

**ANALIZA REZULTATOV MODELIRANJA OBJEKTOV IZ
OBLAKOV TOČK, PRIDOBLENIH Z RAZLIČNIMI METODAMI
DALJINSKEGA ZAZNAVANJA**

GRADBENIŠTVO

RAZISKOVALNA NALOGA

Raziskovalka iz G2B

Ljubljana, 6. 3. 2020

Kazalo vsebine

1.	Uvod.....	1
2.	Teoretične osnove.....	3
2.1	Terestrično lasersko skeniranje	3
2.1.1.	Terestrični laserski skenerji	4
2.1.2.	Registracija in georeferenciranje oblakov točk laserskega skeniranja.....	5
2.2.	Fotogrametrični zajem podatkov	7
2.1.3.	Bližnjeslikovna aerofotogrametrija.....	8
2.1.4.	Načrtovanje aerofotografiranja z letalnikom.....	9
2.2.	Obdelava oblakov točk.....	10
2.3.	Modeliranje objektov.....	11
3.	Opis delovišča, terenske izmere in obdelave podatkov	14
3.1.	Delovišče in terenska izmera	14
3.2.	Terestrično lasersko skeniranje izbranega objekta	14
3.3.	Aerofotogrametričen zajem izbranega objekta z letalnikom.....	17
4.	Analiza obdelave podatkov in rezultatov	20
4.1.	Izdelava 3D-modela iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja.....	20
4.2.	Izdelava 3D-modela iz oblaka točk aerofotogrametrije z letalnikom	21
5.	Zaključek.....	26
VIRI:		27

»Ta stran je namenoma prazna«

Kazalo slik

Slika 1: Naravni koordinatni sistem skenerja (Urbančič in Grigillo, 2015).....	4
Slika 2: Terestrični laserski skener Leica BLK360 (vir: Tilen Urbančič)	5
Slika 3: Registracija oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja (Kogoj, 2015).	6
Slika 4: Primeri umetnih tarč za postopek registracije in georeferenciranja oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja (Vezočnik, 2011).....	6
Slika 5: Georeferenciranje oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja (Kogoj, 2015).	7
Slika 6: Letalnik DJI PHANTOM PRO.	8
Slika 7: Višina leta in prostorska ločljivost fotografije (Viler, 2019).	9
Slika 8: Črno bela tarča za oslonilno točko pri fotografiranju z letalnikom.....	10
Slika 9: Samodejna obdelava oblaka točk: a) klasificiran oblak točk; b) segmentiran oblak točk.....	11
Slika 10: Žični model (vir: https://helpx.adobe.com/si/acrobat/using/interacting-3D-models.html).	12
Slika 11: Ploskovni model (vir: https://www.apexdesignservicesllc.com/surface-modeling/)	12
Slika 12: Osnovni volumski gradniki za izdelavo 3D-modelov (vir: https://ktownsend0.weebly.com/solid-models.html).....	13
Slika 13: Izbran objekt za tesno izmero - Gasilski dom v vasi Breg os Savi.....	14
Slika 14: Pogled po uvozu podatkov v program Leica Cyclone REGISTER 360.....	15
Slika 15: Postopke registracije v programu Leica Cyclone REGISTER 360: (a) osnovna oblaka točk; (b) premik v horizontalnem smislu; (c) rotacija v horizontalnem smislu; (d) neusklajenost oblakov točk v vertikalnem smislu; (e) premik oblaka v vertikalnem smislu. .	16
Slika 16: Registriran oblak točk terestričnega laserskega skeniranja – trikotniki predstavljajo stojišča skenerja, zelene črte so povezave med stojišči.	16
Slika 17: Georeferencirani oblak točk terestričnega laserskega skeniranja pred urejanjem, prikazan z intenzitetami.....	17
Slika 18: Razporeditev oslonilnih točk za zajem z letalnikom.....	18
Slika 19: Načrtovanje leta v programu 3D-survey Pilot.....	18
Slika 20: Redek oblak točk po povezavi fotografij.....	19
Slika 21: Določitev oslonilnih točk na fotografijah.....	19
Slika 22: Območje brez točk.....	20
Slika 23: Prikaz neželenih točk, ki jih je bilo potrebno odstraniti: (a) modra območja točke znotraj objekta, zeleno območje zastava, rdeče območje človek; (b) izbor točk žleba pred brisanjem.	21
Slika 24: 3D-model gasilskega doma iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja	21
Slika 25: Luknje v oblaku točk iz fotografij	22
Slika 26: 3D-model objekta iz aerofotogrametričnega zajema z letalnikom.....	22
Slika 27: Razpršenost točk okoli stene: (a) oblak točk terestričnega laserskega skeniranja; (b) oblak točk fotogrametričnega zajema.....	23
Slika 28: Razpršenost točk na stolpu: (a) oblak točk terestričnega laserskega skeniranja; (b) oblak točk fotogrametričnega zajema.....	23
Slika 29: Hrapava površina modela zaradi razpršenosti točk okoli ploskve.....	24

Slika 30: Združen in urejen oblak točk za izdelavo končnega 3D-modela.	25
Slika 31: Končni 3D-model gasilskega doma iz združenih podatkov obeh metod zajema.	25

Kazalo preglednic

Preglednica 1: Tehnični podatki skenerja Leica BLK360 (vir: https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/blk360).....	14
Preglednica 2: Tehnični podatki letalnika DJI PHANTOM 4 PRO (vir: https://www.dji.com/si/phantom-4-pro).....	17

»Ta stran je namenoma prazna«

Povzetek:

V raziskovalni nalogi smo obravnavali kakovost izdelave 3D-modela stavbe v obliki mreže nepravilnih trikotnikov. Podatke smo pridobili z dvema metodama izmere, ki jih uvrščamo na področje daljinskega zaznavanja. V raziskovalni nalogi predstavljamo postopek zajema in obdelave podatkov terestričnega laserskega skeniranja in bližnjeliskovne fotogrametrične izmere za izdelavo oblakov točk ter 3D-modela objekta. Praktični del se nanaša na izmero gasilskega doma v vasi Breg ob Savi. Kakovost izdelanih 3D-modelov iz obeh podatkovnih nizov smo analizirali v geometričnem in vizualnem pomenu. Ugotovili smo, da je za izdelavo modelov objektov najboljša kombinacija obeh podatkovnih nizov. Kot končni rezultat smo poleg digitalnih 3D-modelov objekta natisnili 3D-model.

Ključne besede: terestrično lasersko skeniranje, fotogrametrija, oblak točk, 3D-model

Abstract:

In this research, we considered the quality of 3D-building model as a triangulated irregular network. The data were obtained using two methods, which is classified in the field of remote sensing. In our research, we present o procedures for data acquisition and processing the terrestrial alser scanning and close range photogrammetric measurements for production of point cloud and 3D-building model. The practical part of the research concerns the measurement of a fire station in the village Breg ob Savi. The quality of the produced 3D-models for both datasets was analyzed in geometric and visual aspect. We found that the best 3D-building model is obtained by combining of both datasets. As a final result, we made a 3D-print od the building model.

Key words: terrestrial laser scanning, photogrammetry, point cloud, 3D-model

»Ta stran je namenoma prazna«

1. Uvod

Človek se že od nekdaj ukvarja s prikazovanjem sebe in svojega okolja na risbah, v obliki kipcev in z različnimi predmeti iz kamna, gline ali kovine. Namen tega izražanja je bil osebnega značaja (umetnost), počasi pa je dobil tudi praktične vrednosti. Če naštejemo le nekatere, so to prikaz meja parcel – današnji kataster, zemljevidi za potrebe trgovanja in vojaških pohodov, načrti za potrebe planiranja, rekonstrukcij, nadzorovanja, današnje 3D-modeliranje, ki se uporablja v proizvodnji, arhitekturi, urbanizmu, umetnosti in podobno.

Geodezija je imela vedno veliko vlogo v prikazovanju zemeljskega površja. Metode dela in geodetskega orodja se venomer izpopolnjujejo, od enostavnih orodij do naprednih modernih instrumentov. Še posebno v zadnjih nekaj desetletjih je bil ta razvoj zelo hiter in učinkovit.

Močno je napredovala oprema za daljinsko zaznavanje prostora (fotogrametrija in lasersko skeniranje), ki nam da verno sliko v obliki 3D-modela terena. Iz tako zaznanih podatkov lahko izdelamo številne produkte, med katere sodi tudi izdelava 3D-modela.

Zgrajeni objekt modeliramo iz oblakov točk, pridobljenih s fotogrametrijo in laserskim skeniranjem. To sta brezkontaktni merski metodi in se uporabljata za zajem geometrijskih podatkov kompleksnih ali nedostopnih površin.

3D-laserski skener omogoča celovito izmero vseh vidnih površin. Rezultat meritev je oblak točk, ki ga lahko uporabimo za dokumentacijo trenutnega stanja, merjenje sprememb objekta, za katero sta potrebni vsaj dve meritvi, merjenje prostornin, naklonov, površin in razdalj, hitra in natančna izdelava načrtov realnega stanja, izdelava 3D-modela in sprehod skozi oblak točk s pomočjo navidezne resničnosti.

Tehnologija laserskega skeniranja je podrobno razložena v knjigi avtorjev Vosselman in Mass (2010). Podatki terestričnega laserskega skeniranja so omogočili številne nove pristope k analizi prostorskih podatkov v številnih vedah in na številnih področjih. V domači literaturi lahko prvo obravnavo te tehnologije zasledimo v dokumentih po letu 2000 (Kolenc, 2004; Mozetič, 2004). Prve poskuse uporabe oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja najdemo na področju kulturne dediščine (Kolenc, 2008; Kastelic, 2010, Gabršček, 2015). Kakovost oblakov točk je omogočala uporabo podatkov tudi v nalogah, kjer je zahtevana visoka natančnost, npr. pri spremljanju stabilnosti objektov na hidroelektrarnah (Turčič, 2015), izdelavi promocijskega materiala (Kržan, 2016), spremljanju stabilnosti tal v kraški jami (Mihevc in Urbančič, 2019) itd. Na spletu lahko najdemo številne modele objektov, ki so nastali iz oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja, med katerimi najbolj izstopajo 3D-modeli vseh objektov Plečnikovih Žal v Ljubljani: <https://www.detailuna.eu/2017-plecniks-zale>.

Fotogrametrija je analogna oblika zajemanja in shranjevanja informacij o slikanem objektu. Ukvarja se z zajemanjem in obdelavo informacij o objektih in pojavih s pomočjo fotografskega posnetka (Gorjup, 1991). Pri aerofotogrametriji kot platformo lahko uporabimo

letalo ali letalnik, ki se neprestano premika in zajema posnetke. Zaradi nizkih stroškov in hitrega zajemanja podatkov, so ravno letalniki po več letih fotogrametrijo oživili kot način zajemanja prostorskih podatkov.

