

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski program geodezija,
Smer Geodezija v inženirstvu

Kandidat:

Primož Opravš

Postopek in natančnost tehnologije 3R terestričnega laserskega skeniranja

Diplomska naloga št.: 271

Mentor:

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

Somentor:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Ljubljana, 4. 7. 2008

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **PRIMOŽ OPRAVŠ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom
**»POSTOPEK IN NATANČNOST TEHNOLOGIJE 3R TERESTRIČNEGA
LASERSKEGA SKENIRANJA«.**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, 20.6.2008

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.5:528.7:681.32(043.2)
Avtor:	Primož Opravš
Mentor:	izr. prof. dr. Dušan Kogoj
Naslov:	Postopek in natančnost tehnologije 3R terestričnega laserskega skeniranja
Obseg in oprema:	102 str., 11 pregl., 74 sl., 25 en., 9 pr.
Ključne besede:	3R terestrično lasersko skeniranje, laserski skener, natančnost skeniranja, natančnost registracije, natančnost modeliranja

Izveček

V diplomskem delu je prikazana tehnologija 3R terestričnega laserskega skeniranja od priprave delovišča in zajemanja podatkov, registracije podatkov posameznih stojišč v enoten homogen oblak točk, georeferenciranja in naknadne obdelave oblaka točk, do končne pridobitve 3R modela objekta. Prikazane so tudi različne vrste laserskih skenerjev glede na tip delovanja. Za potrebe ovrednotenja kakovosti tehnologije terestričnega laserskega skeniranja so opisani tudi pogoški, ki se pojavijo v delovnih fazah postopka skeniranja in vplivajo na natančnost in točnost oblaka točk ter na pridobljeni 3R model stvarnosti. Na primeru skeniranja podzemne kraške jame (Železne jame) je prikazano praktično delo s terestričnim skenerjem Riegl LMS-Z420i in pripadajočim programom RiSCAN PRO, ki omogoča krmiljenje inštrumenta med delom, registracijo in georeferenciranje skenogramov, ter naknadno obdelavo oblaka točk in 3R modeliranje. Model železne jame je zgrajen do stopnje, ki omogoča izračun volumna.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 528.5:528.7:681.32(043.2)
Author: Primož Opravš
Supervisor: Assoc. prof. dr. Dušan Kogoj
Title: The Procedure and Accuracy of The Terrestrial 3D Laser Scanning Technology
Notes: 102 p., 11 tab., 74 fig., 25 eq., 9 a.
Keywords: terrestrial 3D laser scanning technology , laser scanner, accuracy of scanning, accuracy of registration, accuracy of modelling

Abstract

The graduation thesis present the Terrestrial 3D Laser Scanning technology. First, the procedure of setting and starting a job is described. Next, the procedures of data acquisition, registration of scans in one homogenous pointcloud, georeferencing, subsequent handling of pointcloud and finally 3D modeling objects are described. There are also mentioned different types of laser scanners, which distinguish in principles of the operation. In need to evaluate the technology of the terrestrial laser scanning the errors, which arise in all steps of the scanning work and which affect precision and accuracy of acquired data and consequantly the 3D model of the scanned reality, are decribed. In case of scanning the underground Karstical cave (Železna jama) the practical work with the scanner Riegl LMS-Z420i with RiSCAN PRO software, which enables a guidance of the instrument during the acquisition phase, registration and georeferencing of scans and subsequently handling with pointcloud and 3R modelling, is presented. The model of the cave Železna jama is made out to the stage which enables a computation of the volume.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Dušanu Kogojcu in somentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras. Zahvaljujem se tudi osebjem na Oddelku za geodezijo, ki mi je pomagalo pri dokončanju študija.

KAZALO VSEBINE

	UVOD	1
1	POSTOPEK LASERSKEGA SKENIRANJA	3
1.1	Definicija	3
1.2	Delovne faze v postopku skeniranja	3
1.2.1	Zajem prostorskih podatkov s skenerjem - postopek skeniranja	3
1.2.2	Nadaljnje postopanje z oblakom točk	5
1.2.3	Registracija pridobljenih podatkov	6
1.2.3.1	Metode registracije	6
1.2.3.1.1	Registracija z veznimi točkami	7
1.2.3.1.2	Registracija na osnovi prekrivajočih se delov skenogramov	9
1.2.3.1.3	Ročna približna registracija	11
1.2.3.1.4	Registracija preko modeliranih objektov	12
1.2.3.1.5	Direktno georeferenciranje	12
1.2.3.1.6	Hibridna večstojiščna izravnava (Hibrid Multistation Adjustment)	14
1.2.4	Oblak točk	15
1.2.5	Modeliranje objektov iz oblaka točk	15
1.2.5.1	Modeliranje geometričnih primitivov	15
1.2.5.2	Triangulacija	17
1.2.5.3	Modeliranje robov ploskev	19
1.2.5.4	Ploskve prostih oblik	23

1.2.6	Interpretacija in uporaba podatkov	28
2	RAZVRSTITEV LASERSKIH SKENERJEV PO PRINCIPU DELOVANJA	33
2.1	Skenerji z neposrednim merjenjem razdalj (angl. Range Scanners)	34
2.1.1	Impulzni (angl. „Time-of-Flight“) skener	34
2.1.2	Fazni skener	36
2.3	Triangulacijski skener	39
3	NATANČNOST SKENIRANJA	43
3.1	Natančnost terestričnih 3R skenerjev	43
3.1.1	Splošno o natančnosti	44
3.1.1.1	Kotna natančnost	46
3.1.1.2	Natančnost merjenja dolžin	51
3.1.1.2.1	Vpliv atmosfere na merjenje dolžin	51
3.1.1.2.2	Natančnost merjenja dolžin z impulznim skenerjem	53
3.1.1.2.3	Natančnost merjenja dolžin s faznim skenerjem	53
3.1.1.2.4	Skupna natančnost merjenja dolžin	54
3.1.1.2.5	Praktični preizkus skenerjev, ki so ga opravili na Inštitutu i3mainz	55
3.1.1.3	Ločljivost	59
3.1.1.4.	Učinek robov	62
3.1.1.5	Vpliv odbojnosti površja objektov	64

3.1.1.6	Vpliv interferenčnega sevanja	69
3.2	Natančnost registracije stojišč	69
3.3	Natančnost 3R modela	70
4.	PRAKTIČNI DEL - SKENIRANJE IN MODELIRANJE ŽELEZNE JAME	71
4.1	Sistem Riegl LMS-Z420i	72
4.1.1	Tehnične značilnosti skenerja	72
4.1.2	Natančnost skenerja pod Rieglovimi testnimi pogoji	75
4.1.3	Program RiSCAN PRO	75
4.1.3.1	Koordinatni sistemi v programu RiSCAN PRO	75
4.1.3.2	Zajem podatkov	78
4.1.3.3	Zajem podobe	81
4.1.3.4	Obarvanje skenograma	82
4.2	Registracija skenogramov	82
4.2.1	Ocena natančnosti registracije	90
4.3	Oslonilne točke	91
4.3.1	Pridobitev koordinat oslonilnih točk z geodetskimi opazovanji	91
4.4	Izdelava 3R modela Železne jame in izračun volumna modela	92
4.4.1	Ocena natančnosti izračuna volumna	94
5	ZAKLJUČEK	97
	VIRI	99

KAZALO PREGLEDNIC

Avtorske preglednice

- Preglednica 1: Klasifikacija laserskih skenerjev.
- Preglednica 8: Odbojnosti nekaterih materialov in barv pri valovni dolžini $\lambda = 1 \mu\text{m}$ (bližnja infra rdeča).
- Preglednica 10: Izbrane celice iz seznama veznih točk v projektnem koordinatnem sistemu.
- Preglednica 11: Seznam oslonilnih točk v globalnem koordinatnem sistemu (D48/GK koordinatni sistem).

Preglednice z virom

- Preglednica 2: Skenerji testirani na Inštitutu i3mainz (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 11 str.)
- Preglednica 3: Razlike med znanimi in skeniranimi razdaljami med dvema kroglama, pravokotno na smer merjenja (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 12 str.)
- Preglednica 4: Razlike med znanimi in iz podatkov skeniranja pridobljenimi prostorskimi dolžinskimi razlikami med dvema kroglastima tarčama (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 13 str.)
- Preglednica 5: Rezultati testa ločljivosti pri 6 m oddaljenosti (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 14 str.)
- Preglednica 6: Rezultati testa ločljivosti pri 22 m oddaljenosti (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 15 str.)
- Preglednica 7: Ovrednotenje kakovosti določitve robov (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 16 str.)
- Preglednica 9: Popravek razdalje v mm zaradi različnih materialov površin (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 17 str.)

KAZALO SLIK

Avtorske slike

- Slika 42. Graf odvisnosti natančnosti skenirane točke od oddaljenosti predmeta skeniranja od baze triangulacijskega skenerja
- Slika 49. Pogrešek dolžine a zaradi pogreška konstantnega dela k_a v primeru 60° kota med točkama skeniranja
- Slika 50. Pogrešek dolžine zaradi konstantnega dela k_a v primeru, ko sta točki skeniranja nasproti si ležeči
- Slika 63. Izgled pogovornega okna za zajem podatkov z enim samim skenogramom
- Slika 68. Seznam veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu
- Slika 69. Izpis rezultatov registracije posameznega stojišča
- Slika 70. Seznam veznih točk v projektnem koordinatnem sistemu
- Slika 71. Seznam oslonilnih točk v globalnem koordinatnem sistemu
- Slika 72. Matrika SOP_1
- Slika 73. Matrika POP
- Slika 74. Rezultati ukaza Zmanjševanje šuma v programu Geomagic Studio 9

Slike z virom

- Slika 1. Delovne faze 3R terestričnega laserskega skeniranja (Pfeifer, N. 2007: 4 str.)
- Slika 2. Razporeditev veznih točk med stojišči skenerja, podobno, kot pri metodah fotogrametrije (Pfeifer, N. 2007: 41 str.)
- Slika 3. Tarče za vzpostavitev veznih točk (www.leica-geosystems.com)
- Slika 4. Razporeditev oslonilnih točk v verigi (poligonu) stojišč skenerja (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 152 str.)
- Slika 5. Razporeditev oslonilnih točk v zanki stojišč skenerja (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 153 str.)
- Slika 6. Princip registracije preko prekrivajočih se delov skenogramov (Akca, D., 2007: 32 str.)

- Slika 7. Primer ročne registracije pred uspešnim sklopom veznih objektov (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 159 str.)
- Slika 8. Vezna objekta sta sklopljena (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 160 str.)
- Slika 9. Tarča, namenjena za direktno georeferenciranje skenerja, opremljena s satelitskim sprejemnikom (Balzani, M. et al. 2006: 29 str.)
- Slika 10. Laserski skener Riegl LMS-Z420i, opremljen z GPS sprejemnikom. (Rieger., P., Studnicka, N., Ullrich, A., 2007: 28 str.)
- Slika 11. Modeliranje tovarniških inštalacij po metodi geometričnih primitivov (Pfeifer, N., 2007: 66 str.)
- Slika 12. Modeliranje valja iz podatkov oblaka točk (Pfeifer, N., 2007: 83 str.)
- Slika 13. Program za modeliranje iz oblaka točk izdelava nepravilno triangulacijsko mrežo (Pfeifer, N., 2007: 57 str.)
- Slika 14. Problem sosednjih točk pri izgradnji nepravilne triangulacijske mreže. (Pfeifer, N., 2007: 60 str.)
- Slika 15. Načini izgradnje nepravilne triangulacijske mreže iz razpršenih točk (Pfeifer, N., 2007: 61 str.)
- Slika 16. Temeljni koncept modeliranja strukturnih linij ob pomoči določanja presekov dveh ravnin, kjer so ravnine pridobljene iz oblaka točk (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 2 str.)
- Slika 17. Strukturne linije po digitalizaciji oblaka točk. Skenogram Berglove sobe v Schönbrunnski palači na Dunaju (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 3 str.)
- Slika 18. Strukturne linije po izvedeni redukciji linij. Skenogram Berglove sobe (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 3 str.)
- Slika 19. Berglova soba: model robov ploskev (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 4 str.)
- Slika 20. Berglova soba: model robov ploskev in notranjost ploskev modelirana s triangulacijo (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 4 str.)
- Slika 21. Primer odprte ploskve. Prikazane so tudi linije vzporedne abscisi u in ordinati v koordinatnega sistema ploskve. (Computer representation of surfaces - Wikipedia, Prosta enciklopedija)
- Slika 22. Primer kontrolnih točk (polov) in kontrolnega poligona (Nonuniform rational B-spline - Wikipedia, Prosta enciklopedija)
- Slika 23. Najprej pridobimo homogen registrirani oblak točk (Pfeifer, N., 2007: 69 str.)

- Slika 24. Točke povežemo v nepravilno triangulacijsko mrežo (Pfeifer, N., 2007: 69 str.)
- Slika 25. Zgladimo nepravilno triangulacijsko mrežo - zmanjšamo šum (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)
- Slika 26. V modelu se pojavijo nepravilni robovi (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)
- Slika 27. Zgladimo meje ploskev in zapolnimo luknje (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)
- Slika 28. Model v obliki nepravilne triangulacijske mreže pretvorimo v ploskve prostih oblik (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)
- Slika 29. Detajl krpastega modela ploskev prostih oblik (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)
- Slika 30. Uporaba skenerja v stavbarstvu. (Pfeifer, N., 2007: 73 str.)
- Slika 31. Prerezi skozi oblak točk debela (Pfeifer, N., 2007: 80 str.)
- Slika 32. Pas točk, iz katerega izdelamo prečni prerez (Pfeifer, N., 2007: 85 str.)
- Slika 33. Primer modeliranja geometričnih primitivov (Pfeifer, N., 2007: 78 str.)
- Slika 34. Praktični primer pridobivanja antropometričnih podatkov (Pfeifer, N., 2007: 75 str.)
- Slika 35. Polarni 3R koordinatni sistem (Pfeifer, N., 2007: 8 str.)
- Slika 36. Konstrukcija impulznega laserskega skenerja (<http://www.riegl.com>)
- Slika 37. Srednji odboj laserskega žarka v primeru prvega in zadnjega odboja (Pfeifer, N., 2007: 21 str.)
- Slika 38. Vrste modulacij (Kogoj, D., 2002: 25 str.)
- Slika 39. Ilustracija principa določanja dolžine s faznim razdaljemerom. (Kogoj, D. 2002: 30 str.)
- Slika 40. Skenirne linije (Pfeifer, N., 2007: 20 str.)
- Slika 41. Ponazoritev konstrukcije triangulacijskega skenerja (Pfeifer, N., 2007: 19 str.)
- Slika 43. Model triangulacijskega skenerja z dvema CCD kamerama (Pfeifer, N., 2007: 20 str.)
- Slika 44. Krogla za preizkušanje (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 7 str.)
- Slika 45. Okvir za postavljanje testnih krogel na določenih lokacijah na stopnicah (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 6 str.)
- Slika 46. Preizkusna inštalacija za ugotavljanje natančnosti dolžinskih razlik (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 7 str.)
- Slika 47. Jeklne plošče, s katerimi se namesti krogle na navpično steno (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 7 str.)
- Slika 48. Lokacija krogel na steni in stojišča skenerja (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 7 str.)

- Slika 51. Standardna deviacija merjenja dolžin pri določeni oddaljenosti od skenerja. (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 11 str.)
- Slika 52. Tarča z režami za preizkušanje ločljivosti (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 8 str.)
- Slika 53. Plošča, uporabljena za preučevanje učinka robov (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 9 str.)
- Slika 54. Značilen primer za kakovost določitve robov za inštrumente, ki jih prikazuje preglednica št. 7. (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 16 str.)
- Slika 55. Razlika med difuznimi in zrcalnimi površji (Wagner, W., 2005: 23 str.)
- Slika 56. Deska z belim okvirjem in različnima slojema (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 10 str.)
- Slika 57. Karta prikazuje položaj Železne jame (Atlas Slovenije, 1992: 108 str.)
- Slika 58. Skica Železne jame (Bradán, T., Per, J., Peterka, P., Vodišek, D., 2007: 3 str.)
- Slika 59. Riegl LMS-Z420i pri praktičnem delu (Bradán, T., Per, J., Peterka, P., Vodišek, D., 2007: 6 str.)
- Slika 60. Matrika senzorjeve orientacije in pozicije (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 35 str.)
- Slika 61. Transformacije med koordinatnimi sistemi (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 36 str.)
- Slika 62. Koordinatni sistemi v programu RiSCAN PRO (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 36 str.)
- Slika 64. Laserski žarki na odbojni površini pri skeniranju brez vključenega sistema leč, ki razširi žarek (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 83 str.)
- Slika 65. Laserski žarki na odbojni površini pri panoramskem skeniranju brez vključenega sistema leč, ki razširi žarek (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 84 str.)
- Slika 66. Laserski žarki na odbojni površini pri panoramskem skeniranju z vključenim sistemom leč, ki razširi žarek. (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 84 str.)
- Slika 67. Postavljene vezne točke (Bradán, T., Per, J., Peterka, P., Vodišek, D., 2007: 5 str.)

KAZALO PRILOG

Priloga A: Načrt poligonske mreže in oslonilnih točk

Priloga B: Tehnične specifikacije laserskih skenerjev

Priloga C: 3R model Železne jame - odprtine niso zapolnjene - tloris

Priloga D: 3R model Železne jame - odprtine so zapolnjene - tloris

Priloga E: 3R model Železne jame - odprtine so zapolnjene - naris (sprednji)

Priloga F: 3R model Železne jame - odprtine so zapolnjene - pogled od spodaj

Priloga G: 3R model Železne jame - odprtine so zapolnjene - naris (pogled s strani)

Priloga H: 3R model Železne jame - odprtine so zapolnjene - izometrični pogled

Priloga I: Pridobitev koordinat oslonilnih točk v državnem koordinatnem sistemu D48/GK

UVOD

Trirazsežno (3R) terestrično lasersko skeniranje je tehnologija, ki se je tehnološko razvila in komercialno uveljavila v zadnjih petnajstih letih.

V okviru rednih predavanj in vaj Visokošolskega študija geodezije o tej tehnologiji študentje nismo izvedeli veliko, le pri predmetu Meritve povečane natančnosti je sošolec predstavil seminarsko nalogo, v samo natančnost pa se ni poglobljajal. Ob tej seminarski nalogi sem postal radoveden in želel izvedeti še kaj več. V času izbire teme diplomske naloge in predpriprav se je ponudila priložnost, spoznati tehnologijo s praktičnega vidika, ko so se študentje 4. letnika Univerzitetnega študija geodezije, pri predmetu Kartografija III, namenili izdelati seminarsko nalogo iz skeniranja kraške Železne jame. Tako sem se udeležil praktičnega dela - skeniranja, ki je potekalo 15.4.2007.

Poleg praktičnega dela je bilo za izdelavo diplomskega dela potrebno preučiti tudi literaturo, ki opisuje postopke in metode terestričnega laserskega skeniranja in 3D modeliranja. Zaradi naglega razvoja tehnologije laserskega skeniranja, mi ni uspelo najti celostne in primerno obsežne monografije s tega področja, zato sem si pri delu pomagal z univerzitetnimi predavanji v elektronski obliki, publikacijami, objavljenimi na spletu, ter informacijami na spletnih straneh različnih izobraževalnih in raziskovalnih organizacij ter podjetij, ki proizvajajo terestrične laserske skenerje in programsko opremo za delo s skenerji.

Vsak merski inštrumentarij in mersko metodo je potrebno tudi ovrednotiti z vidika kakovosti, to je natančnosti, točnosti in popolnosti pridobljenih podatkov. V delu sem tako opisal pogoške in vplive, s katerimi so lahko obremenjeni rezultati laserskega skeniranja. Pri preučevanju pogoškov sem se oprl na vire praktičnih testiranj, ki so jih izvedle raziskovalne in izobraževalne institucije. Pri tem moram omeniti, da so postopki ugotavljanja praktične natančnosti laserskega skeniranja še na stopnji razvoja in še niso standardizirani.

Tehnologija terestričnega laserskega skeniranja me je tako navdušila, da bi se želel ukvarjati z njo v rednem delovnem času oz. v komercialne namene. Žal pa so skenerji ter pripadajoča, za

delo potrebna programska oprema, še vedno zelo dragi. Pri tovrstnem poslu ostaja vprašanje, kako dovolj učinkovito tržiti storitve skeniranja, da lahko upravičimo naložbo v nabavo potrebnih inštrumentov, pripomočkov in opreme. Ali bi bilo dovolj povpraševanja na trgu po tovrstnih storitvah ob ceni okoli 4000 € za projekt, ki obsega enodnevno terensko delo in dvodnevno pisarniško delo v obliki procesiranja, odpravljanja napak ter 2R in 3R modeliranja?

1 POSTOPEK LASERSKEGA SKENIRANJA

1.1 Definicija

Terestrično trirazsežno (3R) lasersko skeniranje je tehnologija, ki za zajem merskih podatkov o objektih v prostoru uporablja laserski žarek. Zajem podatkov se izvaja s površja Zemlje v določenem urejenem vzorcu z veliko hitrostjo, neposredni rezultati teh opazovanj pa so 3R koordinate točk, ki pripadajo površju skeniranih predmetov ter intenziteta odboja signala od ploskev objektov.

1.2 Delovne faze v postopku skeniranja

V grobem lahko delovne faze razdelimo v:

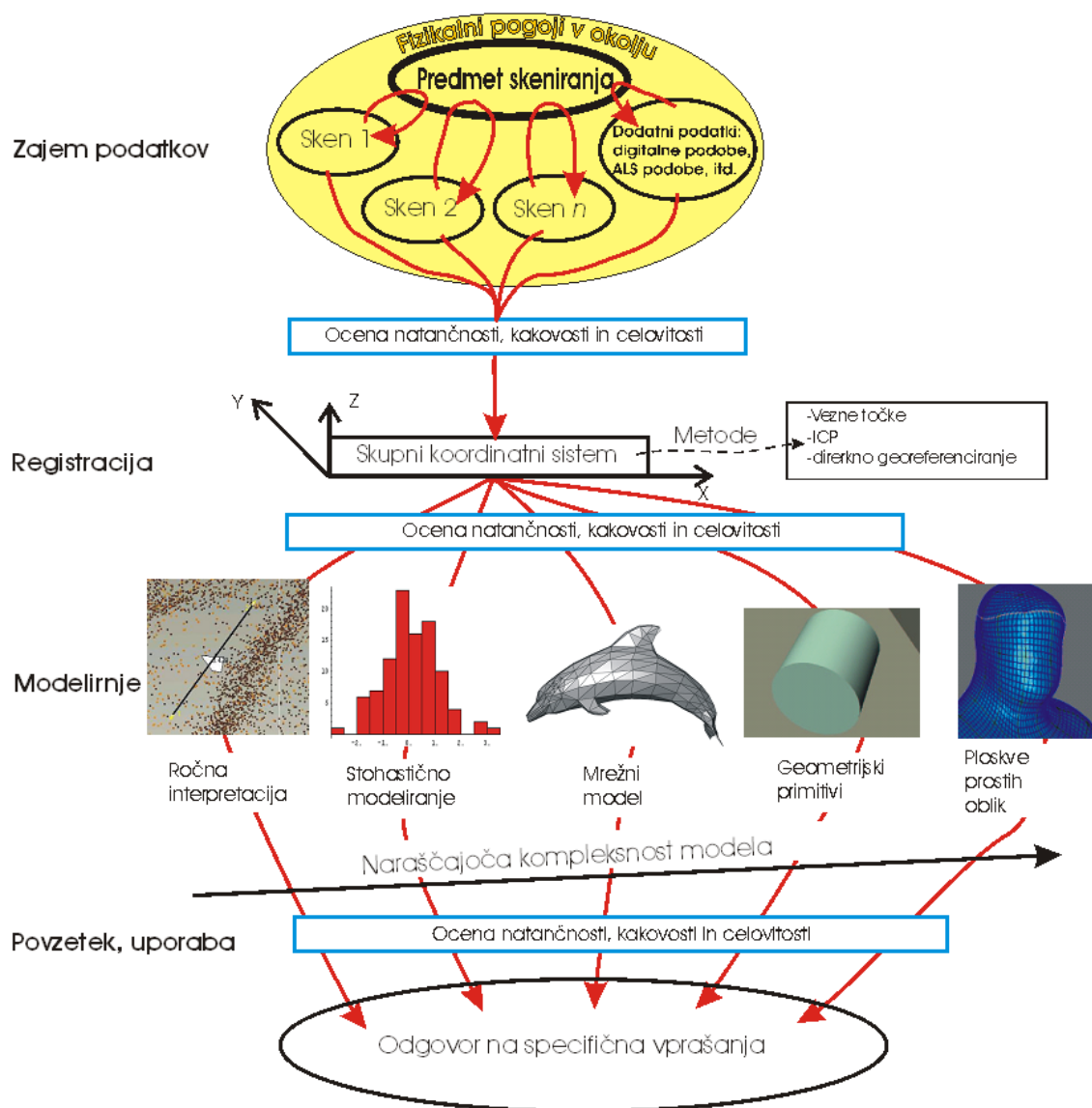
- zajem podatkov,
- registracijo skenogramov v enoten oblak točk,
- modeliranje 3R objektov iz oblaka točk,
- različne načine uporabe, predstavitve in analize modelov.

Delovne faze v postopku skeniranja prikazuje Slika št. 1. Treba je opozoriti, da rešitve različnih proizvajalcev skenerjev med seboj niso povsem enake, zato je prikazan postopek splošen, ki pa lahko v realnosti bolj ali manj odstopa od opisanega.

1.2.1 Zajem prostorskih podatkov s skenerjem - postopek skeniranja

Zajemanje pomeni pridobivanje skenogramov oz. oblakov točk v okviru stojišča v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu. Skener je praviloma povezan z računalnikom, ki zagotavlja upravljanje skenerja in omogoča shranjevanje zajete podatke. Na računalniku je nameščen program, ki ga proizvajalec dobavi skupaj s skenerjem. Program za krmiljenje tudi omogoča pregled napredovanja dela in nadzor popolnosti zajema podatkov. Tovrstni programi lahko omogočajo definiranje poljubnega območja skeniranja (preko okna pogleda, laserskega žarka ali okvirja v kameri). Prav tako lahko spremenimo pogled tako, da sledimo dolžinskim objektom (npr. cevovodom). Omogočena je avtomatska ali polavtomatska prilagoditev

ločljivosti za potrebe finega skeniranja tarč. Možna je avtomatska prilagoditev ločljivosti za pridobitev konstantnih velikosti grida na ploskvah objektov na različnih razdaljah od skenerja ali, odvisno od oblike objekta, nastavimo slabšo ločljivost na gladkih ploskvah, večjo na nagubanih ploskvah ali robovih. Splošno, obstaja delitev skenerjev, glede na izvedbeni princip, na tri skupine, kar je bolj podrobno razloženo v poglavju 2.



Slika 1: Delovne faze 3R terestričnega laserskega skeniranja (Pfeifer, N. 2007: 4 str.).

Pridobljeni podatki so obremenjeni s slučajnimi, sistematičnimi in grobimi pogreški, kot je to obširneje opisano v poglavju 3. Slučajni pogreški so odvisni od natančnosti inštrumenta. Sistematične pogreške lahko povzročata bodisi atmosferski vplivi, bodisi so inštrumentalne

vzroka ali pa jih povzročajo odbojne lastnosti ploskev. Nekatere sistematične pogreške lahko odpravimo (npr. atmosferske s pazljivejšim opazovanjem atmosferskih spremenljivk), nekaterih pa ne (npr. sistematični vpliv odbojnosti ploskev). V grobe pogreške lahko uvrstimo tako imenovane učinke robov ali fantomske točke. Te točke moramo ročno ali polavtomatsko odpraviti iz oblaka točk.

1.2.2 Nadaljnje postopanje z oblakom točk

Programska oprema praviloma omogoča vizualizacijo zajetih podatkov za potrebe grobe ocene pravilnosti zajema. Ker gre za ogromne količine točk, je lahko operacija vizualizacije optimizirana tako, da se število točk v oblaku reducira. V predogledu so lahko točke opremljene z intenziteto odboja.

Naslednji korak je odstranjevanje odvečnih točk iz oblaka točk enega stojišča. Te točke so lahko nastale kot:

- odboj signala od površja v ozadju predmeta opazovanja,
- odboj signala od površja predmetov na razdalji med skenerjem in površjem predmeta opazovanja (npr. mimoidoči ljudje, mimovozeča vozila, vegetacija, atmosferski učinki, kot sta prah in dež),
- učinek robov,
- vpliv različnih odbojnosti površja,
- posledica interference signala.

Odstranjevanje grobo pogrešenih točk lahko poteka interaktivno. Inteligentne rutine, ki temeljijo na prepoznavanju ploskev in so vgrajene v program, pa lahko pospešijo urejanje oblaka točk. Točke pred in za opazovanim objektom lahko enostavno odstranimo z uvedbo veljavnih območij dolžin. Težje je zaznati napačne točke na robovih. Odstopanje na robovih je odvisno od deleža odboja signala od površja. Odstopanje je praviloma sistematično, kar lahko odpravimo z ustrezno rutino v programu.

S filtriranjem podatkov (oblaka točk) odstranimo ali zmanjšamo t. i. šum, ki je posledica slučajnih pogreškov pri merjenju dolžin in kotov ter neposredno odvisen od natančnosti inštrumenta. Pojem šuma lahko povežemo s pojmom natančnosti posamezne točke. Uporabimo lahko algoritem nizkopasovnega ali srednjepasovnega filtriranja. Pri tem je

potrebno paziti na (lomljene) robove objektov, ki jih lahko s filtriranjem preveč zgladimo. Potrebno je presoditi, ali je filtriranje primerno ali ne.

Nenazadnje lahko izvedemo redukcijo števila točk v oblaku, toda biti moramo previdni, saj lahko posredno poslabšamo kakovost modela, še posebej, če gre v primerjavi z gridom skeniranja za relativno majhne detajle.

1.2.3 Registracija pridobljenih podatkov

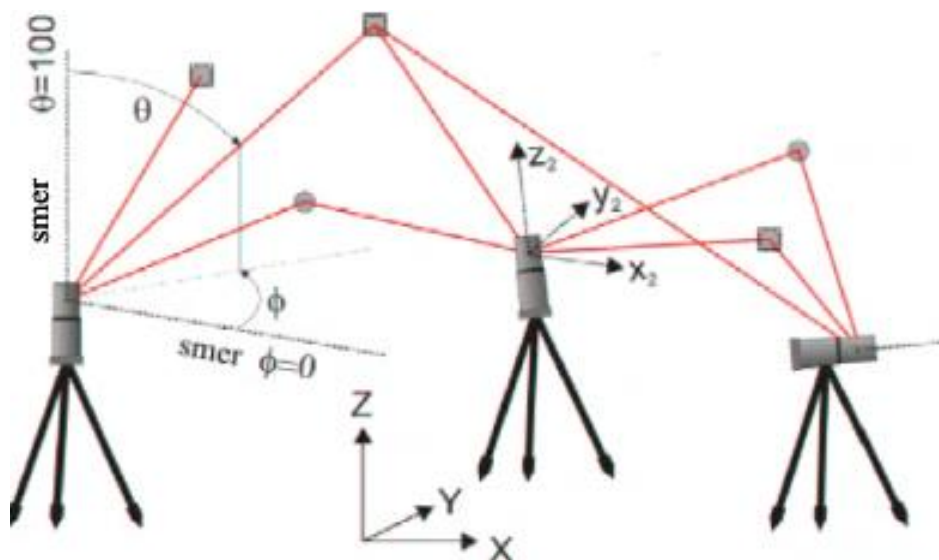
Termin »registracija« pomeni združitev različnih skenogramov ali oblakov točk na območju delovišča v enoten homogen oblak točk. Registracija je pravzaprav transformacija izvornih podatkov, katerih koordinate so pridobljene v lokalnem skenerjevem koordinatnem sistemu, v lokalni projektni koordinatni sistem ali globalni koordinatni sistem, npr. državni D48/GK ali ETRS89/TM. Navadno se uporablja model 6 ali 7-parametrične prostorske transformacije (ortogonalna ali podobnostna transformacija). V praktični izvedbi pa so proizvajalci opreme za skeniranje razvili več načinov ali metod registracije, ki niso vse primerne za iste vrste delovnih nalog. Samo področje tehnologije registracije se še vedno naglo razvija, saj se pojavljajo novi pristopi, algoritmi in matematični modeli določitve transformacijskih parametrov. Več o metodah registracije je napisano v poglavju 1.2.3.1.

1.2.3.1 Metode registracije

Metode registracije lahko v grobem delimo na dve osnovni metodi: registracijo s pomočjo različnih veznih geometrijskih predmetov in direktno georeferenciranje. V prvo skupino lahko uvrstimo metodo registracije s pomočjo veznih točk, veznih objektov, registracijo na osnovi iterativnega postopka iskanja najmanjšega odstopanja med točkami ali ploskvami ter ročno približno registracijo. V drugo skupino spada več različnih metod direktnega georeferenciranja, npr. metoda registracije s pomočjo notranjega ureza, metoda postavitve in orientacije na dane točke v globalnem koordinatnem sistemu ter metoda georeferenciranja s satelitskim sprejemnikom.

1.2.3.1.1 Registracija z veznimi točkami

Ta metoda temelji na podobnem principu kot metode fotogrametrije, kar prikazuje tudi Slika 2. Vezne točke so na območju delovišča signalizirane s posebnimi tarčami različnih oblik (Slika 3). To so lahko krogi (ploskve), valji in krogle. Skupna značilnost vseh tarč je, da so retroreflektivne. Le-to zagotavlja količinsko največji možen odboj laserskega signala nazaj k skenerju. Vse tarče morajo biti kalibrirane in podatki o njihovi dimenziji vneseni v program za registracijo. Koordinate veznih točk v skenerjevem koordinatnem sistemu namreč program določi na osnovi modeliranja tarče iz oblaka točk, pridobljenega iz podatkov finega skeniranja tarče, in poznanih dimenzij tarče. Prostorske koordinate veznih točk se nahajajo v središču tarče, npr. kroga, valja ali krogle. Transformacijske parametre prostorske ortogonalne ali podobnostne transformacije med posameznimi skenerjevimi koordinatnimi sistemi in projektnim koordinatnim sistemom nato program oceni iz koordinat istih veznih točk v teh dveh koordinatnih sistemih. Ker v praksi običajno nastopa več veznih točk kot jih je najmanj potrebno za enolično določitev transformacijskih parametrov, program oceni parametre z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov.

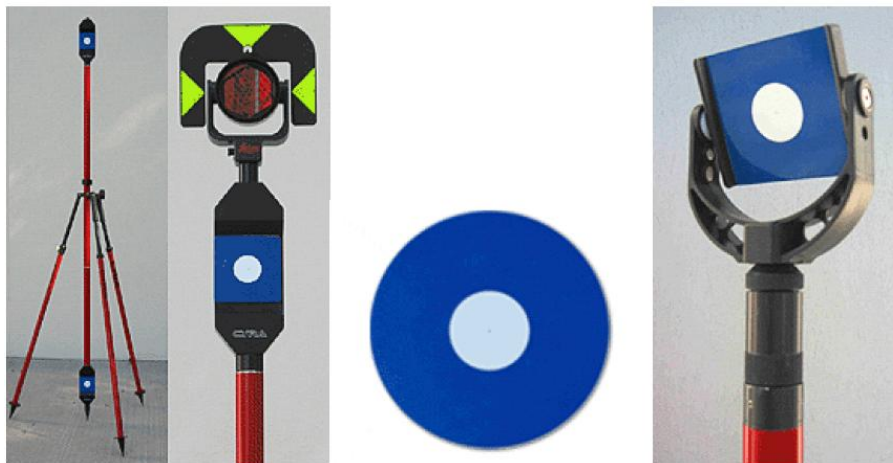


Slika 2: Razporeditev veznih točk med stojišči skenerja, podobno, kot pri metodah fotogrametrije (Pfeifer, N. 2007: 41 str.)

Pri postavljanju tarč na območju delovišča moramo torej paziti na zadostno število veznih točk ter tudi ustrezno razporeditev teh točk tako, da so (po možnosti) postavljene čim bolj blizu zunanjim robovom območja delovišča. Tako dosežemo, da je natančnost oblaka točk

bolj homogena, torej približno enaka, tako v jedru kot tudi na zunanjih robovih. Po končanem postopku registracije program za registracijo praviloma izračuna in prikaže standardne deviacije parametrov transformacije in standardne deviacije določitve veznih točk v projektnem koordinatnem sistemu.

Vezne točke lahko določimo tudi kot oslonilne točke v globalnem koordinatnem sistemu. Predhodno jim določimo koordinate s terestrično polarno metodo (npr. z elektronski tahimetrom), bližnjelikovno fotogrametrijo ali pa z metodo satelitske geodezije. Po končanem postopku georeferenciranja program za registracijo izračuna georeferenciran oblak točk in ocenjene parametre transformacije med projektnim koordinatnim sistemom in globalnim koordinatnim sistemom. Kot rezultat so navadno prikazana tudi odstopanja med oslonilnimi in veznimi točkami ter ocena natančnosti parametrov transformacije.

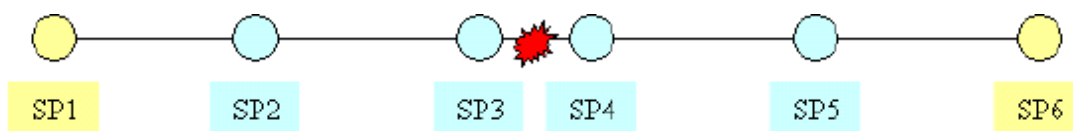


Slika 3: Tarče za vzpostavitev veznih točk (www.leica-geosystems.com)

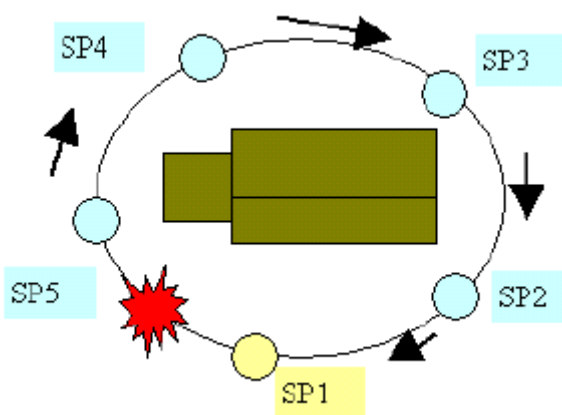
Postopek registracije lahko poteka na tri načine. Prva možnost je, da izberemo eno izmed stojišč skenerja in koordinate veznih točk tega stojišča določimo kot koordinate v projektnem koordinatnem sistemu. Nato, na to izbrano stojišče, pripnemo vsa ostala stojišča. Pomanjkljivost te metode je, da ne obstaja neodvisna kontrola registracije. Drugi dve metodi temeljita na oslonilnih točkah, kar omogoča neodvisno kontrolo registracije. Analogijo teh metod najdemo pri klasičnem geodetskem poligonu, kot prikazujeta sliki 4 in 5. Pri verižni razporeditvi stojišč so oslonilne točke razporejene na prvem in zadnjem skenogramu. V primeru zaključene zanke stojišč pa so oslonilne točke samo na območju prvega (hkrati tudi zadnjega) stojišča.

Slabosti registracije preko veznih točk so v tem, da je potrebno pazljivo in predvsem stabilno postavljati posebne tarče ali reflektorje, kar zahteva dodaten čas, kar pa v primeru metode registracije na osnovi prekrivajočih se delov skenogramov (poglavje 1.2.3.1.2) ali direktnega georeferenciranja skenogramov odpade. Ker se tarče v splošnem nahajajo samo v eni ravnini, je potrebno rezultate, ki opisujejo natančnost te metode, ekstrapolirati.

Pozitivni vidik te metode pa je, da jo lahko uporabimo skoraj v vseh primerih. Metoda je zelo primerna za namene georeferenciranja, ker lahko določimo koordinate oslonilnih točk zelo natančno. Tudi ocena natančnosti transformacijskih parametrov je po metodi registracije preko veznih točk hitrejša in zahteva manj procesorske moči, kot npr. metoda registracije na osnovi prekrivajočih se delov skenogramov, ki je opisana v poglavju 1.2.3.1.2.



Slika 4: Razporeditev oslonilnih točk v verigi (poligonu) stojišč skenerja (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 152 str.)



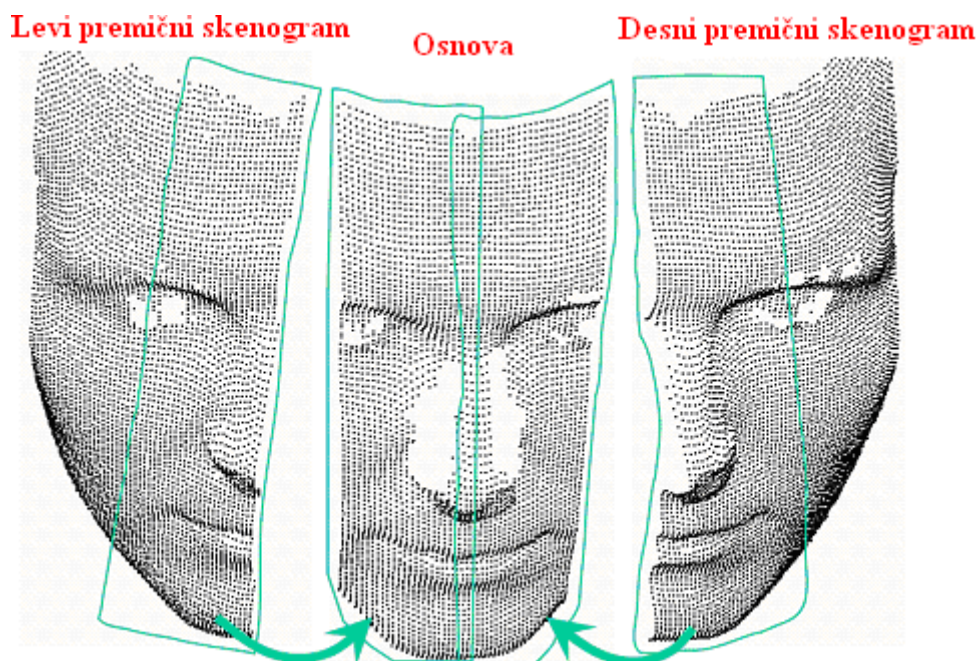
Slika 5: Razporeditev oslonilnih točk v zanki stojišč skenerja (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 153 str.)

