomoč pri načrtovanju izmere s TLS.

Razmerje med velikostjo odtisa žarka in velikostjo tarče pri skeniranju s TLS določimo na podlagi enačb (7), (8) in (9) ter rezultatov najboljše regije (sliki 9 in 10 ter preglednica 2). Določimo ga le za najboljše kombinacije oddaljenosti skeniranja in regije za posamezno kroglo (preglednica 3).

Preglednica 3: Razmerje velikosti odtisa in velikosti krogle.

Krogla	D [m]	regija	r_l [mm]	r_t [mm]	ϑ [%]
$R = 3,5$ cm	15	0–70°	5,15	16,44	9,81
$R = 5$ cm	20	0–70°	5,70	23,49	5,89
$R = 7,5$ cm	15	0–70°	5,15	35,24	2,13

Med vsemi krogli ima za najboljšo regijo 0–70° najmanjši standardni odklon položaja središča krogle iz stotih ponovitev krogle s polmerom $R = 5$ cm (poglavje 4.2), kjer znaša $\sigma_s = 0,49$ mm. Iz rezultatov naše raziskave ugotavljamo, da je za najboljšo kombinacijo velikosti krogle, regije in razdalje skeniranja najboljše razmerje med velikostjo odtisa laserskega žarka in velikostjo tarče (krogle) 5,89 %. V tem primeru pridobimo najbolj kakovostne odboje od površine krogle, ki omogočajo optimalno določitev parametrov krogle.

5 SKLEP

V raziskavi smo z dvema preizkusoma določili najboljšo regijo za določitev koordinat središča krogle ter najboljše razmerje med velikostjo odtisa laserskega žarka in velikostjo krogle. Analize smo opravili na podatkih skeniranja testnega polja, sestavljenega iz treh različno velikih krogel iz stiropora, ki smo jih skenirali na različnih oddaljenostih. Število skeniranih točk na krogli se zmanjšuje z večanjem oddaljenosti tarče od skenerja. Ker smo skeniranje opravili v enakem objektu na vseh razdaljah skeniranja, je vzrok za manjšanje števila točk večji odtis laserskega žarka. Ta se na robovih krogle ne odbije več samo od površine krogle, ampak tudi od osnovne ploskve testnega polja (ravnine).

Najboljšo regijo smo v prvem primeru določili na podlagi izračuna razlik parametrov krogle za primera, ko je v izravnavi radij znana in neznana količina ter v drugem primeru z izračunom standardnih elipsoidov položaja središča krogle za 100 ponovitev izračuna parametrov iz 50 naključno izbranih točk. Primerjalna analiza rezultatov obeh metod določitve najboljših regij na krogli je pokazala, da z obema pridobimo podobne rezultate. Ugotovili smo namreč, da je v največ primerih najboljša za izračun parametrov krogle regija 0–70° oziroma krogelna kapica s središčnim kotom 140° ter da je najbolj primerna krogla s polmerom $R = 5$ cm. Razlike ΔR in standardni odkloni položaja središča krogle σ_s so za boljše regije, pri tej velikosti krogle, najmanjši. Pri vseh treh kroglih se za najboljšo kombinacijo regije in razdalje skeniranja razmerja površine odtisa in površine tarče nekoliko razlikujejo in so v vseh treh primerih manjša od 10 %. Ob dejstvu, da smo najmanjšo vrednost σ_s dobili pri krogli $R = 5$ cm, ugotovimo, da je najboljše razmerje med površino odtisa in površino tarče nekoliko manj kot 6 %. Na podlagi tega razmerja lahko z upoštevanjem enačbe (1) določimo optimalno velikost krogle oziroma optimalno razdaljo skeniranja.

Kontrolne točke se za ocenjevanje kakovosti georeferenciranja uporabljajo tudi pri skeniranjih ALS. Podobno kot pri TLS na podlagi najboljšega razmerja med površino odtisa ter površino tarče ob znani višini leta in divergenci laserskega žarka določimo optimalen polmer krogle za vezne oziroma kontrolne točke. Na podlagi poznanega najboljšega razmerja med površino odtisa in tarče ter z znano višino leta pa

lahko optimalno velikost krogle pri zračnem laserskem skeniranju določimo tudi z različnimi metodami simulacij (npr. Barkallah idr., 2012).

V postopkih skeniranja in obdelave oblakov točk so kot vezna in kontrolna točka pogosto uporabljana telesa okrogle oblike. Vendar pa morajo biti krogle ustrezno velike glede na oddaljenost teh točk od skenerja. Rezultati naše raziskave se nanašajo na stiroporne krogle. S predlagano metodologijo in izvedenimi postopki raziskave je podobno mogoče ugotavljati kakovost določitve parametrov krogel, izdelanih iz drugih materialov, a obstaja možnost, da bi bili rezultati drugačni. Glede na pogosto uporabo kroglastih teles kot umetnih tarč v praksi bi bilo smiselno narediti podobno raziskavo s krogli iz kovine ali umetne mase, uporabiti krogle drugačnih polmerov oziroma drugačna razmerja polmerov krogel in razdalj skeniranja ter skeniranje izvesti tudi na daljših razdaljah.