Geodetska podjetja so bila ena prvih, ki so uporabo letalnikov izkoristila za nadgradnjo svojih storitev. Glede na razvoj programske opreme je bila fotogrametrija z letalnikom uporabna predvsem za izdelavo modelov površja (Kerin, 2014; Bitenc, 2015). V smislu množične uporabe je bil predstavljen tudi poskus na področju 3D-katastra stavb (Stamenković, 2016), za analizo prometnih nesreč (Oset, 2019), na področju navidezne resničnosti (Zelenbaba, 2016).

Glede na dva popolnoma različna načina daljinskega zaznavanja sem se spraševala, kateri je boljši. Da bi dobila odgovor iz prve roke, sem se odločila za raziskovalno nalogo, kjer bom preverila kvaliteto obeh načinov zajemanja podatkov, podatke med seboj primerjala in ugotovila možnost povezave podatkov v isti model. Odločila sem se izdelati 3D-model stavbe našega gasilskega doma, kjer sem aktivna članica.

Postavila sem si naslednji raziskovalni vprašanja:

- Ali je možno iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja izdelati popoln 3D-model objekta?
- Ali fotografije zajema z brezpilotnim letalnikom omogočajo popolno izdelavo 3D-modela objekta?

Po obdelavi podatkov terenske izmere izbranega objekta bomo z izdelavo 3D-modelov objekta poskusili poiskati prednosti in slabosti posamezne metode zajema za izdelavo 3D-modela.

Raziskovalna naloga je sestavljena iz 5 poglavij. Po uvodnem poglavju predstavimo idejo za izdelavo raziskovalne naloge, znano literaturo z obravnavanega področja in raziskovalni vprašanja. V 2. poglavju predstavimo teoretične osnove obeh metod zajema prostorskih podatkov, postopke obdelave oblakov točk za potrebe modeliranja in pristope modeliranja. Delovišče in terensko izmero predstavimo v 3. poglavju. Predstavimo tudi uporabljen instrumentarij, tehnične lastnosti zajema podatkov z obema metodama in obdelavo podatkov ter izdelavo končnega 3D-modela. Popolnost izdelanih modelov s samodejno metodo izdelave 3D-modela ovrednotimo v 4. poglavju, kjer izpostavimo posebnosti obeh podatkovnih nizov in njune obdelave. V 5. poglavju predstavljamo ugotovitve, se do njih opredelimo in predstavimo svoje mnenje o možnostih nadgradnje opravljenega raziskovalnega dela.

2. Teoretične osnove

Razvoj tehnologije je omogočil, da se v praksi vse pogostejše uporabljajo metode množičnega zajema prostorskih podatkov. V primerjavi s tradicionalnimi geodetskimi metodami izmere v krajšem času pridobimo večjo količino podatkov, ki je primerljive kakovosti. Tovrstni podatki omogočajo podrobnejšo določitev geometrije merjenega objekta (Smogavec, 2015).

Podatkovna niza, ki smo ju uporabili za izvedbo naloge, sta rezultata izmer z dvema metodama daljinskega zaznavanja. Metode daljinskega zaznavanja so metode pridobivanja prostorskih podatkov o površini Zemlje ali objektov na njej, kjer je pri merjenju ne pridemo v neposredni stik z opazovanim delom zemeljskega površja ali objekta.

V tem poglavju najprej podrobneje predstavimo obe uporabljeni metodi daljinskega zaznavanja za izdelavo raziskovalne naloge, torej terestrično lasersko skeniranje in fotogrametrično metodo. Sledita podpoglavji, kjer predstavimo postopka obdelave oblakov točk za izdelavo 3D-modela objekta iz obeh podatkovnih nizov ter poglavje zaključimo z opisom postopkov modeliranja objektov.

2.1 Terestrično lasersko skeniranje

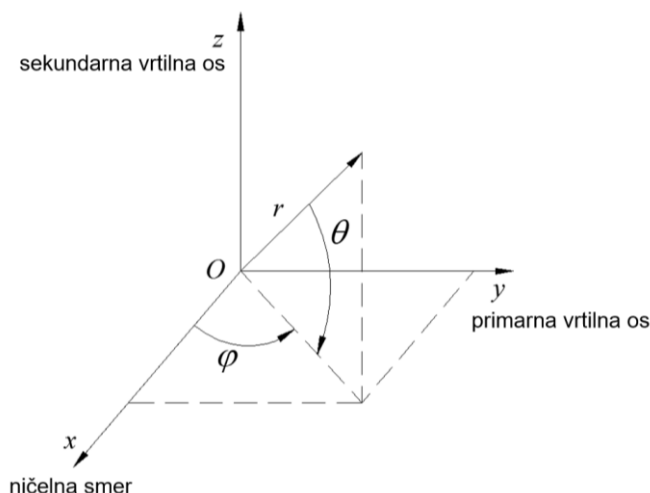
Terestrično lasersko skeniranje je po načinu izmere zelo podobno klasični geodetski izmeri ob uporabi tahimetra. Ker je za merjenje razdalje od skenerja do objekta uporabljena laserska svetloba, pogosto tehnologijo terestričnega laserskega skeniranja poimenujemo tudi kar lidar, ki izhaja iz angleške besedne zveze »light detection and ranging«.

V splošnem metode laserskega skeniranja delimo glede na platformo, na katero je pritrjen skener:

- satelitsko lasersko skeniranje oz. SLS (angl. satellite laser scanning),
- aerolasersko skeniranje oz. ALS (angl. airborne laser scanning),
- terestrično lasersko skeniranje oz. TLS (angl. terrestrial laser scanning),
- mobilno lasersko skeniranje oz. MLS (angl. mobile laser scanning).

Laserski skenerji so za našete platforme nekoliko različnih tehničnih specifikacij (predvsem vrsta in moč laserske svetlobe) in velikosti. Vsem metodam je skupno to, da na osnovi merjenih vrednosti v naravnem koordinatnem sistemu skenerja, torej poševne dolžine r , horizontalnega kota φ in vertikalnega kota θ , določimo pravokotne koordinate (x, y, z) vsaki merjeni točki (Urbančič in Grigillo, 2015) (Slika 1).

Končni rezultat skeniranja je velika množica vseh izmerjenih točk, ki jo imenujemo oblak točk (angl. point cloud). Kadar je skenirani objekt velik, moramo oblake točk iz različnih stojišč združiti v enotni koordinatni sistem.



Slika 1: Naravni koordinatni sistem skenerja (Urbančič in Grigillo, 2015)

Med lastnostmi laserskega skeniranja pred ostalimi geodetskimi metodami izmere prostorskih podatkov lahko kot prednosti izpostavimo:

- kratek čas zajema podatkov,
- delovanje v primeru slabše svetlobe in v temi,
- koordinate merjenih točk v skoraj realnem času,
- brezkontaktno merjenje – izmera nedostopnih in nevarnih območij,
- večkratna uporaba podatkov – tudi za različne namene,
- enostavno upravljanje instrumenta.

Glavne slabosti laserskega skeniranja so:

- veliko porabljenega časa za obdelavo podatkov,
- kakovostna strojna in programska oprema,
- vpliv kakovosti odbojnih površin na izmerjene točke,
- prisotnost neželenih točk (odbojev od drugih objektov).

2.1.1. Terestrični laserski skenerji

Princip delovanja terestričnih laserskih skenerjev je zelo podoben delovanju tahimetrov, ki za merjenje razdalje uporabljajo lasersko svetlobo. Razlika je predvsem v hitrosti izvajanja meritev posamezne točke in v natančnosti. Poslan laserski pulz se odbije od objekta in v kombinaciji z izmerjenima kotoma omogoča določitev prostorskih koordinat. Princip delovanja skenerjev je znan že zelo dolgo (Vosselman in Mass, 2010).

Terestrične laserske skenerje lahko razdelimo (Urbančič in Grigillo, 2015):

a) Glede na način merjenja dolžin:

- impulzni skenerji
- fazni skenerji
- triangulacijski skenerji

b) Glede na vidno polje:

- okenski skenerji
- hibridni skenerji
- sferni, panoramski skenerji

c) Glede na doseg:

- bližnji – zelo kratki doseg – triangulacijski skenerji
- skenerji kratkega dosega
- skenerji srednjega dosega
- skenerji dolgega dosega

d) Glede na mobilnost:

- statični skenerji
- sistemi za kinematične meritve

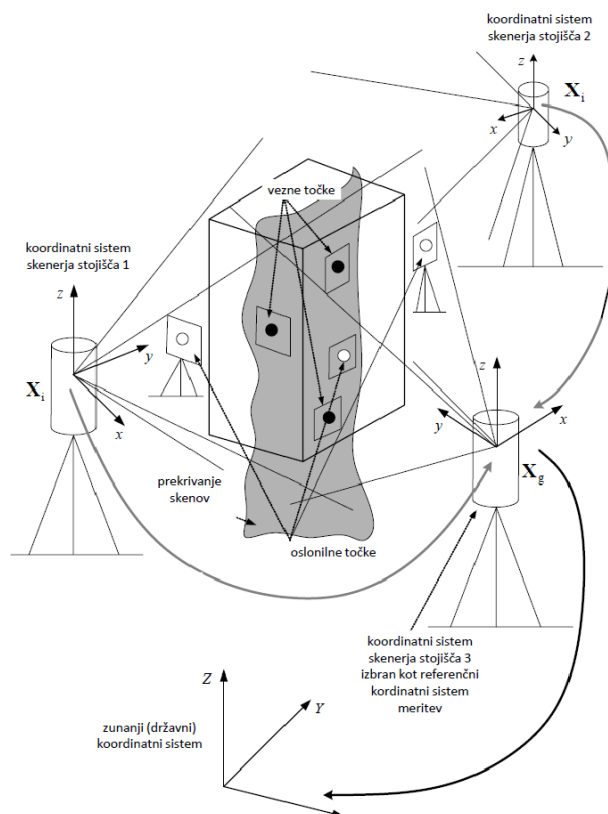
Primer skenerja, ki smo ga uporabili v raziskovalni nalogi, t. j. Leica BLK360, je statičen in srednjega dosega, impulzen in srednjega dosega (Slika 2).