1.2.3.1.2 Registracija na osnovi prekrivajočih se delov skenogramov

Pri registraciji na osnovi prekrivajočih se delov skenogramov kot vezni objekti nastopajo deli oblaka točk ali ploskve, modelirane iz oblaka točk (Slika 6). Program za registracijo skuša

poiskati ujemajoče se točke ali ploskve istih objektov v oblakih točk, zajetih iz dveh ali več stojišč. Običajno pri tej metodi najprej podatke enega stojišča skenerja določimo kot podatke v projektnem koordinatnem sistemu. Nato v projektni koordinatni sistem transformiramo ostale skenograme.

Poznamo več vrst metod, razlikujejo se predvsem v matematičnem modelu. Vsem pa je skupno, da poizkušajo registrirati podatke skeniranja z iskanjem čim manjšega odstopanja med veznimi ploskvami. Postopek, ki je enak pri vseh metodah, poteka v treh korakih. Prvi korak je približna registracija, kar pomeni, da določimo enake ploskve v dveh oblakih točk. Najprej jih približno ročno poravnamo, lahko pa ob pomoči algoritmov za prepoznavanje podobnih ploskev. Dobimo približno registriran oblak točk. Fina registracija je naslednji korak in obsega postopek iskanja podobnih elementov površja na paru oblakov točk ter postopek ocene transformacijskih parametrov. Ta korak je popolnoma avtomatski. Zadnji korak je globalna registracija, s katero lahko registriramo podatke vseh skeniranj na območju delovišča. To je pravzaprav fina registracija za večje število oblakov točk. Pri tem gre za enotno homogeno izravnavo in določitev transformacijskih parametrov, temu ustrezno pa so tudi porazdeljeni popravki odstopanj.

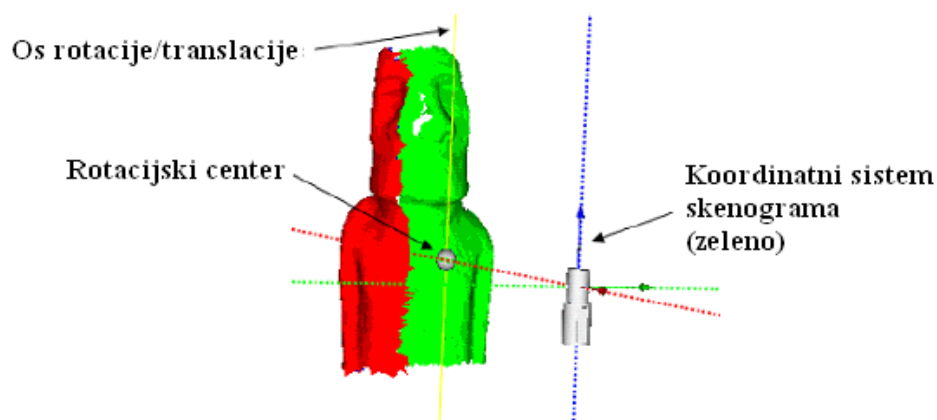


Slika 6: Princip registracije preko prekrivajočih se delov skenogramov (Akca, D., 2007: 32 str.)

Slabe lastnosti metode registracije na osnovi prekrivajočih se delov skenogramov so v tem, da je potrebno zadostno število skeniranih veznih ploskev v dveh ali več skenogramih, ki so predmet registracije. Izbrane ploskve morajo biti enakomerno razporejene na območju delovišča projekta. Te ploskve naj ne bi bile velike, neizrazite (brez robov) ravne površine, ki onemogočajo natančne rezultate. V oblaku točk je potrebno vezne ploskve izbrati ročno, kar je lahko zamudno. Poleg tega registriranje po metodi prekrivajočih se delov skenogramov ni najbolje prirejeno za potrebe georeferenciranja. Tudi čas, ki ga računalnik porabi za oceno transformacijskih parametrov, je daljši in zahteva več procesorskih zmogljivosti.

Pozitivni vidik registracije na osnovi prekrivajočih se delov skenogramov pa je, da za to metodo lahko uporabimo vse dovolj primerne prekrivajoče se dele skenogramov. Tako lahko pridobimo transformacijske parametre iz podatkov, ki se nahajajo na širšem območju delovišča. Natančnost ocene transformacijskih parametrov je tako lahko celo večja kot pri metodi registracije preko veznih točk. Prednost je tudi v tem, da nam ni potrebno postavljati veznih tarč, kar je še posebej na nedostopnih terenih, ali, če poteka skeniranje več dni, velika prednost.

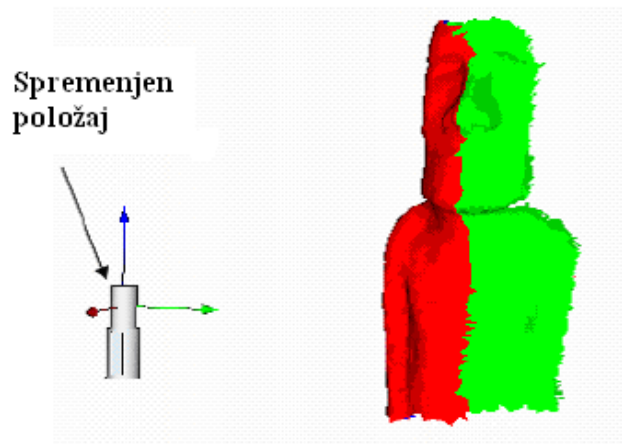
1.2.3.1.3 Ročna približna registracija



Slika 7: Primer ročne registracije pred uspešnim sklopom veznih objektov (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 159 str.)

S to metodo si lahko pomagamo v primeru, da (zaradi različnih vzrokov) nismo postavljali veznih točk. V delovnem oknu programa za registracijo interaktivno premikamo in rotiramo

skenograme različnih stojišč (sliki 7 in 8). Pri tem eno stojišče določimo kot nepremično (in kot izhodišče projektne koordinatnega sistema), preostala stojišča pa verižno dodajamo. Kot vezni objekti nam služijo vizualno izraziti predmeti na območju delovišča projekta. Seveda nam pri tej metodi uporabljeni program ne more izračunati nobenih ocen o natančnosti registracije. Zanašamo se lahko le na vizualno kontrolo.



Slika 8: Vezna objekta sta sklopljena (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 160 str.)

1.2.3.1.4 Registracija preko modeliranih objektov

Pri tej metodi se kot vezne objekte uporablja le dovolj prepoznavne objekte na območju skeniranja, ki jih lahko modeliramo z geometričnimi primitivi, kot so valji, krogle, kocke, piramide, prizme, itd. Pred registracijo torej modeliramo tovrstne objekte najprej v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu.

1.2.3.1.5 Direktno georeferenciranje

Metodo direktnega georeferenciranja lahko razčlenimo na več različnih podmetod, vsem pa je skupno, da gre za neposredno transformacijo koordinat točk iz skenerjevega lastnega koordinatnega sistema v globalni koordinatni sistem. V program za registracijo je potrebno vnesti koordinate obstoječih geodetskih točk, npr. ETRS89 koordinatnem sistemu. Pred postopkom skeniranja je potrebno postaviti in orientirati skener na dane referenčne točke. Postopek orientacije je specifičen glede na model in znamko skenerja. V primeru prostorskega

notranjega ureza se koordinate stojišča skenerja izračunajo podobno kot v primeru klasičnih terestričnih geodetskih metod.

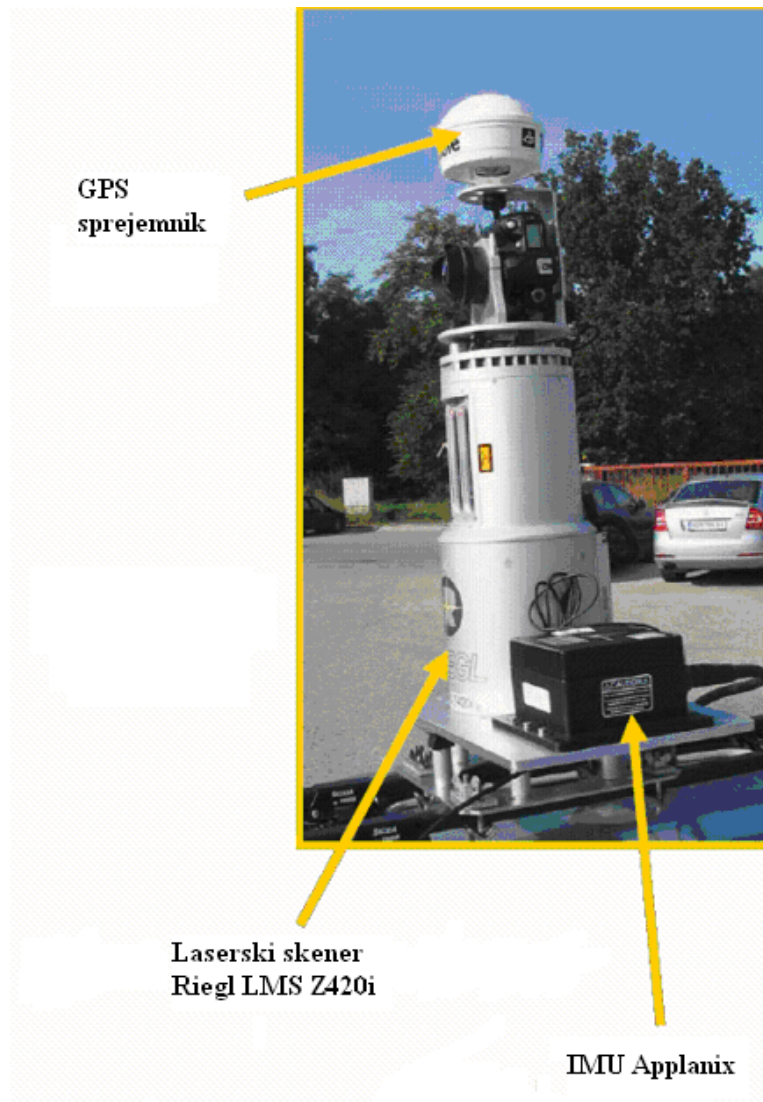


Slika 9: Tarča, namenjena za direktno georeferenciranje skenerja, opremljena s satelitskim sprejemnikom (Balzani, M. et al. 2006: 29 str.)

Položaj skenerja v globalnem koordinatnem sistemu lahko določimo tudi z metodami GNSS geodezije. GPS oz. splošno satelitski sprejemnik namestimo na skener. Zajete skenogramе oz. oblake točk pa orientiramo na druge točke, določene po metodi GNSS geodezije (Slika 9), ali pa na kak drug način, ki je naveden v prejšnjih poglavjih. Uporaba satelitskih sprejemnikov omogoča tudi mobilno metodo terestričnega skeniranja (Rieger., P., Studnicka, N., Ullrich, A., 2007)(Slika 10). Natančnost transformacije koordinat točk iz skenerjevega lastnega koordinatnega sistema v globalni koordinatni sistem je odvisna tudi od natančnosti določitve koordinat položaja skenerja po metodi GNSS geodezije.

Na splošno lahko tovrstne metode direktnega georeferenciranja uporabljamo le na prostem, kar je lahko velika slabost. Druga pomanjkljivost te metode je možna preslaba natančnost registracije skenogramov v enoten oblak točk, kadar imamo na razpolago ali uporabljamo premalo natančne inštrumente in postopke določitve koordinat skenerja in geodetskih točk.

Prednost metode pa je, da koordinate oblaka točk takoj dobimo v globalnem koordinatnem sistemu. Prav tako ne potrebujemo postavljanja dodatnih tarč in niso potrebni vmesni koraki registracije.



Slika 10: Laserski skener Riegl LMS-Z420i, opremljen z GPS sprejemnikom. Nameščen je na strehi avtomobila za namene mobilnega skeniranja, predvsem stavb, ob mestnih in vaških ulicah in cestah (Rieger., P., Studnicka, N., Ullrich, A., 2007: 28 str.)

1.2.3.1.6 Hibridna večstojiščna izravnava (Hibrid Multistation Adjustment)

Tovrstno registracijo omogoča program RiSCAN PRO proizvajalca skenerjev Riegl. Kot točke oz. objekte za določitev transformacijskih parametrov lahko uporabimo tako vezne točke in vezne objekte. S temi nadštevilnimi objekti lahko natančneje določimo parametre transformacije.

1.2.4 Oblak točk

Rezultat registracije je oblak točk v projektnem ali globalnem koordinatnem sistemu. Navadno ga sestavlja več milijonov točk. Točke so brez semantične informacije, v nasprotju s podatki, ki jih pridobimo s terestričnimi geodetskimi meritvami ali fotogrametričnimi metodami. Registriran homogen oblak točk lahko s programom še dodatno očistimo odvečnih, grobo pogrešenih točk. Lahko reduciramo tudi število točk, toda previdno, da ne bi posledično zmanjšali natančnosti modela. V nekaterih programskih paketih je možno redukcijo števila točk izvesti tudi selektivno, in sicer glede na oddaljenost točk od stojišč skenerja, glede na stopnjo odboja in, ob predpostavkah površij objekta, tudi glede na vpadni kot signala.

Vsekakor so točke v oblaku točk obremenjene s sistematičnimi in slučajnimi pogreški, kot je to opisano v naslednjih poglavjih. Natančnost (elipsoid pogreškov) posamezne točke v oblaku točk je težko definirati (glej poglavje 3). Oblak točk lahko dopolnimo z informacijami o intenziteti odboja. Točkam lahko dodamo informacijo, ki jo pridobi fotoaparati, nameščeni na skener. Iz oblaka točk lahko pridobivamo informacije o koordinatah teh točk in merimo razdalje med točkami.

Iz oblaka točk lahko izdelamo profile ali prereze. Označimo ozek pas točk v oblaku točk, nato pa vse 3R točke v tem pasu projiciramo na ravnino. Rezultat so 2R točke. V projekciji lahko modeliramo linije ali ravninske ploskve. Tovrstno operacijo modeliranja navadno izvedemo v CAD aplikaciji, kamor smo predhodno uvozili cel ali del oblaka točk.

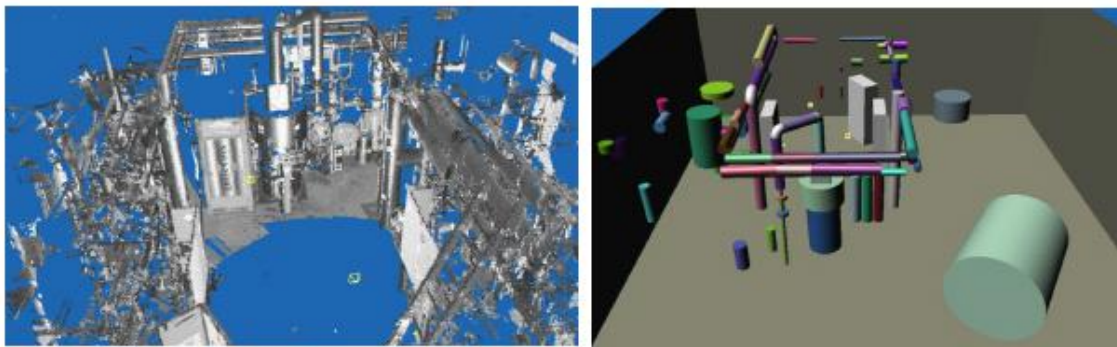
1.2.5 Modeliranje objektov iz oblaka točk

Iz zajetih podatkov želimo pridobiti prostorske ploskve, geometrična telesa ali prostorske modele.

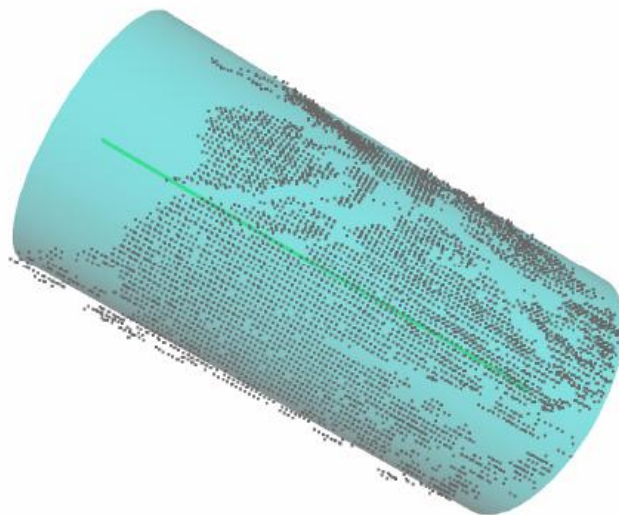
1.2.5.1. Modeliranje geometričnih primitivov

S tovrstno metodo lahko modeliramo predvsem skenirane umetne predmete, sestavljene iz osnovnih geometrijskih teles, kot so ravnine, kocke, kvadri, krogle, valji, stožci, zvitki, ipd (Slika 11). Za tovrstno delo so primerni CAD programi, ki pa morajo omogočati delo z več milijoni točk v eni risbi. Nekatere CAD aplikacije je mogoče nadgraditi z za modeliranje

prirejenimi vtičnimi programi ali moduli. Dimenzijo in položaj telesa glede na izbrani oblak točk orodje za modeliranje določi na osnovi metode najmanjših kvadratov (Slika 12), ko je odstopanje ploskve geometrijskega telesa od referenčnega oblaka točk najmanjše možno. Območje oblaka točk, ki ga želimo modelirati, lahko izberemo ročno ali pa algoritem sam prepozna telesa iz oblaka točk polavtomatsko, ko predlaga najboljšo rešitev. Orodje za modeliranje nam pri delu ponuja hitrejše izbiranje ustreznih modelov na osnovi knjižnic značilnih objektov (npr. knjižnica cevovodov).



Slika 11: Modeliranje tovarniških inštalacij po metodi geometričnih primitivov (Pfeifer, N., 2007: 66 str.)



Slika 12: Modeliranje valja iz podatkov oblaka točk (Pfeifer, N., 2007: 83 str.)

1.2.5.2 Triangulacija

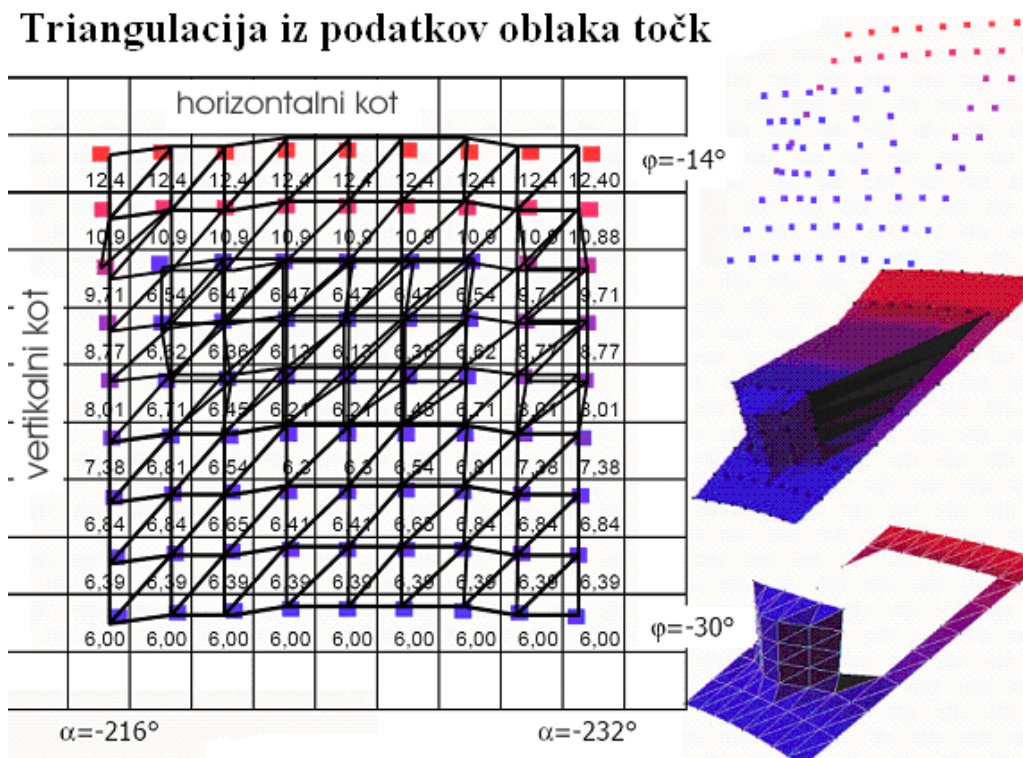
Nepravilna triangulacijska mreža je sestavljena iz diskretnih točk, ki so s trikotniki povezane v mrežo. Metoda modeliranja s triangulacijo je dobrodošla kot izhodišče pri zapletenih objektih, ki jih ni mogoče učinkovito poenostaviti v geometrična telesa. Iz oblaka točk s programom za modeliranje izdelamo triangulacijsko mrežo (Slika 13). Algoritem deluje na principu Delaunayeve triangulacije, ko v trikotnik poveže med seboj tri sosednje točke. Obstajata dva načina modeliranja z nepravilno triangulacijsko mrežo, in sicer tako imenovano 2,5R modeliranje in 3R modeliranje. Pri 2,5R modeliranju so ogliščem trikotnika pripisane samo višine, trikotniki pa dejansko ležijo na ravnini. Slabost 2,5R načina je, da ni mogoče ustvariti zaprtih površij ali geometrijskih teles, kar pa lahko izdelamo s 3R modeliranjem. Zaprta površja ali telesa pa so primerna tudi za nadaljnjo obdelavo, npr. izračun volumnov. Vendar pa je programiranje aplikacij, ki zagotavljajo 3R modeliranje, zahtevno delo, zato so programi s takšnimi zmožnostmi dražji. Triangulacijska mreža je lahko osnova za modeliranje ploskev prostih oblik. Če želimo iz nepravilne triangulacijske mreže pridobiti zaprto »vodotesno« ploskev, moramo zapolniti vse luknje v mreži. Podatke volumna lahko namreč pridobimo samo iz zaprtih ploskev.

Pri grajenju nepravilne triangulacijske mreže se soočamo s težavami razpršenosti ali šuma točk v oblaku točk. Zastavlja se vprašanje, po kakšnem kriteriju naj program poveže med seboj te razpršene točke, npr. sosednje točke lahko povežemo na več načinov (Slika 14). Sosednje točke, čeprav smo skenirali isto površino, lahko opazno odstopajo od te površine. Na ta pojav vpliva tako natančnost in ločljivost skenerja kot tudi odbojne lastnosti materiala (poglavje 3). Rešitve problema pri izgradnji nepravilne triangulacijske mreže iz razpršenih točk so odstranjevanje šuma z nizko- ali srednjepasovnim filtriranjem, tanjšanje oblaka točk in robustne metode (Slika 15).

Nizkopasovno filtriranje je posebna vrsta postopkov v elektroniki ali algoritmov v računalniški tehnologiji, ki prepušča ali ohranja signale frekvenc do določene najvišje mejne frekvence. Amplitude signalov, ki so višje od mejne frekvence, filter oslabi. Naloga nizkopasovnega filtriranja je zagotoviti bolj gladko obliko signala, iz katerega so izključena kratkoročna nihanja frekvence, puščena je le dolgoročna tendenca.

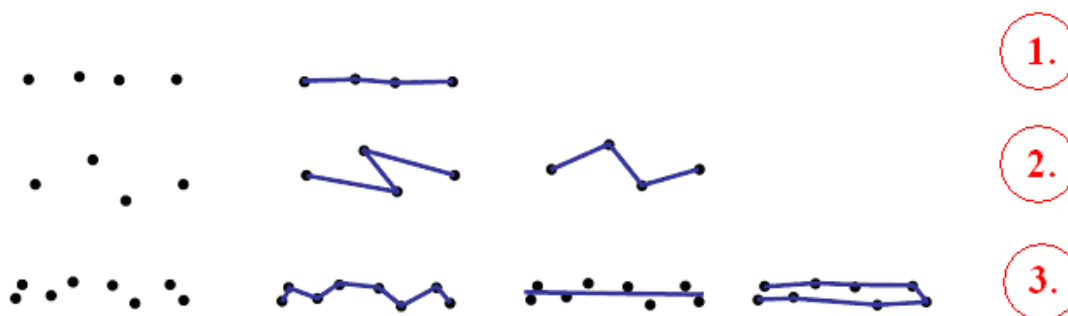
Teoretično naj bi proces triangulacije opravil program za modeliranje samodejno, potem ko uporabnik določi parametre za izvedbo triangulacije. V realnosti marsikateri program zahteva veliko več interaktivnega dela, še posebej, če je program omejen samo na 2,5R način modeliranja. Dogaja se, da se med izgradnjo nepravilne triangulacijske mreže povežejo odvečni ali napačni trikotniki, ali pa nastanejo luknje v modelu tam, kjer je sicer gostota točk zadostna. Z orodji za urejanje je potrebno te napake in pomanjkljivosti odpraviti ročno.

Triangulacija iz podatkov oblaka točk

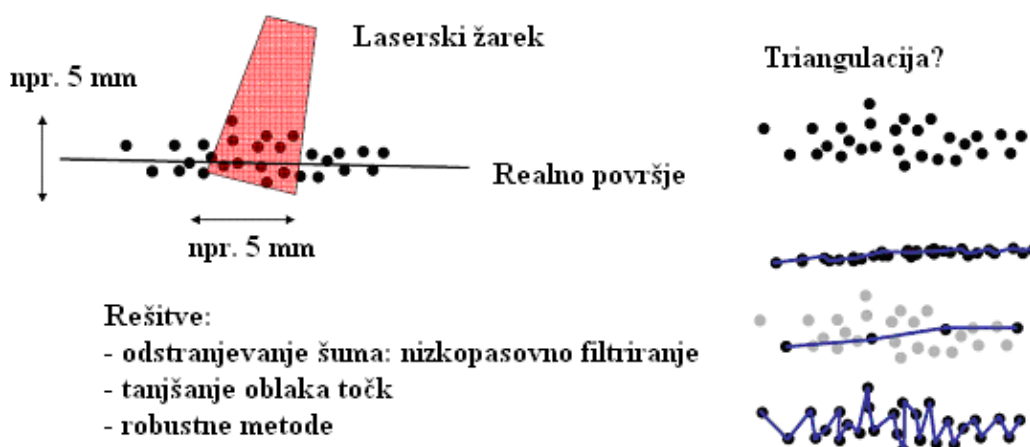


Slika 13: Program za modeliranje iz oblaka točk izdelava nepravilno triangulacijsko mrežo
 (Pfeifer, N., 2007: 57 str.)

Težave pri modeliranju robov objektov so povezane z ločljivostjo skenerja. Če je bila le-ta dovolj visoka, program za modeliranje pravilno zazna robove in temu ustrezno izriše mrežo trikotnikov. Kadar pa, zaradi preslabe ločljivosti, robovi niso dovolj jasno definirani v oblaku točk, mora uporabnik interaktivno definirati potek in dimenzije robov.



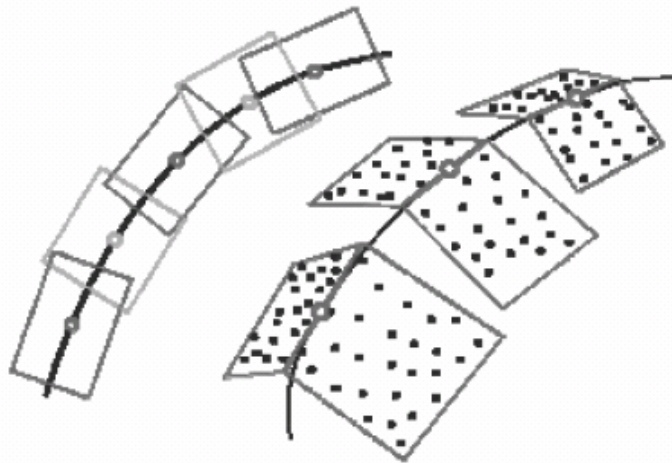
Slika 14: Problem sosednjih točk pri izgradnji nepravilne triangulacijske mreže. Če je razpršenost majhna (1), potem je rešitev praktično enolična. V primeru (2), kjer je razpršenost večja od srednje vrednosti ločljivosti ali velikosti grida, je lahko rezultat nepravilen. Razpršen oblak točk (3) je možno povezati v mrežo trikotnikov na več načinov (Pfeifer, N., 2007: 60 str.)



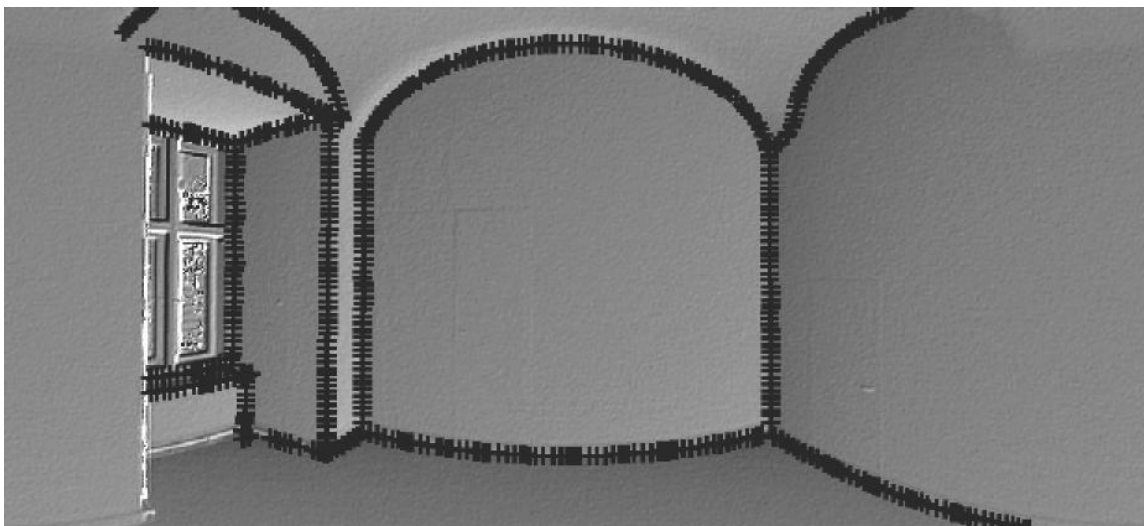
Slika 15: Načini izgradnje nepravilne triangulacijske mreže iz razpršenih točk (Pfeifer, N., 2007: 61 str.)

1.2.5.3 Modeliranje robov ploskev

Skeniranih gradbenih objektov približno pravilnih oblik ne modeliramo iz geometričnih primitivov, temveč določimo t. i. strukturne linije, ki predstavljajo robove značilnih ploskev objektov. Te ploskve so npr. stene, zidovi, tla, stropi in podobne geometrijsko enostavne strukture, ki imajo vse po vrsti lahko določljive (izrazite) robove. Notranjost ploskev nato zapolnimo z nepravilno triangulacijsko mrežo, na katero lahko projiciramo podatke, pridobljene s fotoaparatom. Na tak način dobimo natančnejši in pravilnejši model stvarnosti.



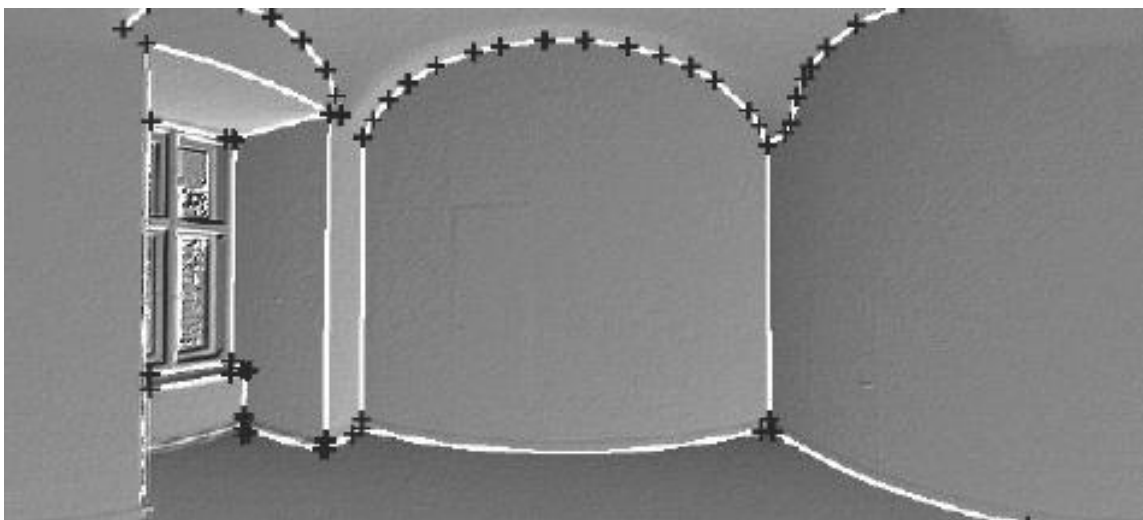
Slika 16: Temeljni koncept modeliranja strukturnih linij ob pomoči določanja presekov dveh ravnin, kjer so ravnine pridobljene iz oblaka točk (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 2 str.)



Slika 17: Strukturne linije po digitalizaciji oblaka točk. Skenogram Berglove sobe v Schönbrunnski palači na Dunaju (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 3 str.)

Določanje strukturnih linij iz oblaka točk temelji na polavtomatskem algoritmu in omogoča pridobiti 3R linijske strukture. Orodje za modeliranje določi linijske strukture iz presekov parov robustno ocenjenih lokalnih ploskovnih elementov (Slika 16). Zato, da bi zmanjšali delež ročnega dela pri določanju začetnih vrednosti linije, so v algoritmu vgradili t. i. koncept rasti linij. Ta omogoča določiti celotno strukturno linijo iz enega začetnega segmenta ali celo iz ene same točke v bližini linije. Določitev elementov ploskev je lahko opravljena v 2,5R ali 3R načinu modeliranja. Zato, da se reducira obseg kompleksnosti 3R podatkov pri izbiranju

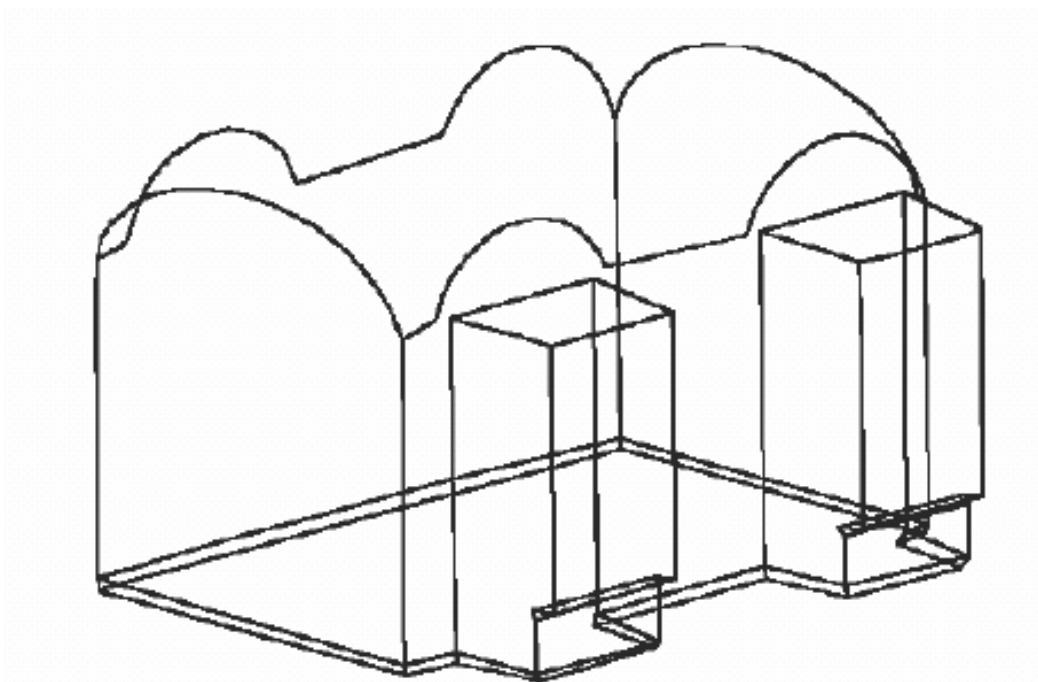
okolice linij, se v ta namen nadomestijo kartezične koordinate s polarnimi koordinatami. Metoda določanja linij poteka polavtomatsko tako, da najprej digitaliziramo približni potek strukturnih linij v ravninskem pogledu iz oblaka točk posameznega stojišča v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu v polarnih koordinatah. Približki so nato osnova za strukturne linije v 2,5R načinu. Strukturne linije se digitalizirajo v vsakem skenogramu oz. oblaku točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu posebej (pred registracijo) v polarnem koordinatnem sistemu. Ker so nekateri objekti skenirani z več stojišč, lahko strukturne linije teh objektov digitaliziramo iz več skenogramov. Registracija oziroma transformacija strukturnih linij v projektnem koordinatnem sistemu sledi šele, ko smo te linije določili iz vseh posameznih skenogramov. Po transformaciji lahko preučujemo, za koliko odstopajo različne verzije strukturnih linij istih objektov. Ocenimo lahko srednjo vrednost odstopanj in poiščemo maksimalno odstopanje. Levji delež odstopanja linij med različnimi verzijami po predvidevanjih odpade na težko definiranost strukturnih linij na samem objektu v naravi, manj pa na postopek registracije. Za nadaljnje modeliranje objektov uporabimo srednjo linijo. Slika 17 prikazuje primer določitve strukturnih linij iz podatkov oblaka točk na nekem stojišču skenerja (iz primera skeniranja Berglove sobe v sklopu Schönbrunnske palače na Dunaju).



Slika 18: Strukturne linije po izvedeni redukciji linij. Skenogram Berglove sobe (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 3 str.)

Modeliranje objektov poteka v kartezičnem projektnem koordinatnem sistemu. Če ima rob več reprezentativnih linij pridobljenih iz vsakega posameznega modeliranja posebej, potem te

linije spojimo. Pogoji za spajanje je neka v naprej izbrana vrednost. Če linije od premice odstopajo za manj kot je vrednost v naprej izbranega pogoja, so spojene v lokalno 3R regresijsko linijo (Slika 18). Strukture, ki niso spojene z ravnimi linijami, so razredčene glede na v naprej izbrani pogoji najkrajše linije. Položaj ogliščne točke, kjer se stikajo tri ploskve, algoritem določi kot srednjo vrednost 3R koordinat koncev strukturnih linij (robov), ki se približno sekajo v bližini oglišča. Algoritem nato preveže strukturne linije z novo ogliščno točko. Kljub temu, da ogromno dela opravi računalnik avtomatsko, je še vedno potrebno ročno delo, npr. kjer so robovi neizraziti. Preden nadaljujemo z modeliranjem notranjosti ploskev, morajo biti vse ploskve zaprte s strukturnimi linijami.

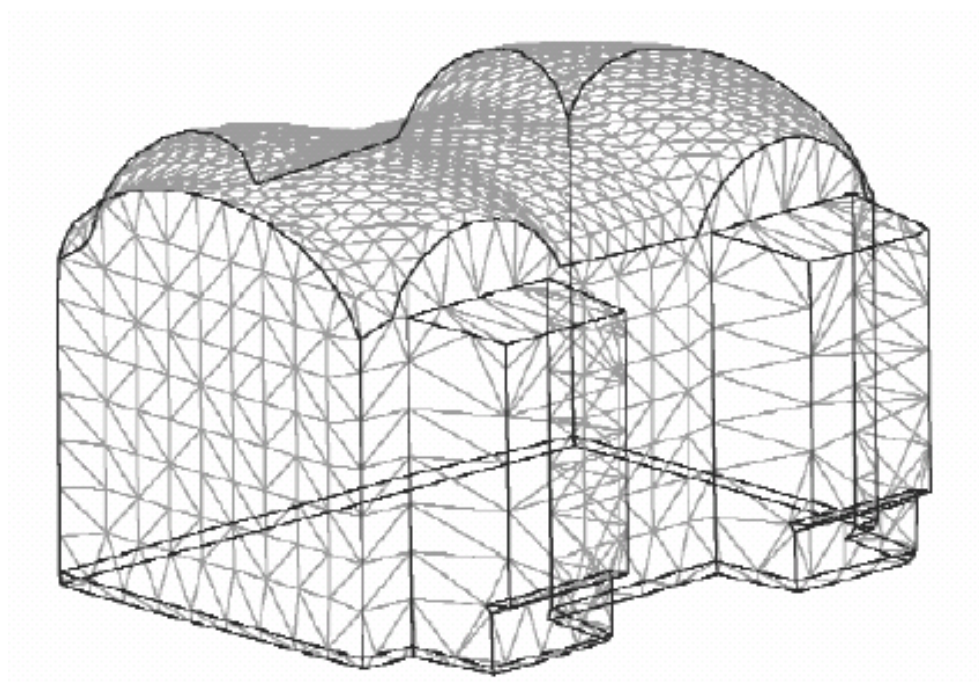


Slika 19: Berglova soba: model robov ploskev (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 4 str.)

Metoda modeliranja strukturnih linij iz oblaka 3R točk v kartezičnem koordinatnem sistemu je še v fazi razvijanja in preizkušanja. Ta metoda naj bi imela dve prednosti: presečni koti med dvema posameznima ploskvama bodo lahko manjši, razen tega pa bodo lahko vsi oblaki točk procesirani v enem koraku v projektnem koordinatnem sistemu, s tem pa bo postopek modeliranja poenostavljen in hitrejši, saj bo vsaka strukturna linija digitalizirana samo enkrat.

Ko smo končali z modeliranjem robov ploskev (Slika 19), kar pomeni, da so vse ploskve zaprte, pričnemo z modeliranjem notranjosti ploskev. Izdelamo nepravilno triangulacijsko

mrežo, ki je omejena z že modeliranimi robovi, kar prikazuje Slika 20. Nepravilna triangulacijska mreža je znotraj ploskev modelirana na podlagi podatkov skeniranja (oblaka točk). Ker so pri skeniranju prisotni šumi, moramo to dejstvo upoštevati pri gradnji nepravilne triangulacijske mreže. Odvisno od programske opreme, lahko modeliramo v 2,5R ali 3R načinu. V primeru 2,5R načina je potrebno vsako ploskev postaviti v svoj lokalni koordinatni sistem, kjer je ravnina ploskve ravnina lokalnega koordinatnega sistema in normala na ploskev smer z osi koordinatnega sistema. Postopek 3R modeliranja ploskev pa je še v testni fazi.