ZAHVALA

Prispevek je del raziskav v okviru doktorskega študija prvega avtorja, ki ga sofinancira Evropski socialni sklad. Avtorji se za opravljeno terestrično lasersko skeniranje zahvaljujemo podjetju DFG Consulting. Prispevek je nastal s finančno podporo ARRS v okviru raziskovalnega programa P2-0227 Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije.

Literatura in viri:

- Ačko, B., McCarthy, M., Haertig, F., Buchmeister, B. (2012). Standards for testing freeform measurement capability of optical and tactile coordinate measuring machines. *Measurement science and technology*, 23(9), 1–13.
- Barkallah, M., Louati, J., Haddar, M. (2012). Evaluation of Manufacturing Tolerance Using a Statistical Method and Experimentation. *International Journal of Simulation Modelling*, 11(1), 5–16.
- Borah, D. K., Voelz, D. G. (2007). Estimation of Laser beam pointing parameters in the presence of atmospheric turbulence. *Applied Optics*, 46(23), 6010–6018.
- Centeno, J. A. S., Dias Wutke, J., Aparecido Mitishita, E., Vöglte, T. (2010). Two Methods to Estimate the Spot Size of Terrestrial Laser Scanners. *Journal of Surveying Engineering*, 136, 126–131.
- Franaszek, M., Cheok, G. S., Saidi, K. S., Witzgall, C. (2009). Fitting Spheres to Range Data From 3-D Imaging Systems. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 58(10), 3544–3553.
- Jutzi, B., Eberle, B., Stilla, U. (2003). Estimation and measurement of backscattered signals from pulsed laser radar. *Proc. SPIE 4885, Image and Signal Processing for Remote Sensing VIII*, March 13, 2003, 256–346.
- Kukko, A., Kaasalainen, S., Litkey, P. (2008). Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data. *Applied Optics*, 47(7), 986–992.
- Lichti, D. D. (2007). Error modelling, calibration and analysis of an AM CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(5), 307–324.
- Lichti, D. D., Harvey, B. R. (2002). The effects of reflecting surface properties on time-of-flight laser scanner measurements. *ISPRS, Vol. XXXIV, Part 4-IV, Geospatial Theory, Processing and Applications*, Ottawa, July 9–12, 2002, Ottawa, Canada, 9 str.
- Lichti, D. D., Jamtsho, S. (2006). Angular resolution of terrestrial laser scanners. *The Photogrammetric Record* 21(114), 141–160.
- Paschotta, R. (2008). *Field Guide to Lasers*. SPIE field guides, SPIE press, Bellingham.
- Pesci, A., Teza, G. (2008). Terrestrial laser scanner and retroreflective targets: An experiment for anomalous effects investigation. *International Journal of Remote Sensing*, 29(19), 5749–5765.
- Pesci, A., Teza, G., Bonali, E. (2011). Terrestrial Laser Scanner Resolution: Numerical Simulations and Experiments on Spatial Sampling Optimization. *Remote Sensing*, 3, 167–184 (Doi:10.3390/rs3010167).
- Pfeifer, N., Doringner, P., Haring, A., Fan, H. (2007). Investigating Terrestrial Laser Scanning Intensity Data: Quality and Functional Relations, 328–337.
- Siegman, A. E. (1986). *Lasers*. Mill Valley, California: University Science Books, XXII, 1283 str.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(4), 389–399.
- Soudarissanane, S., Van Ree, J., Bucksch, A., Lindenbergh, R. (2007). Error Budget of Terrestrial Laser Scanning: Influence of the Incidence Angle on the Scan Quality, 73–81.
- Voegtle, T., Schwab, I., Landes, T. (2008). Influences of different materials on the measurements of a terrestrial laser scanner (TLS). V: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B5, Peking*, 1061–1066.
- Voegtle, T., in Wakaluk, S. (2009). Effects on the measurements of the terrestrial laser scanner HDS 6000 (Leica) caused by different object materials. *IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3/W8-Paris*, September 1–2, 2009, 68–74.

- Zhou, S., Guan, Y., Zhan X., in Lu, T. (2008). Robust algorithm for fitting sphere to 3D point clouds in terrestrial laser scanning. ISPRS Congress: Commission V, WG 3, Peking, 519–522.
- Zhuang, H., Roth, Z. S. (1995). Modeling gimbal axis misalignments and mirror center offset in a single-beam laser tracking measurement system. The International Journal of Robotics Research, 14(3), 211–224.
- Witzgall, C., Cheok, G. S., in Kearsley, A. J. (2006). Recovering Spheres from 3D Point Data. In Proceedings of the 35th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop (AIPR,06). IEEE Computer Society, Washington.
- Geo-matching (<http://www.geo-matching.com/category/46/compare/1675>, dostop 17. 7. 2013).
- Riegl (<http://riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/5/>, dostop 15. 7. 2013).

Urbančič T., Koler B., Stopar B., Kosmatin Fras M. (2014). Analiza kakovosti določitve parametrov krogle pri terestričnem laserskem skeniranju. Geodetski vestnik, 58 (1): 11-27.

asist. Tilen Urbančič, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: tilen.urbancic@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Božo Koler, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: bozo.koler@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: bojan.stopar@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: mojca.kosmatin-fras@fgg.uni-lj.si