Slika 2: Terestrični laserski skener Leica BLK360 (vir: Tilen Urbančič)

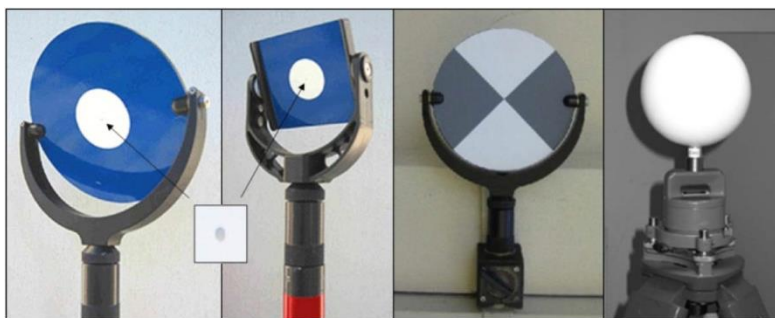
2.1.2. Registracija in georeferenciranje oblakov točk laserskega skeniranja

Pri skeniranju iz enega stojišča kot rezultat dobimo oblak točk v skenerjevem koordinatnem sistemu. Za celovito terestrično lasersko skeniranje izbranega območja običajno potrebujemo več stojišč. Postopku združevanja več stojišč v isti koordinatni sistem imenujemo registracija (Slika 3).



Slika 3: Registracija oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja (Kogoj, 2015)

Registracijo lahko izvedemo z uporabo veznih točk oz. veznih ploskev. Vezne točke običajno predstavljajo umetne tarče različnih barvnih vzorcev in geometrijskih oblik (Slika 4), vezne ploskve pa predstavljajo dobro definirane ploskve (najbolje ravnine) v oblaku točk.

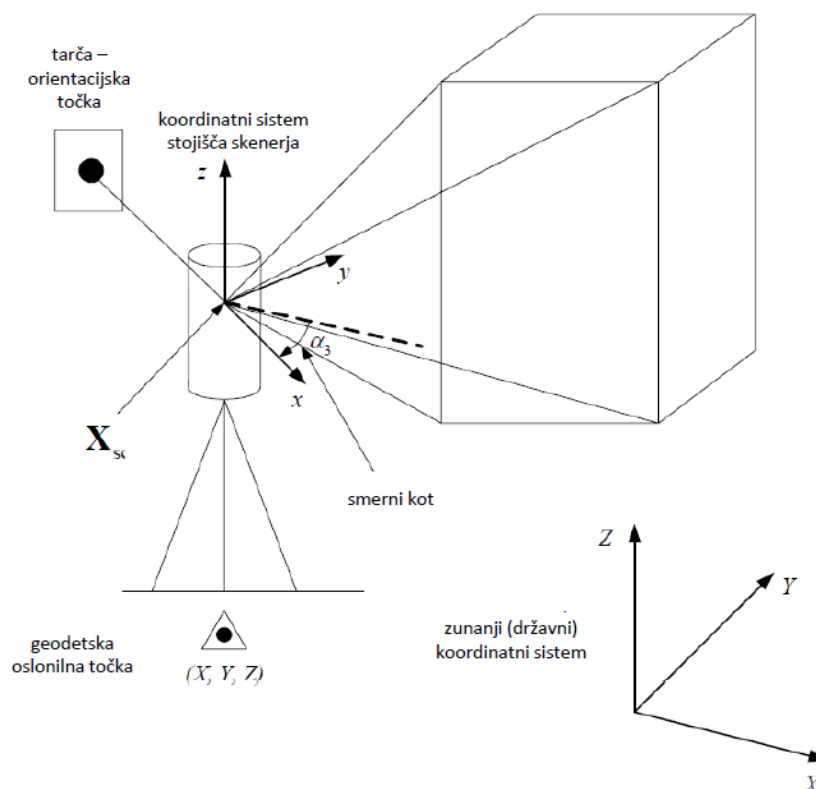


Slika 4: Primeri umetnih tarč za postopek registracije in georeferenciranja oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja (Vežočanik, 2011)

Registracija na osnovi veznih ploskev poteka z uporabo ene od metod iterativnega postopka iskanja istoležečih točk ali ploskev v dveh različnih oblakih točk in pogosto temelji na algoritmu ICP (angl. iterative closest points) (Besl in McKay, 1992).

Postopek umestitve registriranega oblaka točk v izbran koordinatni sistem imenujemo georeferenciranje (Slika 5). Najpogosteje gre za transformacijo oblaka točk v državni koordinatni sistem, lahko pa je izmera izvedena tudi v lokalnem koordinatnem sistemu. Za

georeferenciranje uporabimo transformacije, kjer oblaku točk ne spremenimo merila, ampak ga le premaknemo in rotiramo v pravi položaj.



Slika 5: Georeferenciranje oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja (Kogoj, 2015)

2.2. Fotogrametrični zajem podatkov

Fotogrametrija je znanost določanja prostorske lokacije in oblike objektov ter njihovo prepoznavanje iz fotografij oziroma slik. Fotogrametrijo lahko razvrstimo na podlagi različnih kriterijev:

- oddaljenost senzorja od objekta: mikroskopska, bližnjelikovna, aero ali satelitska fotogrametrija,
- področje uporabe: topografija, arhitektura, industrija, medicina,...
- število uporabljenih posnetkov: eno-slikovna, dvo-slikovna ali več-slikovna,
- uporaba različnih postopkov, nosilcev slik in instrumentov, ki so lahko analogni, analitični ali digitalni.

Nekatere kriterije lahko med seboj združimo, da dobimo natančnejši opis uporabljene metode. Rezultati oziroma izdelki fotogrametrije so lahko grafični, analitični ali semantični. Pod grafične spadajo točke, linije, telo, fotografija. Pod analitične rezultate spadajo koordinate, razdalje, koti, povišine in prostornine. Semantične rezultate predstavimo kot lastnosti objektov, ki jih interpretiramo v času izvrednotenja posnetkov. Izvrednotenje posnetkov je 2D ali 3D-digitalizacija, ki jo opravimo na posnetkih. Prednost pred drugimi

metodami je trajnost in množica podatkov na posnetkih, ki predstavljajo objektivni in primarni vir. Zelo pomembno je, da je zajem podatkov iz posnetkov ponovljiv.

V nadaljevanju podrobneje predstavljamo samo bližnj slikovni fotogrametrični zajem z uporabo daljinsko vodenega letalnika (v nadaljevanju letalnik), ki smo jo uporabili za izvedbo naloge.

2.1.3. Bližnj slikovna aerofotogrametrija

Letalniki (Slika 6) so na področju geodezije v zadnjih letih močno pridobili na popularnosti, predvsem na področju izdelave oblakov točk, izdelovanja 3D-modelov in ortofotov. Pri zajemu z letalnikom lahko parametre leta prilagodimo željeni natančnosti in razpoznavnosti, ki izhajata iz prostorske ločljivosti fotografij (Cramer, Przybilla in Zurnhorst, 2017). Glavna prednost tovrstnega zajema prostorskih podatkov je v hitrosti izmere in obdelave, glavni slabosti pa sta omejitev glede nosilnosti (uporaba dodatnih senzorjev velikokrat ni mogoča) in velika občutljivost na vremenske razmere (močno sonce, veter). Odločilen kriterij pri načrtovanju snemanja z letalnikom je prostorska ločljivost fotografij, ki se pri zajemu s fotoaparatom na letalniku, nahaja med 0,5 cm in 5 cm. Če privzamemo, da so lastnosti fotoaparata nespremenljive, je prostorska ločljivost fotografij odvisna predvsem od višine leta.



Slika 6: Letalnik DJI PHANTOM 4 PRO

Ponoven vzpon uporabe fotogrametričnih postopkov v postopkih pridobivanja prostorskih podatkov je rezultat povezav med tradicionalno fotogrametrijo in sodobnim področjem računalniškega vida. Raziskovalci s področja računalniškega vida se ukvarjajo s prepoznavanjem elementov na slikah oz. fotografijah, ki jih smiselno povezujejo v zaključene enote (Goli, 2010). Kot posledica razvoja je nastala t. i. SfM-fotogrametrija. Kratica izhaja iz angleške besedne zveze *Structure from Motion*, kar v prevodu pomeni struktura iz gibanja. Posebna značilnost SfM-fotogrametrije je samodejen postopek določitve orientacije in položaja fotografije v času snemanja. Metoda je za izdelavo oblaka točk iz množice fotografij

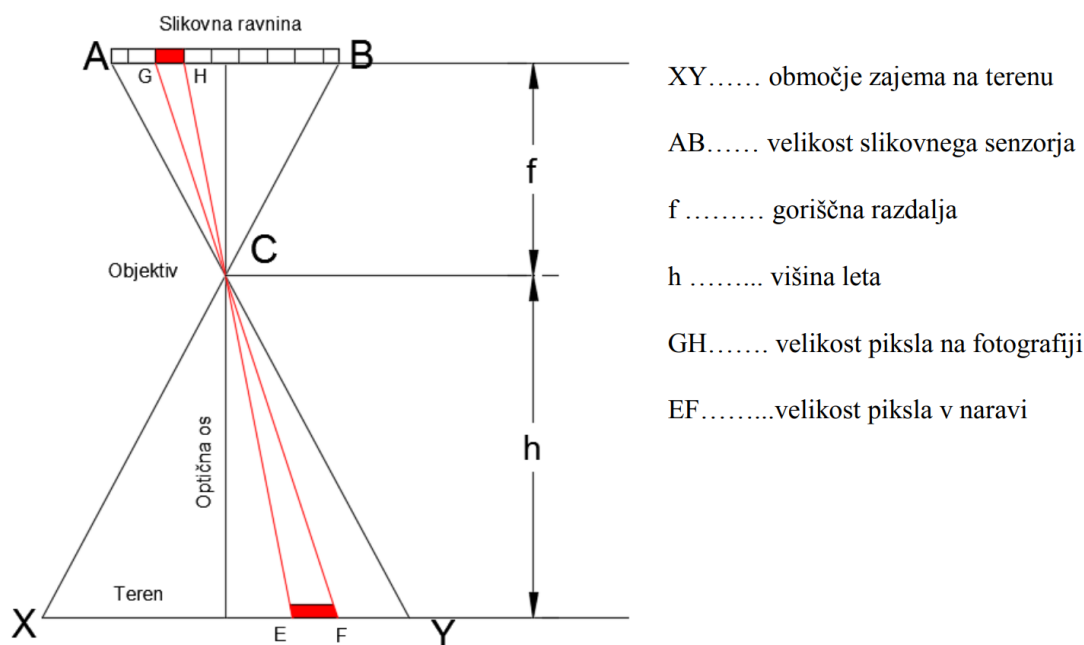
uporabna, kadar imamo na voljo digitalne fotografije objekta iz različnih zornih kotov. Na kakovost delovanja algoritma vplivajo številni dejavniki, med katerimi velja posebej izpostaviti višino leta, vzdolžni in prečni preklap fotografij, oblika fotografiranega objekta (terena) ter razporeditev in število oslonilnih točk (Guang in Weili, 2011).