Slika 20: Berglova soba: model robov ploskev in notranjost ploskev modelirana s triangulacijo (Briese, C., Dorninger, P., 2005: 4 str.)

Nazadnje lahko na nepravilno triangulacijsko mrežo projiciramo podatke, ki smo jih zajeli z (digitalnim) fotoaparatom. Tako model dobi teksturo.

1.2.5.4 Ploskve prostih oblik

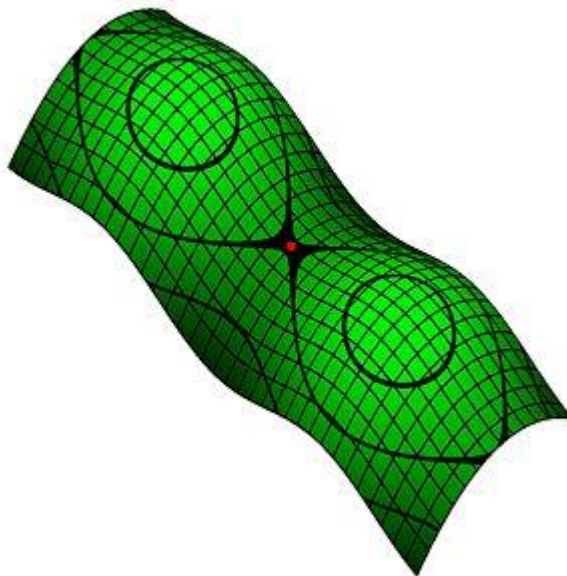
Ploskev je le površje 3R geometričnega telesa, ni pa geometrično telo. Termin ploskev v računalniški 3R grafiki lahko opredelimo s parametrično enačbo:

$$x = x(u, v), \tag{1}$$

kjer sta u in v abscisa in ordinata koordinatnega sistema ploskve (Slika 21). Hkrati Slika 21 prikazuje odprto ploskev. Odprtost pomeni, da zadenemo rob ploskve, če se premikamo tako

v smeri abscise kot ordinate koordinatnega sistema ploskve. Odrpte ploskve lahko povežemo v kompleksnejše ploskve.

Poznamo tudi v eni smeri zaprte ploskve, kot so npr. valji, stožci, poloble in vrtenine. Pri teh ploskvah zadenemo rob ploskve le, če se gibljemo v smeri ene izmed koordinat. Ploskve z družine krogel in zvitkov so zaprte v obeh smereh. Robov ploskev ne moremo zadeti z gibanjem niti v smeri abscise niti ordinate.



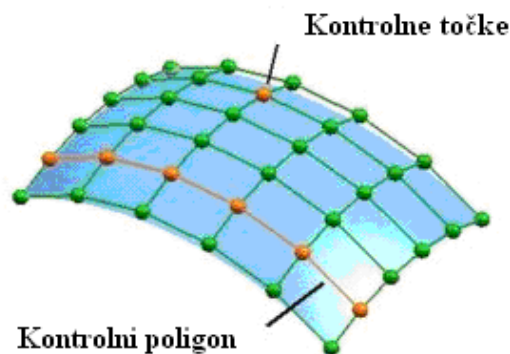
Slika 21: Primer odrpte ploskve. Prikazane so tudi linije vzporedne abscisi u in ordinati v koordinatnega sistema ploskve. Prikazane so tudi izohipse (Computer representation of surfaces - Wikipedia, Prosta enciklopedija)

Kompleksne ploskve lahko sestavimo iz enostavnejših ploskev ali krp, kjer ima vsaka krpa svoj koordinatni sistem. Krivulje, ki jih pridobimo s presekom ploskve v smeri vzdolž abscise ali ordinate koordinatnega sistema (u , v), so podobne polinomskim krivuljam, ki sestavljajo zlepke. Sistem krp, ki so med seboj povezane, omogoča, da so kompleksnejše ploskve predstavljene z nizi preprostejših enačb, kot pa z enim nizom zelo kompleksnih enačb. Zaprte ploskve v eni ali obeh smereh mora program za modeliranje pogosto razdeliti na dve ali več krp.

Ploskve ali ploskovne krpe lahko režemo le vzporedno z absciso ali ordinato koordinatnega sistema ploskve.

Zveznost ploskovnih krp in ploskev zgrajenih iz krp: običajno imajo točkovno zveznost (ni vrzeli) in zveznost krivulj (enakost tangents). Zveznost ukrivljenosti (ni nagle diskretne spremembe radija ukrivljenosti krivulje) pa velikokrat ni zagotovljena.

Modeliranje krp poteka po sledečem postopku: najprej ustvarimo 3R konstrukcijske krivulje, t. i. zlepke, iz katerih je potem 3R ploskev povezana v prostorsko mrežo. Ploskev pa lahko zgradimo ali spremenimo tudi z upravljanjem polov ali kontrolnih točk ploskve. Iz prvotnih krp lahko zgradimo kompleksnejše ploskve, npr. s podaljševanjem ali krajšanjem prvotne ploskve ali rezanjem. Lahko tudi spojimo krpe, bodisi z dodatnimi veznimi ploskvami ali pa kar neposredno brez vezi.

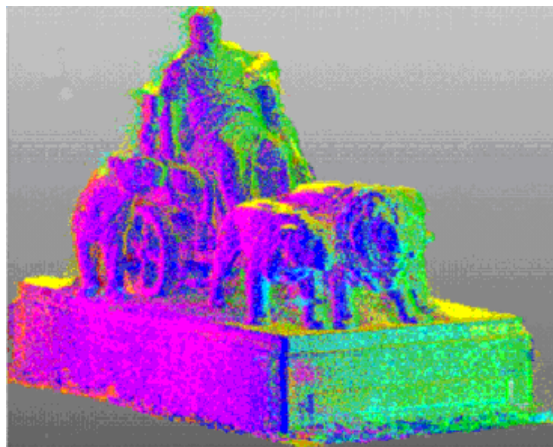


Slika 22: Primer kontrolnih točk (polov) in kontrolnega poligona (Nonuniform rational B-spline - Wikipedia, Prosta enciklopedija)

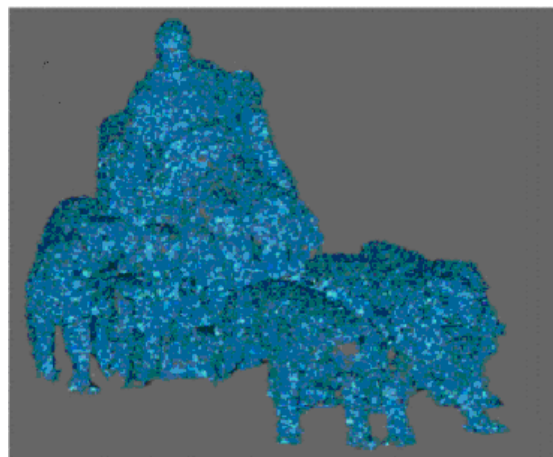
Večina računalniških programov danes temelji na uporabi neuniformnih racionalnih B-zlepkov ali angl. Non-uniform Rational B-splines (NURBS). Ploskve prostih oblik niso definirane s polinomskimi enačbami, ampak s poli, stopnjami in številom krp (oz. številom segmentov, ki jih določajo krivulje zlepkov). Poli se včasih imenujejo tudi kontrolne točke. Naravni robovi ploskve so definirani s položajem začetnih in končnih polov. Ploskev se polom samo približuje, vendar se jih nikoli ne dotakne ali preseka (Slika 22). Drugi in tretji poli definirajo obliko, začetni in tangentni kot ter tudi ukrivljenost. V posamezni krpi ploskve prostih oblik (t. i. Bézierjevi ploskvi) je en pol več kot je število stopenj ploskve. Krpe lahko spojimo v enotno kompleksno ploskev NURBS. Krpe se spajajo na mestih veznih linij. Število vezi določa vpliv polov na vsako stran vezne linije in kako gladek je prehod med sosednjima krpama. Ta gladkost prehoda se imenuje zveznost. Zveznost (angl. continuity) je pogosto opisana z vrednostmi spremenljivke C:

- C0: krpi se samo dotikata, prehodnost je nezvezna - pojavi se oster rob, lahko konkavni ali konveksni;
- C1: krpi se dotikata, sta zvezni na meji, toda sprememba ukrivljenosti je na meji nenadna;
- C2: ukrivljenost ploskev prehaja na meji z ene na drugo krpo brez nenadnega skoka.

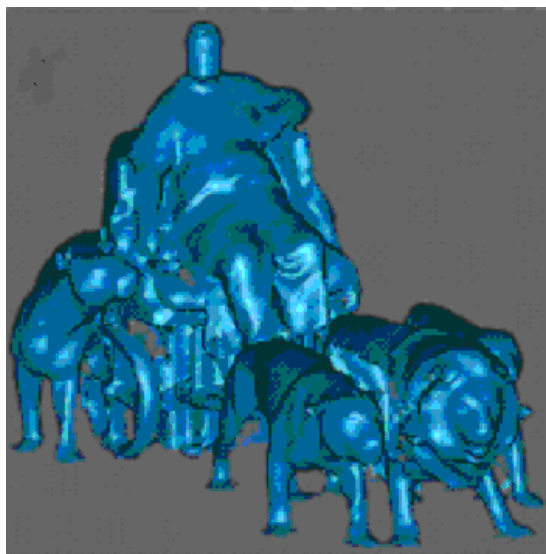
Postopek pridobitve ploskev prostih oblik iz podatkov laserskega skeniranja na primeru spomenika (Pfeifer, N., 2007), kar prikazujejo po vrstnem redu slike od št. 23 do št. 29.



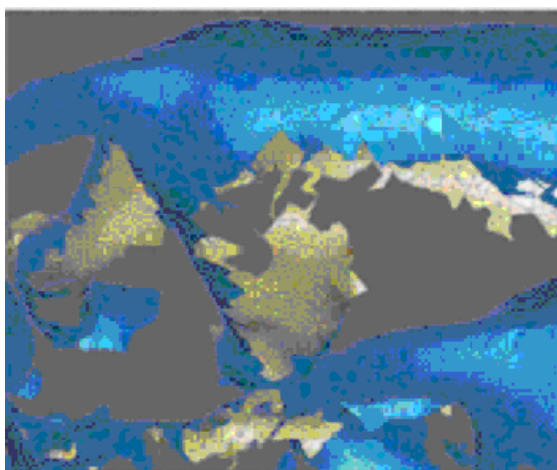
Slika 23: Najprej pridobimo homogen registrirani oblak točk (Pfeifer, N., 2007: 69 str.)



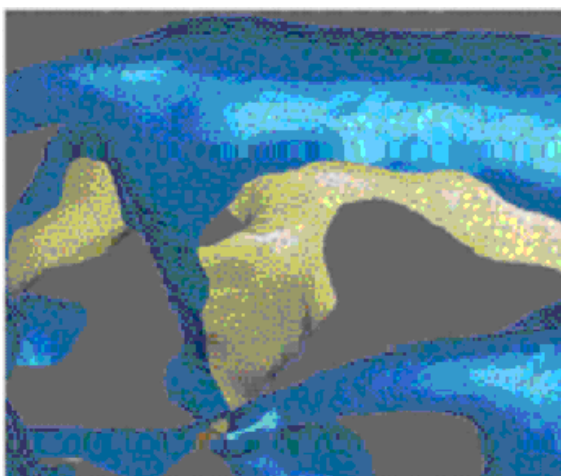
Slika 24: Točke povežemo v nepravilno triangulacijsko mrežo (Pfeifer, N., 2007: 69 str.)



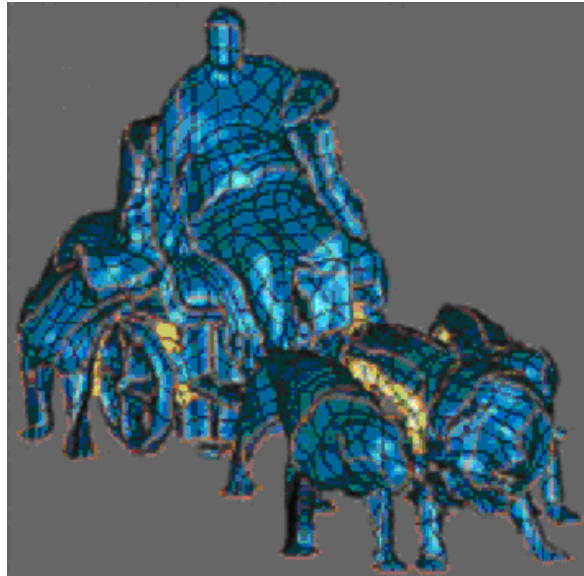
Slika 25: Zgladimo nepravilno triangulacijsko mrežo - zmanjšamo šum (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)



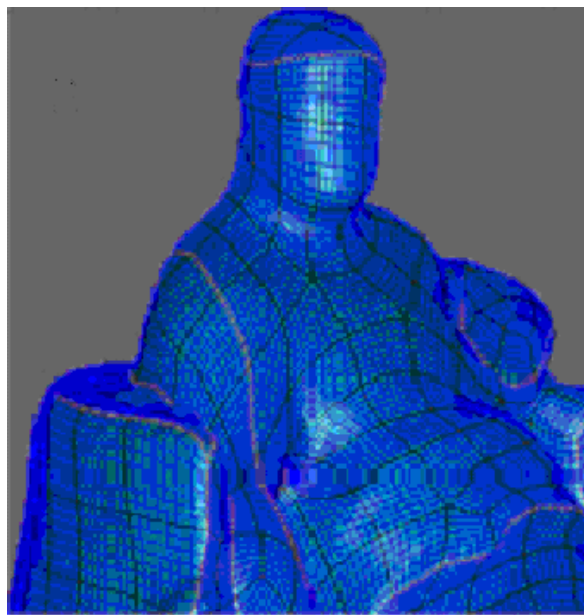
Slika 26: V modelu se pojavijo nepravilni robovi (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)



Slika 27: Zgladimo meje ploskev in zapolnimo luknje (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)



Slika 28: Model v obliki nepravilne triangulacijske mreže pretvorimo v ploskve prostih oblik (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)



Slika 29: Detajl krpastega modela ploskev prostih oblik (Pfeifer, N., 2007: 70 str.)

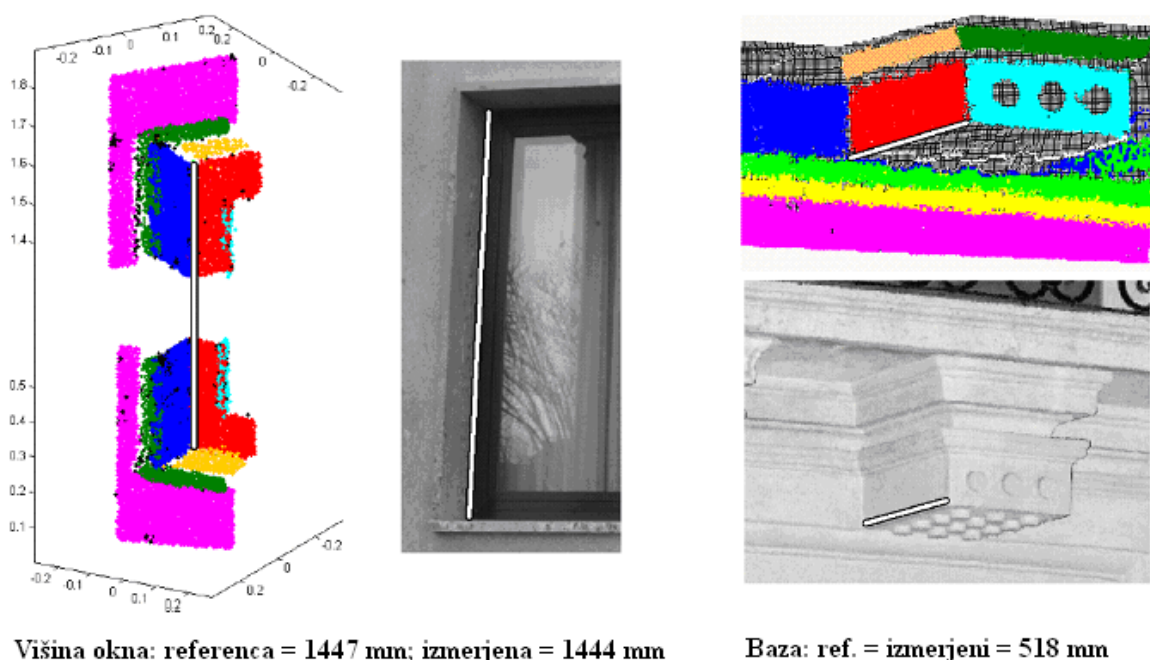
1.2.6 Interpretacija in uporaba podatkov

Pred pričetkom vsake vrste naloge se je potrebno vprašati, kateri skener je najbolj primeren za rešitev naloge. Kriteriji za odločitev so: doseg delovanja skenerja, ločljivost, natančnost, možnost registracije intenzitete odboja signala in možnost dopolnjevanja skenogramov z informacijami, ki jih posname fotoaparati. Paziti moramo tudi na možnost transporta skenerja

in oskrbe z električno energijo. Tudi programska oprema, s katero bomo obdelovali zajete podatke, je pomembna.

Področja uporabe so naslednja:

- gradbeništvo; merjenje dimenzij, volumnov, pridobivanje profilov in prerezov (Slika 30). Za tovrstne naloge uporabljamo skenerje dolgega dosega. Ker običajno nek predmet ali skupino objektov zajemamo z več stojišč, je potrebno paziti tudi na postopek registracije oziroma razporejanja veznih točk ali veznih objektov. Dolžine lahko merimo kar po oblaku točk (slika na naslednji strani) ali modelu, sestavljenem iz geometričnih primitivov;



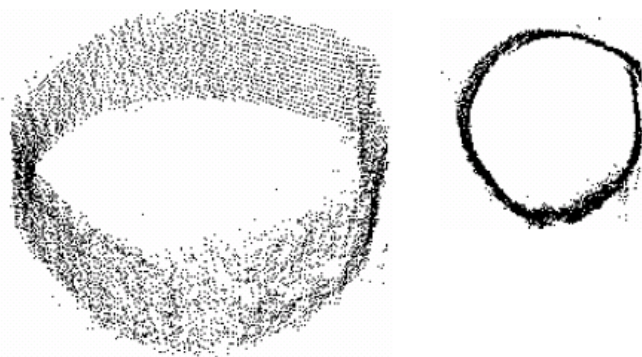
Slika 30: Uporaba skenerja v stavbarstvu. (Pfeifer, N., 2007: 73 str.)

- 3R vizualizacija;
- arheologija;
- arhitektura in izmera fasad;
- dokumentiranje kulturne dediščine;
- modeliranje naselij;
- gozdarstvo; uporaba laserskega skeniranja za potrebe ugotavljanja volumna lesa v gozdu. Vsako deblo, ki ga hočemo oceniti, je potrebno skenirati tako, da je možno

pridobiti oblak točk tega drevesa. Oblak točk mora biti dovolj kakovosten po celotni dolžini debla, da je možno pridobiti prečne prereze skozi deblo iz oblaka točk (Slika 31). Prerezi skozi oblak točk se praviloma tvorijo tako, da se iz oblaka točk izreže pas točk (npr. širina 20 cm), nato pa se točke v smeri osi debla projicira na ravnino. Tako smo iz 3R točk dobili 2R točke (Slika 32). Za naloge v gozdarstvu bomo praviloma uporabili skener srednjega dosega;

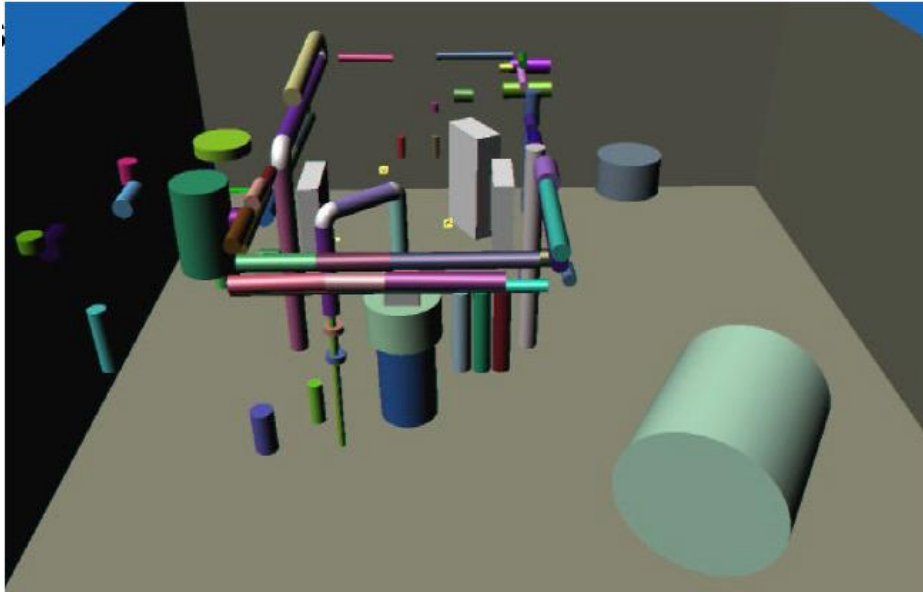


Slika 31: Prerezi skozi oblak točk debla (Pfeifer, N., 2007: 80 str.)



Slika 32: Pas točk, iz katerega izdelamo prečni prerez (Pfeifer, N., 2007: 85 str.)

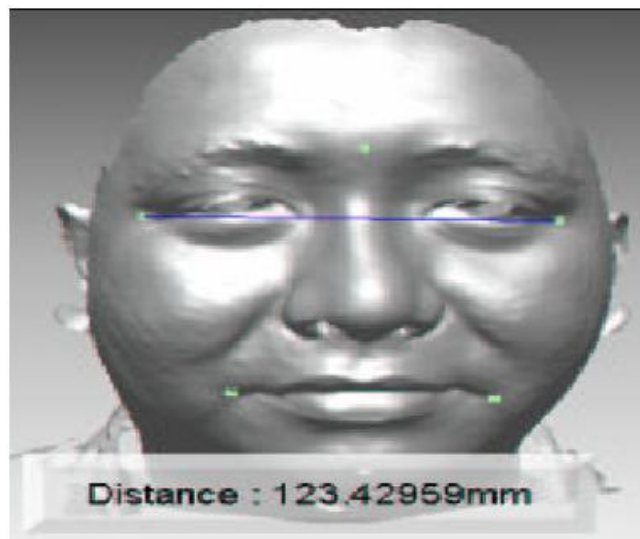
- sodne preiskave;
- obratno inženirstvo; skener bomo uporabili za potrebe rekonstrukcije, adaptacije, popravila in dokumentacije industrijskih inštalacij kot so cevovodi, kotli, peči, stroji, ipd. ter gradbeni objekti, ki jih obdajajo. Razčlenimo jih lahko na osnovna geometrijska telesa. Torej se poslužujemo modeliranja objektov z geometričnimi primitivi (Slika 33).



Slika 33: Primer modeliranja geometričnih primitivov (Pfeifer, N., 2007: 78 str.)

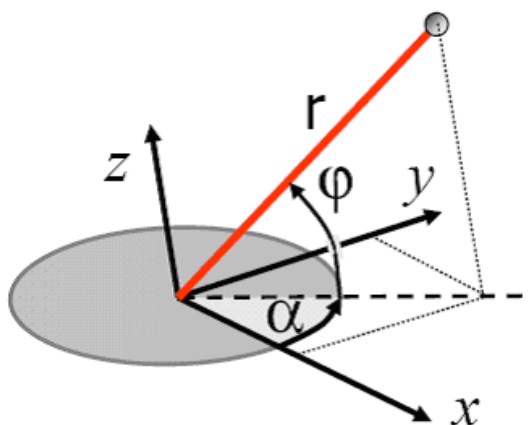
- načrtovanje in dokumentiranje infrastrukturnih objektov in infrastrukturnih vodov,
- medicina in biologija;
eden izmed primerov uporabe pridobitev 3R modela obraza za potrebe merjenja antropometričnih točk na človeškem obrazu (Slika 34). Drugi možni načini uporabe v medicini so: primerjanje oblike in dimenzij telesa ali udov pred operacijo in po njej, spremljanje razvoja organizmov tekom časa, skeniranje obrazov za potrebe zanesljivega identificiranja ipd. V koraku postprocesiranja običajno zajeti oblak točk modeliramo v preprosto triangulacijsko mrežo ali pravokotno mrežo. Iz modela lahko metrične podatke pridobimo kadarkoli. Za potrebe nalog v medicini in biologiji se praviloma uporablja triangulacijske skenerje;
- rudarstvo;
- filmska industrija,;
- spremljanje premikov in deformacij zgradb;
- nadzor proizvodov v industriji;

- industrijsko oblikovanje in razvijanje izdelkov;
- topografske meritve;
- spremljanje zemeljskih pojavov, npr. plazov;
- navidezna resničnost, programiranje računalniških iger, ipd.



Slika 34: Praktični primer pridobivanja antropometričnih podatkov (Pfeifer, N., 2007: 75 str.)

2 RAZVRSTITEV LASERSKIH SKENERJEV PO PRINCIPU DELOVANJA



Slika 35: Polarni 3R koordinatni sistem (Pfeifer, N., 2007: 8 str.)

Terestrični 3R laserski skener omogoča po principu polarne metode (glej Slika 35) izračunati koordinate točk v skenerjevem koordinatnem sistemu (x_r, y_r, z_r) . Prostorske podatke pridobiva v sistematičnem vzorcu, z veliko hitrostjo (od 100 do 100000 in več točk/ s) skorajda v realnem času.

Na tržišču je več vrst terestričnih laserskih skenerjev, ki se med seboj razlikujejo po natančnosti, dosegu merjenja in hitrosti skeniranja, na doseg pa vpliva predvsem princip delovanja skenerja. Po dosegu jih lahko razvrstimo (Dorninger, 2005) v:

- skenerje kratkega dosega (razdalja od nekaj cm do 10 m),
- srednjega dosega (razdalja od 1m do 100 m),
- ali pa v skenerje dolgega dosega (razdalja od 1m do 2500 m).

Preglednica 1. Klasifikacija laserskih skenerjev:

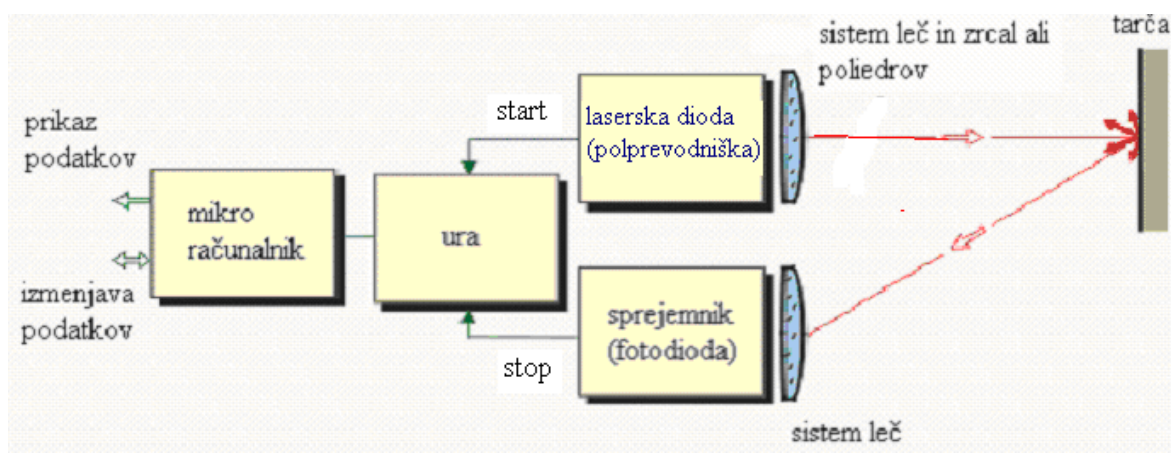
Metoda meritev	Doseg v m	Natančnost v mm	Proizvajalci
Impulzni princip	~2500	>10	Callidus, Leica, Mensi, Optech, Riegl, Trimble.
Merjenje faze	<100	<10	Leica, Faro, Zoller+Fröhlich.
Optična triangulacija	<10	<1	Konica Minolta, Mensi.

Skenerji so namenjeni specifičnim nalogam, zato ne obstaja nek univerzalni skener, ki bi ga lahko uporabili v vseh možnih primerih. Pred pričetkom dela glede na cilj delovne naloge izberemo ustrezen skener. Iz Preglednice 1 lahko vidimo, da so skenerji dolgega in srednjega dosega bolj primerni za naloge v geodeziji, gradbeništvu, strojništvu in pri dokumentiranju arhitekturne in arheološke dediščine. Skenerji kratkega dosega pa so bolj primerni za uporabo v industriji in pri grafičnem ter industrijskem oblikovanju. Podrobnejše specifikacije skenerjev so prikazane v nadaljevanju tega poglavja.

2.1 Skenerji z neposrednim merjenjem razdalj (angl. Range Scanners)

Skenerji te vrste merijo dolžino neposredno, radialno (Slika 35), kjer se eno krajišče daljice r izmerjene dolžine nahaja v izhodišču 3R polarnega koordinatnega sistema, ki je hkrati center elektrooptičnega sistema skenerja. Laserske skenerje, ki sodijo v to skupino, lahko razvrstimo v razreda dolgega in srednjega dosega.

2.1.1 Impulzni (angl. „Time-of-Flight“) skener



Slika 36: Konstrukcija impulznega laserskega skenerja (<http://www.riegl.com>)

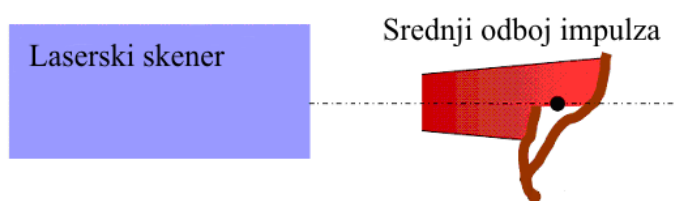
Skener oddaja laserski signal v kratkih impulzih (Slika 36). Ti signali se odbijejo od površine predmeta nazaj do senzorja. Čas širjenja impulza tja in nazaj je sorazmeren razdalji med oddajnikom in predmetom. Gre za podoben princip merjenja kot pri impulznih elektrooptičnih razdaljemerih, ki so vgrajeni v elektronske tahimetre. Pri tovrstnih skenerjih je možno pridobiti podatke o intenziteti odboja ter barvi površja predmeta.

Osnova je metoda merjenja časovnega intervala med trenutkom oddaje laserskega signala t_0 , ki ga emitira skener, in trenutkom zaznave tega odbitega signala v samem skenerju t_1 . Ob poznani hitrosti svetlobe c v optičnem sredstvu lahko pridobi razdaljo D med skenerjem in merjeno točko po enostavni enačbi:

$$D = \frac{c \cdot t_1 - t_0}{2}. \quad (2)$$

Zaradi laserskega impulza je doseg daljši, tudi do 2 km, vendar so na splošno manjše natančnosti kot alternativni principi.

Impulzni laserski skener lahko teoretično razloči tudi prvi in zadnji odboj signala v primerih, ko odbojna ploskev ni ravna ali pravokotna na vpadli žarek. Ta pojav se še posebej pojavlja na daljših razdaljah, ko površina prečnega prereza skozi laserski impulz zavzema čedalje večjo ploščino. Na razširjanje žarka vpliva pojav divergence, ki nastane pri prehodu impulza skozi oddajno optiko. Kadar se prvi in zadnji odboj po dolžini in času razlikujeta za manj, kot je skenerjeva natančnost merjenja dolžin, inštrument privzame kar srednjo vrednost, kot prikazuje Slika 37. Včasih je vpliv prvega in zadnjega odboja tudi nezaželen, ko npr. nastane eden izmed odbojev na predmetih, ki niso predmet skeniranja, npr. vegetacija ali pojavi v ozračju, kot so prah, megla, kaplje ipd. Takrat nastanejo t. i. fantomske točke, ki jih moramo med postopkom obdelave oblaka točk ročno odstraniti.



Slika 37: Srednji odboj laserskega žarka v primeru prvega in zadnjega odboja (Pfeifer, N., 2007: 21 str.)

V prilogi B pod številkami 1, 2 in 3 so prikazani modeli impulznih laserskih skenerjev proizvajalcev, ki tekmujejo na svetovnem tržišču. Gre za aktualne znamke in modele, ki so v proizvodnji oz. prodaji. Prikazal sem samo tiste modele, za katere sem lahko pridobil preko spleta ali elektronske pošte zadosti kakovostne tehnične specifikacije. Vsi podatki specifikacij so pridobljeni na bazi testiranja, ki jih definirajo proizvajalci sami, saj ne obstaja nek

mednarodni ali industrijski standard, ki bi zagotavljal enotne preizkuse in s tem enakovredne in primerljive specifikacije. Poleg tega so nekatere specifikacije pomanjkljive ali nejasne, s čimer lahko proizvajalci namerno prikrivajo slabosti svojih izdelkov.

2.1.2 Fazni skener

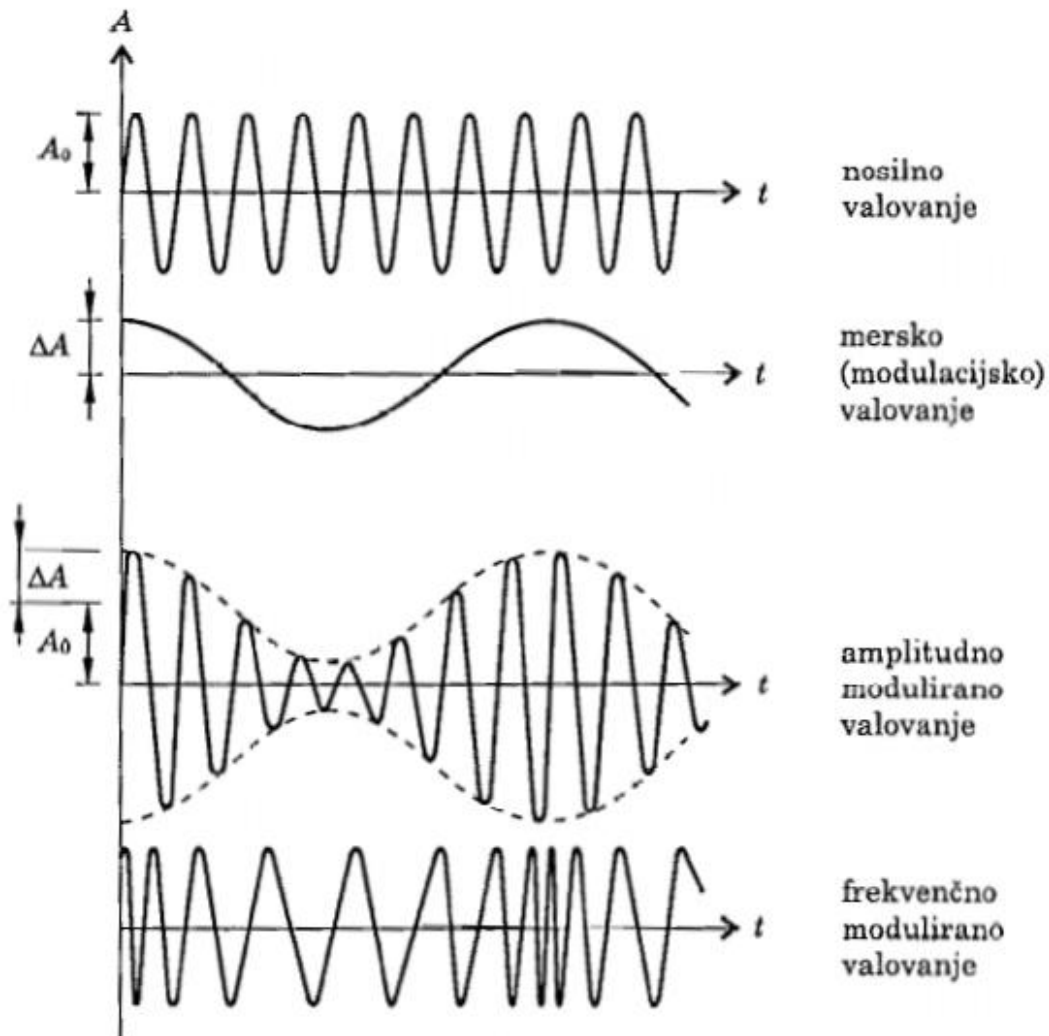
Skenerji, ki spadajo v to skupino, določijo dolžino po podobnem načelu kot elektronski razdaljemerji, ki merijo po principu faznega merjenja dolžin. Frekvenca oddanega laserskega signala je modulirana s sinusnim valovanjem, dolžino pa določijo iz primerjave faze oddanega in sprejetega moduliranega valovanja (Kogoj, D., 2002). Zaradi podrobnejše analize odbitega signala, lahko izmerijo razdaljo z večjo natančnostjo (σ_d okrog 1 mm). Zaradi zahtevane jakosti odbitega valovanja, se lahko zgodi, da imajo takšni skenerji zmanjšan doseg delovanja. Razdalja je tako omejena do 100 metrov. Pozitivni vidik faznih skenerjev pa je, da lahko razdalje merijo kontinuirano, zato lahko zajamejo več točk na sekundo kot impulzni skenerji.

Fazni skenerji so pogosto skonstruirani tako, da zaznajo in registrirajo jakost odbitega signala. Ta možnost omogoča zaznavanje reflektivnih lastnosti površine predmeta. Nekateri modeli skenerjev omogočajo zaznavo prave barve površja tako, da imajo vgrajen dodatni pasivni kanal. Barvna informacija omogoča samodejno določanje teksture predmeta.

Delovanje faznih skenerjev temelji na moduliranem elektromagnetnem valovanju. Modulacija je združitev dveh ali več valovanj iste vrste. Združita se elektromagnetni valovanji, ki se lahko ujemata v fazi ali frekvenci, ali pa imata oba elementa različna. Modulacija pomeni spreminjanje parametrov valovanj v času in prostoru. V primeru faznih skenerjev združujemo dve elektromagnetni valovanji, in sicer:

- nosilno valovanje; Laser je izvor elektromagnetnega valovanja zelo visokih frekvenc f_N (približno 10^5 GHz). To valovanje zagotavlja premočrtnost razširjanja v atmosferi. Govorimo o nosilcu informacije faze. Nosilno valovanje lahko ponazorimo z merskim trakom, na katerega še ni nanesena dolžinska razdelba. Doseg instrumenta, hitrost valovanja in absorpcija svetlobe so odvisni od lastnosti nosilnega valovanja;
- mersko valovanje; Nosilno valovanje je modulirano z merskim valovanjem, katerega izvor je kremenov kristal. Merska frekvenca f_M je bistveno nižja od frekvence nosilnega valovanja (od nekaj deset do nekaj sto MHz). Modulacijska frekvenca nam

zagotavlja dolžinsko mersko enoto - polovično modulacijsko valovno dolžino.
Velikost le-te je odvisna od velikosti modulacijske frekvence.



Slika 38: Vrste modulacij (Kogoj, D., 2002: 25 str.)

Vrsta modulacije je odvisna od parametra valovanja, ki se spreminja. Najpogostejši sta amplituda in frekvenčna modulacija, uporablja pa se tudi fazna modulacija (Slika 38). Modulacijska frekvenca je izbrana tako, da je valovna dolžina v idealnih pogojih neko zaokroženo število, npr. 30 cm. Natančnost izmere dolžine je tudi povezana z velikostjo modulacijske frekvence. Čim višja je frekvenca, natančnejša je določitev dolžine, pod pogojem, da je ta frekvenca tudi stabilna.

Določitev vrednosti merjene dolžine pa poteka na sledeč način: valovna dolžina merskega vala (moduliranega valovanja) je odvisna od modulacijske frekvence in sredstva, skozi katerega se valovanje širi:

$$\lambda_M = \frac{c}{f_M}, \quad (3)$$

kjer so:

- λ_M ... valovna dolžina moduliranega valovanja (modulacijska valovna dolžina),
- f_M ... modulacijska frekvenca,
- c ... hitrost nosilnega svetlobnega valovanja v sredstvu.

Celotno pot merskega žarka (dvakrat pretečeno dolžino od razdaljemera do reflektorja) zapišemo v enotah modulacijskih valovnih dolžin. Dolžina med začetno in končno točko je:

$$2D = N\lambda_M + \Delta\lambda_M, \quad (4)$$

in zato je:

$$D = N \frac{\lambda_M}{2} + \frac{\Delta\lambda_M}{2}, \quad (5)$$

kjer je:

- N ... število polovičnih valovnih dolžin na merjeni poti,
- $\Delta\lambda_M$... del modulacijske valovne dolžine, ki ga določimo na osnovi merjenja fazne razlike med merskim in referenčnim žarkom, in sicer:

$$\Delta\lambda_M = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda_M. \quad (6)$$

Merjenje dolžine po faznem načinu torej pomeni določevanje števila polovičnih modulacijskih valovnih dolžin N in fazne razlike $\Delta\varphi$ med merskim in referenčnim žarkom oziroma signalom, od česar izhaja tudi ime tovrstnih razdaljemerov.

Označimo:

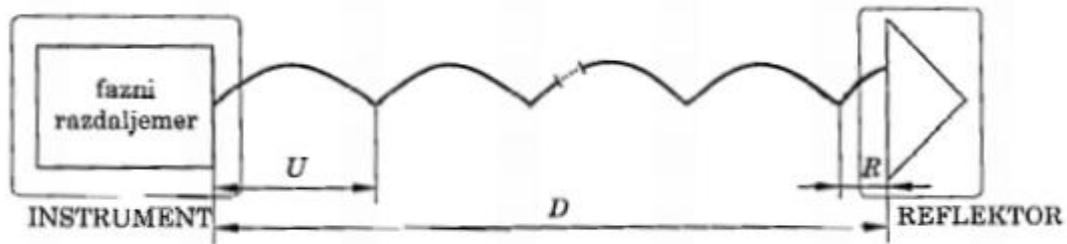
$$\frac{\lambda_M}{2} = U \quad (7)$$

in

$$\frac{\Delta\lambda_M}{2} = R. \quad (8)$$

U imenujemo merilo ali merska enota, R pa ostanek. Izmeriti dolžino s faznim skenerjem ali razdaljemerom pomeni določiti število enot N in velikost ostanka R (Slika 39). Skener določi število enot N in ostanek R na različne načine, odvisno od konstrukcije. Enačbo dolžine torej lahko zapišemo:

$$D = NU + R. \quad (9)$$



Slika 39: Ilustracija principa določanja dolžine s faznim razdaljemerom. (Kogoj, D. 2002: 30 str.)