2.1.4. Načrtovanje aerofotografiranja z letalnikom

Preden izvedemo snemaje, moramo določiti želeno prostorsko ločljivost fotografij (Slika 7), torej velikost slikovnega elementa. S tem je povezana zahtevana višina leta. Ostala dva pomembna parametra sta vzdolžni in prečni preklap fotografij.

Višino leta izberemo glede na lastnosti fotoaparata. Višina leta poleg velikosti prostorske ločljivosti fotografij vpliva tudi na natančnost izdelkov iz fotografij. Z višino leta je povezano tudi število fotografij, ki jih moramo narediti pri snemanju. Število fotografij in pot letalnika pri snemanju je na koncu povezana s potrebnim časom letenja letalnika. Z večanjem višine leta se prostorska ločljivost pikslov povečuje in obratno. Ravno nasprotno velja za čas snemanja. Višina leta torej vpliva na natančnost in točnost končnih izdelkov, kar pa moramo povezovati tudi z drugimi dejavniki v času snemanja, kot so veter in svetlobni pogoji in lastnostmi fotoaparata.

Prostorsko ločljivost fotografije lahko izračunamo iz podobnih trikotnikov, ki ju določajo razmerja med goriščno razdaljo ter velikost piksla na fotografiji in med višino leta in velikostjo piksla v naravi (Šantl, 2017) (Slika 7).



Slika 7: Višina leta in prostorska ločljivost fotografije (Viler, 2019)

Zadnji pomembnejši dejavnik pri načrtovanju aerofotografiranja z letalnikom je določitev števila in razporeditve oslonilnih točk. Vsi našeti dejavniki vplivajo na točnost končnih rezultatov. Oslonilne točke uporabimo za georeferenciranje končnih rezultatov v izbran koordinatni sistem. Iz tradicionalnih fotogrametričnih izmer velja, da oslonilne točke

postavimo na vogale in v sredino območja fotografiranja. Z večanjem območja oslonilne točke zgostimo enakomerno po celotnem območju. Pomembno je, da so oslonilne točke signalizirane z optimalnimi tarčami (Slika 8).



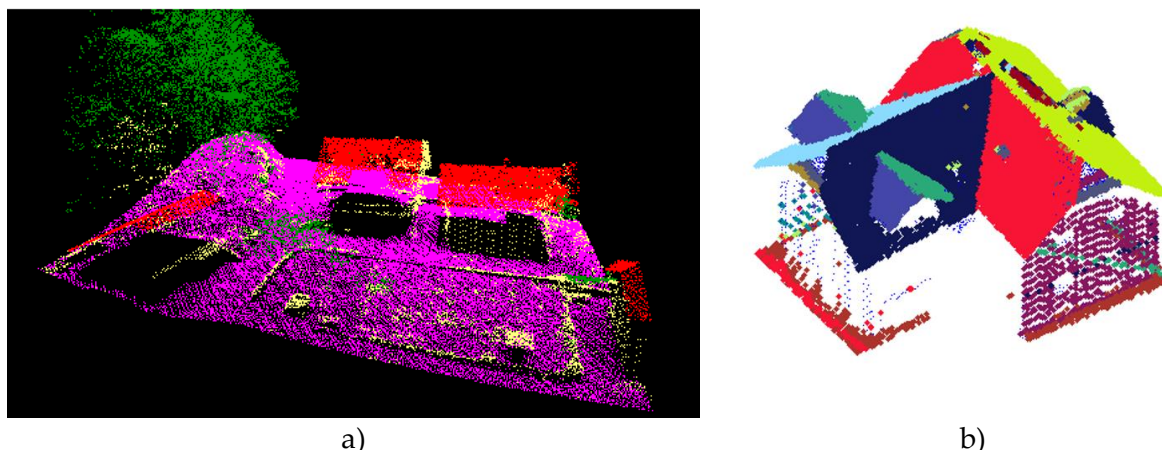
Slika 8: Črno bela tarča za oslonilno točko pri fotografiranju z letalnikom

2.2. Obdelava oblakov točk

Oblake točk, ki jih pridobimo s terestričnim laserskim skeniranjem ali z aerofotogrametrijo z letalnikom, je potrebno pripraviti za končne obdelave. Prvi korak obdelave je urejanje oblakov točk v smislu brisanja točk, ki ne pripadajo objektom ali terenu, ki smo ga izmerili. To so točke pod tlemi, v zraku, med dvema objektoma itd. Razlogi so v primeru laserskega skeniranja v kakovosti odboja laserskega žarka, pri fotogrametričnem oblaku točk pa v kakovosti fotografij. Brisanje točk lahko izvedemo ročno med vizualnim pregledom podatkov ali z uporabo ustreznih programskih orodij.

Sledi postopek filtriranja, kjer ločimo podatke na želene in neželene. Ta faza je običajna, kadar izdelujemo model površja in odstranimo vso vegetacijo ter objekte na površju Zemlje od talnih točk (Šantl, 2017).

V kolikor filtriran oblak točk ločujemo v še manjše podatkovne nize (visoka vegetacija, nizka vegetacija, stavbe,...), govorimo o klasifikaciji (Slika 9a). Če pri tem upoštevamo določene karakteristike teh podmnožic osnovnega oblaka točk, govorimo o segmentaciji. To je postopek, kjer npr. avtomatsko poiščemo točke, ki pripadajo posameznim stenam in strehi objekta (Urbančič in Grigillo, 2015) (Slika 9b). Pri tem so uporabljeni različni algoritmi. Nekateri poleg lege točk upoštevajo tudi barvne vrednosti posamezne točke. Tako pripravljeni podatki so osnova za modeliranje.



Slika 9: Samodejna obdelava oblaka točk: a) klasificiran oblak točk; b) segmentiran oblak točk

Za pregledovanje in enostavno urejanje (filtriranje) oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja in bližnjefotogrametrije obstajajo številni prostodostopni programi, za uporabo naprednejših operacij kot sta npr. klasifikacija in segmentacija pa imamo na voljo profesionalna programska orodja.

2.3. Modeliranje objektov

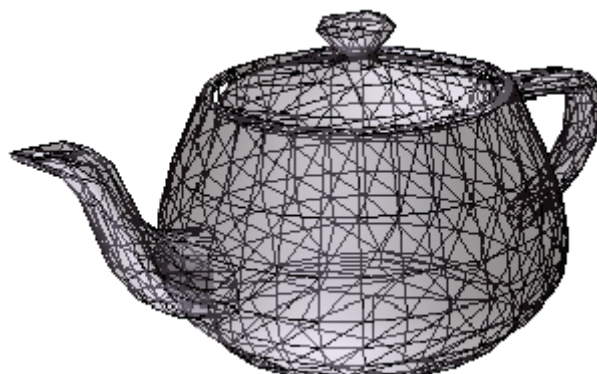
Postopek 3D-modeliranja razumemo kot proces ustvarjanja resničnih ali navideznih 3D-objektov. Številna programska oprema uporabniku omogoča, da lahko izbira med različnimi metodami in tehnikami modeliranja. Model lahko izdelamo na osnovi poligonov, krivulj ali kot kombinacijo obeh tehnik. Izbira je povezana samo s porabljenim časom in ne s kakovostjo končnega 3D-modela (Zelenbaba, 2016).

Izdelan 3D-model opišemo s 3D-podatki, ki so glede na uporabljeno programsko opremo lahko zapisani v različnih formatih. 3D-podatke lahko po vsebini razdelimo v tri skupine: videz, geometrija in scena. Za izdelavo običajnega 3D-modela objekta je najpomembnejša geometrija (Zelenbaba, 2016).

Izvorni podatek 3D-modela so 3D-točke, največkrat v obliki urejenega oblaka točk. Te točke pri kreiranju geometrijskih oblik predstavljajo vozlišča. Najbolj enostavna in pogosta oblika ploskve je triangulacijska ploskev. Videz modela izboljšamo z uporabo tekstur, ki jih nalepimo na njegovo površino. Podatke o barvnih vrednostih lahko privzamemo iz fotografij ali iz barvnih vrednosti posamezne točke. Uporaba tekstur izboljša realističnost modela (Zelenbaba, 2016).

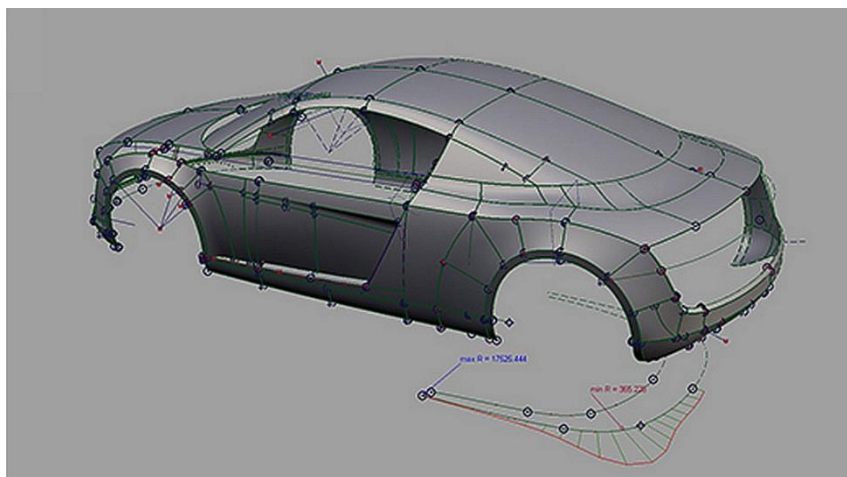
Modele lahko razvrstimo v naslednje skupine:

- *žični model (angl. wireframe)*: najenostavnejša oblika, enostavni za izdelavo, slabše možnosti pri upodobitvah (Slika 10).



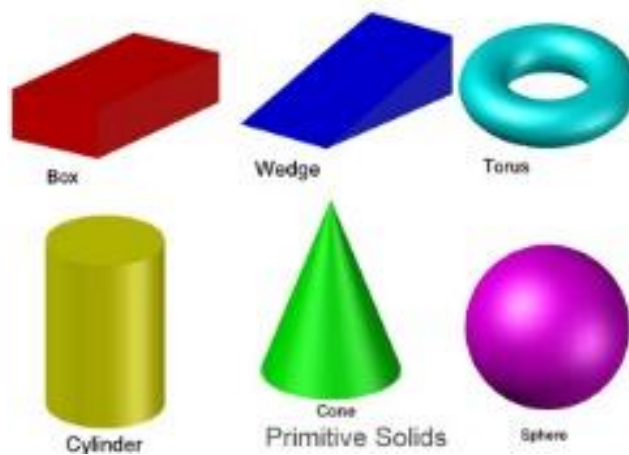
Slika 10: Žični model (vir: <https://helpx.adobe.com/si/acrobat/using/interacting-3D-models.html>)

- *Ploskovni modeli (angl. surface models)*: množice ploskev, ki so povezane v objekt. Površine določajo poligonalne mreže, ki so pri izdelavi prerezov videti »prazne«, ker nimajo prostornine (Slika 11).