V prilogi B pod točkami 3, 4 in 5 so prikazani modeli faznih laserskih skenerjev proizvajalcev, ki tekmujejo na svetovnem tržišču. Pri tem velja podoben komentar kot v poglavju 2.1.1.

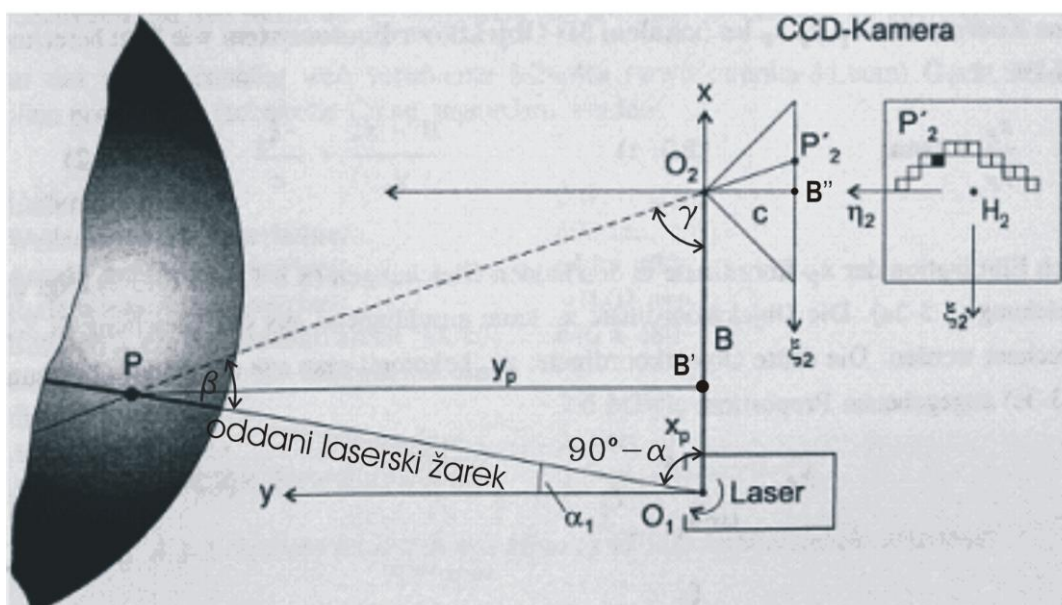
2.3 Triangulacijski skener

Triangulacijski skenerji spadajo v razreda kratkega in srednjega dosega. Tovrstni skenerji imajo naslednje konstrukcijske lastnosti: laserski oddajnik emitira laserski žarek in ga projicira na površino predmeta, ki ga želimo skenirati. Del žarka se nato odbije od površja tega predmeta nazaj k CCD kameri, ki je sestavni del triangulacijskega skenerja. Skener se imenuje triangulacijski, zato ker laserski oddajnik, točka na predmetu in kamera tvorijo trikotnik (Slika 41). Pri tem poznamo dolžino med laserskim izvorom (center) in kamero (projekcijskim centrom) - bazo - iz podatkov kalibriranja skenerja. Prav tako poznamo tudi kot med oddanim žarkom in bazo. Med samim potekom skeniranja se kot med oddanim žarkom in bazo ves čas spreminja, vendar ta kot poznamo, saj podatke o njem pridobiva računalnik, ki krmili triangulacijski skener med postopkom skeniranja. Dolžino do površja objekta nato računalnik izračuna na podlagi dolžine baze in znanega kota ter točke odboja, preslikane na čip kamere. Ko gibanje žarka po posamezni skenirni liniji pride od začetka do konca te linije, žarek preskoči na začetek naslednje skenirne linije (Slika 40). Skeniranje po

posameznih linijah je kar precej zamudno, zato dandanes skenerji namesto žarka uporabljajo šop žarkov, s katerim »pometejo« površino predmeta (pometajoči skener), kar pospeši postopek skeniranja. Skenerji tega tipa dosežejo natančnost določevanja prostorskega položaja točke na manj kot milimeter pri razdaljah krajših od dveh metrov. Natančnost je odvisna od dolžine baze skenerja in oddaljenosti skeniranega objekta in se zmanjšuje s kvadratom oddaljenosti predmeta od baze skenerja (Slika 42).



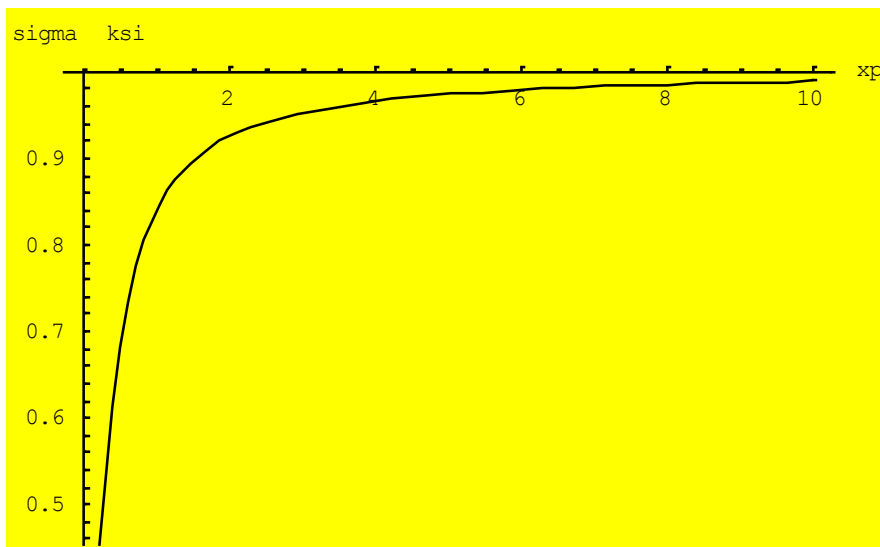
Slika 40: Skenirne linije (Pfeifer, N., 2007: 20 str.)



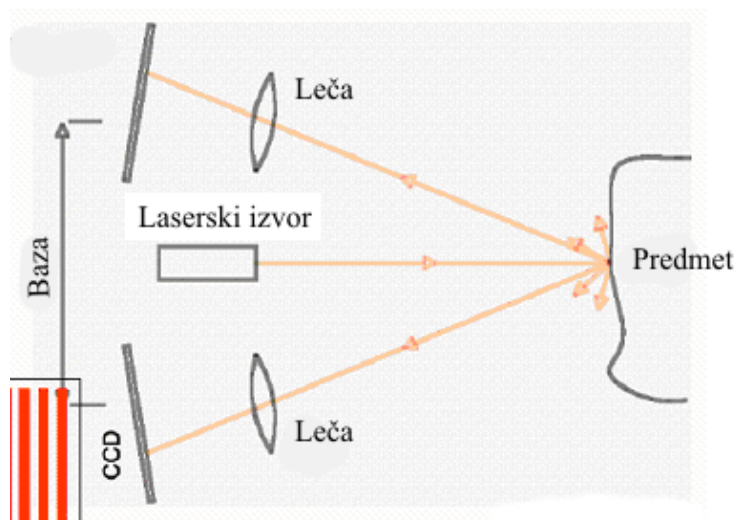
Slika 41: Ponazoritev konstrukcije triangulacijskega skenerja (Pfeifer, N., 2007: 19 str.)

Oddaljenost y_p točke P na površju predmeta skeniranja od baze skenerja B lahko izrazimo iz podobnih trikotnikov. Trikotnika PO_2B' in $O_2P'_2B''$ sta podobna. Poznane so količine: konstanta kamere c , baza skenerja B , kot oddanega žarka α_1 in koordinata ζ_2 v slikovnem koordinatnem sistemu.

Obstaja tudi alternativni konstrukcijski princip triangulacijskega skenerja, kjer bazo skenerja tvori oddaljenost med dvema CCD kamerama (glej Sliko 43).



Slika 42: Graf odvisnosti natančnosti skenirane točke od oddaljenosti predmeta skeniranja od baze triangulacijskega skenerja



Slika 43: Model triangulacijskega skenerja z dvema CCD kamerama (Pfeifer, N., 2007: 20 str.)

Zaradi visoke natančnosti in kratkega dosega, triangulacijski skenerji niso primerni za naloge topografskih meritev, ampak za druge specifične naloge, npr. v strojni industriji, grafičnem oblikovanju in modeliranju, biologiji in medicini, ipd. V prilogi B, pod številkami 7, 8 in 9, so prikazane osnovne lastnosti treh triangulacijskih skenerjev, ki jih proizvaja korporacija Konica Minolta.

3 NATANČNOST SKENIRANJA

Natančnost skeniranja bi lahko opredelili kot natančnost izdelanega 3D modela skeniranega objekta ali predmeta in natančnost iz modela pridobljenih podatkov. Natančnost je rezultat vsote pogreškov v okviru posameznega stojišča skenerja, registracije opazovanj vseh stojišč skenerja v okviru projektnega koordinatnega sistema v enoten oblak točk, nadalje postopka obdelave oblaka točk in nazadnje metode 3D modeliranja.

3.1 Natančnost terestričnih 3D skenerjev

V tem poglavju prikazujem velikost posamičnih vplivov na natančnost zajetih podatkov in 3R modela v okviru posameznega stojišča skenerja. Pogreški, ki vplivajo na pridobljene podatke, so predstavljeni teoretično, če obstaja ustrezna literatura. Pomagal sem si tudi z rezultati preizkušanj, ki so jih opravili zaposleni Inštituta i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences Mainz, Nemčija, in objavila Böhler in Marbs (2005).

Kakršnakoli geodetska merska metoda omogoča pridobiti ne samo relativne položaje točk, ampak tudi oceno natančnosti rezultatov. V primeru klasičnih geodetskih metod in fotogrametrije, kjer opazujemo definirane točke, lahko na osnovi metode najmanjših kvadratov pridobimo kot rezultat tako natančnost iskanih količin kot tudi natančnost opazovanj. Če pa nimamo dovolj opazovanj za izravnavo (ni nadštevilnih opazovanj), lahko ocenimo natančnost na osnovi modela prenosa pogreškov opazovanj iz podatkov natančnosti inštrumenta in pribora. Nadalje, rezultate meritev lahko izboljšamo tako, da na osnovi kalibracije inštrumenta, odpravimo sistematične inštrumentalne pogreške.

V primeru laserskih skenerjev je postopek ocene natančnosti nekoliko drugačen. Laserski skener namreč med skeniranjem pridobi ogromno število 3R točk v izjemno kratkem času. Pomembne točke, kot so vogalne točke in robovi predmetov, niso direktno posnete, ampak jih je potrebno v posebnem postopku modelirati iz oblaka točk. Čeprav je mogoče posneti isti predmet večkrat z različnih stojišč, je nemogoče posneti iste točke z vseh stojišč. Nekatere površine tako skeniramo samo enkrat, z enega stojišča. Torej, pogreške lahko ugotovimo šele

potem, ko smo objekte že modelirali iz registriranega oblaka točk. Če poznamo geometrijske parametre predmetov, je lahko odstopanje točke od geometrijske ploskve kazalnik natančnosti. Kot referenčno ploskev se pri preizkušanju praktične natančnosti skenerjev uporablja ravno ploščo, pa tudi valj in kroglo.

Splošni mednarodni ali industrijski standard, po katerem bi proizvajalci preizkusili svoje skenerje in tako ugotovili praktično natančnost skenerjev, ne obstaja. Vsako podjetje samo določi preizkusne pogoje, rezultati teh testov so navedeni v tehničnih specifikacijah izdelkov in objavljeni na spletu, kot promocijski material. Po pisni izjavi R. Swarza (2008), odgovorne osebe za zagotavljanje podpore uporabnikom strojne in programske opreme podjetja Riegl, organizacija za standarde ASTM - International American Society for Testing and Materials, pripravlja industrijski standard za preizkušnjo skenerjev

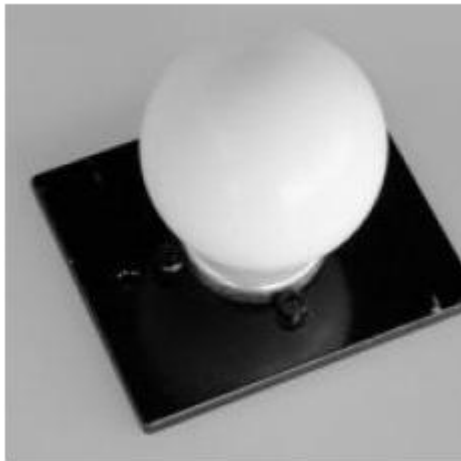
3.1.1 Splošno o natančnosti

Vsak oblak točk, ki ga pridobimo z laserskim skenerjem, vsebuje nezanemarljivo število točk, obremenjenih z grobim pogreškom. Če pridobimo oblak točk, kot rezultat skeniranja, jamstva kakovosti meritev ne moremo izdati, vsaj ne v taki obliki, kot ga pri klasičnih terestričnih meritvah. Ko so na Inštitutu i3mainz v letu 2003 pričeli s testi, so nekatere ustanove že objavile metode in rezultate preizkušanj posamičnih laserskih skenerjev. Na osnovi že dognanega je bil razvit program testiranja, na katerem je bilo preizkušenih kar nekaj različnih skenerjev na istih testnih postavitvah.

Za potrebe praktične preizkušnje inštrumentov je bil izdelan nabor tarč iz običajnih materialov. Naprave za preizkušanje so bile nameščene v dveh stavbah University of Applied Sciences Mainz. Večina preizkusov se lahko ponovi na vsaki drugi lokaciji, če uporabimo enake tarče iz enakih materialov in enakih barv.

Ker posamezne točke skenograma ni možno analizirati in primerjati, so raziskovalci uporabili krogelne tipe tarč (bele krogle s premerom 76,2 mm na magnetni plošči, ki jo je proizvedla Mensi) za večino preizkušanj dolžin (Slika 44). Skenerji, namenjeni za vrsto različnih aplikacij, morajo biti zmožni zaznati in modelirati kroglo takšnih dimenzij. Ravne ploskve pa so uporabili za ugotavljanje šuma ter odbojnosti površin glede na vrsto in barvo materiala. Še

nekateri dodatni pripomočki, ki so opisani v nadaljevanju, so bili skonstruirani za preučevanja drugih lastnosti.



Slika 44: Krogla za preizkušanje (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 7 str.)

Raziskovalci Inštituta i3mainz so ugotovili, da natančnosti, ki jih navajajo različni proizvajalci v publikacijah in pamfletih svojih proizvodov, zaradi že navedenega razloga (pomanjkanja splošnega standarda), med seboj niso primerljive. Izkušnje so tudi pokazale, da tem specifikacijam ne moremo na splošno zaupati, in da natančnost skenerjev, ki so proizvedeni v majhnih serijah, variirajo od inštrumenta do inštrumenta, hkrati pa so natančnosti odvisne tudi od kalibracije posameznega inštrumenta ter načina upravljanja in shranjevanja inštrumenta. Poskusi, ki so jih organizirali v okviru Inštituta i3mainz, niso zasnovani tako, da bi odkrili mehanske, optične ali elektronske izvore pogreškov v inštrumentu, ampak odkrivajo učinke teh pogreškov na določena opazovanja v praktičnih merskih pogojih. Ko so, na primer, izračunali kratko razdaljo med dvema kroglama, ki sta na enaki razdalji od skenerja, je le-ta izračunana iz točk v središču 3R modela krogle, pridobljenega iz oblaka točk, iz česar lahko na splošno ocenimo natančnosti kotnih merjenj, hkrati pa rezultat ne pove vsega o kotni natančnosti ene točke v oblaku točk. Raziskovalci so uporabili isti postopek in iste tarče za vse preizkušane inštrumente, kar zagotavlja zanesljivo metodo primerjanja delovanja teh inštrumentov pod praktičnimi pogoji. Krogle so bile skenirane z rastrom 4 mm. Če krogel ni bilo moč skenirati s takšno ločljivostjo, je bila izbrana ločljivost, ki je najbližja 4 mm. Ravne ploskve so skenirali z ločljivostjo 5 mm ali čim bližje tej ločljivosti. Testi, s katerimi so preverili ločljivost in učinek odboja na robovih, so bili, če je le mogoče, izvršeni z 1 mm rastrom. Vsi objekti so bili posneti enkrat, ob uporabi ene izmere

na točko in čitanjem na desetinko mm, če je bilo možno. Modeliranje ravnin in krogel so izvedli z uporabo metode najmanjših kvadratov. Znane lastnosti geometrijskih objektov, t. j. planarnost ravnin, premer krogle, so bile vnesene v izravnavo kot pogojne količine. Modelirali so s programom Dipsos, proizvajalca Mensi, za katerega so ugotovili, da so rezultati enaki kot pri drugih primerljivih programih. Za potrebe modeliranja ravnih plosč so iz oblaka ročno odstranili vse točke ob robovih plosče, saj so te točke pogosteje grobo pogrešene zaradi učinka robov. Prav tako so bile za potrebe določanja pogreškov dolžin v smeri skener - točka ročno odstranjene iz oblaka točk točke ob robu krogle (robu, ki bi se pojavil, če bi prerezali kroglo na dve polobli - osvetljeno in osenčeno). Za potrebe ugotavljanja pogreškov dolžin v smeri pravokotni na smer vpadnega laserskega žarka, robnih točk iz oblaka točk niso odstranjevali. Vso modeliranje in računanje je opravila ista oseba.

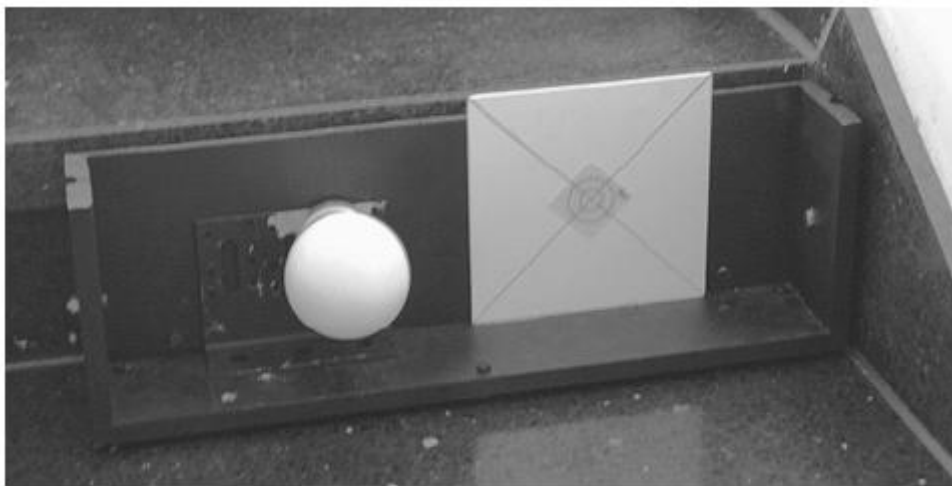
Vse preizkušnje so se opravljale v zaprtih prostorih pri temperaturi približno 20°C. Podatkov o zračnem tlaku in zračni vlažnosti v publikaciji, objavljeni na spletu, ni navedenih.

3.1.1.1 Kotna natančnost

Kotna natančnost posamezne točke je v osnovi odvisna od natančnosti kotne meritve. Pri skenerjih, kjer laserski žarek usmerjajo vrtljiva zrcala ali poliedri z reflektivnimi površinami, predstavlja en parameter natančnost ravnosti teh optičnih delov, drugi parametri pa se nanašajo na kakovost kotnega odčitalca, ki določi položaj zasuka zrcal. Generiran laserski žarek, majhna vrteča se naprava (bodisi zrcalo ali prizma), odkloni in pošlje proti predmetu. Drugi kot, pravokoten na prvega, inštrument spreminja ob uporabi motorja ali druge vrteče se optične naprave. Registrirani odčitki za ta dva kota se uporabijo za izračun 3R točk. Kakršenkoli pogrešek, ki je rezultat vrtenja okoli osi, ali nosilcev vrtečih se delov, ali naprav za branje s kotnih razdelb, se bo prenesel pravokotno na smer širjenja žarka. Ker je težko preveriti položaj posamezne točke v skenogramu, je poznanih le nekaj raziskav tega problema. Skupni pogrešek merjenja H_z in V kota tudi ni podatek v specifikacijah, ki jih priložijo proizvajalci skenerjev k inštrumentom.

Preizkus skenerjev, v smislu ugotovitve praktične kotne natančnosti, pa je na Inštitutu izmainz izgledal tako, da so pogreške v kotih med dvema žarkoma ugotovili na osnovi izmerjenih kratkih razdalj med dvema krogelama, ki sta locirani na enaki razdalji od skenerja.

Model krogel je rezultat nizkopasovnega filtriranja podatkov. V rezultatih torej ni možno zaznati majhnih kotnih sprememb. Prva preizkusna inštalacija temelji na uporabi bele krogle v kovinski škatli, ki je nameščena na natančno izmerjene točke, označene na kamnitih stopnicah na koncu 60 m hodnika. Škatlo (Slika 45) je možno premikati za nekaj desetih mm glede na kamnite stopnice in jo poravnati tako, da se vzpostavi natanko takšno stanje, kot je bilo izmerjeno z natančnejšimi geodetskimi metodami. Natančnost določitve preizkusnih inštalacij, s predhodnimi geodetskimi meritvami, ni navedena. Tarče so nameščene na vsaki strani stopnic, na razdalji približno 1 meter (Slika 46). To omogoča izračun šestih neodvisnih kratkih razdalj v H_z in V smeri. V drugem prostoru so nameščene štiri krogle na navpični steni, in sicer v ogliščih pravokotnika visokega 3,5 m in širokega 5 m. Krogle se pritrdi (Slika 47) z magnetnim kontaktom na jeklene plošče, nameščene na steni. Tako se lahko na preizkusni inštalaciji kadarkoli vzpostavijo razmerja, ki so jih izmerili s predhodnimi geodetskimi opazovanji. Takšno razporeditev se skenira z razdalje 15 m s treh stojišč, kot kaže Slika 48. Na tak način so spet pridobili šest neodvisnih razdalj v H_z in V smeri.

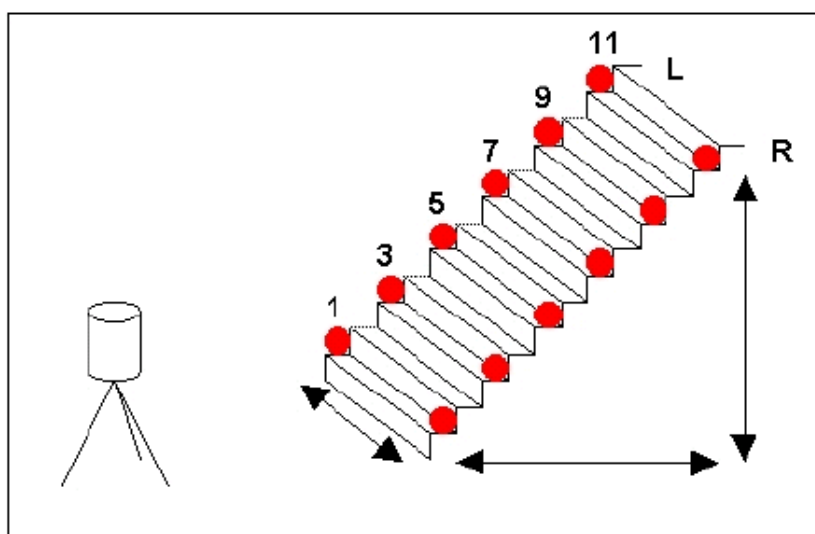


Slika 45: Okvir za postavljanje testnih krogel na določenih lokacijah na stopnicah (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 6 str.)

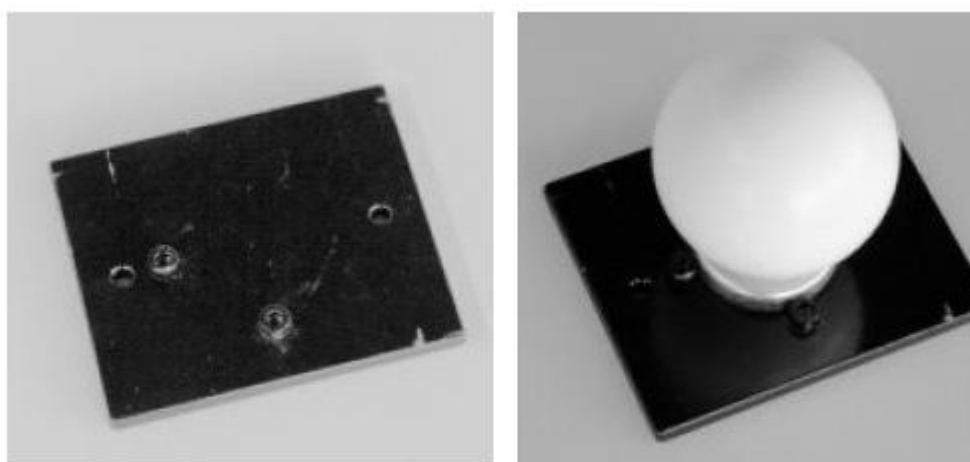
Na praktičnih preizkušanjih je bilo 13 skenerjev (Preglednica 2) v obdobju med letoma 2003 in 2005. Testirali so impulzne, fazne in triangulacijske skenerje. V Preglednici 3 so prikazane standardne deviacije dolžinskih razlik po H_z in V smeri (iz skice postavitve testne inštalacije). Standardna deviacija je izračunana:

$$\sigma_{H_z,V} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \mu^2}, \quad (10)$$

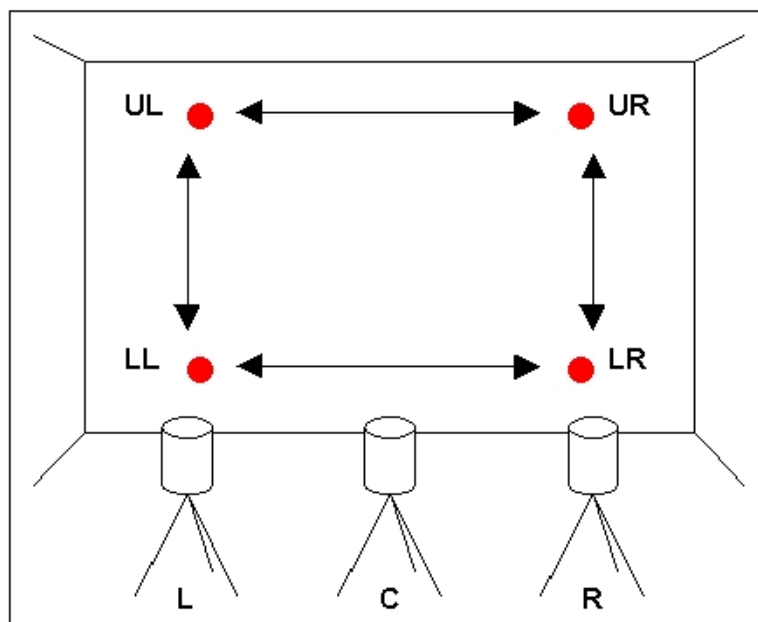
kjer je x_i dolžinska razlika med središčema dveh krogel, ki sta pridobljena iz podatkov skeniranja, μ pa je prava vrednost med središčema dveh krogel, pridobljena iz geodetskih opazovanj. Standardna deviacija posamezne točke v oblaku točk pa je teoretično večja, saj je središče testnih krogel pridobljeno iz več točk, torej na osnovi nadštevilnih opazovanj. Iz Preglednice 3 lahko tudi opazimo, da je pri marsikaterem skenerju natančnost opazovanja po H_z smeri drugačna kot po V smeri.



Slika 46: Preizkusna inštalacija za ugotavljanje natančnosti dolžinskih razlik(Böhler, W., Marbs, A., 2005: 7 str.)



Slika 47: Jeklene plošče, s katerimi se namesti krogle na navpično steno (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 7 str.)



Slika 48: Lokacija krogel na steni in stojišča skenerja (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 7 str.)

Preglednica 2. Skenerji testirani na Inštitutu i3mainz.

Opomba - letnice pomenijo leto proizvodnje/ leto testiranja (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 11 str.):

	Leto proizvodnje	Leto testiranja	Last inštituta	Skupaj testiranj
Callidus Precision Systems		2000/2003 2001/2003		2
Leica HDS2500	-/2003		2001/2003	2
Leica HDS3000	2004/2005	2004/2005		2
Mensi S25			2001/2003	1
Mensi GS100	2002/2003			1
Mensi GS200		2003/2004		1
Riegl LMS-Z210		2001/2003		1
Riegl LMS-Z420i	2003/2003			1
Riegl LPM-25HA		2004/2004		1
Zoller+Froehlich Imager 5003	2003/2003			1
Total:				13

Za potrebe primerjave rezultatov preizkusov na Inštitutu i3mainz, z navedbami proizvajalcev skenerjev, ki so običajno napisane v tehničnih specifikacijah skenerjev, si lahko ogledamo podatke v Prilogi B.

Rezultati preizkušanj so tudi pokazali, da pogreški dolžinskih razlik, pravokotnih na smer merjenja dolžine, pri večini inštrumentov ne naraščajo z oddaljenostjo skenerja od tarče (velja za razdalje razreda do 60 m).

Preglednica 3. Razlike med znanimi in skeniranimi razdaljami med dvema krogla, pravokotno na smer merjenja (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 12 str.).

Opombe - standardna deviacija je pridobljena iz 12-ih neodvisnih vertikalnih in 12-ih neodvisnih horizontalnih razdalj.

- a. Zaradi omejenega kotnega inkrementa so skener testirali samo na kratkih razdaljah ≈ 15 m.
- b. Slabši rezultati so posledica triangulacijskega principa delovanja skenerja. Rezultati so mnogo boljši pri razdalji 4 m: 0,8 mm *V* in 0,2 mm *H*z:

	Std. dev. vertikalnih razdalj [mm]	Std. dev. horizontalnih razdalj [mm]	Največja absolutna razlika [mm]
Callidus Precision Systems (1)	5.6 ^a	4.3 ^a	12.2 ^a
Callidus Precision Systems (2)	9.9 ^a	2.5 ^a	18.3 ^a
Leica HDS2500 (1)	0.8	0.8	1.6
Leica HDS2500 (2)	0.5	0.5	1.1
Leica HDS3000 (1)	1.3	1.1	2.9
Leica HDS3000 (2)	1.1	1.8	2.8
Mensi S25	3.8 ^b	3.4 ^b	9.2 ^b
Mensi GS100	1.9	2.3	3.3
Mensi GS200	4.7	2.2	8.3
Riegl LMS-Z210	10.2 ^a	16.8 ^a	27.1 ^a
Riegl LMS-Z420i	1.7	2.1	4.1
Riegl LPM-25HA	2.5	3.9	6.5
Zoller+Froehlich Imager 5003	2.9	7.5	11.1

3.1.1.2 Natančnost merjenja dolžin

3.1.1.2.1 Vpliv atmosfere

Gostota zraka kot zmesi plinov je odvisna od:

- temperature zraka t ,
- zračnega tlaka p ,
- relativne vlažnosti zraka η ali delnega tlaka vodne pare e ,
- in vsebnosti dodatnih trdnih delcev.

Prvi vpliv atmosfere lahko definiramo kot spremenjeno splošno gostoto zraka, ki vpliva na lomni količnik svetlobe n , ta pa na hitrost širjenja valovanja in zato posredno na modulacijsko valovno dolžino λ_M (Kogoj, D., 2002). Pri tem gre za spremembo lomnega količnika n primerjavi z referenčnim lomnim količnikom n_0 , ki ga proizvajalci laserskih skenerjev določijo za neko poljubno referenčno atmosfero, največkrat normalno atmosfero ali atmosfero blizu normalne. Normalna atmosfera ima naslednje vrednosti (Kogoj, D., 2002):

$$t = 0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$$

$$p = 1013,25 \text{ hPa} = 760 \text{ torr}$$

0,03% vsebnosti CO₂ in

suhi zrak (0% relativna vlažnost).

Drugi vpliv atmosfere pa lahko opišemo kot optično refrakcijo. Pri optični refrakciji gre za zvezno spremembo lomnega količnika n vzdolž laserskega žarka. Sprememba je odvisna v glavnem od optične gostote zraka, ki se znižuje z nadmorsko višino. Pri prehodu iz enega v drugi sloj se žarek lomi. Dolžina, ki jo skener izmeri, je enaka prostorski krivulji, ki jo lahko v vertikalni ravnini aproksimiramo s krožnim lokom. Krožni lok je s konkavno stranjo obrnjen proti središču Zemlje. Polmer refrakcijskega loka je večji od polmera Zemlje, razmerje med polmeroma definira koeficient refrakcije k . Vrednost koeficienta refrakcije je ugotovljena na osnovi empiričnih raziskav in znaša $k = 0,13$ za naše kraje in valovne dolžine elektrooptičnih razdaljemerov oziroma skenerjev. Za razdalje, ki se lahko pojavijo pri nalogah terestričnega laserskega skeniranja, je vpliv refrakcije manjši od 1 ppm, zato se računanje popravka dolžin zaradi vpliva refrakcije opusti (Kogoj, D., 2002).

Prvi in drugi vpliv atmosfere povzročata sistematične pogreške dolžin, ki vplivajo na merilo merjenih dolžin. Omenjene sistematične pogreške lahko odpravimo z opazovanjem atmosferskih pogojev v času skeniranja.

Temperatura zraka t se v odprtem prostoru, kakor tudi marsikaterem grajenem objektu, porazdeljuje slučajno. Za potrebe odprave pogreška merila dolžin je zato potrebno merjenju temperature posvetiti več pozornosti. Temperaturo je potrebno pri daljših razdaljah meriti na stojišču in na mestu odboja žarka. V podzemni jami je seveda temperatura bolj konstantna, zato merjenje temperature na mestu stojišča zadostuje.

Zračni tlak p se na nekem območju in v času ne spreminja tako naglo, zato zadostuje ena meritev tlaka na stojišču.

Delni tlak vodne pare e izračunamo iz relativne vlažnosti η , ki predstavlja razmerje med delnim in nasičenim tlakom vodne pare. Relativna vlažnost se v kraju in času ne spreminja prehitro, zato bi zadostovala ena meritev te količine na območju stojišča. Ker pa je vpliv delnega tlaka vodne pare na vrednost lomnega količnika zelo majhen in znaša manj kot 1 ppm (Kogoj, D., 2002), ga lahko pri odpravljanju pogreškov, s katerimi so obremenjene dolžine pridobljene s terestričnim skenerjem, zanemarimo.

Spremembo dolžine, v odvisnosti od sprememb meteoroloških parametrov, izrazimo z diferencialom (Kogoj, D., 2002) (velja za valovno dolžino infrardeče svetlobe $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$):

$$dD = -0,36dp + 0,95de + 0,05de \cdot 10^{-6} \cdot D. \quad (11)$$

Iz enačbe lahko vidimo, da posamezna sprememba: 4 hPa (= 3 torr) zračnega tlaka, ali 1°C suhe temperature, ali 26,7 hPa (= 20 torr) delnega tlaka vodne pare povzroči relativno spremembo vrednosti merjene dolžine 1 ppm.

Opazovane atmosferske količine vnesemo v računalnik, opremljen s programom za krmiljenje skenerja in obdelavo zajetih podatkov. Omenjeni program popravi izmerjene dolžine. Če je projekt skeniranja v časovnem smislu in številu stojišč majhen, vnesemo opazovane atmosferske parametre v program tako, da se vse izmerjene dolžine v okviru projekta popravijo naenkrat. Pri obsežnejših projektih pa takšen način odpravljanja pogreškov dolžin zaradi vpliva atmosfere ni primeren zaradi prevelikih sprememb atmosfere med potekom skeniranja. Ustrezen program za obdelavo podatkov skeniranja mora omogočati tudi vnos

opazovanih atmosferskih parametrov in odpravo pogreška dolžin za vsako posamezno stojišče posebej.

3.1.1.2.2 Natančnost merjenja dolžin z impulznim skenerjem

Natančnost merjenja dolžin z impulznim skenerjem izpeljemo iz enačbe dolžine (Kogoj, D., 2002):

$$D = \frac{c_0}{2n} \Delta t + k_a, \quad (12)$$

$$\Delta t = NT + T_1 - T_0 = NT + \Delta T. \quad (13)$$

kjer je k_a adicijski pogrešek, c_0 hitrost svetlobe v vakuumu in n lomni količnik nosilnega valovanja. V enačbi (13) pomeni Δt pretečen čas med trenutkom oddaje in sprejema impulza, N število taktov in ΔT trajanje enega takta.

Enačbo 12 odvedemo po vseh spremenljivkah in dobimo:

$$\sigma_D = \sqrt{\left(\frac{\sigma_T}{T} D\right)^2 + \sigma_n D^2 + \sigma_{\Delta T}^2 + \sigma_{k_a}^2}. \quad (14)$$

Pogreška, ki sta neodvisna od velikosti dolžine, sta ločljivost merjenja dela takta $\sigma_{\Delta T}$ in pogrešek adicijske konstante σ_{k_a} . Instrumentalni pogrešek adicijske konstante σ_{k_a} se imenuje tudi pogrešek ničelne točke in je vsota ekscentricitet skenerja in reflektorja oziroma odbojne ploskve (v primeru tarč, s katerimi signaliziramo vezne ali oslonilne točke). Pogreška $\sigma_{\Delta T}$ in σ_{k_a} lahko znašata vsak po nekaj milimetrov. Pogreška, ki vplivata na merilo izmerjene dolžine D , sta pogrešek frekvence takta σ_T in pogrešek določitve lomnega količnika σ_n . Pogreška σ_T in σ_n lahko znašata največ do nekaj ppm. Vsekakor pa je potrebno upoštevati tudi sorazmerno velika vpliva učinka robov (poglavje 3.1.1.4) in odbojnosti površja (3.1.1.5) na merjenje dolžine D .

3.1.1.2.3 Natančnost merjenja dolžin s faznim skenerjem

Natančnost merjenja dolžin s faznim skenerjem lahko izpeljemo iz enačbe dolžine (Kogoj, D., 2002):

$$D = NU + R + k_a, \quad (15)$$

$$U = \frac{c_0}{2nf_M} \quad (16)$$

kjer je k_a adicijski pogrešek, c_0 hitrost svetlobe v vakuumu in n lomni količnik nosilnega valovanja.

Enačbo 15 odvedemo po vseh spremenljivkah; predpostavimo, da $n \approx 1$, in dobimo:

$$\sigma_D = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{f_M}}{f_M} D\right)^2 + \sigma_n D^2 + \sigma_R^2 + \sigma_{k_a}^2} \quad (17)$$

Pogreška, ki sta neodvisna od velikosti dolžine, sta ciklični pogrešek faze σ_R in pogrešek adicijske konstante σ_{k_a} . Podobno, kot pri impulznih skenerjih, pogreška σ_R in σ_{k_a} v najslabšem primeru lahko znašata tudi več milimetrov. Pogreška, ki vplivata na merilo izmerjene dolžine D , sta pogrešek modulacijske frekvence σ_{f_M} in pogrešek določitve lomnega količnika σ_n . Pogreška σ_{f_M} in σ_n lahko znašata največ do nekaj ppm. Podobno kot pri impulznih skenerjih je potrebno biti pozoren še na učinek robov in vpliv odbojnosti površja.

3.1.1.2.4 Skupna natančnost merjenja dolžin

Natančnost merjenja dolžin s skenerjem definirata konstantni delni standardni odklon σ_{mm} in multiplikacijski delni standardni odklon σ_{ppm} (Kogoj, D., 2002). Na standardni odklon izmerjene dolžine različno vplivata; delni standardni odklon σ_{mm} ima relativno največji vpliv pri kratkih razdaljah D , medtem ko ima delni standardni odklon σ_{ppm} relativno največji vpliv pri dolgih razdaljah. Ker so naloge, pri katerih uporabljamo laserski skener, v večini primerov zasnovane tako, da se objekti nahajajo na kratkih oddaljenostih od stojišča inštrumenta (največ do nekaj 100 m), je bolj pomembno poznavanje vpliva parametra σ_{mm} .

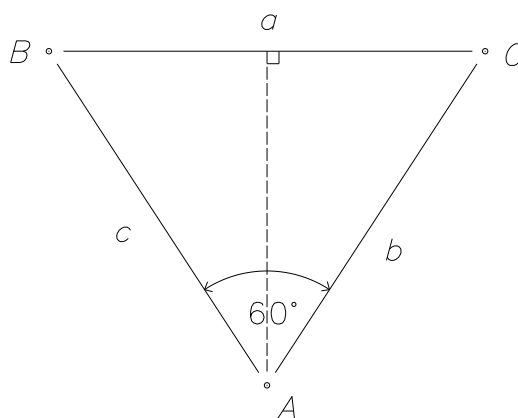
Skupni standardni odklon izmerjene dolžine izračunamo:

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_{mm}^2 + \sigma_{ppm}^2 D^2} \quad (18)$$

3.1.1.2.5 Praktični preizkus skenerjev, ki so ga opravili na Inštitutu i3mainz

Laserski skenerji, ki jih lahko razvrstimo v razred dolgega dosega, za razdalje do 100 m kažejo enako natančnost modeliranih objektov. Natančnost triangulacijskih skenerjev pa se zmanjšuje s kvadratom razdalje med skenerjem in predmetom, kot je bilo prikazano že v poglavju 2.3.

Pogreške v merjenju dolžin lahko opazujemo, ko s skenerjem skeniramo v smeri laserskega žarka predmete na znani razdalji. Če skenerji niso postavljeni na dano referenčno točko (npr. s prisilnim centriranjem), je edino mogoče meriti dolžinske razlike med tarčami. Ravnske, valjčne ali krogelne tarče uporabimo le, če so seveda njihove natančne lokacije izmerjene z inštrumenti in metodami bolj natančnimi kot lasersko skeniranje. Sistematični pogrešek merila izmerjenih dolžin je prisoten v vsaki s skenerjem izmerjeni dolžini. Kot je opisano v poglavjih 3.1.1.2.2 in 3.1.1.2.3, je pogrešek merila odvisen od pogreška frekvence takta ali pogreška modulacijske frekvence in pogreška lomnega količnika. Vpliv pogreška lomnega količnika na meritev dolžin lahko odpravimo z upoštevanjem atmosferskih parametrov. Konstantni del sistematičnega pogreška merjenja dolžin k_a , kot vsote adicijske konstante ter pogreškov zaradi učinka robov in odbojnosti materialov, se odšteje, ko določimo dolžinsko razliko Δd med tarčama, ki ležita (skoraj) na isti premici kot skener. Omenjeni konstantni pogrešek merjenja dolžin vpliva na razdalje med dvema točkama, ki sta locirani v različnih smereh glede na skener. Npr., če sta obe opazovani točki locirani na isti dolžini od skenerja in med seboj oklepata Hz kot 60° , bo vpliv konstantnega pogreška k_a na dolžino a med točkama B in C enak konstantnemu pogrešku k_a , ki obremenjuje razdalji c in b (Slika 49).



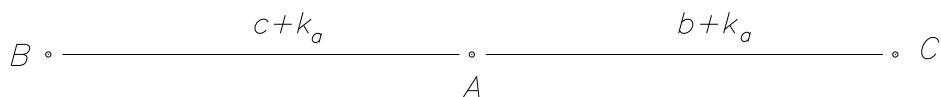
Slika 49: Pogrešek dolžine a zaradi pogreška konstantnega dela k_a v primeru 60° kota med točkama skeniranja

A - točka stojišča,

B, C - točki v oblaku točk.

$$\begin{aligned}
 \overline{AB} &= \overline{AC} \\
 \overline{AB} &= c + k_a \\
 \overline{AC} &= b + k_a \\
 \frac{a}{2} &= \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \overline{AB} \\
 \frac{a}{2} &= \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \overline{AC} \\
 a &= 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \overline{AB} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \overline{AC} \\
 a &= c + k_a = b + k_a
 \end{aligned} \tag{19}$$

Če pa npr. oklepata smeri proti točkam na isti razdalji kot 180° , potem je pogrešek zaradi konstantnega dela k_a , s katerim je obremenjena razdalja med opazovanima točkama B in C, enak dvakratnemu konstantnemu pogrešku k_a (Slika 50).



Slika 50: Pogrešek dolžine zaradi konstantnega dela k_a v primeru, ko sta točki skeniranja nasproti si ležeči

$$\begin{aligned}
 \overline{AB} &= \overline{AC} \\
 \overline{AB} &= c + k_a \\
 \overline{AC} &= b + k_a \\
 \overline{BC} &= c + b + 2k_a
 \end{aligned} \tag{20}$$

Konstantni sistematični pogrešek k_a je poleg (konstantne) ekscentricitete skenerja odvisen tudi od vrste odbojne površine. Različni materiali, iz katerih so sestavljene odbojne površine, in različni vpadni koti laserskega žarka na odbojno površino, povzročijo vsakič drugačen konstantni pogrešek merjenja dolžin k_a . Več o vplivu odbojnosti v poglavju 3.1.1.5. Težave

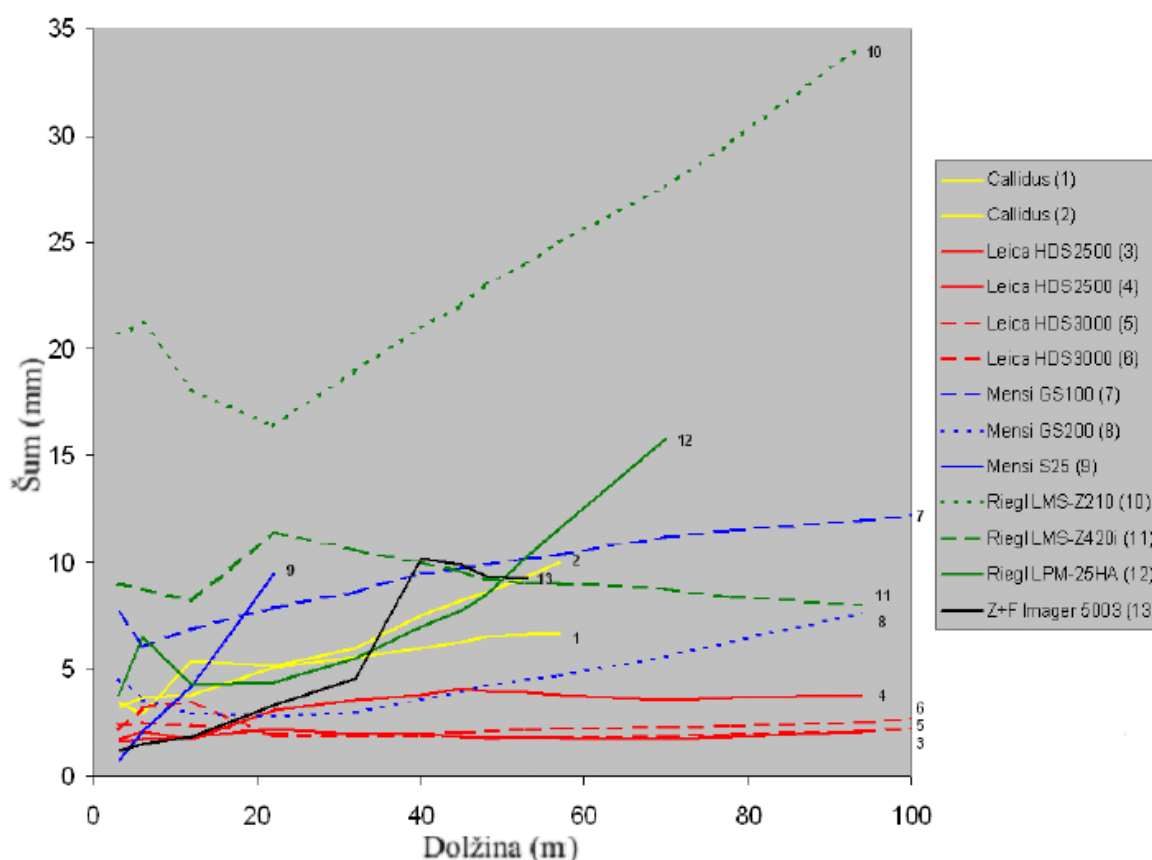
pri ugotavljanju konstantnega pogreška k_a so poglavitni razlog, zakaj splošno uveljavljen postopek kalibriranja in certificiranja laserskih skenerjev ni možen, oziroma, parametri kalibracije veljajo samo za predmete iz materialov, ki imajo zelo podobne reflektivne lastnosti kot tarče, na katerih so se ti parametri določili.

Preglednica 4. Razlike med znanimi in iz podatkov skeniranja pridobljenimi prostorskimi dolžinskimi razlikami med dvema kroglastima tarčama (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 13 str.). Opombe - standardne deviacije v mm so pridobljene iz vsaj 12 neodvisnih dolžinskih razlik na bližnjih oddaljenostih tarč in vsaj 14 neodvisnih dolžinskih razlik na večjih oddaljenostih tarč.

- a. Modeliranje krogel ni možno zaradi omejene kotne ločljivosti inštrumenta.
- b. Toda 0,2 mm pri 4 m in 0,5 mm pri 6 m.
- c. Pri 22 m.
- d. Samo 4 skenogrami pri večjih oddaljenostih tarč.
- e. Samo 3 skenogrami pri večjih oddaljenostih tarč.
- f. Samo 2 skenograma pri večjih oddaljenostih tarč:

	Std. dev. za $d < 10$ m [mm]	Std. dev. za $d[10,50]$ m [mm]	Največja absolutna razlika [mm]
Callidus Precision Systems (1)	1.5	- ^a	2.6
Callidus Precision Systems (2)	2.8	- ^a	5.9
Leica HDS2500 (1)	0.6	1.1	2.3
Leica HDS2500 (2)	0.4	0.5	0.9
Leica HDS3000 (1)	0.8	1.0	2.0
Leica HDS3000 (2)	1.2	0.7	2.3
Mensi S25	1.4 ^b	4.6 ^c	7.7 ^c
Mensi GS100	2.6	2.0	8.2
Mensi GS200	1.1	1.1	2.7
Riegl LMS-Z210	19.7	- ^a	40.4
Riegl LMS-Z420i	2.6	2.7 ^d	5.9
Riegl LPM-25HA	3.5	5.7 ^e	6.4
Zoller+Froehlich Imager 5003	1.6	0.7 ^f	12.3

Praktični preizkus na omenjenem inštitutu je potekal tako, da so na postavitvi (Slika 45) statistično analizirali 2×6 neodvisnih dolžinskih razlik, na približni oddaljenosti od skenerja za 60 m. Druga postavitev je bila zasnovana tako, da so pridobili 4 neodvisne dolžinske razlike na srednjih razdaljah, približno 30 m. Tarče so pri tej inštalaciji krogle. Tretji preizkus je temeljil na interferenčnem komparatorju, kjer so pridobili 3 neodvisne dolžinske razlike iz postavitev tarče na oddaljenosti od 3 do 8 m od skenerja. Ker vsi trije navedeni preizkusi niso mogli zaznati pogreška adicijske konstante, se je ta konstanta izračunala iz dolžinskih razlik, pridobljenih s testom, ki ga kaže Slika 46. Rezultati preizkusov so navedeni v Preglednici 4.



Slika 51: Standardna deviacija merjenja dolžin pri določeni oddaljenosti od skenerja.

Standardna deviacija je določena na osnovi odstopanj posameznih točk od referenčne ravne ploskve. Ploskev je sive barve (40% odbojnost). Številke ob grafih pomenijo posamezne modele skenerjev (tabela desno). (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 11 str.)

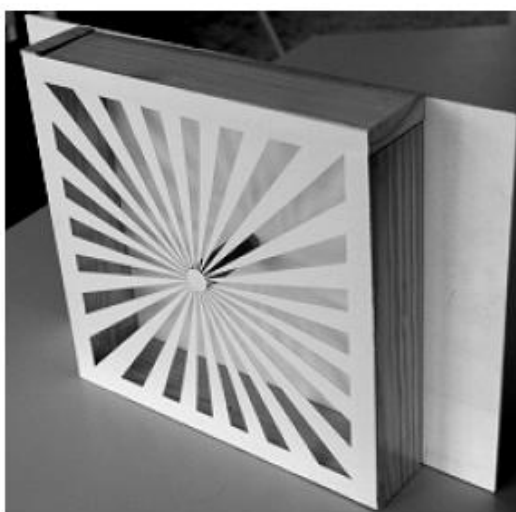
Zelo hiter in enostaven preizkus šuma (slučajni pogrešek merjenja dolžin - natančnost) merjenja dolžin so izvedli tako, da so skenirali ravno ploščo pravokotno na smer laserskega žarka. Plošče so bile pri preizkusu iz belega materiala (80% reflektivnost), sivega (40%

reflektivnost) in črnega (8% reflektivnost). Standardno deviacijo dolžin so ugotovili iz odstopanj oblaka točk od referenčne plošče. S testom pa so kot dodatni rezultat pridobili tudi informacije o tem, ali je natančnost dolžine odvisna od določene ločljivosti skeniranja. Preizkušnja šuma je pokazala rezultate, ki jih prikazuje Slika 51.

3.1.1.3 Ločljivost

Ločljivost je odvisna od kotnega inkrementa po H_z in V smeri in velikosti točke na odbojni ploskvi. Velikost točke je odvisna od divergence laserskega žarka in razdalje med skenerjem in ploskvijo predmeta. Laserski žarek se pri prehodu iz optične odprtine skenerja odkloni oz. razprši, tako da zunanje ploskve žarka pri optični odprtini oklepajo majhen kot β , kot je bilo že prikazano v poglavju 2.1.1.


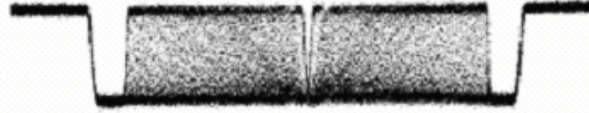

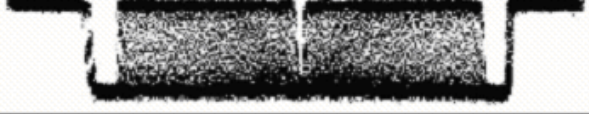










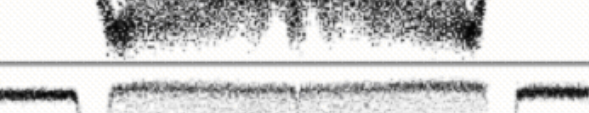

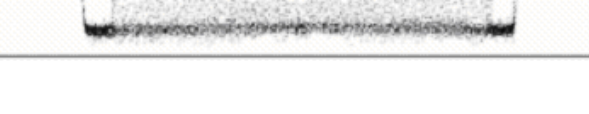

Preizkus praktične ločljivosti, ki so ga izvedli na Inštitutu i3mainz, pa je potekal tako, da so izdelali kvadratasto škatlo, velikosti 300 mm \times 300 mm in globine 55 mm (Slika 52). V sprednjo ploskev škatle so vrezane trikotne reže, ki so na obodni strani široke 30 mm. Škatlo so potem skenirali z vsakim od preizkušanih inštrumentov. Če ima inštrument dovolj visoko ločljivost (pri najmanjšem možnem kotnem inkrementu), potem se žarek odbije tudi od zadnje ploskve škatle. Pri zelo visoki ločljivosti žarek doseže zadnjo ploskev vse do vrha trikotne reže v središču tarče. Rezultati preizkušnje so prikazani v preglednicah št. 5 in 6.














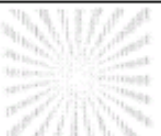
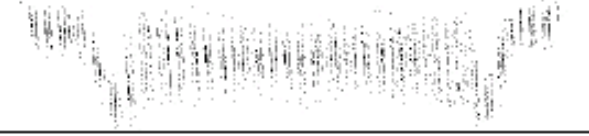



Slika 52: Tarča z režami za preizkušanje ločljivosti (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 8 str.)

Preglednica 5. Rezultati testa ločljivosti pri 6 m oddaljenosti tarče (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 14 str.).

Opombe - levo: prerez skozi skenogram škatle; desno: točke na zadnji plošči tarče:

Callidus		<i>ni odboja od zadnje plošče</i>
Leica HDS 2500		
Leica HDS 3000		
Mensi S25		
Mensi GS100		
Mensi GS200		
Riegl LMS-Z210		<i>zelo slaba kakovost</i>
Riegl LMS-Z420i		
Riegl LPM-25HA		
Z+F Imager 5003		

Preglednica 6. Rezultati testa ločljivosti pri 22 m oddaljenosti tarče (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 15 str.):

Callidus	<i>gostota točk je premajhna, da bi lahko razločili predmet</i>	
Leica HDS 3500		
Leica HDS 3000		
Mensi S25		
Mensi GS100		
Mensi GS200		
Riegl LMS-Z210	<i>gostota točk je premajhna, da bi lahko razločili predmet</i>	
Riegl LMS-Z420i		
Riegl LPM-25HA		
Z+F Imager 5003		

Iz rezultatov preizkusov sklepam, da ima ločljivost specifičen vpliv na natančnost modeliranja skeniranega predmeta. Če npr. skeniramo geometrično enostaven objekt brez detajlov oziroma skeniramo za potrebe nalog, kjer ni potrebna visoka natančnost, lahko tudi s slabšo

ločljivostjo pridobimo dovolj kakovostne skenograme, na podlagi katerih lahko dovolj natančno modeliramo predmete. V primeru geometrično kompleksnejših predmetov z več detajli pa je potrebno nastaviti ustrezno visoko ločljivost oziroma izbrati primeren skener. Posamezna točka v oblaku točk pa je lahko določena z isto natančnostjo, bodisi pri nizki ali visoki ločljivosti.

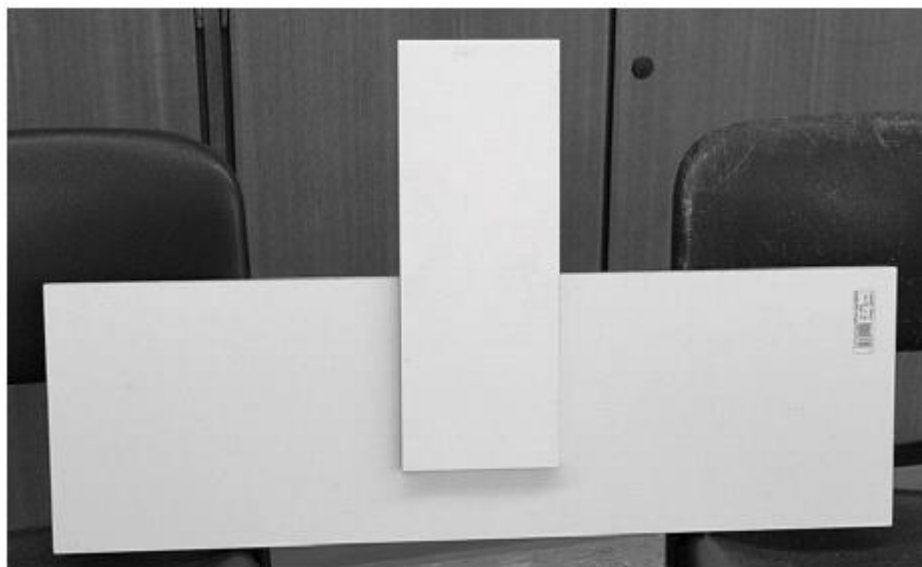
3.1.1.4. Učinek robov

Oddani laserski žarek se na površje skeniranega predmeta vedno projicira kot krog ali elipsa določenega premera, kar lahko poimenujemo svetlobna pika. Ko žarek zadene rob predmeta, se samo del žarka odbije nazaj k skenerju, kot je bilo prikazano že v poglavju 2.1.1, preostali del žarka pa se odbije od ploskve za predmetom, od ploskve v bližini predmeta, ali pa sploh ne, če v ozadju ni nobenega predmeta. Vse vrste skenerjev v skenogramih ustvarijo množico napačnih točk v soseščini robov. Napačne točke ali t. i. fantomske točke se pojavijo običajno za robom predmeta, gledano v smeri od inštrumenta do predmeta (Preglednica 7). Ta pogrešek v dolžini lahko variira od samo delčka milimetra do vrednosti nekaj decimetrov. Za nameček je model skeniranega predmeta večji kot v realnosti, ker skener registrira točko vedno za kotno pozicijo osi žarka, tudi če samo del svetlobne pike leži na površju predmeta. Položajno napačne točke so v oblaku točk neizogibne, saj svetlobna pika nikoli ni čista geometrijska točka. Iz tega lahko sklepamo, da laserji, ki bolj fokusirajo žarek, lahko dosežejo večjo ločljivost in predvsem položajno natančnost točk. Ko uporabimo standardno tarčo z različnimi tipi robov, lahko preučujemo in primerjamo različne tipe skenerjev. Sistematični učinek lahko opazujemo, ko skeniramo valjčne ali krogelne tarče. V tem primeru, še posebej v obrobni delih oblega predmeta, center odbojne površine ni enak centru oddanega žarka.

Na Inštitutu i3mainz je bila ena izmed preizkuševalni inštalacij za ugotavljanje učinka robov tudi deska (Slika 53). Ploščo so namestili tako, da je v ozadju ni nobenih predmetov. Torej, na merjenje zunanjih robov niso vplivali objekti za ploščo, medtem ko so sprednji robovi manjše plošče, fiksirane na večjo ploščo, simulirali učinek odboja od dveh različnih objektov. Oceno pogreškov so izvedli na osnovi izrisa oblaka točk te plošče (Slika 54).

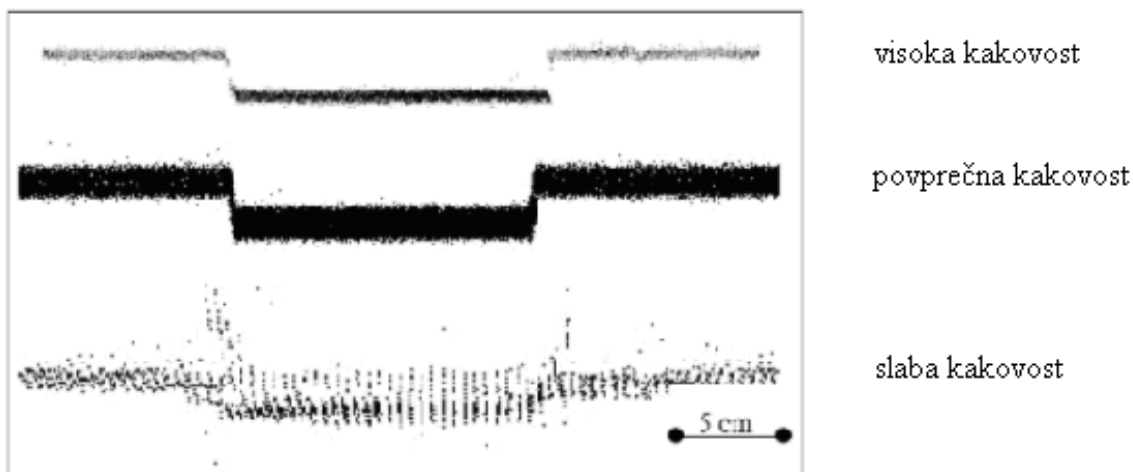
Druga preizkusna inštalacija je valj. Skenirali so vertikalno cev s premerom 200 mm z razdalje 3 m. Valj so nato modelirali iz podatkov oblaka točk, nato pa model primerjali z

znano mero. Za potrebe grafičnega prikaza učinka robov so natisnili oblak točk in ga primerjali z znanim premerom. Žal pa rezultatov preizkušnje niso objavili v publikaciji.



Slika 53: Plošča, uporabljena za preučevanje učinka robov (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 9 str.)

Rezultati inštalacije za odkrivanje robov (Slika 53) so prikazani v Preglednici 7. Kakovost robov lahko ocenimo iz oblaka točk, kot prikazuje Slika 54.



Slika 54: Značilen primer za kakovost določitve robov za inštrumente, ki jih prikazuje Preglednica št. 7. Zgoraj: visoka kakovost, ki ni bila dosežena z nobenim skenerjem. Center: povprečna kakovost. Spodaj: nizka kakovost (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 16 str.)

Preglednica 7. Ovrednotenje kakovosti določitve robov (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 16 str.):

	Kakovost robov
Callidus Precision Systems	slaba
Leica HDS2500	popvredna
Leica HDS3000	popvredna
Mensi S25	popvredna
Mensi GS100	popvredna
Mensi GS200	popvredna
Riegl LMS-Z210	slaba
Riegl LMS-Z420i	popvredna
Riegl LPM-25HA	popvredna
Zoller+Froehlich Imager 5003	slaba

3.1.1.5 Vpliv odbojnosti površja objektov

Odbojnost je delež oddanega valovanja, v primeru laserskega skeniranja laserske svetlobe, ki jo odbije neko površje. V splošnem jo moramo razumeti kot funkcijo vpadnega kota valovanja glede na normalo na površje, grobosti ali gladkosti površine glede na valovno dolžino oddanega valovanja, in lastnosti odbojnega materiala, kot so dielektričnost, magnetna permeabilnost in električna prevodnost (Harvey, B. R., Lichti, D. D., 2002). Površja, v splošnem, glede na kot odboja sevanja, razdelimo na difuzna, ki sevanje razpršijo, in zrcalna, ki ga odbijejo po zakonu o odboju valovanja.

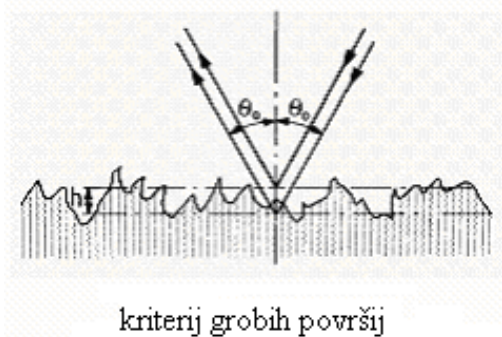
Zrcalna odbojnost se pojavi takrat, ko je površje odbojne površine gladko, glede na valovno dolžino (Slika 55). Koeficient refleksije r je definiran kot:

$$r = \frac{E_r}{E_i}, \quad (21)$$

kjer je:

- E_i amplituda vpadnega elektro-magnetnega valovanja,
- E_r amplituda odbitega elektro-magnetnega valovanja.

Večina površin je v primerjavi z valovno dolžino laserja ($\approx 1 \mu\text{m}$) difuznih, razen gladine stoječe vode, poliranih materialov in zrcal.



Slika 55: Razliko med difuznimi in zrcalnimi površji (Wagner, W., 2005: 23 str.)

V splošnem velja, da je natančnost izmerjene dolžine odvisna od vpadnega kota oddanega valovanja, vrste materiala in barve podlage (Preglednica 8). Natančnost je povezana z jakostjo signala. Natančnost je večja pri difuznih in svetlejših površinah ter vpadnem kotu, ki je čim bližje normalni, saj se jakost odbitega signala večja. Zrcalne površine predstavljajo problem pri skeniranju; ker se vpadli žarek odbija zrcalno, senzor skenerja ne zazna (skoraj) nobenega odbitega signala. Dodaten problem pri difuznih površinah pa predstavlja dejstvo, da se jakost odboja na teh površinah spreminja, s tem pa se spreminja tudi natančnost izmerjene dolžine (Kogoj, D., 2002).

Z eksperimenti je bilo ugotovljeno, da ploskve različnih odbojnosti povzročajo sistematične pogreške merjenja dolžin. Za nekatere materiale so lahko ti pogreški nekajkrat večji od standardne deviacije enega merjenja dolžine. Nekateri skenerji, ki zagotavljajo neko vrsto prilagoditve oddajne odprtine, prikažejo pogrešena opazovanja prvih točk potem, ko je laserski žarek prvič zadel ploskev, ki je po svojih odbojnih lastnostih bistveno drugačna od predhodne. V takšnem primeru skener izmeri dolžino brez sistematičnega pogreška šele, ko je že izmeril nekaj (pogrešenih) točk. Pri objektih, ki jih sestavljajo različni materiali ali so različno barvani ali prekriti z različnimi površinami, lahko vedno pričakujemo opazne pogreške dolžin. Tem pogreškom se lahko ognemo le, če je objekt začasno prekrit ali premazan z enotnim materialom, kar pa lahko storimo le redkokdaj.

Na Inštitutu i3mainz so preizkusi potekali tako, da so skenirali desko, ki predstavlja okvir, v centru te deske pa sta nalepljeni ploskvi kvadratne oblike, sestavljeni iz drugačnega materiala kot nosilna plošča (Slika 56).

Preglednica 8. Odbojnosti nekaterih materialov in barv pri valovni dolžini $\lambda = 1 \mu\text{m}$ (bližnja infra rdeča):

površje materiala	količnik reflektivnost pri $\lambda = 1 \mu\text{m}$ za normalni vpadni kot
aluminijasta folija	0,8 - 0,9
asfalt	0,2
cement	0,4
krom	0,6
baker	0,9
platina	0,45 - 0,60
peščena zemlja	
- namočena	0,15
- osušena	0,30
mulj, osušen	0,6
sneg	0,25
nerjaveče jeklo	0,2 - 0,6
žgana glina	0,3
voda	
normalni vpadni kot	< 0,01
skoraj vodoravni vpadni kot	do 0,3
list belega hrasta	0,65
javorjev list	0,4
barvni premaz v spreju	
motni beli	0,8 - 0,9
motni sivi	0,4
motni črni	0,08

Nosilna plošča in ploskvi, ki sta nameščeni nanjo, sta se modelirali vsaka posebej, iz modela pa so se izključili tudi robovi. Razlika dolžin med tremi ploskvami je pokazatelj pogreška

vpliva odbojnosti različnih materialov in barv. Med preizkusom so uporabili naslednje barve in materiale:

- beli moten sprej, 90% odbojnost,
- beli moten sprej, 80% odbojnost,
- sivi moten sprej, 40% odbojnost,
- črni moten sprej, 8% odbojnost,
- sprej kovinske barve,
- polirano aluminijasto folijo,
- modro retro folijo, kot se uporablja pri tarčah znamke Leica.



Slika 56: Deska z belim okvirjem in različnima slojema (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 10 str.)

Ker so opazili velika odstopanja na oranžnih ploskvah prometnega stožca, ki se uporablja za signaliziranje, so dodali ta predmet v postopek testiranja. Podobna odstopanja se pojavijo tudi med skeniranjem merskih tarč, kjer se izmenjujeta bela in oranžna ali bela in rdeča.

Rezultati preizkušanj so prikazani v Preglednici 9. Čeprav za večino inštrumentov pridobimo zanesljive razdalje za primer ploskev pod normalnim kotom, lahko nekateri materiali povzročijo sistematične pogoške. Poševni vpadni koti niso bili preizkušeni in lahko povzročijo drugačna odstopanja. Variacije nakazujejo, da ni možno zagotoviti splošnih kalibracijskih parametrov za skener.

Preglednica 9: Popravek razdalje v mm zaradi različnih materialov površin (Böhler, W., Marbs, A., 2005: 17 str.).

Opombe - pozitivni znak pomeni, da je razdalja izmerjena prekratko glede na belo površje. a. Skener ni zaznal nobene točke na tem površju:

	beli 90%	beli 80%	beli 40%	črni 8%	kovi nski	alu folija	modra folija	oranžni stožec
Callidus (1)	0	0	0	0	0	0..-100	+7	-10
Callidus (2)	0	0	+4	+3	0..-10	0..-15	+5	-20
Leica HDS2500 (1)	0	0	0	0	0	0..+10	+22	-40
Leica HDS2500 (2)	0	0	0	0	0	0	+17	-70
Leica HDS3000 (1)	0	0	0	0	0	0..+15	+3	-25
Leica HDS3000 (2)	0	0	0	0	0	0	+3	-7
Mensi S25	0	0	0	0	0	0	0	0
Mensi GS100	0	0	0	+8	0	0	n.a. ^a	0
Mensi GS200	0	0	0	0	0	0	n.a. ^a	0
Riegl LMS-Z210	0	0	+13	+3	0..-100	0..-250	0	-100
Riegl LMS-Z420i	0	0	0	0	0	0	0	-20
Riegl LPM-25HA	0	0	+4	+5	0	0	-6	-20
Zoller+Froehlich	0	0	0	0	0	0..+30	-18m	-20

Kot zanimivost navajam rezultate eksperimenta, ki sta ga objavila Harvey in Lichti (2002). Na bližnji (3 m) in srednji razdalji (53 m) sta preučevala lastnosti skeniranja s skenerjem Cyrax 2400 za različne naravne in umetne materiale. To je skener dolgega dosega, ki deluje na principu impulznega zajemanja točk. Laserski žarek emitira vidno svetlobo z valovno dolžino zelene barve $\lambda = 532$ nm. Kot tarče so nastopali različni naravni kamni, kot so beli granit, črni premog, apnenec, bazalt, laterit in beli kremen, gradbeni materiali, npr. beton, rdeča opeka in apnenčev blok, in različni retro reflektivni predmeti: samolepilne tarče za signaliziranje veznih točk, klasični reflektor za elektrooptične razdaljemere ter rdeče in belo mačje oko. Naravni kamni so bili obžagani, tako da je bila stran, ki se je skenirala, skoraj popolnoma ravna. Vsi testni predmeti so bili pravokotni na vizuro in z ravno ploskvijo usmerjeni proti skenerju. S takšno postavitvijo tarč sta eksperimentatorja zagotovila normalni vpadni kot impulza in posledično teoretično največjo možno odbojnost. Vsi materiali so se skenirali dvakrat: najprej kot suhi in takoj zatem kot zmočeni. Ločljivost skenerja je bila v vsakem primeru nastavljena na isto vrednost, in sicer 2 mm po Hz in V smeri za vsako razdaljo. Atmosferski pogoji so bili med potekom eksperimenta približno isti (vpliv spremembe atmosfere med testom je zanemarljiv). Vsi predmeti so bili postavljeni na isti dve oddaljenosti

od skenerja. Predmet preučevanja je bil oblak točk izključno samo ravnih ploskev skeniranih predmetov. Robovi so bili odstranjeni. Eksperimentatorja sta analizirala razpršenost oblaka točk v smeri merjenja dolžine (t. i. šum) in stopnjo intenzitete odboja. Ugotovila sta, da na merjenje dolžin statistično ne vpliva vrsta materiala (razlike v povprečni dolžini za posamezni material so manjše od natančnosti izmere posamezne dolžine v oblaku točk). Opazila sta le razlike v merjenju dolžin, če je bil predmet suh ali moker toda odstopanje po dolžini je bilo manjše od natančnosti določitve dolžine posamezne točke. K tako dobremu rezultatu naj bi po mnenju eksperimentatorjev pripomogla elektronika skenerja, ki po amplitudi regulira povratni impulz. Analiza opazovanj je tudi pokazala, da se zaradi vodnega sloja pri mokrih površinah intenziteta odboja poveča. Na splošno, pa se z oddaljenostjo predmeta od skenerja intenziteta odboja zmanjšuje, in sicer na skoraj pol manj na razdalji 53 m, v primerjavi s 3 m. Zaradi retro reflektivnosti navadni reflektorji za elektrooptične razdaljemere niso primerni za delo s skenerjem, saj je prišlo med skeniranjem do zasičenja (koeficient $r = 1$) sprejemne elektronike z močnim odbitim signalom. Tovrstni problem se je pojavil, tako na razdalji 3 m kot na 53 m.

3.1.1.6 Vpliv interferenčnega sevanja

Laserji delujejo v zelo omejenem frekvenčnem pasu. Zato laserski skenerji filtrirajo prejete signale preden jih senzorji skenerja ali kamere zaznajo. Če je sevanje, ki ga oddajajo izvori svetlobe v prostoru, kot je na primer sonce ali luči, močno v primerjavi z odbitim laserskim signalom, lahko ambientalno sevanje preide filtre in vpliva na poslabšanje natančnosti rezultatov skeniranja ali pa povsem onemogoči registracijo odbitih signalov.

3.2 Natančnost registracije stojišč

Podatek o natančnosti registracije praviloma pridobimo že iz rezultatov registracije, ki jo izvedemo s k skenerju pripadajočo programsko opremo. Npr. program RiSCAN PRO, proizvajalca Riegl, kot podatek o natančnosti registracije preko veznih točk, izpiše naslednje rezultate o natančnosti:

- standardno deviacijo parametrov 3R prostorske transformacije, pridobljene po metodi najmanjših kvadratov. To so trije parametri translacije Δx , Δy in Δz ter trije parametri rotacije φ , ν in ψ ;

- odstopanja koordinat veznih točk v projektnem koordinatnem sistemu pred registracijo ali transformacijo ter po izvedeni registraciji;
- standardno deviacijo koordinat veznih točk v projektnem koordinatnem sistemu;
- srednje odstopanje koordinat oslonilnih točk v projektnem koordinatnem sistemu od koordinat teh točk v globalnem koordinatnem sistemu.

Za doseganje natančnejših rezultatov registracije je potrebno iz podatkov posameznih stojišč odpraviti tiste sistematične pogoške, ki jih je možno oceniti. Gre predvsem za pogoške merjenja dolžin, ki so odvisni od atmosferskih vplivov (glej poglavje 3.1.1.2.1 Vpliv atmosfere).

3.3 Natančnost 3R modela

Če modeliramo tako, da zgradimo 3R nepravilno triangulacijsko mrežo, ker objekt ni sestavljen iz geometričnih primitivov, oziroma je prekompleksno sestavljen, potem je natančnost modela neposredno odvisna od natančnosti in kakovosti oblaka točk. Večji pogoški v oblaku točk, razpršenost točk, učinek robov, fantomske točke in sence lahko usodno pokvarijo model, še posebej, če gre za objekt, ker so prisotni ostri robovi, z algoritmi za glajenje, pa bi pokvarili model. Za doseganje čim večje natančnosti modela je potrebno poseči po čimbolj natančnem in kakovostnem skenerju.

V primeru, da modeliramo po metodi geometričnih primitivov, večja odstopanja posameznih točk v oblaku točk niso tako usodna, če gre za odstopanja od pogojne geometrične ravnine, kateri poiščemo parametre, na podlagi katerih bomo zgradili model.

4 PRAKTIČNI DEL - SKENIRANJE IN MODELIRANJE ŽELEZNE JAME

Železna jama se nahaja v Občini Domžale, na obrobju naselja Gorjuša, v bližnjem gozdu (glej Sliko 57). Jamo sestavljata dve dvorani (glej Sliko 58), ki sta med seboj povezani z rovom in mostovi, ki so del turističnih poti. Dolžina jame, od vhoda do zadnjega rova v drugi dvorani, je 42 m. Višina večje Druge dvorane je 13 m, širina pa 12 m. Čeprav je Železna jama majhna, so njene drobne oblike pestre. V jami se nahajajo številni žlebiči in kapniki.

Vhod v Železno jamo se nahaja na točki s koordinatami v Gauss-Krügerjevem koordinatnem sistemu in ortometrično nadmorsko višino:

$$Y_{GK} = 472463 \text{ m}$$

$$X_{GK} = 110298 \text{ m}$$

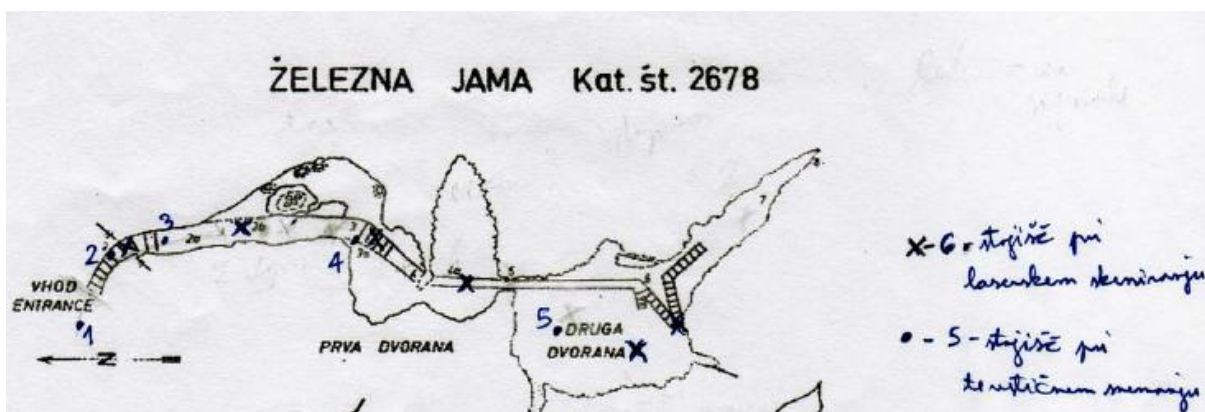
$$H_{ORT} = 325 \text{ m.}$$



Slika 57: Karta prikazuje položaj Železne jame (Atlas Slovenije, 1992: 108 str.)

Prvotni namen skeniranja jame je bil pridobitev podatkov za potrebe izdelave seminarske naloge pri predmetu Kartografija III na Univerzitetnem študiju geodezije na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Sam postopek skeniranja jame sta opravila sodelavca podjetja Geodetski zavod Celje d. d., s službenim inštrumentarijem, to je sistemom Riegl LMS-Z420i, dne 15. 4. 2007. Pri skeniranju jame smo bili prisotni tudi študentje in profesorji Oddelka za geodezijo na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Meritve oslonilnih točk smo izvedli študentje omenjene fakultete z elektronskim tahimetrom, znamke Nikon, modelom DTM-320, z ustreznim priborom. Na dan opravljanja je bilo vreme meritve jasno in toplo, približno 18°C v senci na prostem. Opazovanja atmosferskih parametrov se niso izvajala.

3R model Železne jame, pridobljen iz podatkov skeniranja, je prikazan v prilogah C, D, E, F, G in H.



Slika 58: Skica Železne jame (Bradán, T., Per, J., Peterka, P., Vodišek, D., 2007: 3 str.)

4.1 Sistem Riegl LMS-Z420i

Proizvajalec tega sistema je podjetje Riegl Laser Measurement Systems GmbH, s sedežem v Avstriji (Slika 59).

4.1.1 Tehnične značilnosti skenerja

Po podatkih tehničnih specifikacij, ki so med drugim tudi objavljene na spletu, so temeljne značilnosti skenerja Riegl LMS-Z420i naslednje:

Podatki o razdaljemeru

Varnostni razred laserja razred 1 po mednarodnem standardu IEC 60825-1:2001 (IEC - International Electrotechnical Commission)

Meritveni doseg

Za naravne tarče, $\rho \geq 80\%$ do 1000 m
Za naravne tarče, $\rho \geq 10\%$ do 350 m
Minimalni doseg 2 m
Natančnost $\sigma = \pm 10$ mm na razdalji 50 m
Hitrost meritev do 11000 točk/s ob uporabi oscilirajočega zrcala
do 8000 točk/s ob uporabi vrtečega se zrcala
Valovna dolžina laserja blizu infra rdeče
Divergenca žarka 51,56"

Vertikalno skeniranje

Območje skeniranja od 0° do 80°
Mehanizem skeniranja oscilirajoče/ rotirajoče zrcalo
Hitrost skeniranja od 1 skenogram/s do 20 skenogram/s pri 80° območju skeniranja
Območje kotnega hoda $14,40'' \leq \Delta\theta \leq 12'$
Min. kotna ločljivost 7,20"
Inklinacijski senzor opcijsko
Interni sinhronizacijski časovni merilnik za sinhronizacijo z zunanjim GPS/INS sistemom opcijsko

Horizontalno skeniranje

Območje skeniranja od 0° do 360°
Mehanizem skeniranja rotirajoča optična glava
Hitrost skeniranja od 36"/s do 15°/s
Območje kotnega hoda $14,40'' \leq \Delta\phi \leq 45''$
Min. kotna ločljivost 9,00"

Splošni tehnični podatki

Vmesnik:

za konfiguracijo in izhod podatkov	Ethernet TCP/IP, 10/100 Mbit/s
za konfiguracijo	RS232, 19.2 kBd
za izhod po	ECP standard, paralelni

Napajanje 12 - 28 V DC

Poraba energije normalno 78 W max. 94 W

Poraba toka:

- pri 12 V DC normalno 6,5 A max. 7,8 A

- pri 24 V DC normalno 3,25 A max. 3,9 A

Dimenzije 463 mm × 210 mm

Masa približno 16 kg

Temperaturno območje od 0°C do +40°C (operativno)

od -10°C do +50°C (hranjenje)

Zaščitni razred IP64, odporen proti prahu in pljuskom vode



Slika 59: Riegl LMS-Z420i pri praktičnem delu (Bradán, T., Per, J., Peterka, P., Vodišek, D.,
2007: 6 str.)

4.1.2 Natančnost skenerja pod Rieglovimi testnimi pogoji

Pri natančnosti je v brošuri omenjeno samo to, da gre za natančnost, ugotovljeno v pogojih, ki jih imajo v Rieglovih laboratorijih. Nisem uspel izvedeti, kakšni so ti pogoji; v brošuri pa ni navedeno, ali gre samo za natančnost v smeri merjenja dolžin (t. i. šum), ali pa gre za kombiniran vpliv natančnosti merjenja dolžin in kotov.