Slika 11: Ploskovni model (vir: <https://www.apexdesignservicesllc.com/surface-modeling/>)

- *Volumski modeli (angl. solid models)*: sestavljajo jih osnovne 3D-oblike: kroglja, valj, stožec, kvader, itd. Imajo zaprt volumen, so popolni in nedvoumni (Slika 12).



Slika 12: Osnovni volumski gradniki za izdelavo 3D-modelov (vir:
<https://ktownsend0.weebly.com/solid-models.html>)

V primeru obdelave oblakov točk v okviru te raziskovalne naloge, bomo uporabili ploskovni način modeliranja.

3. Opis delovišča, terenske izmere in obdelave podatkov

Vpliv izbora podatkovnega vira, torej oblak točk terestričnega laserskega skeniranja ali oblak točk aerofotogrametrije z letalnikom, na izdelavo 3D-modela objekta, smo preverili na testnih podatkih, ki smo jih pridobili namenoma za izvedbo te raziskovalne naloge.

3.1. Delovišče in terenska izmera

Za testni objekt smo izbrali gasilski dom v vasi Breg ob Savi v občini Kranj. Objekt je primeren zaradi svoje velikosti in oblike: ima razgibano streho, stolp, stopnišče in več lomov zunanjih sten (Slika 13).



(a)



(b)

Slika 13: Izbran objekt za tesno izmero - Gasilski dom v vasi Breg ob Savi

Terensko izmero smo opravili v dveh dneh, ločeno za terestrično lasersko skeniranje in zajem z letalnikom. V nadaljevanju navajamo podrobnosti o terenskih izmerah.

3.2. Terestrično lasersko skeniranje izbranega objekta

Terestrično lasersko skeniranje gasilskega doma smo izvedli 5. 12. 2019. Pri skeniranju smo uporabili terestrični laserski skener Leica BLK360 (Slika 2). Tehnične podatke instrumenta smo zbrali v preglednici 1:

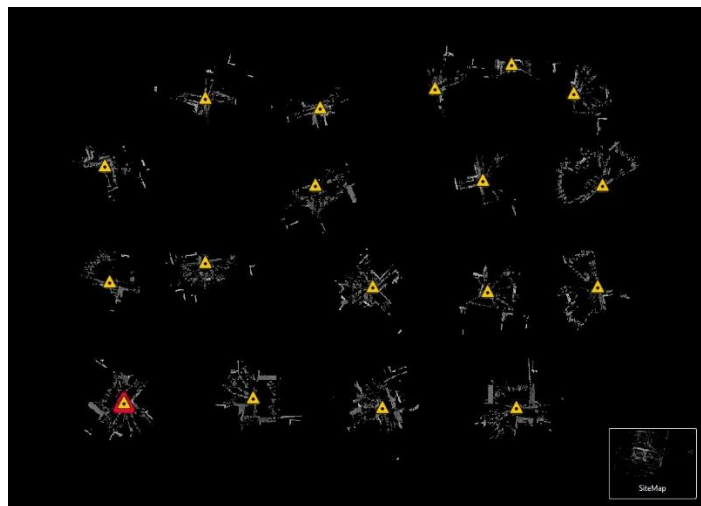
Preglednica 1: Tehnični podatki skenerja Leica BLK360 (vir: <https://leica->

Dimenzije	165 mm (višina) x 100 mm (premer)
Kot skeniranja	360° horizontalno in 300° vertikalno
Valovna dolžina laserja	830 nm
Doseg	0,6 m – 60 m
Hitrost skeniranja	360 000 točk/sekundo
Natančnost merjenja dolžin	4 mm/10 m oz. 7 mm/20 m
Načini skeniranja	3 načini: 5 mm, 10 mm ali 20 mm/20 m
Kamera	15.1 MP sistem treh kamer, sferna fotografija 360° x 300° v velikosti 150 MP; Termokamera – panoramska 360° x 70°
Natančnost skeniranih točk	6 mm/10 m oz. 8 mm/20 m
Spomin	do 100 stojišč

[geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/blk360](https://www.geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/blk360))

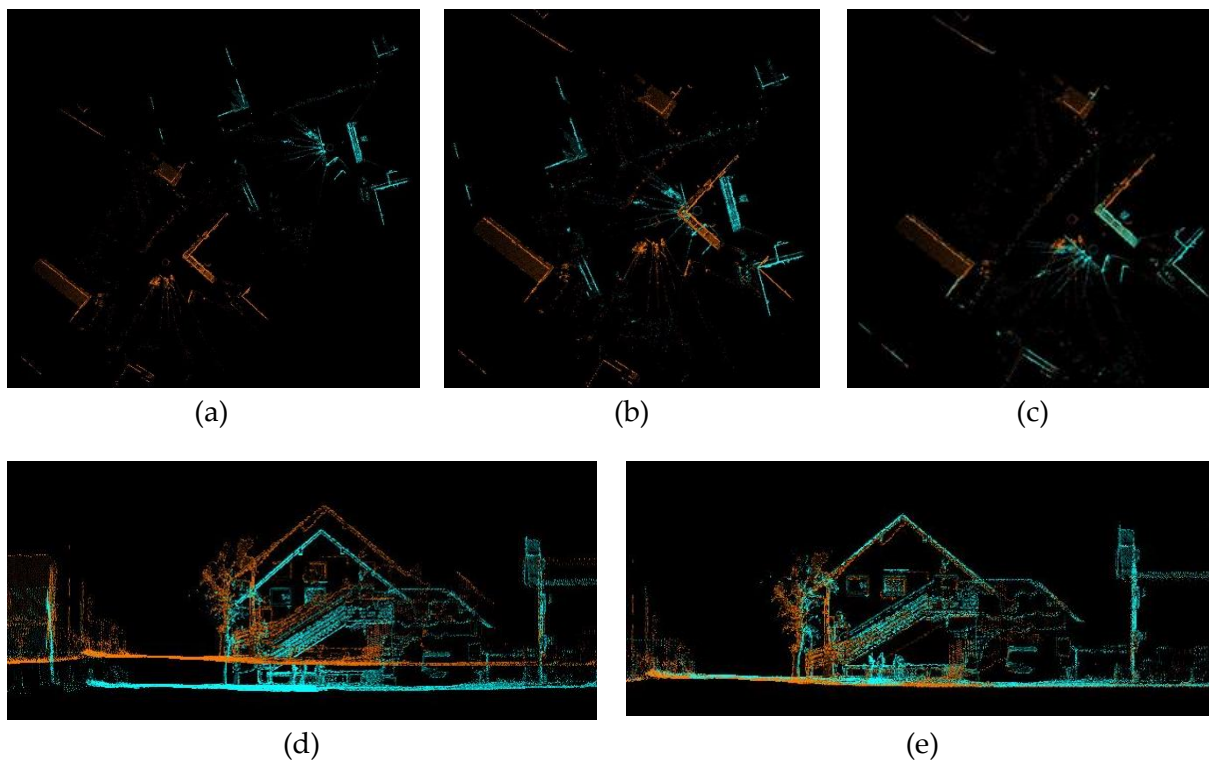
Za uporabo tega skenerja smo se odločili, ker ima zadovoljiv doseg in natančnost in ker je razvita programska oprema, ki omogoča kakovostno obdelavo podatkov skenerja.

Pri skeniranju smo uporabili srednjo gostoto skeniranja, torej 10 mm/20 m. Celoten objekt smo skenirali iz 18 stojišč (Slika 14).



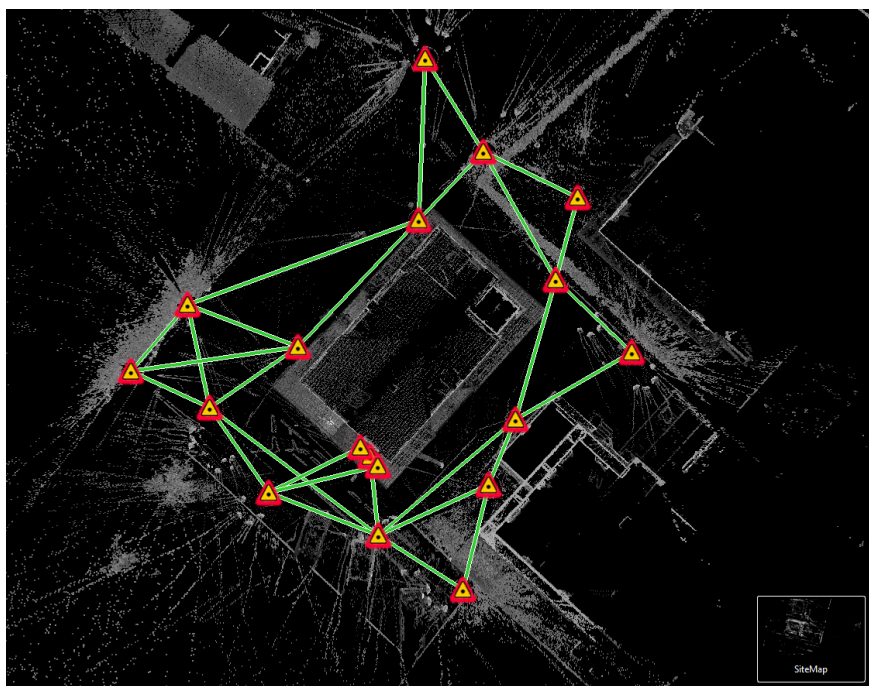
Slika 14: Pogled po uvozu podatkov v program Leica Cyclone REGISTER 360

Združitev oblakov točk v skupen oblak točk smo naredili v programu Leica Cyclone REGISTER 360. Postopek registracije poteka tako, da oblaka dveh stojišč s premiki in rotacijami najprej poravnamo v tlorisu in nato še v stranskem pogledu.