4.1.3 Program RiSCAN PRO

Program RiSCAN PRO je del sistema Riegl LMS-Z420i. Naložen na zmogljiv prenosni računalnik omogoča krmiljenje skenerja in digitalnega fotoaparata med zajemom podatkov, pregled in ponazoritev zajetih podatkov po končanem zajemu in registracijo skenogramov v enoten oblak točk. S programom je možno tudi obdelovati zajete podatke, kot npr. razredčiti oblak točk, modelirati, izdelovati ortofoto načrte in meriti razdalje med točkami, kote med točkami, volumne zaprtih ploskev in površine ploskev. Omogočena je tudi izmenjava podatkov z drugimi programi in sistemi.

4.1.3.1 Koordinatni sistemi v programu RiSCAN PRO

V omenjenem programu obstajajo štiri vrste koordinatnih sistemov. Termini v slovenščini so prevzeti po Mavsar, P., 2006.

1. Skenerjev lastni koordinatni sistem (SLKS) oz. angl. Scanner's Own Coordinate System (SOCS) je koordinatni sistem, v katerem skener pridobi surove podatke.
2. Projektni koordinatni sistem (PRKS) oz. angl. Project Coordinate System (PRCS) je sistem, ki ga definira uporabnik, kot na primer že obstoječi lokalni koordinatni sistem na območju stojišča. RiSCAN PRO zahteva, da so vse koordinate v tem sistemu zapisane z največ 7-mestnimi števili. Tako, npr., če projekt zahteva mm natančnost, naj bi bile največje koordinate manjše od 1 km.
3. Globalni koordinatni sistem (GLKS) oz. angl. Global Coordinate System (GLCS) je sistem, v katerega nato transformiramo pridobljene točke v projektnem koordinatnem sistemu. Običajno koordinate v globalnem koordinatnem sistemu vsebujejo zelo velika števila.

4. Koordinatni sistem fotoaparata (KSF) oz. angl. Camera Coordinate System (CMCS) je sistem fotoaparata, ki je po izbiri lahko nameščen na temenu skenerja. Fotoaparat mora zagotavljati podobe visoke ločljivosti.

Pri skoraj vseh projektih poteka zajem podatkov z več različnih stojišč. Pri skeniranju stremimo za tem, da pridobimo skenogram površja objekta brez lukenj ali senc. Preden pričnemo z novim projektom, to je novim deloviščem, je potrebno nastaviti prvo (novo) stojišče (prednastavljeno »ScanPos01«). Surovi podatki skeniranja so povezani z nastavitvami določenega stojišča. Zajeti podatki s stojišča so definirani v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu. K definiciji stojišča sodi orientacija in položaj skenerjevega lastnega koordinatnega sistema, glede na projektni koordinatni sistem. Orientacijo in položaj opisuje 6-parametrična matrika (3 translacije in 3 rotacije), velikosti 4×4 . Matrika se imenuje SOP informacija (Mavsar, P., 2006) - senzorjeva orientacija in pozicija oz. angl. Sensor's Orientation and Position. Matrika ima nastavljen parameter spremembe merila na 1, kar pomeni, da gre za podobnostno prostorsko transformacijo (Slika 60).

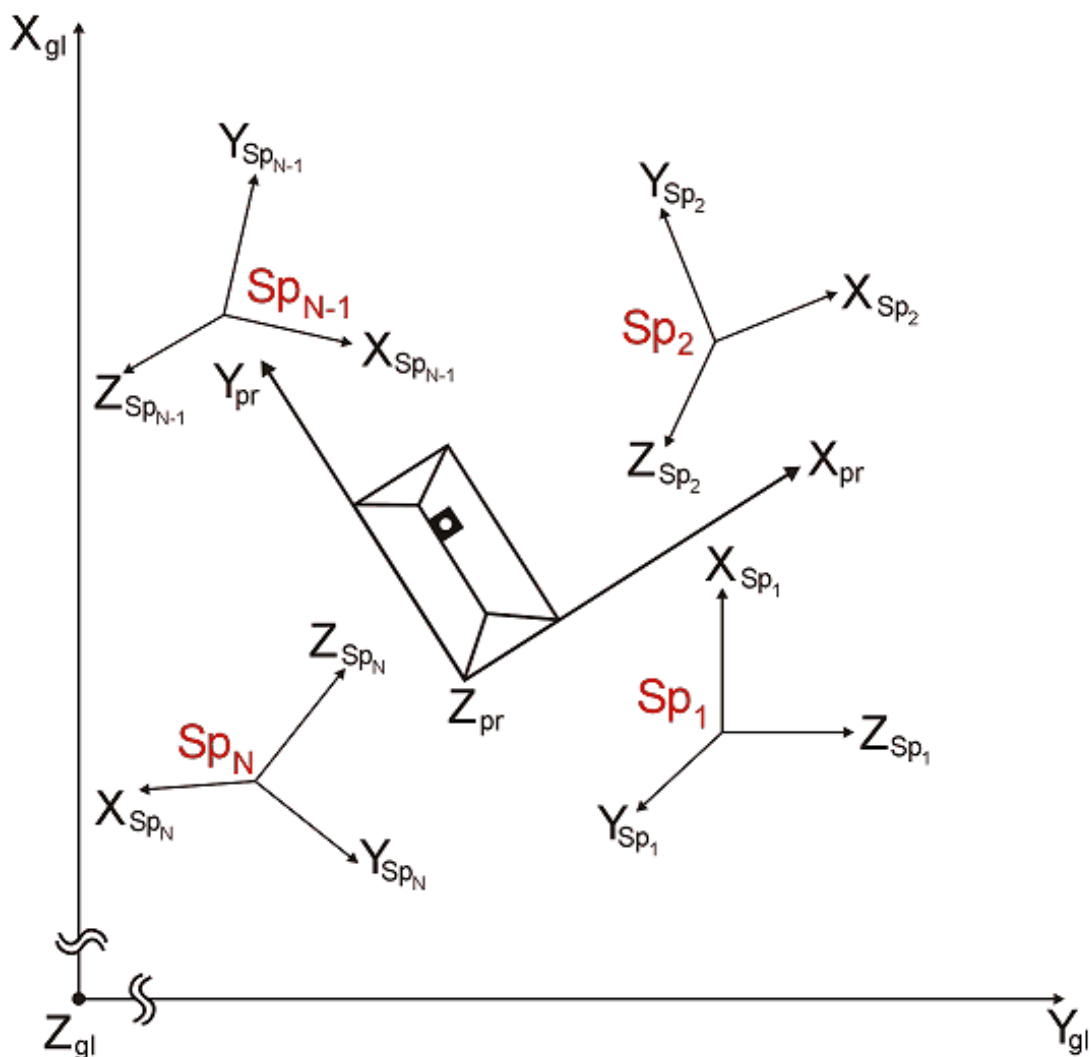
$$M_{SOP} = \begin{pmatrix} r_{12} & r_{13} & r_{14} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Slika 60: Matrika senzorjeve orientacije in pozicije (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 35 str.)

V postopku registracije vsakemu stojišču RiSCAN PRO določi pripadajočo SOP informacijo. Zato, da transformiramo podatke iz skenerjevega lastnega koordinatnega sistema v projektni koordinatni sistem, preprosto pomnožimo koordinate točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu, z matriko SOP. Podobno velja pri transformaciji koordinat točk iz projektnega koordinatnega sistema v globalni koordinatni sistem, kjer koordinate točk pomnožimo s POP informacijo - projektno orientacijo in pozicijo oz. angl. Project Orientation and Position. Velja pa tudi obratno: s pomočjo inverzne matrike POP^{-1} transformiramo koordinate iz globalnega koordinatnega sistema v projektni koordinatni sistem, s pomočjo inverzne matrike SOP^{-1} pa transformiramo koordinate iz projektnega koordinatnega sistema v skenerjev lastni koordinatni sistem (Slika 61).

$$\begin{aligned}
 & \times M_{SP} & \times M_{FP} \\
 P_{SOCS} & \rightarrow P_{PRCS} & \rightarrow P_{GLCS} \\
 \\
 & \times M_{SP}^T & \times M_{FP}^T \\
 P_{SOCS} & \leftarrow P_{PRCS} & \leftarrow P_{GLCS}
 \end{aligned}$$

Slika 61: Transformacije med koordinatnimi sistemi (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 36 str.)



Slika 62: Koordinatni sistemi v programu RiSCAN PRO (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 36 str.)

Slika 62 koordinatnih sistemov predstavlja vse tri vrste omenjenih koordinatnih sistemov: skenerjev lastni koordinatni sistem (SOCS), projektni koordinatni sistem (PRCS) in globalni

koordinatni sistem (GLCS). Projektni koordinatni sistem je obvezno desni koordinatni sistem. Globalni koordinatni sistem pa je lahko levi ali desni. Na skici je tako globalni koordinatni sistem levi koordinatni sistem, kot npr. D48/GK koordinatni sistem. Vsako stojišče skenerja ima svoj lastni koordinatni sistem.

Primeri seznamov veznih in oslonilnih točk in matrik SOP_i ter POP informacije so prikazani v poglavju 4.2.

4.1.3.2 Zajem podatkov

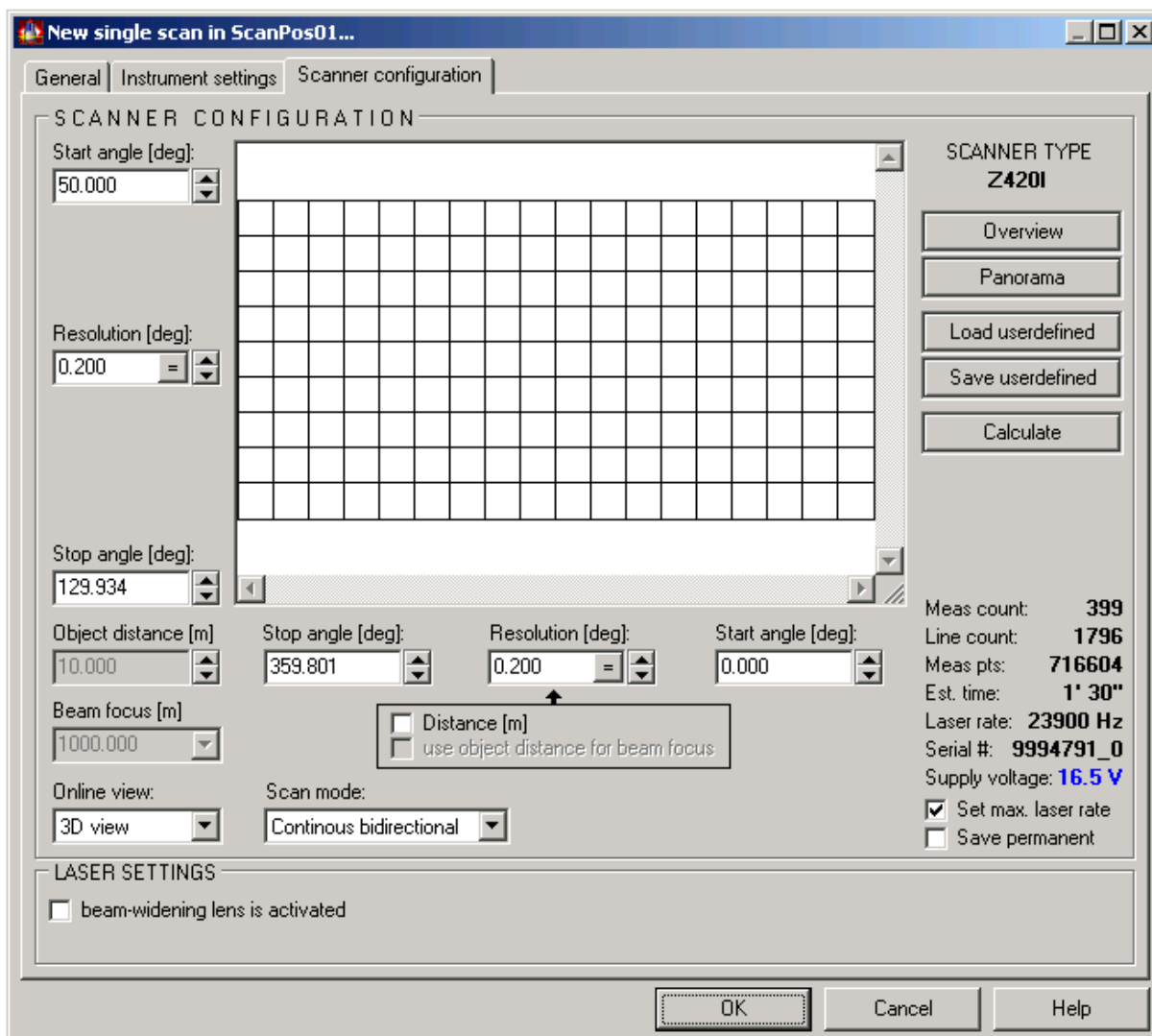
Vsak skenogram, pridobljen s posameznega stojišča, program RiSCAN PRO shrani v datoteko s končnico 3DD, v mapo z imenom »SINGLESCANS«, »SCANSEQUENCES« ali »TIEPOINTSCANS«, odvisno od vrste skenograma (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006). Vrste skenogramov pa so lahko:

- posamezni skenogram (Singlescan); vsebuje samo en pogled/posnetek izbranega območja. Pri tem gre za 3R posnetek vseh tarč v zornem polju tega posnetka v času snemanja;
- niz posnetkov (Scansequence); vsebuje več pogledov/posnetkov, ki jih zajame sekvenčno enega za drugim. Ta način je primeren pri snemanju prometnih projektov. Ker je vsak posamezni posnetek zajet ob drugem času, je precej verjetno, da so skoraj vsi zastirajoči predmeti (vozila, pešci) lahko izločeni iz skupnega skenograma;
- skenogram veznih točk (Tiepoint scan); to so skenogrami visokih ločljivosti tarč in drugih površin, na podlagi katerih povežemo skene med seboj v enoten oblak točk.

Postopek zajema podatkov poteka tako, da znotraj programa RiSCAN PRO aktiviramo ukaz »New single scan« ali »New scansequence«. Ob zagonu ukaza »New single scan« se odpre posebno pogovorno okno in RiSCAN PRO se poskuša povezati s skenerjem ter zahteva določitev nastavitvev. Med to proceduro povezovanja ne moremo spremeniti nobenih nastavitvev. Po končanem povezovanju pa lahko spreminjamo nastavitve. Pod kartico »Nastavitvev skenerja« nastavimo vzorec skeniranja, ki ga mora inštrument izvesti, da zajame podatke. Izgled pogovornega okna prikazuje Slika 63.

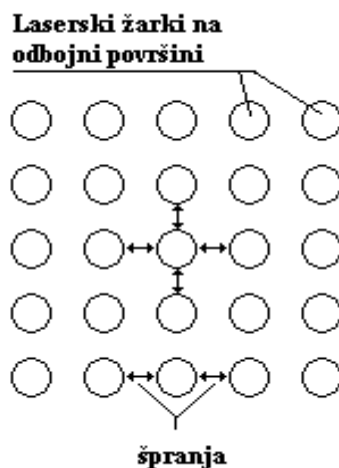
Vzorec skeniranja sestavljajo naslednji parametri:

- začetna smer, ločljivost in končna smer po H_z smeri,
- začetna smer, ločljivost in končna smer po V smeri.



Slika 63: Izgled pogovornega okna za zajem podatkov z enim samim skenogramom

Zajem podatkov prično s potrditvijo gumba »OK«, pogovornega okna »New single scan«. V primeru neustrezne temperature enote za merjenje dolžine, izmerjene z laserjem (range finder unit), program RiSCAN PRO sporoči posebno obvestilo. V takšnem primeru je priporočljivo počakati, da vgrajeni grelec ogreje enoto na delovno temperaturo. Postopek zajema lahko opazujemo in nadzorujemo »on-line« med samim skeniranjem.

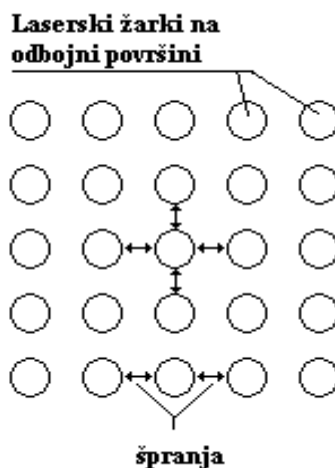


Slika 64: Laserski žarki na odbojni površini pri skeniranju brez vključenega sistema leč, ki razširi žarek (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006: 83 str.)

Pregledno skeniranje (gumb Overwiev) je prednastavljen vzorec skeniranja in se uporablja za hiter pregled območja skeniranja. Omogoča skeniranje po celotnem zornem polju skenerja, to je po horizontalni smeri od 0° do 360° in po vertikalni smeri od $+80^\circ$ do -80° . Kotna ločljivost skeniranja je prednastavljena na $0,2^\circ$. Ker je največja ločljivost, ki jo skener omogoča, manjša od $0,2^\circ$, so v preglednem skenogramu špranje (Slika 64).

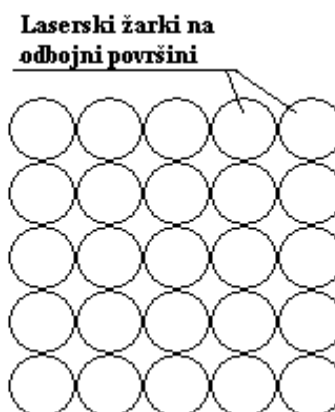
Panoramsko skeniranje je tudi prednastavljen vzorec in omogoča skeniranje po celotnem zornem polju skenerja, to je od H_z smeri od 0° do 360° in od $+80^\circ$ do -80° po vertikalni smeri. Kotna ločljivost skeniranja je $0,12^\circ$. Ker je maksimalna ločljivost skenerja manjša od $0,12^\circ$, so v panoramskem skenogramu špranje (Slika 65), ki pa jih lahko odpravimo z vključitvijo sistema leč, ki razširi oddani laserski žarek za približno 8 krat na širino kotne ločljivosti ($2 \text{ mrad} = 0,12^\circ$) (Slika 66). Ta sistem leč se aktivira z namenom, da se poveča verjetnost zaznave vseh tarč na območju projekta.

Določanje položajev reflektorjev je funkcija v programu RiSCAN PRO, ki prepozna v skenogramu vse tarče, ki jih sestavljajo odsevne površine. Izračuna koordinate teh tarč v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu in jih zapiše v ustrezni seznam veznih točk. Prepoznavanje tarč deluje na principu jakosti odboja laserskega žarka, kjer zaradi učinka retroreflektivnosti bistveno večja intenziteta množice pikselov na skenogramu kot v okolici te množice pomeni, da ta množica predstavlja tarčo.



Slika 65: Laserski žarki na odbojni površini pri panoramskem skeniranju brez vključenega sistema leč, ki razširi žarek (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006:

84 str.)



Slika 66: Laserski žarki na odbojni površini pri panoramskem skeniranju z vključenim sistemom leč, ki razširi žarek. (Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo,

2006: 84 str.)

4.1.3.3 Zajem podobe

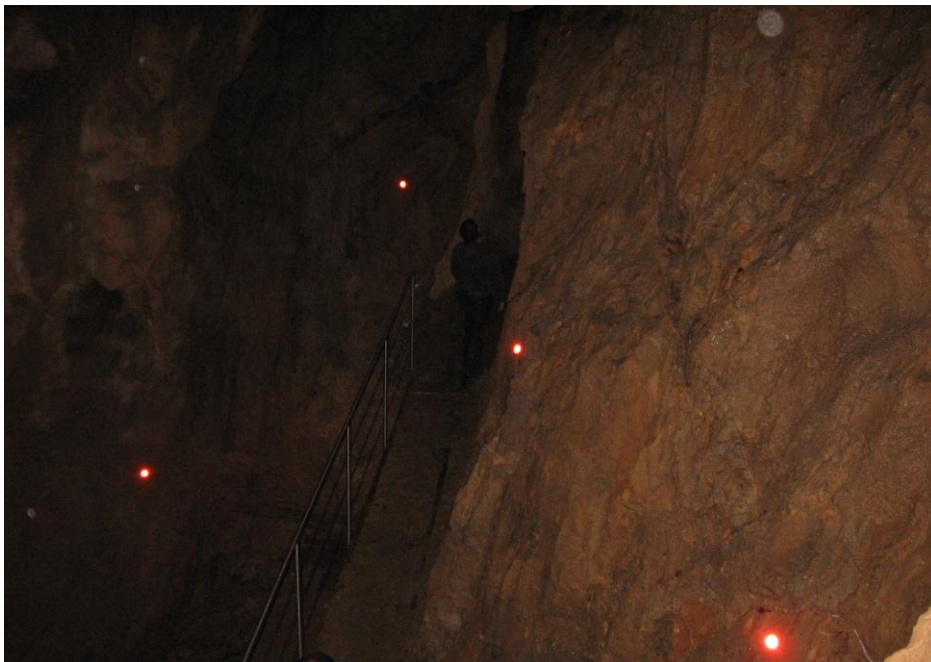
Omogoča zajem podobe po skeniranju. Gre za fotografiranje celotnega območja skenograma z digitalnim fotoaparatom. Prednastavljena je uporaba prednastavljenih kalibracijskih parametrov fotoaparata (notranja orientacija) in namestitve fotoaparata na skener.

4.1.3.4 Obarvanje skenograma

Na podlagi digitalnih fotografskih posnetkov je možno obarvati skenogram.

4.2 Registracija skenogramov

Program omogoča registracijo po različnih metodah, ki so že navedene in opisane v poglavju 1.2.3. V primeru projekta Železna jama smo se odločili za registracijo preko veznih točk (Slika 67). Ta način smo izbrali zato, ker bi bili drugi načini registracije, npr. metoda iterativnega postopka iskanja najmanjšega odstopanja med točkami, v primeru zelo razgibanega površja jame, manj primerni. Poleg tega, nekatere vezne točke v jami služijo tudi kot oslonilne točke za namene georeferenciranja, kar pa bi bilo, v primeru uporabe izključno metode iterativnega postopka iskanja najmanjšega odstopanja med točkami, praktično nemogoče izvesti. Direktnege georeferenciranja, kot je opisano v poglavju 1.2.3.1.5, pa v zaprtem prostoru, kot je jama, ni možno izvesti.



Slika 67: Postavljene vezne točke (Bradán, T., Per, J., Peterka, P., Vodišek, D., 2007: 5 str.)

Zato, da registriramo posamezni skenogram v koordinatnem sistemu projekta, je potrebno s skeniranjem zajeti položaje veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu. Položaje veznih točk pridobimo s finim skeniranjem tarč. Pred postopkom finega skeniranja tarč, RiSCAN PRO najprej pregleda okolico stojišča skenerja s tem, da zažene, bodisi že

opisano pregledno skeniranje bodisi panoramsko skeniranje. Iz podatkov, enega izmed teh dveh skenogramov, program približno določi položaje tarč in prične s finim skeniranjem. Podatkom, zajetih s posameznega stojišča skenerja, program RiSCAN PRO dodeli lastno mapo s podmapami za skenograme, zajete s tega stojišča, digitalne podobe in seznam veznih točk. Nazadnje imamo toliko seznamov veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu kot je stojišč skenerja.

V programu RiSCAN PRO lahko projekt vsebuje le en seznam veznih in oslonilnih točk v projektne koordinatnem sistemu. Koordinate oslonilnih točk običajno pridobimo z opazovanjem teh točk z elektronskim tahimetrom ali s katero izmed metod DGPS. Koordinate oslonilnih točk so v državnem koordinatnem sistemu. Za potrebe obdelave z RiSCAN PRO jih je potrebno transformirati preko matrike POP v koordinatni sistem projekta.

Metoda registracije z veznimi točkami po korakih:

1. V seznam veznih točk v projektne koordinatnem sistemu vnesemo koordinate oslonilnih točk, ki smo jih pridobili s terestrično izmero z elektronskim tahimetrom ali kakšno metodo DGPS. Ker so koordinate točk velikih števil v globalnem koordinatnem sistemu, jih množimo s transformacijsko matriko POP^{-1} . V seznamu veznih točk v projektne koordinatnem sistemu definiramo uvožene točke kot oslonilne točke.

2. Nato izvedemo fino skeniranje tarč, na podlagi podatkov preglednega skeniranja.

3. V primeru, da (še) nimamo na razpolago koordinat oslonilnih točk v projektne koordinatnem sistemu, sami izberemo, katero izmed stojišč predstavlja izhodišče projektne koordinatnega sistema in ga registriramo.

4. V naslednjem koraku odpremo seznam veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu, ki jih želimo registrirati.

5. Zaženemo orodje »Find corresponding points«, ki poišče skladne vezne točke. Pri tem izberemo referenčni koordinatni sistem. Če imamo na voljo koordinate oslonilnih točk v projektne koordinatnem sistemu, izberemo projektne koordinatni sistem na seznamu koordinatnih sistemov. Če pa nimamo na voljo oslonilnih točk, izberemo enega ali več že

registriranih stojišč v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu. Algoritem poskuša najti ustrezne skladne vezne točke v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu in izbranem projektnem koordinatnem sistemu. Če programu uspe najti skladne točke, ustvari novo vezno točko v koordinatnem sistemu projekta in vse skladne vezne točke v skenerjevih lastnih koordinatnih sistemih so povezane s to novo vezno točko. Koordinate vezne točke v projektnem koordinatnem sistemu so izračunane kot sredina koordinat točk v skenerjevih lastnih koordinatnih sistemih. Ko algoritmu uspe izračunati koordinate veznih točk v projektnem koordinatnem sistemu, tvori tudi SOP_i informacijo za vsako stojišče. Ključni, po katerih program poišče skladne vezne točke, pa so lahko:

- po vnaprej podani povezavi,
- po imenu vezne točke,
- z iskanjem minimalnega odstopanja med koordinatami veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu in projektnem koordinatnem sistemu.

Pri tem lahko nastavimo tudi največjo dovoljeno odstopanje med skladnimi veznimi točkami, da jih program še prepozna za skladne. Prav tako lahko določimo najmanjše število skladnih parov veznih točk. Če so stojišča organizirana po načelu verig ali zank (poglavje 1.2.3.1.1 Registracija z veznimi točkami), lahko s programom omogočimo tovrstni način zapiranja zank in stikanja verig. Z orodjem »Filter« pa je možno avtomatsko aktivirati ali deaktivirati vezne točke za potrebe registracije. Kriteriji pri tem orodju so:

- največja ali najmanjša dovoljena oddaljenost veznih točk od skenerja v metrih,
- največja dovoljena velikost veznih točk v metrih.

6. Postopek izračuna SOP_i informacije. Izračunani rezultati so: število skladnih veznih točk, standardna deviacija odstopanj med veznimi točkami v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu in projektnem koordinatnem sistemu ter matrika SOP_i in ocena natančnosti parametrov te matrike iz izravnave transformacije. Rezultate lahko bodisi potrdimo ali poiščemo drugačno rešitev.

Ponovimo korake od 4 do 6 za vsako naslednje stojišče.

Možni problemi pri registraciji z veznimi točkami:

- program ni našel zadostnega števila skladnih točk v obeh koordinatnih sistemih (skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu in projektnem koordinatnem sistemu) za

potrebe določitve parametrov matrike SOP. Rešitev: poskušamo aktivirati več že registriranih sosednjih stojišč, ali pa na terenu signaliziramo in skeniramo več tarč;

- proces registracije je predolgotrajen in ne da zadovoljivih rezultatov. Ta problem se običajno zgodi, ko imamo na razpolago preveč veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu. Poskusimo zmanjšati to število, bodisi s tem, da jih izbrišemo ali deaktiviramo.

Obstajajo tri vrste seznamov veznih in oslonilnih točk v programu RiSCAN PRO, in sicer:

1. Seznam veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu za vsako stojišče. Primer seznama te vrste prikazuje Slika 68.

Name	Link	RefCount	Finescan	RefType	Size	Pixels	Intensity	X	Y	Z	Range	θ	φ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔR	Δθ	Δφ
SOCS_000	G	0	SOCS_000	RIEGL Cylinder 5cm	0.048	2100	0.801	5.235	1.780	1.900	5.846	71.036	18.777	-0.018	0.018	-0.031	-0.021	0.025	0.023
SOCS_001	PRCS_001	1	SOCS_001	RIEGL Cylinder 5cm	0.051	5148	0.805	2.583	3.837	-0.034	4.625	90.422	56.050	0.000	0.003	-0.001	0.002	0.001	0.002
SOCS_002	E	1	SOCS_002	RIEGL Flat 5cm	0.053	3448	0.797	0.108	5.526	-2.589	6.104	115.100	88.881	0.018	-0.021	0.030	-0.031	-0.018	-0.019
SOCS_003	D	0	SOCS_003	RIEGL Flat 5cm	0.045	1681	0.785	-2.526	6.532	-2.292	7.369	108.123	111.143	0.008	-0.006	0.024	-0.016	-0.020	-0.006
SOCS_004	PRCS_007	0	SOCS_004	RIEGL Cylinder 5cm	0.049	1085	0.805	-9.112	16.926	-0.006	19.222	90.017	118.295	-0.002	-0.001	0.002	0.000	-0.002	0.002
SOCS_005	PRCS_010	0	SOCS_005	RIEGL Cylinder 5cm	0.049	1240	0.789	-7.295	12.559	-1.422	14.593	95.590	120.150	-0.002	0.003	0.004	0.003	-0.004	0.001
SOCS_006	PRCS_011	0	SOCS_006	RIEGL Cylinder 5cm	0.048	509	0.817	-6.984	11.388	0.043	13.359	89.817	121.519	-0.009	-0.002	-0.003	0.003	0.003	0.008
SOCS_007	C	0	SOCS_007	RIEGL Cylinder 5cm	0.047	977	0.774	-5.636	8.221	-2.797	10.353	105.678	124.435	-0.001	0.007	-0.009	0.009	0.007	-0.003
SOCS_008	B	1	SOCS_008	RIEGL Flat 5cm	0.048	1406	0.770	-5.968	8.184	-1.936	10.312	100.821	126.100	-0.007	0.002	-0.014	0.008	0.013	0.005
SOCS_009	PRCS_002	1	SOCS_009	RIEGL Flat 5cm	0.050	1465	0.789	-6.475	5.441	-4.476	9.569	117.892	139.961	0.001	0.002	-0.005	0.003	0.004	-0.002
SOCS_010	PRCS_004	1	SOCS_010	RIEGL Flat 5cm	0.047	1825	0.758	-6.226	4.142	-1.561	7.639	101.790	146.365	-0.003	-0.003	-0.003	0.002	0.002	0.004

Slika 68: Seznam veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu

Stolpci v tem seznamu so v splošnem naslednji:

- ime točke v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu,
- povezava točke z vezno ali oslonilno točko v projektne koordinatnem sistemu,
- številka tipa tarče,

- številka finega skenograma tarče,
- velikost tarče v metrih,
- velikost tarče v pikslih,
- jakost odboja svetlobe od tarče,
- x , y in z koordinata točke v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu,
- oddaljenost R točke od izhodišča skenerjevega lastnega koordinatnega sistema - polarna koordinata točke v sfernem koordinatnem sistemu,
- kota θ in φ - preostali dve polarni koordinati točke v 3R koordinatnem sistemu,
- Δx , Δy in Δz kot odstopanje koordinat veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu pred izravnavo transformacije od izravnanih koordinat istih veznih točk v projektnem koordinatnem sistemu; razliko dobimo, če transformiramo koordinate iz skenerjevega lastnega koordinatnega sistema z uporabo matrike SOP_i v projektni koordinatni sistem; Δx , Δy in Δz pomenijo:

$$\Delta x = x_{SLKS_i} - x_{PRKS}, \Delta y = y_{SLKS_i} - y_{PRKS}, \Delta z = z_{SLKS_i} - z_{PRKS} \quad (22)$$

- ΔR , $\Delta \theta$ in $\Delta \varphi$ - velja isto načelo kot za razlike Δx , Δy in Δz , le da pomenijo razlike med koordinatami v sfernem koordinatnem sistemu; ΔR , $\Delta \theta$ in $\Delta \varphi$ pomenijo:

$$\Delta R = R_{SLKS_i} - R_{PRKS}, \Delta \theta = \theta_{SLKS_i} - \theta_{PRKS}, \Delta \varphi = \varphi_{SLKS_i} - \varphi_{PRKS} \quad (23)$$

V vrsticah seznama veznih in oslonilnih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu pa so nanizane posamezne točke.

Name	Link	Ref...	Finescan	RefType	Size	Pixels
B	B	1	SOCS_D...	RIEGL F...	0.048	1406

Slika 69: Izpis rezultatov registracije posameznega stojišča

Ocena natančnosti parametrov podobnostne 3R transformacije (matrika SOP_i) je prikazana nad seznamom veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu (Slika 69).

Izpisana je vrednost naslednjih parametrov:

- standardne deviacije koordinat veznih točk v metrih,

- povprečnega odstopanja po R (radialni komponenti 3R polarnega koordinatnega sistema) v metrih,
- povprečnega odstopanja po kotu θ v kotnih stopinjah (kotna komponenta 3R polarnega koordinatnega sistema),
- povprečnega odstopanja po kotu φ v kotnih stopinjah (kotna komponenta 3R polarnega koordinatnega sistema),
- st.dev. x , st.dev. y in st.dev. z v metrih - ocena natančnosti treh parametrov translacije v matriki SOP_i ,
- st.dev. φ , st.dev. v in st.dev. ψ v kotnih stopinjah - ocena natančnosti treh parametrov rotacije v matriki SOP_i .

2. Naslednji seznam je seznam veznih in oslonilnih točk v projektne koordinatnem sistemu (Slika 70). Obstaja le en tak seznam v posameznem projektu.

Name	Link	Ref...	RefType	Size	X	Y	Z	σX	σY	σZ	mean X	mean Y	mean Z
A	A	0		0.00	2469.000	271.968	316.322	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
B	B	4	RIEGL F...	0.00	2470.000	274.356	319.485	0.002	0.002	0.002	0.009	-0.003	0.013
C	C	6	RIEGL C...	0.00	2470.000	274.281	318.619	0.002	0.003	0.003	-0.001	-0.004	0.009
D	D	3	RIEGL F...	0.00	2473.000	271.700	319.097	0.006	0.003	0.002	-0.008	0.009	-0.025
E	E	2	RIEGL F...	0.00	2475.000	269.920	318.799	0.002	0.000	0.002	-0.013	0.025	-0.032
F	F	0	RIEGL C...	0.00	2477.000	267.525	320.804	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
G	G	3	RIEGL C...	0.00	2479.000	264.682	323.358	0.001	0.002	0.005	0.013	-0.023	0.028
H	H	0	RIEGL C...	0.00	2473.000	261.147	315.861	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
I	I	0	RIEGL C...	0.00	2475.000	286.546	322.604	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
J	J	0	RIEGL F...	0.00	2476.000	286.313	324.346	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
K	K	0	RIEGL C...	0.00	2480.000	288.656	324.157	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
L	L	0	RIEGL C...	0.00	2479.000	292.657	323.477	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
M	M	0	RIEGL C...	0.00	2485.000	295.179	325.368	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
N	N	0	RIEGL C...	0.00	2482.000	291.349	324.944	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
PRCS_001		3	RIEGL C...	0.00	2477.000	267.499	321.390	0.001	0.003	0.004	0.000	0.000	0.000
PRCS_002		4	RIEGL F...	0.00	2469.000	271.921	316.935	0.004	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000
PRCS_003		5	RIEGL C...	0.00	2471.000	284.983	322.062	0.003	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000
PRCS_004		2	RIEGL F...	0.00	2469.000	270.617	319.849	0.004	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000
PRCS_005		3	RIEGL C...	0.00	2473.000	261.002	316.031	0.002	0.001	0.007	0.000	0.000	0.000
PRCS_006		6	RIEGL C...	0.00	2472.000	286.087	322.758	0.005	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000
PRCS_007		2	RIEGL C...	0.00	2470.000	283.650	321.393	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
PRCS_008		3	RIEGL F...	0.00	2470.000	265.646	320.400	0.003	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000
PRCS_009		4	RIEGL F...	0.00	2474.000	291.118	323.974	0.002	0.008	0.002	0.000	0.000	0.000
PRCS_010		5	RIEGL C...	0.00	2470.000	278.927	319.979	0.003	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000
PRCS_011		3	RIEGL C...	0.00	2470.000	277.721	321.451	0.006	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000
PRCS_012		5	RIEGL C...	0.00	2474.000	289.471	322.253	0.003	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000
PRCS_013		3	RIEGL C...	0.00	2471.000	294.500	323.757	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
PRCS_014		2	RIEGL C...	0.00	2468.000	295.849	324.554	0.002	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000

Slika 70: Seznam veznih točk v projektne koordinatnem sistemu

Stolpci v tem seznamu predstavljajo naslednje vrednosti:

- ime točke (na Sliki št. 70, označba s črkami pomeni oslonilno točko, označba s šiframi PRCS_xxx pa vezno točko),

- povezava točke z oslonilno točko v globalnem koordinatnem sistemu,
- številka reflektorja,
- številka tipa tarče,
- velikost tarče v metrih,
- x , y in z koordinata v projektnem koordinatnem sistemu,
- σ_x , σ_y , σ_z , ki so pridobljeni po naslednji enačbi:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_{SLKS_i}^2}{n}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_{SLKS_i}^2}{n}}, \quad \sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_{SLKS_i}^2}{n}}, \quad (24)$$

kjer so Δx_{SLKS} , Δy_{SLKS} in Δz_{SLKS} odstopanja koordinat veznih točk v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu pred izravnavo transformacije od izravnanih koordinat istih veznih točk v projektnem koordinatnem sistemu, n pa je število stojišč, kjer se neka vezna točka pojavlja;

- srednji \bar{x} , \bar{y} in \bar{z} ;

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_{SLKS_i}}{n}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_{SLKS_i}}{n}, \quad \bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_{SLKS_i}}{n} \quad (25)$$

kjer za Δx_{SLKS} , Δy_{SLKS} in Δz_{SLKS} velja ista definicija kot eno alinejo višje.

V vrsticah seznama veznih in oslonilnih točk v projektnem koordinatnem sistemu pa so nanizane posamezne točke.

Ocena natančnosti parametrov 3R transformacije med projektnim koordinatnim sistemom in globalnim koordinatnim sistemom (matrike POP) je prikazana nad preglednico seznama koordinat veznih in oslonilnih točk v projektnem koordinatnem sistemu. Prikazani so isti rezultati kot pri oceni natančnosti transformacijskih parametrov matrik SOP_i . Rezultati obsegajo:

- standardno deviacijo koordinat veznih točk v metrih,
- povprečno odstopanje po radialni dolžini R v metrih,
- povprečno odstopanje po kotu θ v kotnih stopinjah,
- povprečno odstopanje po kotu φ v kotnih stopinjah,
- st.dev. x , st.dev. y in st.dev. z v metrih - ocena natančnosti treh parametrov translacije v matriki SOP_i ,
- st.dev. φ , st.dev. v in st.dev. ψ v kotnih stopinjah - ocena natančnosti treh parametrov rotacije v matriki SOP_i .

Zadnji v vrsti seznamov veznih in oslonilnih točk je seznam oslonilnih točk v globalnem koordinatnem sistemu (Slika 71). Obstaja le en tak seznam v posameznem projektu.

Name	Ref...	RefType	Size	X	Y	Z
A	1		0.00	472469.333	110271.968	316.322
B	1	RIEGL Flat 5cm	0.00	472470.673	110274.356	319.485
C	1	RIEGL Cylinder 5cm	0.00	472470.993	110274.281	318.619
D	1	RIEGL Flat 5cm	0.00	472473.392	110271.700	319.097
E	1	RIEGL Flat 5cm	0.00	472475.560	110269.920	318.799
F	1	RIEGL Cylinder 5cm	0.00	472477.325	110267.525	320.804
G	1	RIEGL Cylinder 5cm	0.00	472479.230	110264.682	323.358
H	1	RIEGL Cylinder 5cm	0.00	472473.490	110261.147	315.861
I	1	RIEGL Cylinder 5cm	0.00	472475.071	110286.546	322.604
J	1	RIEGL Flat 5cm	0.00	472476.689	110286.313	324.346
K	1	RIEGL Cylinder 5cm	0.00	472480.363	110288.656	324.157
L	1	RIEGL Cylinder 5cm	0.00	472479.721	110292.657	323.477
M	1	RIEGL Cylinder 5cm	0.00	472485.108	110295.179	325.368
N	1	RIEGL Cylinder 5cm	0.00	472482.051	110291.349	324.944

Slika 71: Seznam oslonilnih točk v globalnem koordinatnem sistemu

Stolpci od leve proti desni pomenijo naslednje:

- ime oslonilne točke,
- številka tipa tarče,
- tip reflektorja,
- velikost tarče v metrih,
- x , y in z koordinata v globalnem koordinatnem sistemu.

V vrsticah seznama oslonilnih točk v globalnem koordinatnem sistemu pa so nanizane posamezne točke.

SOP:			
Roll: -0.004 deg	Pitch: -0.102 deg	Yaw: -18.701 deg	
0.947204053	0.320627097	-0.001657129	2473.692425881
-0.320626462	0.947205500	0.000642492	264.696159950
0.001775642	-0.000077252	0.999998421	321.418155783
0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000

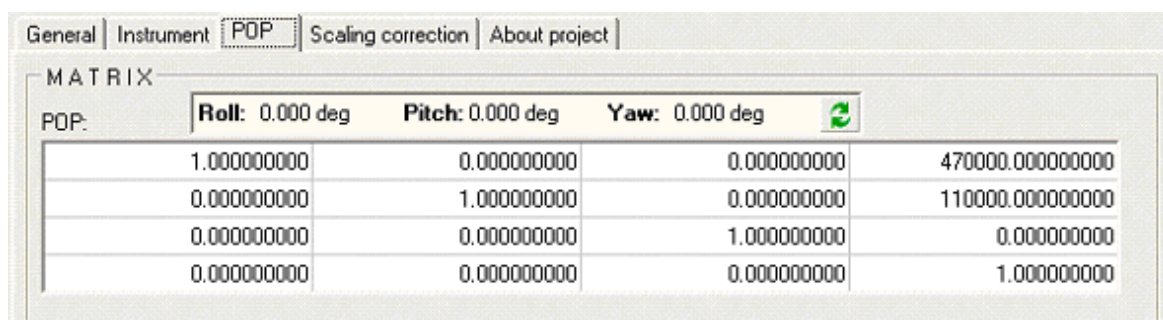
Slika 72: Matrika SOP_1

Primer SOP_i informacije v programu RiSCAN PRO prikazuje Slika 72.

RiSCAN PRO transformira iz položaja skeniranja v koordinatni sistem projekta s 4×4 matriko (poglavje 4.1.2.1). Za interpretacijo rotacijske komponente transformacije je primerneje prikazati rotacijo s tremi koti zasukov. Obstajajo številni načini, privzeto je poimenovanje po tehnologiji ALS (Airborne Laser Scanning), kjer so trije koti zasukov opisani kot:

- roll (rotacija okoli x osi),
- pitch (rotacija okoli y osi),
- yaw (rotacija okoli z osi).

Primer POP informacije v programu RiSCAN PRO prikazuje Slika 73. Struktura te matrike je enaka matriki SOP_i .



M A T R I X				
POP:	Roll: 0.000 deg	Pitch: 0.000 deg	Yaw: 0.000 deg	
	1.000000000	0.000000000	0.000000000	470000.000000000
	0.000000000	1.000000000	0.000000000	110000.000000000
	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000
	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000

Slika 73: Matrika POP

4.2.1 Ocena natančnosti registracije

Natančnost registracije 9 stojišč skenerja v primeru projekta Železne jame lahko preučimo iz podatkov seznama veznih in oslonilnih točk v projektne koordinatnem sistemu (Preglednica 10).

Ocena natančnosti veznih točk σ_x , σ_y , σ_z je izračunana po enačbah, ki so bile že navedene v poglavju 4.2.

Povprečne standardne deviacije $\overline{\sigma_x}$, $\overline{\sigma_y}$ in $\overline{\sigma_z}$, izračunani iz vrednosti vseh posameznih σ_x , σ_y , σ_z veznih točk, znašajo od 2 do 3 mm na razdalji do 50 m, kar je skladno z deklarirano natančnostjo proizvajalca.

Preglednica 10. Izbrane celice iz seznama veznih točk v projektnem koordinatnem sistemu:

Ime	n	Tip reflektorja	σ_x [m]	σ_y [m]	σ_z [m]	\bar{x} [m]	\bar{y} [m]	\bar{z} [m]
B	4	RIEGL Flat 5cm	0,002	0,002	0,002	0,009	-0,003	0,013
C	6	RIEGL Cylinder 5cm	0,002	0,003	0,003	-0,001	-0,004	0,009
D	3	RIEGL Flat 5cm	0,006	0,003	0,002	-0,008	0,009	-0,025
E	2	RIEGL Flat 5cm	0,002	0	0,002	-0,013	0,025	-0,032
G	3	RIEGL Cylinder 5cm	0,001	0,002	0,005	0,013	-0,023	0,028
PRCS_001	3	RIEGL Cylinder 5cm	0,001	0,003	0,004	0	0	0
PRCS_002	4	RIEGL Flat 5cm	0,004	0,002	0,004	0	0	0
PRCS_003	5	RIEGL Cylinder 5cm	0,003	0,003	0,005	0	0	0
PRCS_004	2	RIEGL Flat 5cm	0,004	0,002	0,003	0	0	0
PRCS_005	3	RIEGL Cylinder 5cm	0,002	0,001	0,007	0	0	0
PRCS_006	6	RIEGL Cylinder 5cm	0,005	0,004	0,003	0	0	0
PRCS_008	3	RIEGL Flat 5cm	0,003	0,003	0,002	0	0	0
PRCS_010	5	RIEGL Cylinder 5cm	0,003	0,002	0,002	0	0	0
PRCS_011	3	RIEGL Cylinder 5cm	0,006	0,001	0,002	0	0	0
PRCS_007	2	RIEGL Cylinder 5cm	0,002	0	0,002	0	0	0
PRCS_009	4	RIEGL Flat 5cm	0,002	0,008	0,002	0	0	0
PRCS_012	5	RIEGL Cylinder 5cm	0,003	0,002	0,003	0	0	0
PRCS_013	3	RIEGL Cylinder 5cm	0,004	0,002	0,001	0	0	0
PRCS_014	2	RIEGL Cylinder 5cm	0,002	0,004	0,002	0	0	0
PRCS_015	2	RIEGL Cylinder 5cm	0	0,001	0,001	0	0	0

4.3 Oslonilne točke

Položaj oslonilnih točk lahko vidimo iz Priloge 1. Odstopanja veznih točk od oslonilnih lahko vidimo iz Preglednice 10, pod stolpci \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} . Ta odstopanja so izračunana po enačbah št. 25. Menim, da je vzrok za odstopanja, večja od 1 cm, v nenatančnem viziranju oslonilnih točk z elektronskim tahimetrom, še posebej, ker retroreflektivne tarče niso bile strogo pravokotno usmerjene proti daljnogledu tahimetra, pa tudi osvetljenost tarč v jami je bila problematično slaba.

4.3.1 Pridobitev koordinat oslonilnih točk z geodetskimi opazovanji

Koordinate oslonilnih točk v državnem koordinatnem sistemu D48/GK so bile pridobljene na podlagi tahimetričnih opazovanj z elektronskim tahimetrom Nikon DTM-320. Podrobnejši podatki o tahimetru in računanje tahimetrije s programom Geos6, proizvajalca Zeia d. o. o., se nahajajo v prilogi I.

Preglednica 11. Seznam oslonilnih točk v globalnem koordinatnem sistemu (D48/GK koordinatni sistem):

Ime	x [m]	y [m]	z [m]	RefIType
A	472469,333	110271,968	316,322	
B	472470,673	110274,356	319,485	RIEGL Flat 5cm
C	472470,993	110274,281	318,619	RIEGL Cylinder 5cm
D	472473,392	110271,700	319,097	RIEGL Flat 5cm
E	472475,560	110269,920	318,799	RIEGL Flat 5cm
F	472477,325	110267,525	320,804	RIEGL Cylinder 5cm
G	472479,230	110264,682	323,358	RIEGL Cylinder 5cm
H	472473,490	110261,147	315,861	RIEGL Cylinder 5cm
I	472475,071	110286,546	322,604	RIEGL Cylinder 5cm
J	472476,689	110286,313	324,346	RIEGL Flat 5cm
K	472480,363	110288,656	324,157	RIEGL Cylinder 5cm
L	472479,721	110292,657	323,477	RIEGL Cylinder 5cm
M	472485,108	110295,179	325,368	RIEGL Cylinder 5cm
N	472482,051	110291,349	324,944	RIEGL Cylinder 5cm

4.4 Izdelava 3R modela Železne jame in izračun volumna modela

3R model Železne jame sem izdelal s programom Geomagic Studio 9 (Geomagic Inc.). Izhodiščna informacija za modeliranje je bil oblak točk s 4.075.368 točkami. Ta oblak je bil pridobljen iz izvornega oblaka z več kot 11 milijoni točk. Velikost grida točk v izvornem oblaku je približno 1 cm × 1 cm, v reduciranem oblaku približno 2 cm × 2 cm.

Postopek modeliranja z omenjenim programom je potekal v več korakih.

V oblaku točk sem najprej odstranil s homogenim delom oblaka točk nepovezane grupe točk. Kriterij za izbiro teh točk je oddaljenost težišča grupe točk od homogenega površja telesa oblaka točk ter velikost te grupe točk glede na celoten oblak točk. Tako so glede na podan kriterij, iz oblaka točk odpadle le štiri točke.

Sledilo je odstranjevanje posameznih točk, ki od površja homogenega telesa oblaka točk preveč odstopajo, angl. outliers. Program je skozi točke oblaka položil navidezno statistično najbolj prilegajočo se ploskev, potem, pa na podlagi kriterija odstopanja točke od površja ploskve (kriterij izbire uporabnik programa), odstranil točke, ki ne ustrezajo pogoju. V primeru Železne jame je iz oblaka točk v tej fazi odpadlo 86.319 točk ali 2,1 % točk od izhodiščnega oblaka točk s 4.075.368 enotami.

Ugotovil sem, da je potrebno zaradi omejenosti procesorske moči računalnika, v oblaku točk še dodatno zmanjšati količino točk. Uporabil sem rutino uniformnega prevzorčenja oblaka v mrežo točk velikosti $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. Količina točk se je zmanjšala na 635.725 enot ali 15,6 % točk od izhodiščnega oblaka točk.

V naslednjem koraku sem iz oblaka točk modeliral odprto 3R ploskev, ki jo sestavlja množica trikotnikov. V tem koraku sem dobil 975.704 trikotnikov. Rezultati so prikazani v prilogi B.

Nato sem preveril oz. zagotovil, da so trikotniki, ki sestavljajo model, povezani po vseh treh stranicah z drugimi trikotniki. Pravilo pa ne velja za robove modelne ploskve, kjer sta lahko ena ali dve stranici trikotnika prosti.

Sledil je postopek zmanjševanja šuma v modelu. V tem koraku sem zmanjšal odklone normal trikotnikov modela od normal na optimalno prilegajoče se ploskve, ki jo določi program na podlagi statističnih izračunov. Rezultat te operacije je bolj gladek model. Izbrane nastavitve skupine ukazov zmanjševanje šuma (angl. Noise Reduction) obsegajo:

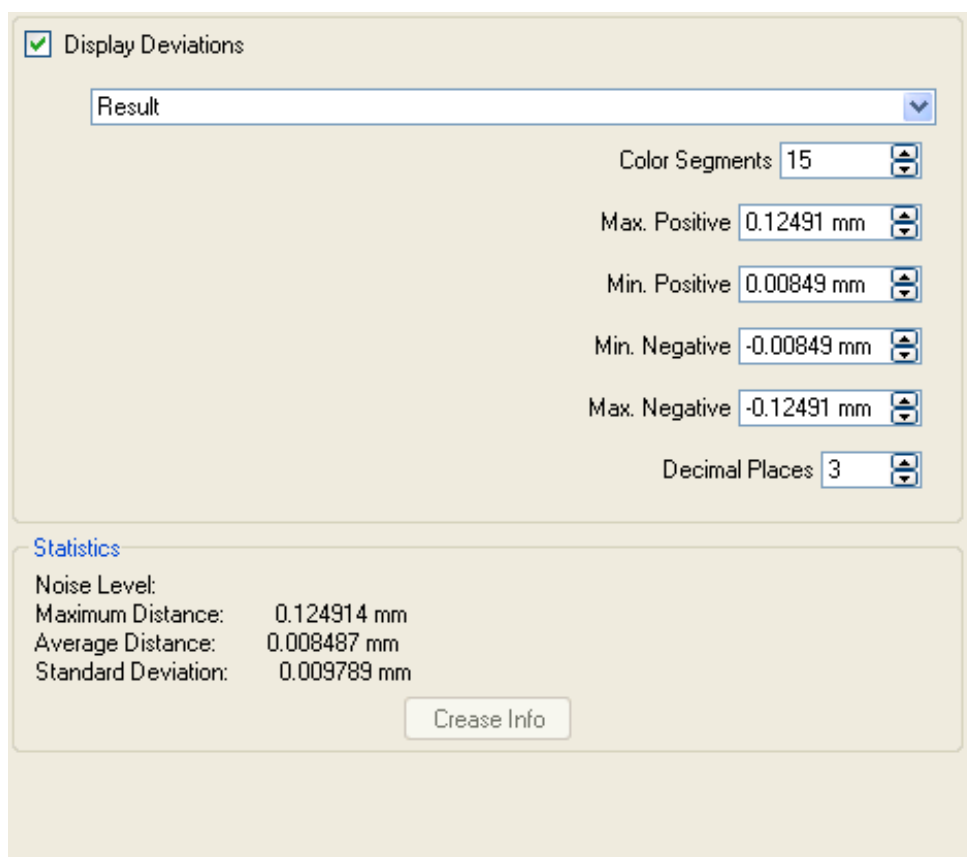
- optimizacijo zmanjševanja šuma glede na vrsto modela; izbral sem ploskev prizmatičnih likov (angl. Prismatic Shapes), kar je najprimerneje za modele z izrazitimi robovi kot je podzemna jama;
- tudi stopnjo zglajenosti sem nastavil na 1 od največ 5 stopenj;
- ukaz zmanjševanje šuma se je izvedel v enem iteracijskem koraku.

Rezultati ukaza zmanjševanje šuma je prikazan na Sliki 74, in obsegajo podatke o največjem in najmanjšem odstopanju posamezne točke od statistično najbolj prilegajoče se ploskve (glede na postavljene pogoje), povprečno absolutno odstopanje in standardno deviacijo odstopanj. Ob koncu postopka zmanjševanja šuma je model Železne jame sestavljalo 968.569 trikotnikov.

Za potrebe izračuna volumna mora biti 3R model zaprt, kar pomeni brez robov. Vsi trikotniki se morajo po vseh treh stranicah dotikati treh sosednjih trikotnikov, zato je v odprtem modelu potrebno zapolniti vse odprtine (angl. Fill Holes). Z omenjenim programom je možno zapolniti odprtine naenkrat po celotnem modelu ali pa izbiramo vsako luknjo posebej. Prav tako lahko izbiramo med dvema načinoma polnjenja odprtin: planarno metodo ali metodo iskanja statistično najbolj optimalno prilegajoče ukrivljene ploskve. Tako sem manjše

odprtine do velikosti obsega 4,83 m zapolnil vse naenkrat, po načinu iskanja optimalno prilegajoče ukrivljene ploskve. Po obsegu večje odprtine pa sem zapolnil z izbiranjem vsake posebej, saj zaradi omejitev procesorja računalnika nekaterih večjih odprtih ni bilo možno zapolniti v enem koraku. Tako sem problematične odprtine zmanjšal na obvladljive s pomočjo gradnje mostov. Pridobljen zaprt model si lahko ogledamo v prilogah D, E, F, G in H.

Volumen modela je bilo možno izračunati šele, ko je bil model zaprt. Program Geomagic Studio 9 je izpisal naslednji rezultat: 1049,020 m².



Slika 74: Rezultati ukaza zmanjševanje šuma v programu Geomagic Studio 9. Opomba - namesto napačnih enot mm nadomestimo s pravilnimi m

4.4.1 Ocena natančnosti izračuna volumna

Ocena natančnosti pridobitve rezultata izračuna volumna je žal možna samo opisno. Železna jama je tako kot vsaka jama nepravilne oblike, razen tega pa nimamo na razpolago nobenih primerljivih alternativnih merskih podatkov. V izvornem oblaku točk je polno lukenj, ki so

nastale kot posledica: senc pri skeniranju, neustreznih ali pomanjkljivih postavitev skenerja ter nedostopnih vboklin, votlin, vertikalnih jaškov ipd. v jami. Za potrebe izračuna volumna je bilo potrebno v modelu zapolniti vse odprtine. Polnjenje odprtin je temeljilo na dveh metodah (planarni ali optimalno prilegajoči ukrivljeni ploskvi), kar pa povzroči, da model ne ustreza realnosti, še posebej, če gre za površinsko sorazmerno velike odprtine.

5 ZAKLJUČEK

Delo z diplomsko nalogo je bilo zanimivo in zelo poučno, saj sem pridobil vpogled v sicer sorazmerno novo tehnologijo laserskega skeniranja. Tudi preučevanje natančnosti, sicer iz bolj informativnega vidika, je bilo zelo koristno, saj sem lahko sem ovrednotil kakovost tehnologije in postopek skeniranja. Ker natančnost skenerjev in skeniranja še ni jasno opredeljena, je bilo pisanje na to temo podobno raziskovalni nalogi.

Če povzamem, temeljne ugotovitve o natančnosti skenerjev in skeniranja so:

- ne obstaja standardiziran postopek preizkusa praktične natančnosti skenerja, npr. v obliki industrijskega ali mednarodnega standarda. Standard se šele razvija. Tehnične specifikacije inštrumentov so napisane za testne pogoje, ki jih definira vsak proizvajalec posebej.
- Natančnost in točnost koordinat posamezne točke v oblaku točk je odvisna od natančnosti določitve H_z smeri in V kota ter poševne izmerjene dolžine d . Omenjeno odvisnost lahko teoretično opredelimo na podoben način kot pri elektronskih tahimetrih. Pri praktičnih preizkusih se pogostokrat izkaže, da natančnost v H_z smeri ni enaka natančnosti v V smeri. Poleg tega na praktičnih testih ne moremo ugotoviti natančnosti posamezne točke, ampak o tej natančnosti lahko sklepamo le iz modela predmeta, ki smo ga pridobili iz oblaka točk ob poznanem položaju in dimenzijah predmeta.
- Natančnost in točnost določitve merjene poševne dolžine d lahko definiramo na podoben način kot pri elektronskih razdaljemerih. Tudi sistematični in slučajni pogreški, ki pri tem nastopajo, so podobni, in imajo bodisi konstantni ali multiplikacijski vpliv. Če zanemarimo inštrumentalni pogrešek, ki vpliva na merilo dolžin d , je merilo odvisno od atmosferskih pogojev. Pogrešek merila dolžin d vpliva na merilo celotnega oblaka točk v okviru enega stojišča. Ker pa gre v nalogah terestričnega skeniranja večinoma za kratke razdalje, največ nekaj 10 m, bomo parametre atmosfere upoštevali le v primeru večjih odstopanj atmosfere od referenčne atmosfere in daljših razdaljah d (več 100 m). Konstantni pogrešek dolžine k_a pa je vsota ekscentricitete skenerja in odbojne ploskve ter sistematičnega pogreška, ki nastane na mestu odboja žarka, in je funkcija odbojnih lastnosti odbojne površine. Ekscentriciteto skenerja in odbojne ploskve lahko ugotovimo in odpravimo s

kalibracijo skenerja, z uporabo odbojnih ploskev, katerih reflektivne lastnosti dobro poznamo. Konstantni sistematični pogrešek dolžin d na mestu odboja žarka pa praktično težko eliminiramo, saj je zelo odvisen od odbojnih lastnosti materiala in vpadnega kota. Na splošno pa velja, da je pri kakovostnih skenerjih ta sistematični pogrešek za večino primerov odbojnih površin manjši od vrednosti natančnosti merjenja dolžine σ_d oziroma od t. i. šuma merjenja dolžin.

- Natančnost, točnost in popolnost 3R modela skeniranega objekta je poleg že navedenih parametrov, ki vplivajo na natančnost določitve posamezne točke, odvisna še od ločljivosti skeniranja. Pred skeniranjem moramo izbrati ustrezen skener oziroma ustrezno ločljivost tako, da bo velikost grida na površju objekta manjša od najmanjše razdalje med dvema karakterističnima točkama na površju objekta.
- Računati moramo na to, da je potrebno oblak točk, iz katerega pridobimo 3R model, v procesu modeliranja še temeljito obdelati z ustreznim programom za obdelavo oblakov točk in modeliranje. Pri tem lahko največji težavi pri procesiranju predstavljata (ogromna) količina točk in kompleksnost 3R modela. Navsezadnje pa je natančnost modela odvisna tudi od uporabe orodij za modeliranje, npr. redčenja oblaka točk, prevzorčenja točk, odstranjevanja preveč odstopajočih točk, zmanjševanja šuma in zapolnjevanja odprtín.
- Iz rezultatov registracije skenogramov projekta Železne jame sem ugotovil, da praktična natančnost uporabljenega skenerja Riegl LMS-Z420i ustreza navedbam o natančnosti inštrumenta, ki so napisane v tehničnih specifikacijah.

VIRI

Uporabljeni viri

Akca, D., 2007. Pointcloud Co-Registration. Prosojnica za ISPRS Summer School. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

Balzani, M., Pelleginelli, A., Perfetti, N., Russo, P., Tralli, S., Uccelli, F., 2006. Cyrax 2500 Laser Scanner and GPS Operational Flexibility: From Detailed Close Range Surveying, to Urban Scale Surveying. Ferrara, University of Ferrara, Department of Engineering: 29 str.

Böhler, W., Heinz, G., Marbs, A., Siebold, M., 2002. 3D Scanning Software: An Introduction. Mainz, FH Mainz, University of Applied Sciences Mainz, i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology.

Böhler, W., Marbs, A., 2005. Investigating Laser Scanner Accuracy. Mainz, FH Mainz, University of Applied Sciences Mainz, i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology.

Bradán, T., Per, J., Peterka, P., Vodišek, D., 2007. 3R prikaz Železne jame. Seminarska naloga. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za geodezijo, Geodetska smer: str. 3, 4, 5 in 6.

Briese, C., Dorninger, P., 2005. Advanced Geometric Modeling of Historical Rooms. Torino, CIPA 2005 XX International Symposium: str. 2, 3 in 4.

Harvey, B. R., Lichti, D. D., 2002. The Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of-Flight Laser Scanner Measurements. Pridobljeno s spletne strani:
<http://www.isprs.org/commision4/proceedings/pdppapers/180.pdf>.

Kogoj, D., 2002. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 16-20, 24-40, 45-57, 60-66 in 70-74.

Kos, V. (Ur.), 1992. Atlas Slovenije: 109 preglednih kart v merilu 1:50000, 12 mestnih načrtov in Slovenija v sliki in besedi. 2. izdaja. Ljubljana, Mladinska knjiga in Geodetski zavod Slovenije: 108 str.

Mavsar, P., 2006. Izdelava 3R virtualnega modela kraške jame iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za geodezijo, Geodetska smer: str. 14, 15 in 16.

Pfeifer, N., 2007. Theory and Application of Laser Scanning. Prosojnica za ISPRS Summer School. Dunaj, Technische Universität Wien, IPF.

Rieger., P., Studnicka, N., Ullrich, A., 2007. »Mobile Laser Scanning« Anwendungen. Prosojnica za ISPRS Summer School. Dunaj, Riegel Laser Measurement Systems GmbH: str28.

Swarcz R.. Request About Accuracy of Laser Scanner Riegl LMS Z420i. Message to: Opravs, P., 10. marec 2008. Osebna komunikacija.

Wagner, W., 2005. The Laser Beam and Its Interaction with Different Types of Surfaces. Univerzitetno predavanje. Dunaj, Technische Universität Wien, IPF: str. 23.

Callidus Precision Systems GmbH
<http://www.callidus.de> (20.4.2008)

Leica Geosystems
<http://www.leica-geosystems.com> (20.4.2008)

Konica Minolta Sensing, Inc.
<http://www.konicaminolta.com> (23.4.2008)

Optech Inc.
<http://www.optech.ca> (20.4.2008)

Program Geomagic Studio 9 - Pomoč za uporabo, 2006. Geomagic Inc.

Program RiSCAN PRO ver. 1.4.1. - Priročnik za uporabo, 2006. Riegl Laser Measurement Systems.

Riegl Laser Measurement Systems

<http://www.riegl.com> (22.4.2008)

Trimble Navigation Ltd.

<http://www.trimble.com.ua> (23.4.2008)

Zoller+Fröhlich GmbH

<http://www.zf-laser.com> (20.4.2008)

Ostali viri

Computer representation of surfaces - Wikipedia, Prosta enciklopedija

<http://en.wikipedia.org> (17.3.2008)

Diffuse reflection - Wikipedia, Prosta enciklopedija

<http://en.wikipedia.org> (19.2.2008)

Freeform surface modelling - Wikipedia, Prosta enciklopedija

<http://en.wikipedia.org> (17.3.2008)

Infrared - Wikipedia, Prosta enciklopedija

<http://en.wikipedia.org> (10.2.2008)

Low-pass filter - Wikipedia, Prosta enciklopedija

<http://en.wikipedia.org> (17.3.2008)

Nonuniform rational B-spline - Wikipedia, Prosta enciklopedija

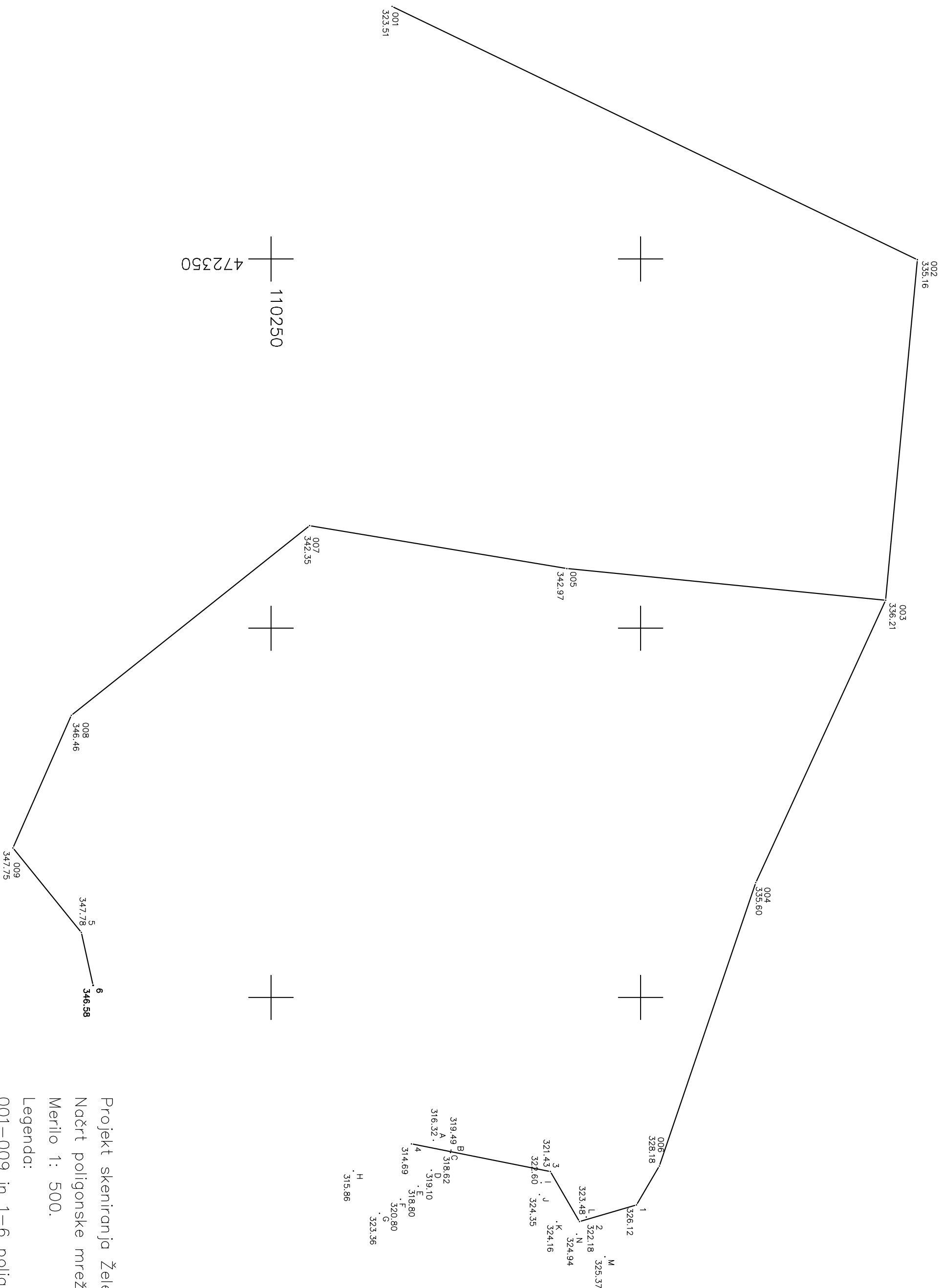
<http://en.wikipedia.org> (17.3.2008)

Reflectivity - Wikipedia, Prosta enciklopedija

<http://en.wikipedia.org> (19.2.2008)

Specular reflection - Wikipedia, Prosta enciklopedija

<http://en.wikipedia.org> (19.2.2008)



PRILOGA A

Projekt skeniranja Železne jame.
 Načrt poligonske mreže in oslonilk.
 Merilo 1: 500.

Legenda:

001–009 in 1–6 poligonske točke.

A–M oslonilne točke; B, C, D, E, G uporabljene oslonilne točke.

G.K. koordinatni sistem državni koordinatni sistem D48.

PRILOGA B: TEHNIČNE SPECIFIKACIJE LASERSKIH SKENERJEV

1. Model ScanStation 2, proizvajalec Leica Geosystems



model ScanStation 2, proizvajalec Leica Geosystems
(Tehnična specifikacija ScanStation 2: 2 str.).

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825- 1:2001	valovna dolžina zelene barve, razred 3R
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 270^\circ$
Doseg	do $d = 300$ m za površine reflektivnosti 90%, do $d = 134$ m za površine reflektivnosti 18%
Hitrost skeniranja	max. 50.000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	<1 mm pri $d = 300$ m
- divergenca žarka	6 mm pri $d = 50$ m
Natančnost	
- posamezne točke	$\sigma = \pm 6$ mm za $1,5 \text{ m} \leq d \leq 50$ m
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 4$ mm za $1,5 \text{ m} \leq d \leq 50$ m
- merjenj smeri (H_z in V)	$\sigma = \pm 21''$
- modelirane ploskve	$\sigma = \pm 2$ mm (odvisno od metode modeliranja; pogoji modeliranja niso specificirani)

2. Model ILRIS 3₆D, proizvajalec Optech Inc.



model ILRIS 3₆D, proizvajalec Optech Inc.
(Tehnična specifikacija ILRIS 3₆D: 2 str.)

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825- 1:2001	$\lambda = 1500$ nm (infrardeča), razred 1R
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 110^\circ$
Doseg	od 3 m do 1.500 m za površine reflektivnosti 80%, od 3 m do 800 m za površine reflektivnosti 20%, od 3 m do 350 m za površine reflektivnosti 4%
Hitrost skeniranja	max. 2.500 točk/s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	4,1" ali 1 mm pri $d = 50$ m
- divergenca žarka	35,1" ali povečanje premera žarka za 17 mm na 100 m
Natančnost	
- posamezne točke	$\sigma = \pm 8$ mm pri $d = 100$ m
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 7$ mm pri $d = 100$ m
- merjenj smeri (H_z in V)	ni podatka
- modelirane ploskve	ni podatka

3. Model LMS-Z620, proizvajalec RIEGL Laser Measurement Systems



model LMS-Z620, proizvajalec Riegl Laser Measurement Systems (www.riegl.com)

Zaradi zelo velikega dosega je skener Riegl LMS-Z620 zelo uporaben pri topografskih izmerah in meritvah v rudarstvu.

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	valovna dolžina bližnje infrardeče, razred 1R
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 80^\circ$
Doseg	od 2 m do 2000 m za površine reflektivnosti 80%, do 650 m za površine reflektivnosti 10%
Hitrost skeniranja	max 11.000 točk/s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	14,4" ali 3,5 mm pri $d = 50$ m
- divergenca žarka	54" ali povečanje premera žarka za 15 mm na 100 m
Natančnost	
- točnost (obremenjenost meritev s sistematičnim pogreškom)	$\sigma = \pm 10$ mm pri $d = 100$ m
- merjenja dolžine (razpršenost meritev)	$\sigma = \pm 10$ mm pri $d = 100$ m
- merjenj smeri (H_z in V)	ni podatka
- modelirane ploskve	$\sigma = \pm 5$ mm pri $d = 100$ m

4. Model HDS6000, proizvajalec Leica Geosystems



Model HDS6000, proizvajalec Leica Geosystems
(Tehnična specifikacija HDS6000: 1 str.).

Prednost skenerja HDS6000 je v visoki hitrosti zajemanja podatkov.

Princip delovanja	fazni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja	$\lambda = 785 \text{ nm}$, razred 3R
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 320^\circ$
Doseg	zaradi faznega principa optimalno od 0,6 m do 20 m za površine reflektivnosti 90% (Photon 20); optimalno od 0,6 do 76 m za površine reflektivnosti 90% (Photon 80).
Hitrost skeniranja	max. 120.000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	$2,73'' \times 32,40''$ oz. $0,6 \text{ mm} \times 7,9 \text{ mm}$ pri $d = 50 \text{ m}$
- divergenca žarka	$11,2 \text{ mm}$ pri $d = 50 \text{ m}$.
Natančnost	
- posamezne točke	ni podatka
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 1,2 \text{ mm}$ pri $d = 25 \text{ m}$ in reflektivnosti površja 90%, $\sigma = \pm 2,9 \text{ mm}$ pri $d = 25 \text{ m}$ in reflektivnosti površja 10%, sistematični pogrešek merjenja dolžin je $\pm 2 \text{ mm}$ pri $d = 50 \text{ m}$
- merjenj smeri (H_z in V)	ni podatka
- modelirane ploskve	$\sigma = \pm 0,6 \text{ mm}$ pri $d = 25 \text{ m}$ in reflektivnosti površja 90%, $\sigma = \pm 1,4 \text{ mm}$ pri $d = 25 \text{ m}$ in reflektivnosti površja 10%

5. Model Photon 80/20, proizvajalec FARO Technologies



model Photon 80/20, proizvajalec FARO Technologies

(Tehnična specifikacija Photon 80/20: 1 str.).

Princip delovanja	fazni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja	ni podatka o valovni dolžini, razred 3R
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 310^\circ$
Doseg	zaradi faznega principa optimalno 79 m
Hitrost skeniranja	max. 500.000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	7,9 mm pri $d = 50\text{m}$
- divergenca žarka	14 mm pri $d = 50\text{ m}$
Natančnost	
- posamezne točke	$\sigma = \pm 6\text{ mm}$ za $1,5\text{m} \leq d \leq 25\text{m}$ $\sigma = \pm 10\text{ mm}$ pri $d = 50\text{ m}$
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 4\text{ mm}$ pri za površine reflektivnosti 90% in $d = 25\text{ m}$, $\sigma = \pm 5\text{ mm}$ pri za površine reflektivnosti 18% in $d = 25\text{ m}$, $\sigma = \pm 5\text{ mm}$ za površine reflektivnosti 90% in $d = 50\text{ m}$, $\sigma = \pm 6\text{ mm}$ za površine reflektivnosti 18% in $d = 50\text{ m}$.
- merjenj smeri (H_z in V)	$\sigma = \pm 25,78''$
- modelirane ploskve	$\sigma = \pm 2\text{ mm}$ (odvisno od metode modeliranja; pogoji modeliranja niso specificirani)

6. Model IMAGER 5006, proizvajalec Zoller+Fröhlich GmbH



model IMAGER 5006, proizvajalec Zoller+Fröhlich GmbH
(Tehnična specifikacija IMAGER 5006: 1 str.).

Prednost skenerja IMAGER 5006 je v visoki hitrosti zajemanja podatkov in ločljivost.

Princip delovanja	fazni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825- 1:2001	valovna dolžina vidne svetlobe, razred 3R
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 310^\circ$
Doseg	zaradi faznega principa merjenja optimalno od 1 m do 79 m
Hitrost skeniranja	max. 500.000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	6,48" ali 1,6 mm pri $d = 50$ m
- divergenca žarka	14 mm pri $d = 50$ m
Natančnost	
- posamezne točke	ni podatka
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 2,5$ mm pri $d = 50$ m in reflektivnosti površja 100%, $\sigma = \pm 4,0$ mm pri $d = 50$ m in reflektivnosti površja 20%, $\sigma = \pm 7,5$ mm pri $d = 50$ m in reflektivnosti površja 10%, vse navedene vrednosti veljajo za srednjo hitrost skeniranja 127.000 točk/ s.
- merjenj smeri (H_z in V)	$\sigma = \pm 25,20''$
- modelirane ploskve	ni podatka

7. Model RANGE 7, proizvajalec Konica Minolta Sensing, Inc.



model RANGE 7, proizvajalec Konica Minolta Sensing, Inc.
(<http://www.konicaminolta.com>)

Vrednosti natančnosti in točnosti sta izmerjeni v proizvajalčevih testnih pogojih, preizkusne inštalacije so merske krogle znanih dimenzij. V okviru preskusa se modeliranje krogel opravi s

proizvajalčevim lastniškim programom. Testni pogoji so enaki za vse tri navedene modele proizvajalca Konica Minolta. Model RANGE 7 je zaradi zelo visoke ločljivosti in natančnosti namenjen za uporabo v industriji.

Princip delovanja	optična triangulacija		
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	$\lambda = 660$ nm, razred 2		
Merilno območje v mm		$X \times Y$	Z (ali d)
	TELE; $d = 450$ mm	79×99	54
	TELE; $d = 800$ mm	141×176	97
	WIDE; $d = 450$ mm	150×188	109
	WIDE; $d = 800$ mm	267×334	194
Doseg	od 450 mm do 850 mm		
Hitrost skeniranja	približno 2 sekundi za en skenogram		
Ločljivost			
- najmanjša velikost grida v smeri X in Y v mm	TELE; $d = 450$ mm	0,08 mm	
	TELE; $d = 800$ mm	0,14 mm	
	WIDE; $d = 450$ mm	0,16 mm	
	WIDE; $d = 800$ mm	0,28 mm	
Točnost	± 40 μ m pri $d = 450$ mm v načinu TELE		
Natančnost meritev Z (oz. d) (razpršenost meritev - šum)	$\sigma = \pm 4$ μ m pri $d = 450$ mm v načinu TELE		

8. Model VIVID 9i, proizvajalec Konica Minolta Sensing, Inc.



model VIVID 9i, proizvajalec Konica Minolta Sensing, Inc.

(<http://www.konicaminolta.com>)

Model VIVID 9i je zaradi visoke natančnosti namenjen za uporabo v industriji.

Princip delovanja	optična triangulacija		
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	ni podatka, razred 2		
Merilno območje v mm		$X \times Y$	Z (ali d)
	TELE; $d = 500$ mm	93×69	26
	TELE; $d = 2500$ mm	463×347	680
	MIDDLE; $d = 500$ mm	165×124	42
	MIDDLE; $d = 2500$ mm	823×618	1100
	WIDE; $d = 500$ mm	299×224	66
	WIDE; $d = 2500$ mm	1495×1121	1750
Doseg	od 600 mm do 1000 mm v standardnem načinu; od 500 mm do 2500 mm v razširjenem načinu.		
Hitrost skeniranja	približno 2,5 sekunde za en skenogram		
Ločljivost			
- najmanjša velikost grida v smeri X in Y v mm	ni podatka		
Točnost	$\pm 0,05$ mm pri $d = 600$ mm v načinu TELE		
Natančnost meritev Z (oz. d) (razpršenost meritev - šum)	$\sigma = \pm 0,008$ mm pri $d = 450$ mm v načinu TELE		

9. Model VIVID 910, proizvajalec Konica Minolta Sensing, Inc.



model VIVID 910, proizvajalec Konica Minolta Sensing, Inc.
(<http://www.konicaminolta.com>)

Model VIVID 910 je zaradi manjše natančnosti namenjen za uporabo v zabavni industriji, šolstvu, razvoju in oblikovanju prototipov ter medicini.

Princip delovanja	optična triangulacija		
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	ni podatka, razred 2		
FOV v mm		$X \times Y$	Z (ali d)
	TELE; $d = 600$ mm	111×83	40
	TELE; $d = 2500$ mm	463×347	500
	MIDDLE; $d = 600$ mm	198×148	70
	MIDDLE; $d = 2500$ mm	823×618	800
	WIDE; $d = 600$ mm	359×269	110
	WIDE; $d = 2000$ mm	1196×897	780
Doseg	od 600 mm do 2500 mm		
Hitrost skeniranja	približno 2,5 sekunde za en skenogram		
Ločljivost			
- najmanjša velikost grida v smeri X in Y v mm	ni podatka		
Točnost	X: $\pm 0,22$ mm, Y: $\pm 0,16$ mm, Z: $\pm 0,10$ mm v načinu TELE/FINE		
Natančnost meritev Z (oz. d) (razpršenost meritev - šum)	ni podatka		

10. Model CP 3200, proizvajalec Callidus Precision Systems GmbH



model CP 3200, proizvajalec Callidus Precision Systems GmbH
(<http://www.callidus.de>)

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	$\lambda = 906 \text{ nm}$ (bližnja infrardeča), razred 1
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 180^\circ$
Doseg	min. 32 cm - max. 80 m (odbojnost površin ni specificirana)
Hitrost skeniranja	1750 točk/ s (ni jasno specificirano)
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak (H_z, V)	H_z : min. $3'45''$ ali 50 mm pri $d = 50 \text{ m}$; V : min. $15'$ ali 218 mm pri $d = 50 \text{ m}$
- divergenca žarka	ni podatka
Natančnost	
- posamezne točke	ni podatka
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 5 \text{ mm}$ (ni podatka o razdalji in odbojni površini)
- merjenj smeri ($H_z; V$)	$\sigma = \pm 18''; \pm 32,40''$
- modelirane ploskve	$\sigma = \pm 2,5 \text{ mm}$ za razdalje od 1 m do 30 m in reflektivnosti vsaj 10%. Tak rezultat se doseže z uporabo proizvajalčevega programskega paketa za modeliranje, kjer uporabimo metode statističnega modeliranja in odpravljanja fizikalnih pogreškov merjenja.