Slika 15: Postopke registracije v programu Leica Cyclone REGISTER 360: (a) osnovna oblaka točk; (b) premik v horizontalnem smislu; (c) rotacija v horizontalnem smislu; (d) neusklajenost oblakov točk v vertikalnem smislu; (e) premik oblaka v vertikalnem smislu

Program samodejno izravna oblaka točk med seboj tako, da so odstopanja na ploskvah, ki jih najde v obeh oblakih točk, minimalna. Po končani registraciji smo med oblaki točk posameznih stojišč ustvarili 29 povezav (zelena črta na Slika 16). Po registraciji oblakov točk program izračuna osnovne statistične mere o kakovosti registracije. Med vsemi povezavami imamo v povprečju 34 % preklap podatkov, srednje odstopanje po izravnavi oblakov točk med seboj pa znaša 8 mm. Osnovni združen oblak točk je imel nekaj več kot 54 milijonov točk.



Slika 16: Registriran oblak točk terestričnega laserskega skeniranja – trikotniki predstavljajo stojišča skenerja, zelene črte so povezave med stojišči

Registriran oblak točk smo georeferencirali v lokalni koordinatni sistem. V ta namen smo v okolici gasilskega doma postavili 5 oslonilnih točk. Iz odstopanj koordinat točk po georeferenciranju smo lahko izračunali srednje odstopanje, ki znaša 3,4 mm.

Celoten oblak točk terestričnega laserskega skeniranja pred urejanjem prikazujemo na Slika 17. Iz obrezali na bližnjo okolico gasilskega doma (približno 3 m) ter ročno izbrisali vse točke, ki ne predstavljajo odbojev od objekta. Tako urejen oblak točk je bil osnovi podatek za izvedbo 3D-modela objekta. Naredili smo ga v programu Metashape. Več o 3D-modelu in njegovi izdelavi je zapisano v poglavju 4.1.



Slika 17: Georeferencirani oblak točk terestričnega laserskega skeniranja pred urejanjem, prikazan z intenzitetami

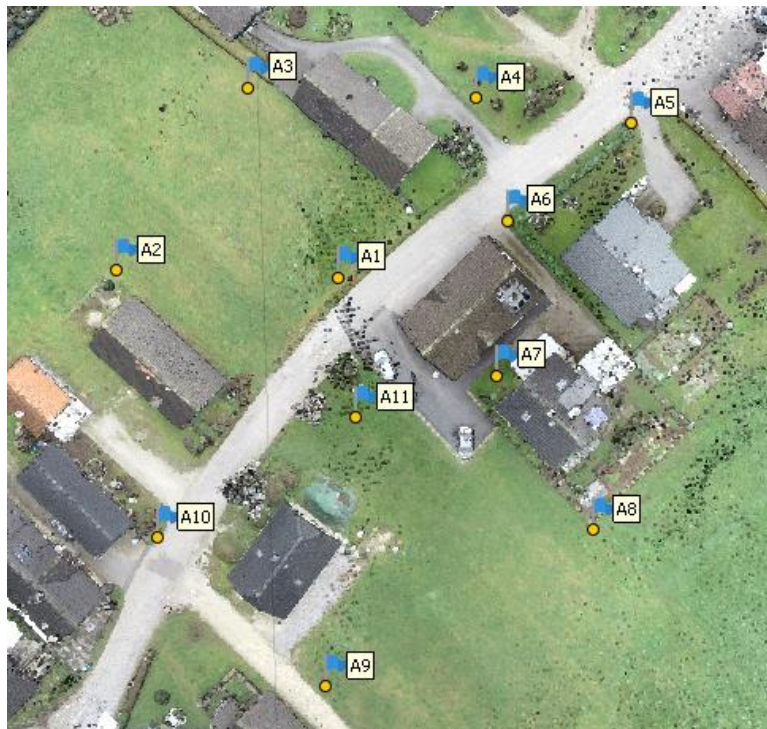
3.3. Aerofotogrametričen zajem izbranega objekta z letalnikom

Terenski zajem smo opravili 19. 12. 2019. Uporabili smo letalnik DJI PHANTOM 4 PRO (Slika 6 in Preglednica 2). Pred izvedbo snemanja smo izbrali tehnične parametre. Za kakovostnejši 3D-model objekta smo se odločili narediti nadirne in poševne fotografije. Skupaj smo naredili 194 fotografij – 98 nadirnih in 96 poševnih. Vzdolžni preklop med nadirnimi fotografijami je bil 80 %, prečni pa 70 %. Poševne fotografije so bile narejene na dveh višinskih nivojih. Zaradi želene velike podrobnosti ter slabših vremenskih razmer (megla) smo izbrali relativno nizko višino leta, in sicer 35 m. Prostorska ločljivost fotografij je bila nekaj manj kot 1 cm.

Preglednica 2: Tehnični podatki letalnika DJI PHANTOM 4 PRO (vir: <https://www.dji.com/si/phantom-4-pro>)

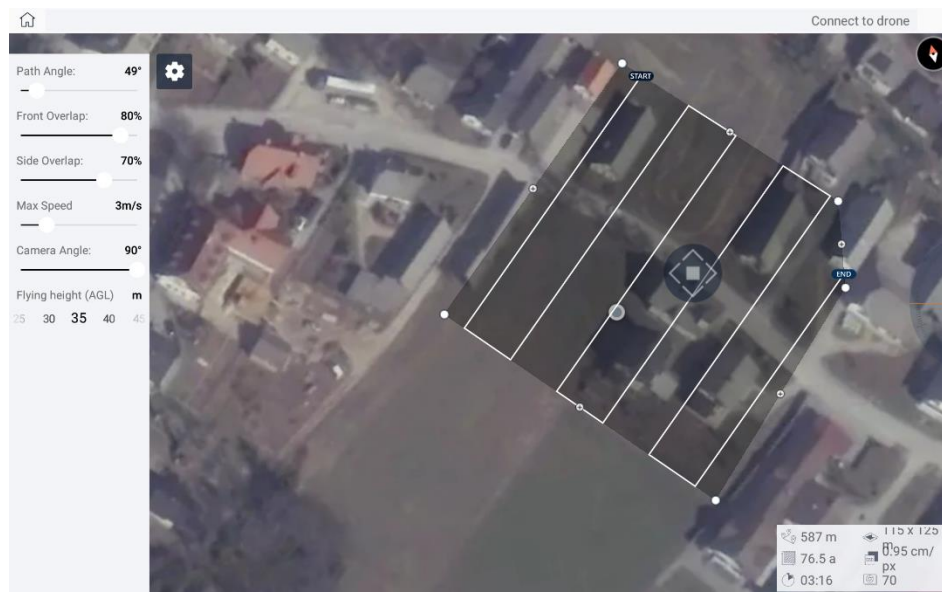
Premer	350 mm
Najvišja hitrost	72 km/h
Čas letenja	do 30 min
Domet upravljanja	do 3,5 km brez ovir
Navigacijski sistem	GPS in GLONASS
Stabilizator fotoaparata	3-osni
Fotoaparat	1" CMOS
Efektivni piksli	20 M točk

Za georeferenciranje oblaka točk smo pred snemanjem na celotnem območju enakomerno razporedili 11 oslonilnih točk, ki so bile določene v istem lokalnem koordinatnem sistemu kot pri terestričnem laserskem skeniranju (Slika 18).



Slika 18: Razporeditev oslonilnih točk za zajem z letalnikom

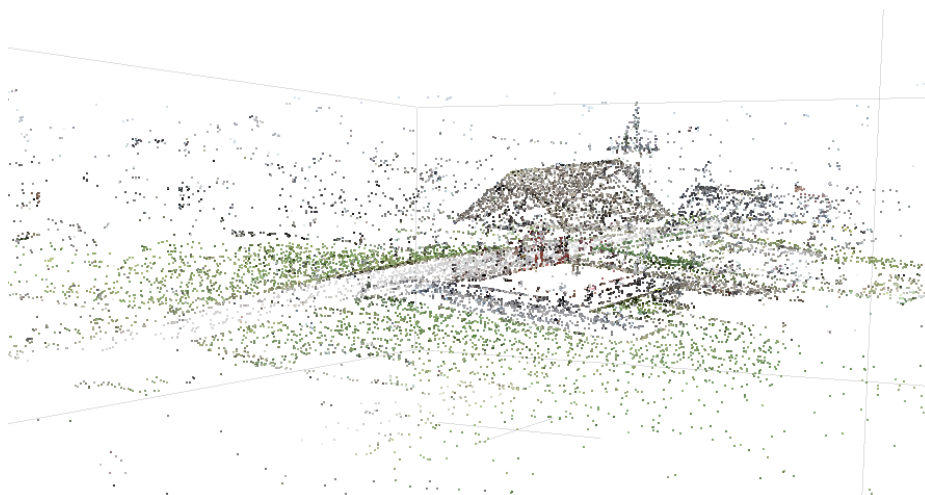
Snemanje nadirnih fotografij poteka samodejno na osnovi v naprej pripravljene poti. Za načrtovanje leta smo uporabili program 3D-survey Pilot (Slika 19).



Slika 19: Načrtovanje leta v programu 3D-survey Pilot

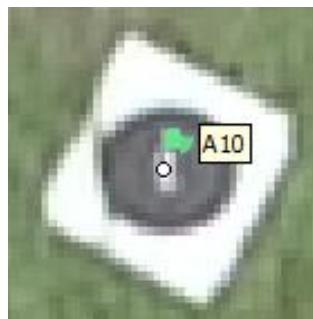
Postopek obdelave fotografij, izdelavo oblakov točk ter izdelavo 3D-modela smo izvedli v programu Metashape. Korake obdelave predstavljajo:

- *Povezava fotografij*: program z vgrajenim algoritmom samodejno poišče vezne točke med posnetimi fotografijami ter določi njihov položaj in orientacijo v času snemanja. Rezultat tega koraka je redek oblak točk, ki ga je sestavljalo 52 107 točk (Slika 20).



Slika 20: Redek oblak točk po povezavi fotografij

- *Merjenje oslonilnih točk na fotografijah*: oslonilne točke (Slika 21) služijo poleg georeferenciranja tudi kot točke, ki izpopolnijo geometrijo oblaka točk. Srednje odstopanje iz koordinat točk oslonilnih točk po končanem georeferenciranju je bilo 8,3 mm.



Slika 21: Določitev oslonilnih točk na fotografijah

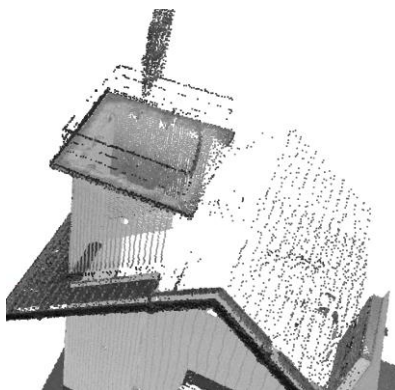
- *Izdelava gostega oblaka točk*: vezne točke in pravilno določeni položaji fotoaparata v času fotografiranja omogočajo določitev gostega oblaka točk. Točke so določene s prostorskim presekom slikovnih žarkov identičnih točk, ki jih program najde na slikah. Celoten gost oblak točk je pred urejanjem (brisanje točk) sestavljalo skoraj 108 milijonov točk (Slika 18).
- *Izdelava 3D-modela*: Iz gostega oblaka točk smo zgradili model s približno 4 milijoni nepravilnih trikotnikov, ki smo jim dodali teksturo.