11. Model HDS 2500, proizvajalec Leica Geosystems



model HDS 2500, proizvajalec Leica Geosystems
(<http://www.leica-geosystems.com>)

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825- 1:2001	valovna dolžina zelene barve, razred 2
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$40^\circ \times 40^\circ$
Doseg	min 1,5 m - max 100 m (za difuzne površine reflektivnosti od 5% do 100%)
Hitrost skeniranja	max 1000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak (H_z, V)	H_z : 0,25 mm pri $d = 50$ m; V : 0,25 mm pri $d = 50$ m
- divergenca žarka	6 mm pri $d = 50$ m
Natančnost	
- posamezne točke	$\sigma = \pm 6$ mm za $1,5 \text{ m} \leq d \leq 50 \text{ m}$
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 4$ mm (ni podatka o razdalji in odbojni površini)
- merjenj smeri (H_z in V)	$\sigma = \pm 12,37''$
- modelirane ploskve	$\sigma = \pm 2$ mm (odvisno od metode modeliranja; dodatni pogoji niso specificirani)

12. Model HDS 3000, proizvajalec Leica Geosystems



model HDS 3000, proizvajalec Leica Geosystems

(<http://www.leica-geosystems.com>)

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	valovna dolžina zelene barve, razred 3
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 270^\circ$
Doseg	do $d = 300$ m za površine reflektivnosti 90%, do $d = 134$ m za površine reflektivnosti 18%
Hitrost skeniranja	max. 4000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	1,2 mm pri $d = 300$ m
- divergenca žarka	6 mm pri $d = 50$ m
Natančnost	
- posamezne točke	$\sigma = \pm 6$ mm za $1,5 \text{ m} \leq d \leq 50$ m
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 4$ mm za $1,5 \text{ m} \leq d \leq 50$ m
- merjenj smeri (H_z in V)	$\sigma = \pm 12,37''$
- modelirane ploskve	$\sigma = \pm 2$ mm (odvisno od metode modeliranja; dodatni pogoji niso specificirani)

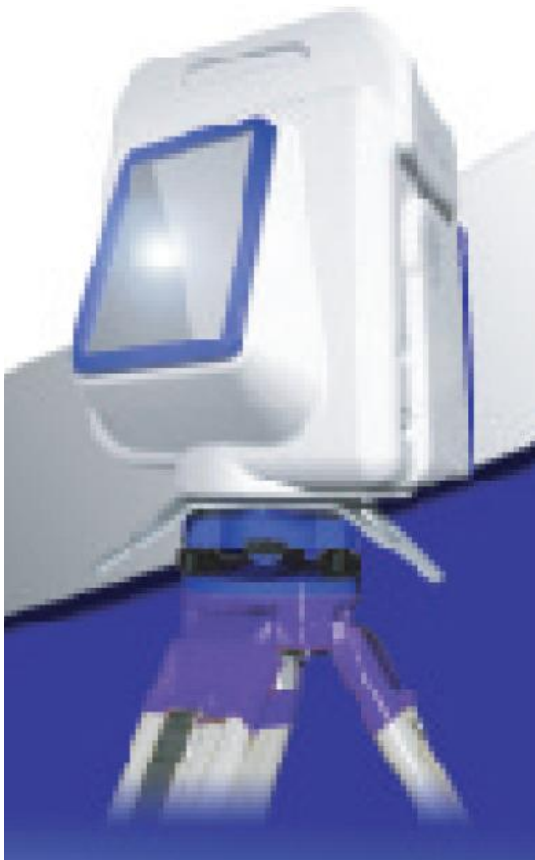
13. Model S25, proizvajalec Mensi



model S25, proizvajalec Mensi, zdaj Trimble
(<http://www.trimble.com.ua>)

Princip delovanja	optična triangulacija
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825- 1:2001	ni podatka, razred 2
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$46^\circ \times 320^\circ$
Doseg	od 2 m do 25 m
Hitrost skeniranja	max. 100 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	ni podatka
- divergenca žarka	0,7 mm pri $d = 1$ m
Natančnost	
- posamezne točke	$\sigma = \pm 0,6$ mm (ni podatka na kakšni razdalji)
- merjenja dolžine	ni podatka
- merjenj smeri (H_z in V)	ni podatka
- modelirane ploskve	ni podatka

14. Model GS100, proizvajalec Mensi (Trimble)



model GS100, proizvajalec Mensi (Trimble)

(<http://www.trimble.com.ua>)

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825- 1:2001	ni podatka, razred 2
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 60^\circ$
Doseg	od 2 m do nad 100 m
Hitrost skeniranja	max. 5000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	6,48"
- divergenca žarka	3 mm pri $d = 1$ m
Natančnost	
- posamezne točke	ni podatka
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 6$ mm (ni podatka na kakšni razdalji)
- merjenj smeri (H_z in V)	ni podatka
- modelirane ploskve	ni podatka

15. Model GS200, proizvajalec Mensi (Trimble)



model GS200, proizvajalec Mensi (Trimble)

(<http://www.trimble.com.ua>)

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825- 1:2001	valovna dolžina zelene barve, razred 2
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 60^\circ$
Doseg	od 1 m do nad 200 m
Hitrost skeniranja	max. 5000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	6,60"
- divergenca žarka	3 mm pri $d = 50$ m
Natančnost	
- posamezne točke	ni podatka
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 1,4$ mm pri $d = 50$ m; pogrešek je max. ± 3 mm
- merjenj smeri (H_z in V)	ni podatka
- modelirane ploskve	ni podatka

16. Model LMS-Z210i, proizvajalec Riegl Laser Measurement Systems



model LMS-Z210i, proizvajalec Riegl Laser Measurement Systems

(<http://www.riegl.com>)

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	valovna dolžina bližnje infrardeče, razred 1
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 80^\circ$
Doseg	min. 4 m - max. 400 m pri reflektivnosti 80%, max. 120 m pri reflektivnosti 10%
Hitrost skeniranja	max. 12.000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak (H_z, V)	36" ali 8,7 mm pri $d = 50$ m
- divergenca žarka	150 mm $d = 50$ m
Natančnost	
- posamezne točke	ni podatka
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 25$ mm, obremenjeno s sistematičnim pogreškom dolžine $\leq + 20$ ppm
- merjenj smeri (H_z in V)	ni podatka
- modelirane ploskve	$\sigma = \pm 15$ mm, obremenjeno s sistematičnim pogreškom dolžine $\leq + 20$ ppm

17. Model LMP-25HA, proizvajalec Riegl Laser Measurement Systems



model LMP-25HA, proizvajalec Riegl Laser Measurement Systems (<http://www.riegl.com>)

Skener Riegl LMP-25HA je prvenstveno namenjen za merjenje gradbenih profilov.

Princip delovanja	impulzni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja po IEC 60825-1:2001	valovna dolžina bližnja infrardeča, razred 1
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 300^\circ$
Doseg	do 60 m
Hitrost skeniranja	max. 1000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	32,8" ali 8 mm pri $d = 50$ m
- divergenca žarka	60 mm pri 60 m
Natančnost	
- posamezne točke	ni podatka
- merjenja dolžine	$\sigma = \pm 8$ mm, obremenjeno s sistematičnim pogreškom dolžine + 20 ppm
- merjenj smeri (H_z in V)	ni podatka
- modelirane ploskve	ni podatka

18. Model IMAGER 5003, proizvajalec Z+F Laser Measurements

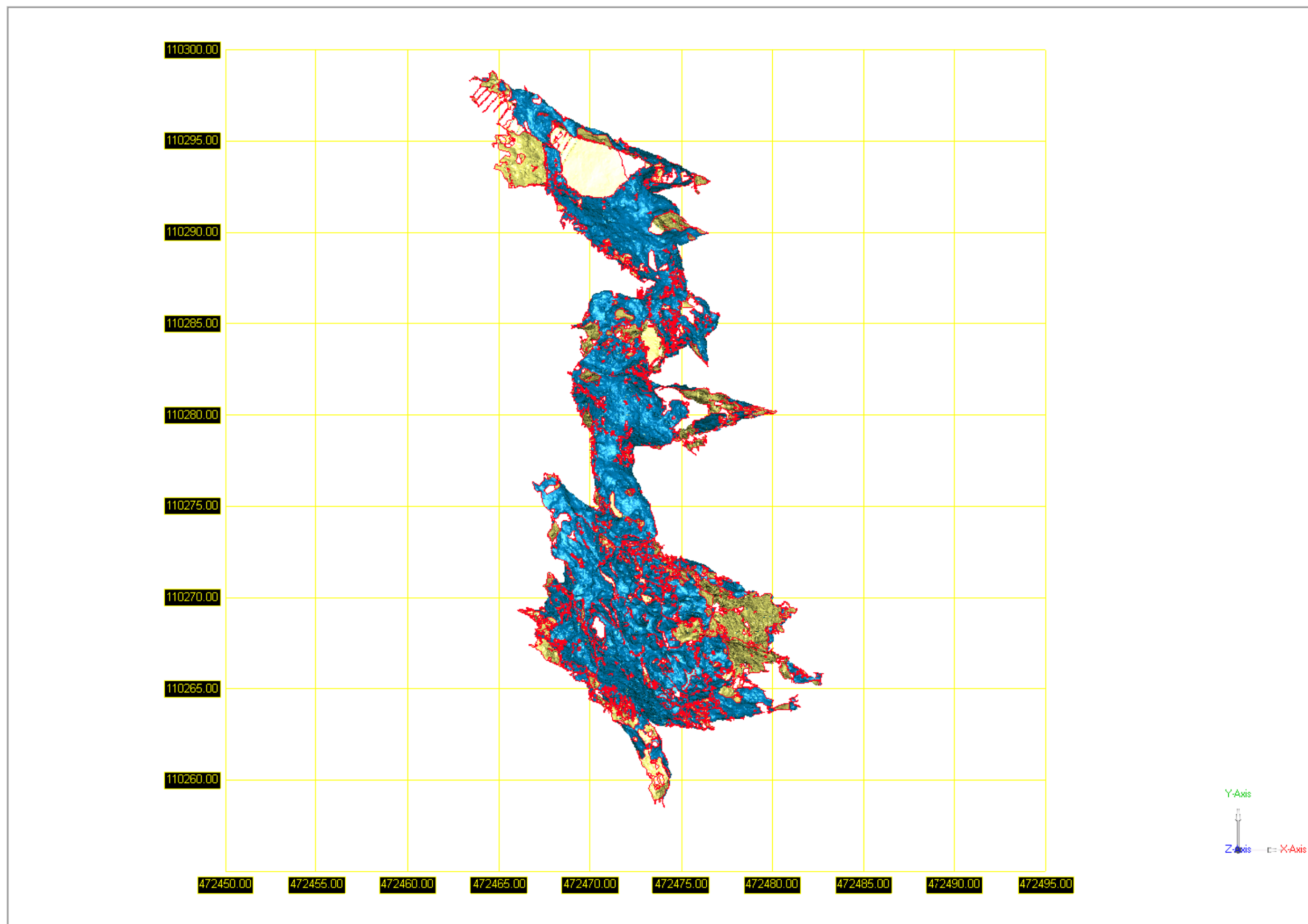


model IMAGER 5003, proizvajalec Z+F Laser Measurements
(<http://www.zf-laser.com>)

Princip delovanja	fazni
Valovna dolžina laserskega žarka λ , varnostni razred laserja	valovna dolžina rdeče barve, razred 3R
Kotno merilno območje ($H_z \times V$)	$360^\circ \times 310^\circ$
Doseg	obstajata dve prilagoditvi dolžinam zaradi faznega načina: tip LARA25200 je prilagojen za $d \approx 25,5$ m in tip LARA53500 za $d \approx 53,5$ m.
Hitrost skeniranja	LARA25200: max. 625.000 točk/ s LARA53500: max. 500.000 točk/ s
Ločljivost	
- najmanjši kotni korak ali najmanjša velikost grida (H_z, V)	H_z : 36" ali 8,7 mm pri $d = 50$ m; V : 1'05" ali 15,7 mm pri $d = 50$ m.
- divergenca žarka	14 mm na 50 m
Natančnost	
- posamezne točke	ni podatka
- merjenja dolžine	LARA25200: $\sigma = \pm 1,6$ mm pri $d = 10$ m in $\rho = 20\%$; $\sigma = \pm 0,9$ mm pri $d = 10$ m in $\rho = 100\%$; $\sigma = \pm 4,5$ mm pri $d = 25$ m in $\rho = 20\%$; $\sigma = \pm 1,6$ mm pri $d = 25$ m in $\rho = 100\%$; LARA53500: $\sigma = \pm 3,0$ mm pri $d = 10$ m in $\rho = 20\%$; $\sigma = \pm 1,3$ mm pri $d = 10$ m in $\rho = 100\%$; $\sigma = \pm 9,0$ mm pri $d = 25$ m in $\rho = 20\%$; $\sigma = \pm 3,0$ mm pri $d = 25$ m in $\rho = 100\%$.
- merjenj smeri (H_z in V)	$\sigma = \pm 1'12''$
- modelirane ploskve	ni podatka

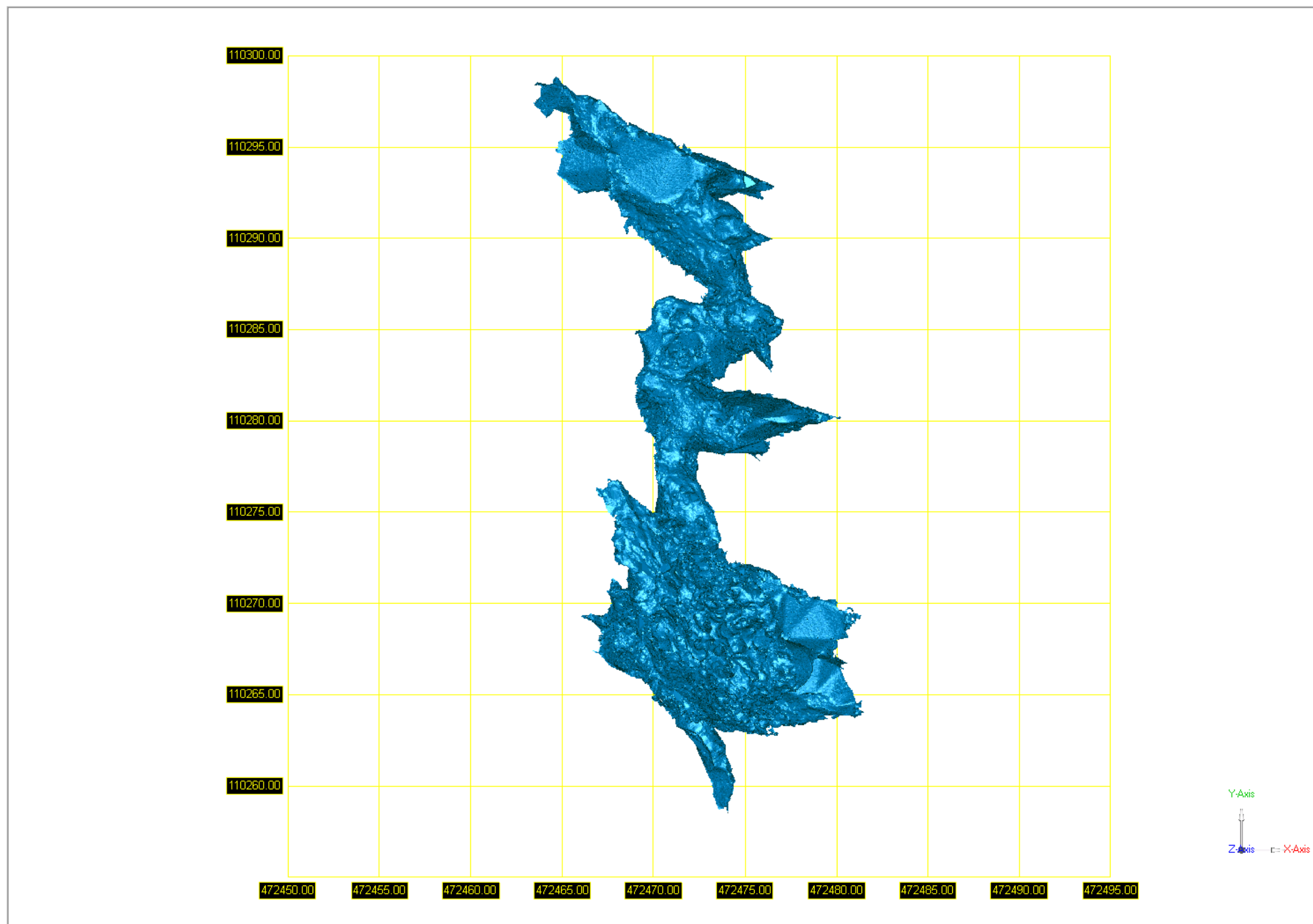
PRILOGA C: 3R MODEL ŽELEZNE JAME - ODPRTINE NISO ZAPOLNJENE

Tloris



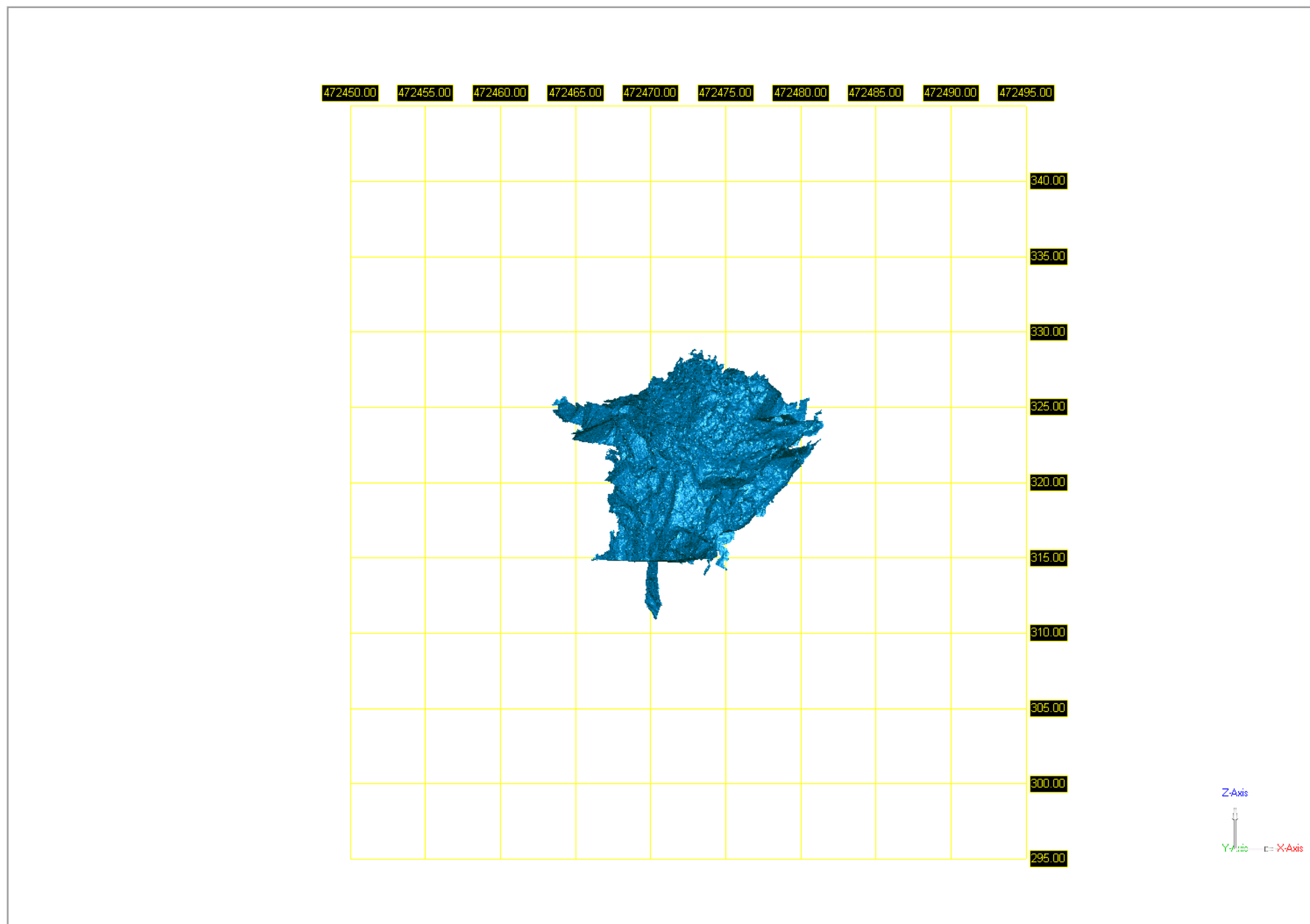
PRILOGA D: 3R MODEL ŽELEZNE JAME - ODPRTINE SO ZAPOLNJENE

Tloris



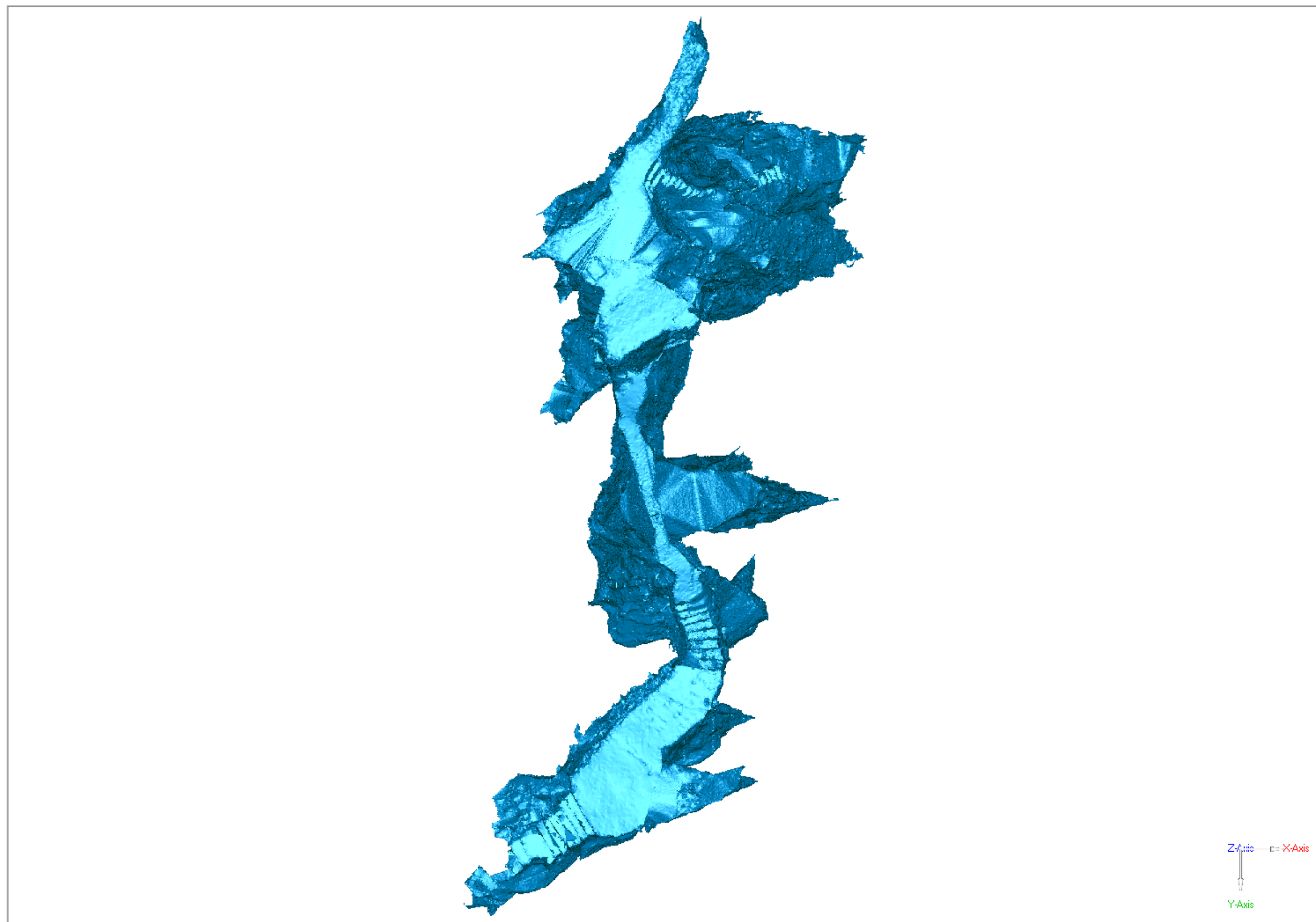
PRILOGA E: 3R MODEL ŽELEZNE JAME - ODPRTINE SO ZAPOLNJENE

Naris (sprednji)



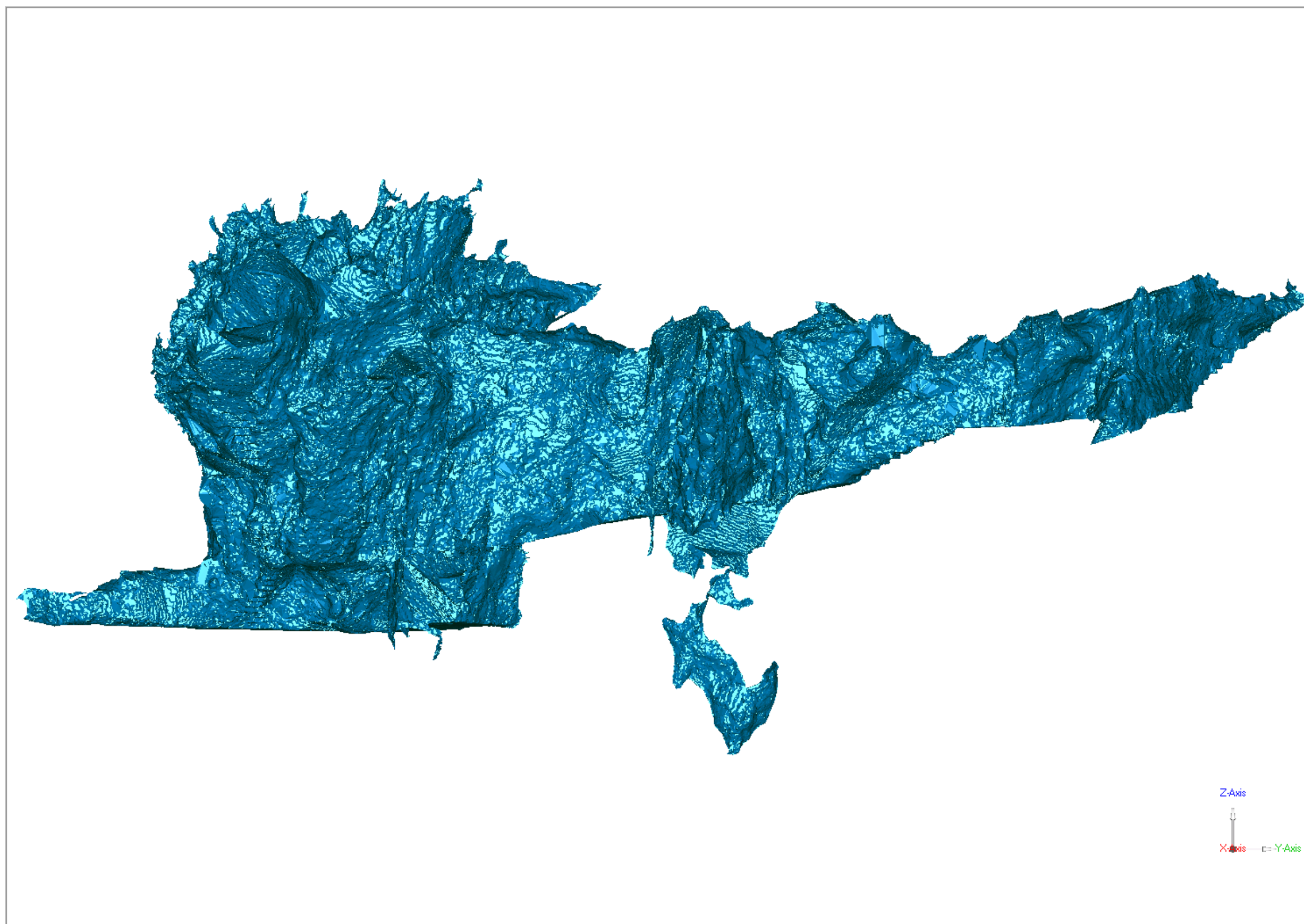
PRILOGA F: 3R MODEL ŽELEZNE JAME - ODPRTINE SO ZAPOLNJENE

Pogled od spodaj



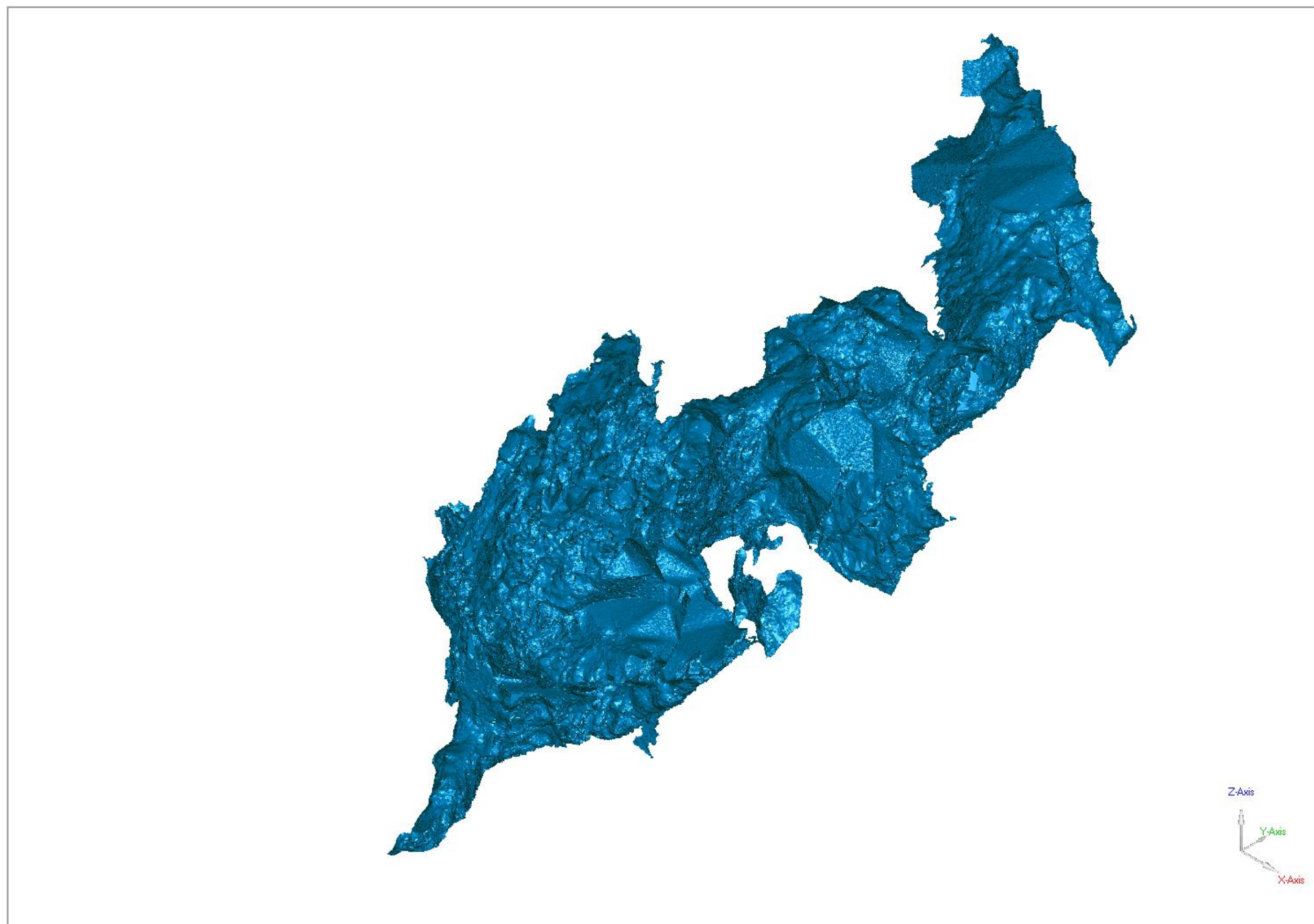
PRILOGA G: 3R MODEL ŽELEZNE JAME - ODPRTINE SO ZAPOLNJENE

Naris (pogled s strani)



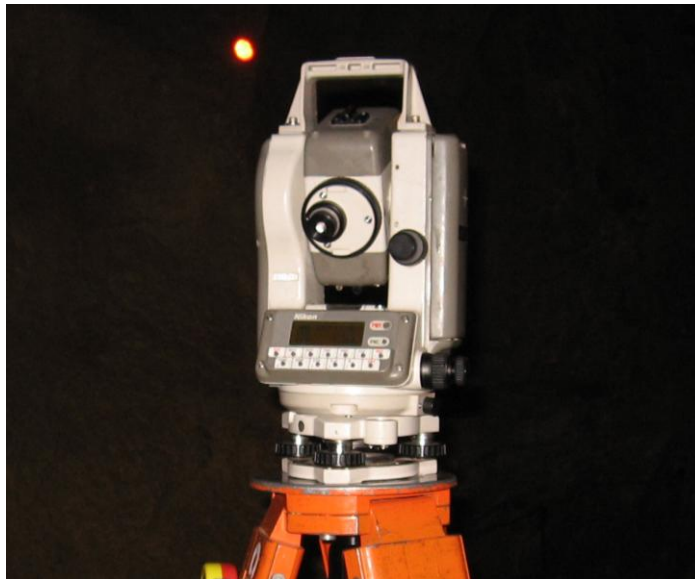
PRILOGA H: 3R MODEL ŽELEZNE JAME - ODPRTINE SO ZAPOLNJENE

Izometrični pogled



PRILOGA I: PRIDOBITEV KOORDINAT OSLONILNIH TOČK V DRŽAVNEM KOORDINATNEM SISTEMU D48/GK

1. Tehnične specifikacije elektronskega tahimetra Nikon DTM-320



Elektronski tahimeter Nikon DTM-320

Tehnične specifikacije:

Prikaz vertikalnega in horizontalnega kota na zaslonu:	5"
Natančnost H_z in V opazovanja smeri:	$\sigma = 5''$
Povečava daljnogleda:	30×
Vidno polje daljnogleda:	2,3 m / 100 m
Doseg razdaljemera:	doseg: 1,2 m do 1.600 m
Natančnost merjenja dolžin:	$\pm (3 + 3 \text{ ppm} \times D) \text{ mm}$
Povečava optičnega grezila:	3 ×

2. Izračun tahimetrije

Tahimetrični zapisnik: C:\4LETNIK\KARTOGRAFIJA\JAMA.

1. STOJIŠČE	Y	X	H stoj.	H inštr.
90044	471949.57	110162.80	320.94	1.560

Točka	O R I E N T A C I J E					
	Y	X	smer	utež	orientac.kot	pop.
431051c	471658.05	111654.47	348°56'31"	1.0	0°00'00"	0°00'01"
90046	471770.70	108989.22	188°39'57"	1.0	0°00'01"	0°00'01"
krvavec	464435.76	128290.93	337°29'15"	1.0	359°59'57"	0°00'02"

sredina: 359°59'59"

Točka	hor.kot	Dred.	dH	prizma	Y	X	H
001	74°12'20"	380.590	2.600	1.590	472315.79	110266.39	323.51

2. STOJIŠČE	Y	X	H stoj.	H inštr.
001	472315.79	110266.39	323.51	1.580

Točka	O R I E N T A C I J E					
	Y	X	smer	utež	orientac.kot	pop.
90044	471949.57	110162.80	333°34'35"	1.0	280°37'46"	0°00'12"
4211341c	468409.57	109307.02	335°33'55"	1.0	280°38'09"	-0°00'12"

sredina: 280°37'58"

Točka	hor.kot	Dred.	dH	prizma	Y	X	H
002	105°07'10"	78.910	11.660	1.590	472350.08	110337.46	335.16

3. STOJIŠČE	Y	X	H stoj.	H inštr.
002	472350.08	110337.46	335.16	1.550

Točka	O R I E N T A C I J E					
	Y	X	smer	utež	orientac.kot	pop.
001	472315.79	110266.39	250°04'50"	1.0	315°40'33"	0°00'00"

sredina: 315°40'33"

Točka	hor.kot	Dred.	dH	prizma	Y	X	H
003	139°38'05"	46.320	1.090	1.590	472396.20	110333.17	336.21

4. STOJIŠČE	Y	X	H stoj.	H inštr.
003	472396.20	110333.17	336.21	1.550

Točka	O R I E N T A C I J E					
	Y	X	smer	utež	orientac.kot	pop.
002	472350.08	110337.46	284°29'10"	1.0	350°49'41"	0°00'00"

sredina: 350°49'41"

Točka	hor.kot	Dred.	dH	prizma	Y	X	H
004	123°51'35"	42.090	-0.570	1.590	472434.44	110315.59	335.60
005	194°51'00"	43.350	6.800	1.590	472391.91	110290.03	342.97

```

=====
5.STOJISČE      Y      X      H stoj.      H inštr.
004      472434.44      110315.59      335.60      1.520
=====

```

```

O R I E N T A C I J E
Točka      Y      X      smer      utež      orientac.kot      pop.
-----
003      472396.20      110333.17      *206°27'30"      1.0      88°13'52"      0°00'00"
-----
sredina:      88°13'52"
-----

```

```

Točka      hor.kot      Dred.      dH      prizma      Y      X      H
-----
006      20°32'00"      40.530      -7.350      1.590      472472.82      110302.55      328.18
=====

```

```

=====
6.STOJISČE      Y      X      H stoj.      H inštr.
005      472391.91      110290.03      342.97      1.520
=====

```

```

O R I E N T A C I J E
Točka      Y      X      smer      utež      orientac.kot      pop.
-----
003      472396.20      110333.17      330°17'05"      1.0      35°23'40"      0°00'00"
-----
sredina:      35°23'40"
-----

```

```

Točka      hor.kot      Dred.      dH      prizma      Y      X      H
-----
007      154°04'45"      35.290      -0.320      1.820      472386.10      110255.22      342.35
=====

```

```

=====
7.STOJISČE      Y      X      H stoj.      H inštr.
007      472386.10      110255.22      342.35      1.490
=====

```

```

O R I E N T A C I J E
Točka      Y      X      smer      utež      orientac.kot      pop.
-----
005      472391.91      110290.03      289°03'35"      1.0      80°24'57"      0°00'00"
-----
sredina:      80°24'57"
-----

```

```

Točka      hor.kot      Dred.      dH      prizma      Y      X      H
-----
008      61°01'55"      41.220      6.020      3.400      472411.79      110222.98      346.46
=====

```

```

=====
8.STOJISČE      Y      X      H stoj.      H inštr.
008      472411.79      110222.98      346.46      1.530
=====

```

```

O R I E N T A C I J E
Točka      Y      X      smer      utež      orientac.kot      pop.
-----
007      472386.10      110255.22      301°02'10"      1.0      20°24'53"      0°00'00"
-----
sredina:      20°24'53"
-----

```

```

Točka      hor.kot      Dred.      dH      prizma      Y      X      H
-----
009      93°19'25"      19.620      1.350      1.590      472429.75      110215.08      347.75
=====

```

Tahimetrični zapisnik: C:\4LETNIK\KARTOGRAFIJA\POLIGON_JAMA.

```

=====
1.STOJISČE      Y      X      H stoj.      H inštr.
006      472472.82      110302.55      328.18      1.530
=====

```

```

O R I E N T A C I J E
Točka      Y      X      smer      utež      orientac.kot      pop.
-----

```

004 472434.44 110315.59 354°17'00" 1.0 294°28'57" 0°00'00"

sredina: 294°28'57"

Točka	hor.kot	Dred.	dH	prizma	Y	X	H
1	185°58'05"	6.112	-2.005	1.590	472478.09	110299.45	326.12

2.STOJISČE	Y	X	H stoj.	H inštr.
1	472478.09	110299.45	326.12	1.380

O R I E N T A C I J E

Točka	Y	X	smer	utež	orientac.kot	pop.
-------	---	---	------	------	--------------	------

006 472472.82 110302.55 257°28'15" 1.0 42°59'41" 0°00'00"

sredina: 42°59'41"

Točka	hor.kot	Dred.	dH	prizma	Y	X	H
2	120°39'15"	8.040	-3.730	1.590	472480.35	110291.74	322.18

3.STOJISČE	Y	X	H stoj.	H inštr.
2	472480.35	110291.74	322.18	1.440

O R I E N T A C I J E

Točka	Y	X	smer	utež	orientac.kot	pop.
-------	---	---	------	------	--------------	------

1 472478.09 110299.45 126°08'10" 1.0 217°31'36" 0°00'00"

sredina: 217°31'36"

Točka	hor.kot	Dred.	dH	prizma	Y	X	H
3	22°22'50"	7.853	-0.593	1.590	472473.56	110287.80	321.44

4.STOJISČE	Y	X	H stoj.	H inštr.
3	472473.56	110287.80	321.44	1.460

O R I E N T A C I J E

Točka	Y	X	smer	utež	orientac.kot	pop.
-------	---	---	------	------	--------------	------

2 472480.35 110291.74 110°22'35" 1.0 309°29'55" 0°00'00"

sredina: 309°29'55"

Točka	hor.kot	Dred.	dH	prizma	Y	X	H
4	339°00'40"	19.166	-6.203	2.000	472455.39	110293.89	314.70
I	180°07'35"	1.961	-0.288	0.000	472475.07	110286.55	322.61
J	165°53'10"	3.462	1.454	0.000	472476.69	110286.32	324.35
K	133°18'00"	6.856	1.265	0.000	472480.36	110288.66	324.17
L	102°13'20"	7.846	0.585	0.000	472479.72	110292.66	323.49
M	107°54'15"	13.705	2.476	0.000	472485.11	110295.18	325.38
N	117°47'25"	9.203	2.052	0.000	472482.05	110291.35	324.95

5.STOJISČE	Y	X	H stoj.	H inštr.
4	472455.39	110293.89	314.70	1.630

O R I E N T A C I J E

Točka	Y	X	smer	utež	orientac.kot	pop.
-------	---	---	------	------	--------------	------

3 472473.56 110287.80 207°57'05" 1.0 260°34'41" 0°00'00"

sredina: 260°34'41"

Točka	hor.kot	Dred.	dH	prizma	Y	X	H
-------	---------	-------	----	--------	---	---	---

A	187°19'05"	3.009	0.003	0.000	472458.40	110294.00	316.33
B	205°43'00"	5.424	3.166	0.000	472460.60	110292.37	319.50
C	209°10'55"	5.410	2.300	0.000	472460.48	110292.06	318.63
D	249°34'50"	4.475	2.778	0.000	472457.62	110290.01	319.11
E	277°35'15"	5.809	2.480	0.000	472455.58	110288.08	318.81
F	297°49'25"	7.644	4.485	0.000	472452.98	110286.64	320.82
G	311°21'45"	10.349	7.039	0.000	472449.92	110285.11	323.37
H	351°40'55"	8.665	-0.458	0.000	472447.14	110291.25	315.87

Tahimetrični zapisnik: F:\kartografija\geos\POLIGON_JAMA11112.

```
=====
1.STOJISČE      Y      X      H stoj.      H inštr.
009            472429.75  110215.08    347.75      1.480
=====
```

```
=====
Točka      Y      X      smer      utež      orientac.kot      pop.
=====
008      472411.79  110222.98    0°00'00"    1.0    293°44'35"    0°00'00"
=====
sredina:    293°44'35"
=====
```

```
=====
Točka      hor.kot      Dred.      dH      prizma      Y      X      H
=====
5      117°13'35"    14.710    0.140    1.590    472441.18  110224.34  347.78
=====
```

```
=====
2.STOJISČE      Y      X      H stoj.      H inštr.
5            472441.18  110224.34    347.78      1.590
=====
```

```
=====
Točka      Y      X      smer      utež      orientac.kot      pop.
=====
009      472429.75  110215.08    0°00'00"    1.0    230°59'15"    0°00'00"
=====
sredina:    230°59'15"
=====
```

```
=====
Točka      hor.kot      Dred.      dH      prizma      Y      X      H
=====
6      206°35'15"    7.340    -1.200    1.590    472448.35  110225.92  346.58
=====
```