4. Analiza obdelave podatkov in rezultatov

V analizi rezultatov se bomo najprej ločeno opredelili do rezultatov modeliranja iz obeh vrst oblakov točk, na koncu pa še med seboj. Poudarimo, da so rezultati te raziskovalne naloge pridobljeni na osnovi postopka ploskovnega modeliranja, kjer točke povežemo z nepravilnimi trikotniki.

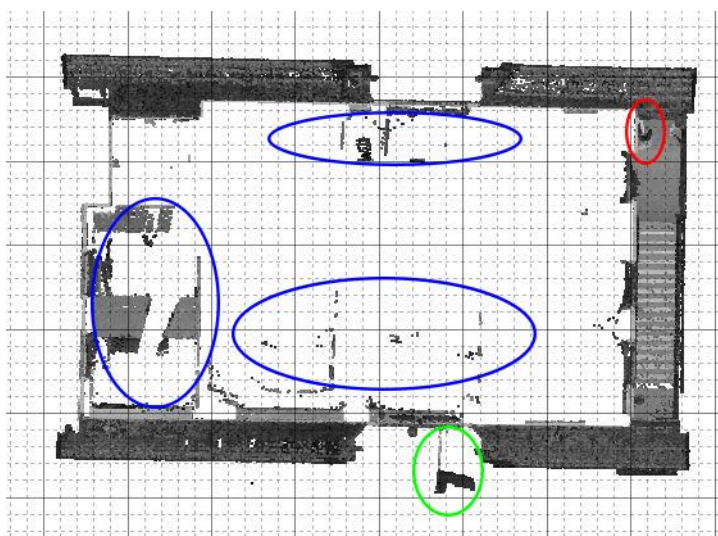
4.1. Izdelava 3D-modela iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja

Oblak točk je rezultat skeniranja iz tal, kar pomeni, da imamo višjih delih objekta lahko nekaj območij, ki jih nismo mogli dobro skenirati. Obravnavani objekt ima v geometrijskem smislu največjo posebnost to, da ima stolp. Največjo luknjo med podatki za kreiranje 3D-modela imamo torej na delu strehe, ki je v senci stolpa in na steni stolpa, ki je orientirana proti slemenu strehe. Tudi na sami strehi je zaradi velikega vpadnega kota gostota točk manjša (Slika 22).

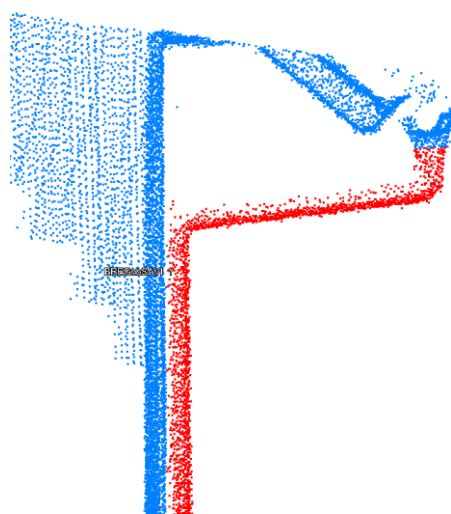


Slika 22: Območje brez točk

Med točkami najdemo take, ki nam onemogočajo kakovostno izdelavo 3D-modela. Izbrisati smo morali npr. točke znotraj objekta, zastave, konzol, ljudi, žlebov ... (Slika 23).



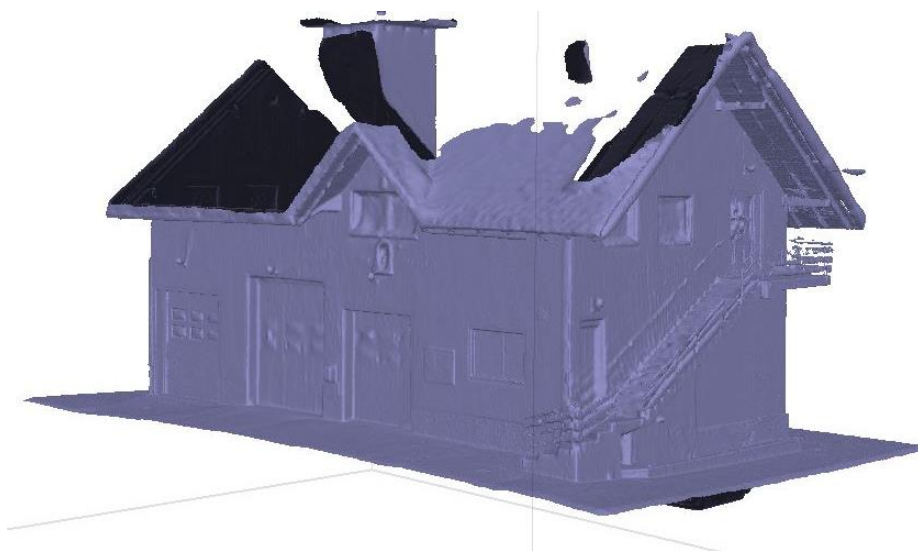
(a)



(b)

Slika 23: Prikaz neželenih točk, ki jih je bilo potrebno odstraniti: (a) modra območja točke znotraj objekta, zeleno območje zastava, rdeče območje človek; (b) izbor točk žleba pred brisanjem

Ker je točnost izdelanega 3D-modela odvisna od pravilne ureditve oblaka točk, je za izdelavo digitalnega končnega 3D-modela običajno potrebnih več ponovitev. Kljub trudu nam samo iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja ni uspelo izdelati popolnega 3D-modela gasilskega doma, saj je bilo na strehi premalo točk, da bi jih algoritmi uspeli povezati v zaključene ploskve (Slika 24).



Slika 24: 3D-model gasilskega doma iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja

4.2. Izdelava 3D-modela iz oblaka točk aerofotogrametrije z letalnikom

Iz fotografij smo uporabili nadirne in poševne fotografije. Kljub temu je v oblaku točk moč najti kar nekaj območij, kjer je oblak točk zelo redek ali celo brez točk. Gre za območja, kjer ni bilo dovolj slik ali pa slike niso imele zadostnega preklopa. Največje luknje so na spodnji strani strehe, ki sega preko zidov vse od kapi do slemena. Zaradi slabe teksture (večja površina enake barve) je kar nekaj območij na dveh stenah, ki so slabo zapolnjene s točkami, dodatno pa so točke zelo razpršene okoli ravnine, ki definira to steno (Slika 25).



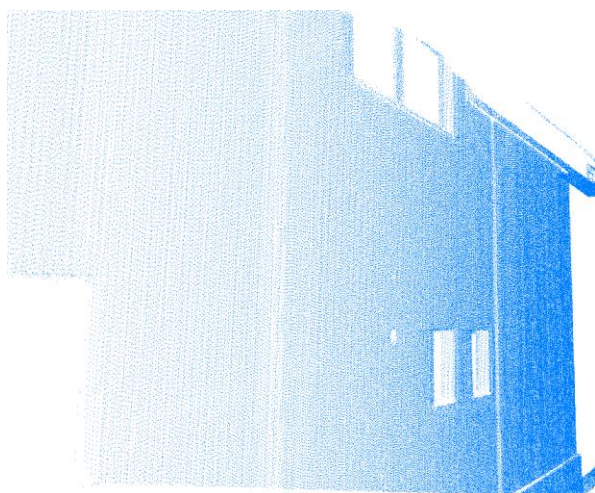
Slika 25: Luknje v oblaku točk iz fotografij

Tudi v primeru tega oblaka točk smo morali vse neželene točke izbrisati in tako urejen oblak točk uporabiti za izdelavo 3D-modela (Slika 26). Vidimo, da je izdelani 3D-model na prvi pogled videti popoln, vendar zaradi lukenj med podatki obstaja kar nekaj območij, kjer so prisotne napake.



Slika 26: 3D-model objekta iz aerofotogrametričnega zajema z letalnikom

Če primerjamo oblaka točk obeh metod izmere, lahko ugotovimo, da imamo na ravni stenah v oblaku točk terestričnega laserskega skeniranja točke veliko manj razpršene okoli površine. Prisotnih je tudi manj neželenih točk (šuma) v okolici oken, žlebov ipd. (Slika 27). Razliko v razpršenosti točk lahko vidimo tudi na primeru stolpa in sirene na stolpu (Slika 28).

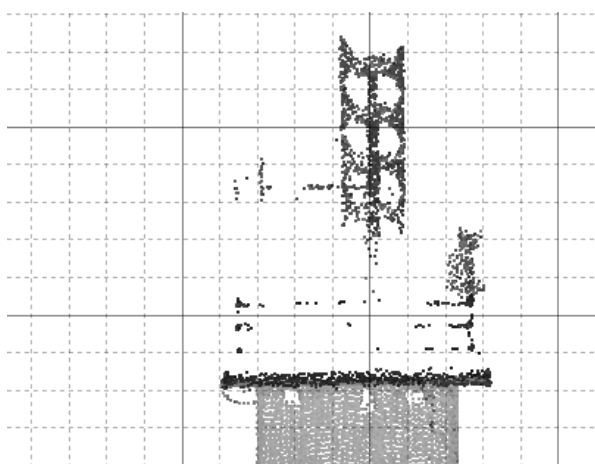


(a)



(b)

Slika 27: Razpršenost točk okoli stene: (a) oblak točk terestričnega laserskega skeniranja; (b) oblak točk fotogrametričnega zajema



(a)



(b)

Slika 28: Razpršenost točk na stolpu: (a) oblak točk terestričnega laserskega skeniranja; (b) oblak točk fotogrametričnega zajema

Razpršenost točk okoli ploskve se opazi tudi na končnem modelu, kjer je površina stene videti hrapava (Slika 29).



Slika 29: Hrapava površina modela zaradi razpršenosti točk okoli ploskve

Za oba podatkovna niza velja, da izdelava modela ni v popolnosti mogoča, če točke ne predstavljajo celotnega objekta, ki bi ga radi modelirali. Z izvedbo terenske izmere, obdelave podatkov in modeliranje objekta smo med izdelavo ugotovili naslednje prednosti in slabosti posamezne metode izmere:

a) Terestrično lasersko skeniranje

Prednosti:

- dobra relativna natančnost oblaka točk,
- površine, vidne s tal, so skenirane popolno,
- oblak točk je takoj v pravem merilu,
- enostavna registracija oblakov točk s samodejnimi postopki ploskovnega ujemanja.

Slabosti:

- redki podatki na strehi,
- luknje v oblaku točk za območja v senci.

b) Aerofotogramerija z letalnikom

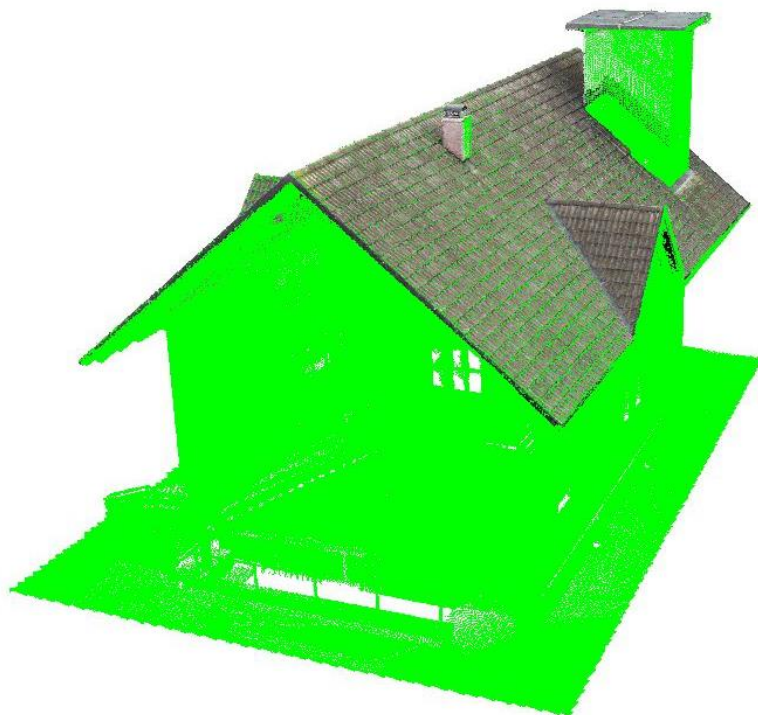
Prednosti:

- popolnejši zajem območij iz zraka,
- ponovljivost obdelave podatkov,
- informacijska vrednost podatkov (barvne vrednosti).

Slabosti:

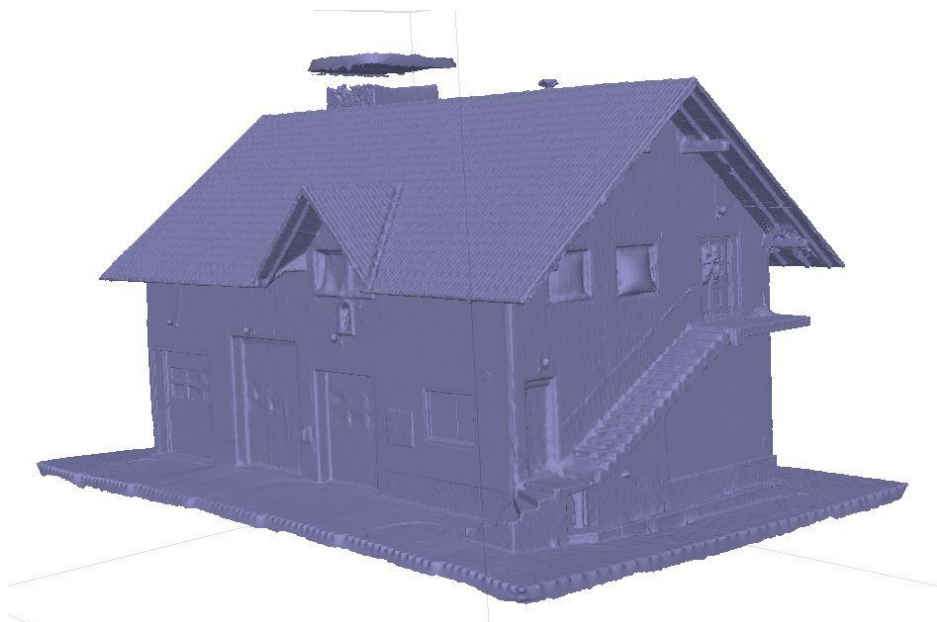
- luknje nujna dopolnitev zajema s terestričnimi podatki,
- obsežnejša obdelava podatkov za izdelavo 3D-modela,
- potreben čas za samodejne postopke obdelav.

Vidimo torej, da ima vsaka od uporabljenih metod nekatere prednosti in slabosti, ki se odražajo tudi na končnem izdelku. Odločili smo se, da za izdelavo končnega 3D-modela iz obeh podatkovnih nizov uporabimo tisti del oblaka točk, kjer so točke dobro določene. Za vse zunanje stene in spodnji del strehe smo uporabili podatke terestričnega laserskega skeniranja, za streho iz del površin na stolpu pa iz fotogrametričnega zajema (Slika 30).



Slika 30: Združen in urejen oblak točk za izdelavo končnega 3D-modela

Iz združenih podatkov smo s samodejnim postopkom izdelave 3D-modela dobili najboljši možni 3D-model. Vidimo lahko, da je razpršenost točk okoli sten manjša, na modelu ni več toliko lukenj,... Glavna težava, ki je brez dodatnega »ročnega« modeliranja ni možno odpraviti, je pas pod vrhom stolpa (Slika 31).



Slika 31: Končni 3D- model gasilskega doma iz združenih podatkov obeh metod zajema

5. Zaključek

V raziskovalni nalogi smo se ukvarjali z obdelavo oblakov točk z namenom izdelave 3D-modela. Za zajem podatkov smo izbrali dve sodobni tehnologiji daljinskega zaznavanja, in sicer terestrično lasersko skeniranje in aerofotogrametrični zajem z letalnikom. Z osnovnimi postopki obdelave smo izdelali dva oblaka točk. Glede na način izmere oz. vhodni podatek se oblaka med seboj zelo razlikujeta po kakovosti in popolnosti. Pri obdelavi podatkov smo uporabili profesionalno programsko opremo in vse pristope, ki se uporabljajo v praksi.

Postavili smo si raziskovalni vprašanje, ki se nanašata na popolnost izdelave 3D-modela iz posameznega od vhodnih podatkov. Sklenemo lahko, da je za izdelavo 3D-modela v obliki mreže nepravilnih trikotnikov s samodejnimi postopki gotovo najboljša rešitev združitve obeh podatkovnih setov. V obeh primerih nismo prišli do povsem popolnega modela. Iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja nam ni uspelo izdelati modela na delu strehe, ker je bila gostota točk premajhna. Rešitev te težave bi bila v večji gostoti skeniranja, več stojiščih ali v dodatnem generiranju podatkov na tem delu objekta. Pri oblaku točk fotogrametričnega zajema smo imeli največ težav z modeliranjem objekta na spodnji strani strehe, ki je vidna iz tal. Oblak točk bi na tem delu lahko zgostili z dodatno izvedenim fotografiranjem iz tal.

Končno izdelani model objekta je pripravljen za izdelavo fizičnega modela v obliki 3D-tiska in uporabo v sodobnih načinih uporabe digitalnih 3D-modelov. Raziskovalno nalogo bi v prihodnosti bilo možno nadgraditi z izdelavo 3D-modela na osnovi kreiranja enostavnih geometrijskih oblik (ravnina, valj, krogla,...) in izdelati topološko popoln 3D-model, raziskovanje pa nadaljevati na področju različnih vizualizacij, izdelave preletov in na področju navidezne resničnosti.

VIRI:

Besl, P.J., McKay, N.D. 1992. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 14: 239–256.

Bitenc, M. 2014. Brezpilotni letalniki – od igrace do večnamenskih robotov. Geodetski vestnik, 58, 1, 155–158.

Cramer, M., Przybilla, H., J., Zurnhorst, A. 2017. UAV cameras: overview and geometric calibration benchmark. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Gabršček, T. 2015. Analiza geometrije objekta kulturne dediščine iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Goli, B. 2010. Računalniški vid v sistemih varovanja. Diplomsko naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za varnostne vede.

Gorjup, Z. 1991. Fotogrametrija. Tehniška založba Slovenije.

Guang, Y., Weili, J. 2011. Research on Impact of Ground Control Point Distribution on Image Geometric Rectification Based on Voronoi Diagram. 2011. Procedia Environmental Sciences 11.

Kastelic, M. 2010. Obdelava podatkov laserskega skeniranja v programu Geomagic na primeru Mislejevega portal. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Kerin, A. 2014. Uporaba posnetkov z brezpilotnega zračnega plovila za izdelavo digitalnega modela reliefa. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezije.

Kolenc, R. 2004. Terestrično 3D-lasersko skeniranje. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Kogoj, D. 2015. Prosojnice predavanj pri predmetu Geodetski merski sistemi, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Kotnik, D. 2008. Izdelava 3D-modela Plečnikovih propilej na ljubljanskih Žalah iz podatkov laserskega skeniranja. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezije.

Kržan, A., 2016. Uporaba terestričnega laserskega skeniranja za izdelavo promocijskega darila. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Mihevc, A., Urbančič, T. 2019. Spremljanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem. Slovensko združenje za geodezije in geofiziko, Ljubljana, januar 2019.

Mozetič, B. 2004. Terestrično 3D (trirazsežno) lasersko skeniranje. *Geodetski vestnik*, 48, 3: 351–362.

Oset, K. 2019. Kartiranje prometnih nesreč iz fotografij z daljinsko vodenega zrakoplova. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezije.

Smogavec, L. 2015. Uporabnost terestričnega laserskega skeniranja pri izdelavi geodetskega načrta. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Stamenković, M. 2016. Možnost vzpostavitve 3D-katastra stavb na osnovi meritev brezpilotnih letal. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Šantl, J. 2017. Analiza vpliva prostorske ločljivosti oblakov točk na izračun prostornin. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Turčič, M. 2015. Terestrično lasersko skeniranje prelivne stene male hidroelektrarne Melje za izračun deformacij. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Urbančič, T., Grigillo, T. 2015. Lidar in uporaba laserskega skeniranja v geodezije. Prosojnice predavanja na Inženirski zbornici Slovenije.

Viler, F. 2019. Vpliv ločljivosti fotografij z letalnika na položajno točnost oblaka točk in ortofota. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezije.

Vezočnik, R. 2011. Analysis of terrestrial laser scanning technology for structural deformation monitoring. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezije.

Vosselman, G., Maas, H.-G. 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing, CRC Press.

Zelenbaba, D. 2016. Modeliranje podatkov terestričnega laserskega skeniranja za uporabo v navidezni resničnosti. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezije.