

GEODETSKA IZMERA FASAD STAVB ZA NAMEN ENERGETSKE SANACIJE

GEODETTIC EVALUATION OF BUILDING FACADES FOR THE PURPOSE OF ENERGY RENOVATION

Simona Savšek, Matjaž Flerin, Klemen Kregar, Dušan Kogoj

UDK: 528.3:69.059.2:692.23
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
Prispelo: 5. 4. 2018
Sprejeto: 31. 5. 2018

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2018.02.201-217
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 5. 4. 2018
Accepted: 31. 5. 2018

IZVLEČEK

Energetska sanacija ali prenova stavb je inženirski projekt, s katerim dosežemo, da po sanaciji stavba za ogrevanje in hlajenje porabi vsaj polovico manj energije kot pred sanacijo. V članku prikažemo možnosti sodelovanja geodetske stroke pri energetski sanaciji kompleksnejših stavb, ki zahtevajo izdelavo gradbenih načrtov na osnovi 3D-grafičnih modelov stavb. Na večstanovanjski stavbi je predstavljena možnost kombinacije klasične terestrične izmere in izmere z uporabo terestričnega laserskega skeniranja za namen energetske sanacije s predhodno izdelanimi fasadnimi elementi. Glede na zahtevano visoko natančnost je potrebno vzpostaviti ustrezno geodetsko mrežo in zagotoviti visoko ločljivost skeniranega detajla. Raziskava na praktičnem primeru kaže, da lahko geodezija z naprednimi tehnologijami izmere nudi podporo drugim strokam in s tem pomembno vpliva na učinkovitost in ekonomičnost energetskih sanacij.

ABSTRACT

Energy remediation or renovation of buildings is an engineering project that provides saving of at least half the energy used for heating and cooling. The article presents the possibilities of cooperation of the geodetic profession in the energy remediation of complex buildings that require the construction of building plans based on 3D-graphic models of objects. The combination of classical terrestrial measurement of facade and terrestrial laser scanner is presented on a case of multi-apartment building, with the aim of energy remediation using prefabricated facade elements. Considering the required high precision, adequate geodetic network needs to be established and high resolution of detail scanning must be provided. The measurement and processing of the reference object show that geodesy with advanced measurement technologies can provide support to other professions and thus significantly influence the efficiency and cost-effectiveness of energy remediation.

KLJUČNE BESEDE

geodetska mreža, energetska sanacija fasad, klasična terestrična izmera TPS, terestrično lasersko skeniranje TLS, metrični 3D-grafični model stavbe

KEY WORDS

geodetic network, energy renovation of facade, classical terrestrial measurement TPS, terrestrial laser scanning TLS, metric 3D-graphic model of object

1 UVOD

V zadnjem desetletju je slovenska zakonodaja skladno z evropsko direktivo povzela načela in zaostрила zahteve energetske učinkovitosti stavb v Sloveniji. Tako je postala prenova starejših, predvsem neustrezno grajenih stavb, nujna. V Sloveniji prevladujejo klasične metode sanacije fasad stavb, zato je potrebno izvajalcem predstaviti možne rešitve, ki jih omogoča sodobna tehnologija. V članku obravnavamo načine energetskih sanacij, ki zahtevajo izdelavo gradbenih načrtov na osnovi geodetske izmere in 3D-grafičnih modelov stavb. Geodetski posnetek lahko poenostavi in poceni energetsko sanacijo, pri kompleksnejših fasadah in modernih postopkih sanacije pa so podrobni načrti, ki jih zagotovimo z geodetskimi izmerami, nujno potrebni.

Večina avtorjev, ki se ukvarja s tematiko energetske sanacije objektov s predhodno izdelanimi fasadnimi elementi, poudarja, da le kombinacija različnih geodetskih metod zagotavlja natančno, ekonomično, hitro in celovito izdelavo 3D-grafičnega modela. Herzog et al. (2004) navajajo nekatere bistvene prednosti energetske sanacije objektov s predhodno izdelanimi fasadnimi elementi. Na osnovi realističnega 3D-modela stavbe, ki je predmet sanacije, lažje zagotovimo strogi nadzor in visoko natančnost izdelave fasadnih elementov, visoko stopnjo skladnosti modela z realnim stanjem, zato so terenske izgube (materialne in časovne) minimalne. Larsen et al. (2011) kot sprejemljive geodetske metode za zajem geometrije saniranega objekta primerjajo metode terestričnega laserskega skeniranja (TLS – Terrestrial Laser Scanning), klasične terestrične izmere (TPS – Theodolite Positioning System) in fotogrametrije. Metode naj bi omogočale izdelavo fasadnih elementov z dimenzijsko točnostjo do 5 mm. Scherer (2002) obravnava prednosti različnih geodetskih metod in predlaga sintezo moderne tahimetrije, fotogrametrije in skeniranja, ki jih združi v sistem imenovan TOTAL (Tacheometric Object Teil Automated Lasersurveying). Sistem vključuje sodoben tahimeter, ki meri polarne koordinate točk brez uporabe reflektorja, opremljen je s tremi kamerami in je krmiljen preko prenosnega računalnika. Sistem je hiter, učinkovit in omogoča natančno določitev geometrije obravnavanega objekta. Abella et al. (1994) obravnavajo možnosti uporabe obratnega inženirstva (ang. RE–Reverse Engineering), ki je opredeljeno kot postopek pridobivanja CAD-modela iz 3D-oblaka točk, pridobljenega z digitalizacijo posameznih komponent objekta. Skladno s tehnološkim napredkom merske opreme Scherer (2001) obravnava ekonomsko učinkovitost glede na vse večjo dosegljivo natančnost posameznih geodetskih metod. Avtor ocenjuje, da za zajem geometrije enostavnih objektov 3D-merski sistemi morda niso najboljša izbira. Za zajem kompleksnejših oblik pa je najbolj učinkovito lasersko skeniranje. Volk et al. (2014) obravnavajo možnost uporabe BIM (Building Information Model) na že obstoječih objektih. Sodobni pristopi informacijskega modeliranja gradbenih objektov vključujejo proces načrtovanja, gradnje in vzdrževanja do razgradnje objektov. Na osnovi izdelave digitalnega 3D-grafičnega modela objekta, se modelu doda še časovna dimenzija (4D) in stroški vzdrževanja (5D), izvedejo se lahko tudi simulacije energetske učinkovitosti stavbe ob ustrezno poznanih lastnostih objekta.

Ocenjujemo, da lahko uporaba brezkontaktnih geodetskih metod ploskovnega zajemanja bistveno olajša izmero fasade stavbe z vsemi detajli. V članku predstavljamo primer, kjer za geodetski posnetek fasade stavbe uporabimo kombinacijo klasične geodetske izmere in laserskega skeniranja (Flerin, 2016). Predlagamo napreden način zagotovitve geodetske mreže s točkami na objektu, ki jih signaliziramo z odbojnimi folijami in začasnimi prostimi stojšči. Bistvena prednost takega načina vzpostavitve geodetske mreže je, da je mreža varna pred uničenjem in ni moteča za okolico. Mrežo kasneje uporabimo za

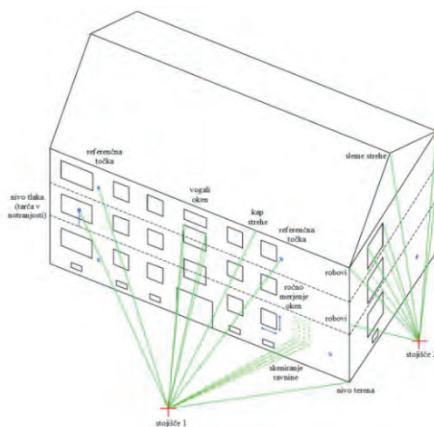
zakoličbo predhodno izdelanih fasadnih elementov. Uporaba sodobnih merskih sistemov, ki omogočajo tako klasično geodetsko izmero kot tudi lasersko skeniranje, olajša terensko delo in zagotovi zadostno in dovolj veliko število merskih podatkov za izvednotenje. Rezultat geodetske izmere in naknadne obdelave je žični ali ploskovni 3D-grafični model stavbe, ki omogoča zelo natančno izdelavo in namestitve predhodno izdelanih fasadnih elementov.

2 GEODETSKA IZMERA FASAD STAVB

Stavbo običajno geometrično obravnavamo v lokalnem koordinatnem sistemu. Izmero fasade izvedemo z ustrežno metodo ob uporabi sodobne tehnologije. Metoda mora zagotavljati dovolj visoko točnost t. j. geometrijsko skladnost končnega modela z realnostjo, ustrežno prostorsko ločljivost (podrobnost izmere detajla), robustno obravnavo vplivov okolja ter mora biti istočasno optimalna v ekonomskem smislu. V nadaljevanju podrobneje obravnavamo klasično terestrično izmero (TPS) in terestrično lasersko skeniranje (TLS), metodi, za kateri pričakujemo, da skupaj izpolnita vse gornje zahteve.

2.1 Klasična terestrična polarna metoda izmere (TPS)

Klasično terestrično polarno metodo izmere (TPS) izvajamo s tahimetrom. Izhodišče za izmero predstavlja geodetska mreža, ki zagotavlja stojliščne in orientacijske točke. Koordinate detajlnih točk na fasadi v koordinatnem sistemu geodetske mreže določimo na osnovi merjenih polarnih koordinat v merskem prostoru stojlišča. Metoda zajema je točkovna (slika 1) in velja, ob uporabi reflektorja za signalizacijo ciljne točke, za najnatančnejšo metodo. Sodobni univerzalni tahimetri omogočajo izmero dolžin tudi brez uporabe reflektorja. Način je sicer manj natančen, je pa občutno hitrejši in omogoča določitev koordinat tudi nedostopnih točk. Število in mesta detajlnih točk morajo biti izbrana tako, da lahko na podlagi izmerjenih točk izrišemo celoten objekt z vsemi zahtevanimi podrobnostmi. Problem lahko predstavljajo zahtevnejši, geometrijsko nepravilni detajli ali poškodbe na fasadi. V teh primerih je zajem podatkov za konstrukcijo 3D-grafičnega modela zahtevnejši. Običajno je terenska izmera zamudna. Število točk je omejeno in pogosto ne odraža dejanskega stanja. Metoda klasične polarne izmere je zato najprimernejša za izmero fasad objektov pravilnih in enostavnih oblik (Joeckel et al., 2008).

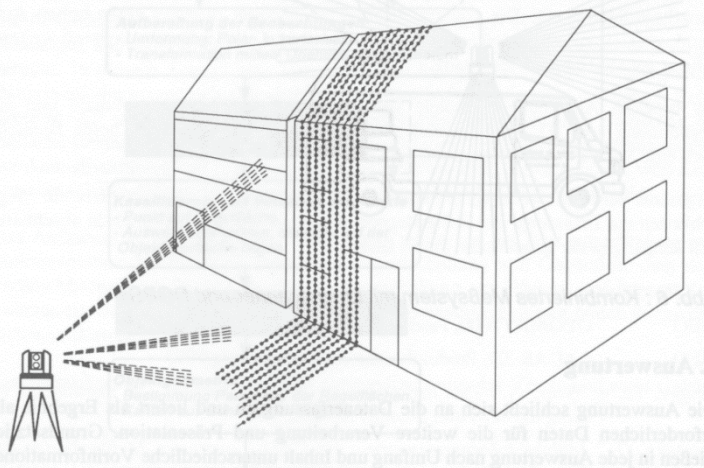


Slika 1: Klasična polarna izmera obravnava geometrijo diskretnih točk - izbira merskih točk na objektu (Lattke et al., 2001, str. 73).

2.2 Terestrično lasersko skeniranje (TLS)

Terestrično lasersko skeniranje (TLS) zajame merski prostor (stavbo) z gostim polarnim rastrom brez-kontaktno. Izvrednotenje objekta, izdelava 3D-grafičnega modela, je izvedena z obdelavo oblakov točk pretežno preko iskanja ravnin fasade. Skeniranje je v osnovi točkovni zajem prostorskih podatkov – le da točke ne obravnavamo posamezno, ampak v grupah. Merske vrednosti so geometrične vrednosti – polarne ali pravokotne koordinate v koordinatnem sistemu skenerja, informacija o moči odbitega merskega signala ter dodatno sivi toni ali barvne vrednosti na posneti fotografiji (Joeckel et. al., 2008). Postopek skeniranja je enostaven in hiter. Ob parametrih, ki jih predhodno določimo, skeniranje poteka popolnoma avtomatsko, brez vpliva operaterja.

Rezultat skeniranja na terenu je množica prostorskih točk – oblak točk (slika 2). Koordinate oblaka točk so določene v skenerjevem koordinatnem sistemu stojišča. Celoten objekt zajamemo z več stojišč. Oblake točk združimo v enotnem koordinatnem sistemu – oblake točk registriramo. Registrirani oblak točk georeferenciramo oz. transformiramo v koordinatni sistem geodetske mreže stavbe. V primeru, da je geodetska mreža vzpostavljena pred skeniranjem, lahko oblake točk direktno georeferenciramo.



Slika 2: Tehnologija TLS obravnava geometrijo oblaka točk gostega polarnega rastra (Wunderlich, 2014, str. 3).

Po odstranitvi šumov in transformaciji oblaka točk v želen koordinatni sistem, uporabimo različne tehnike, s katerimi izboljšamo končni izdelek. Običajno oblak točk filtriramo ter s tem zmanjšamo število točk. Na osnovi obdelanega oblaka točk izdelamo 3D-grafični model, ki služi za prikaz rezultatov naročniku in nadaljnjo obdelavo ter uporabo (Lattke et al., 2001, Balon, 2007; Smogavec, 2015).

3 TESTNI PRIMER – IZMERA FASADE VEČSTANOVANJSKAGA OBJEKTA

Testna stavba meri v tlorisu po širini 24 m in po dolžini 40 m. Poleg kleti in visokega pritličja ima štiri nadstropja in podstrešje. Višina stavbe je 17 m. S svojo daljšo stranjo je orientirana v smeri sever - jug. Vhoda sta na zahodni strani. Krajši stranici sta brez oken in drugih detajlov (slika 3). Izstopajočih balkonov ni, imajo pa nekatera stanovanja na zunanjih stenah nameščene klimatske naprave. Okna so različnih dimenzij, vendar so po nadstropjih simetrično razporejena.



Slika 3: Obravnavana stavba; pogled na južno in vzhodno fasado.

Za izmero smo uporabili instrument *Leica Geosystems Nova MultiStation MS50*, ki združuje vse sodobne merske tehnologije, saj omogoča klasično polarno izmero, lasersko skeniranje, ima slikovno podporo in omogoča povezavo s tehnologijo GNSS. Instrument ima deklarirano kotno natančnost $\sigma_{\text{ISO-THEO Hz, v}} = 1''$ in dolžinsko natančnost $\sigma_{\text{ISO-EDM}}: 1 \text{ mm}; 1,5 \text{ ppm}$ (merjenje brez reflektorja $\text{ISO EDM}: 2 \text{ mm}; 2 \text{ ppm}$). Hitrost skeniranja znaša največ 1000 točk na sekundo do oddaljenosti 300 m. Z istim instrumentom torej lahko izmerimo geodetsko mrežo, izmerimo izbrane detaljne točke in objekt skeniramo. Dodatno lahko v obdelavo vključimo digitalne posnetke objekta. Instrument je dobra izbira za primerjavo tehnologij TPS in TLS, čeprav so tu možnosti za skeniranje glede na samostojne skenerje omejene. Skeniranje s TPS je počasnejše, osnovna merska natančnost pa je višja. Največja prednost skeniranja s tahimetrom je, da lahko oblake točk direktno georeferenciramo že na terenu.

3.1 Izmeritvena mreža

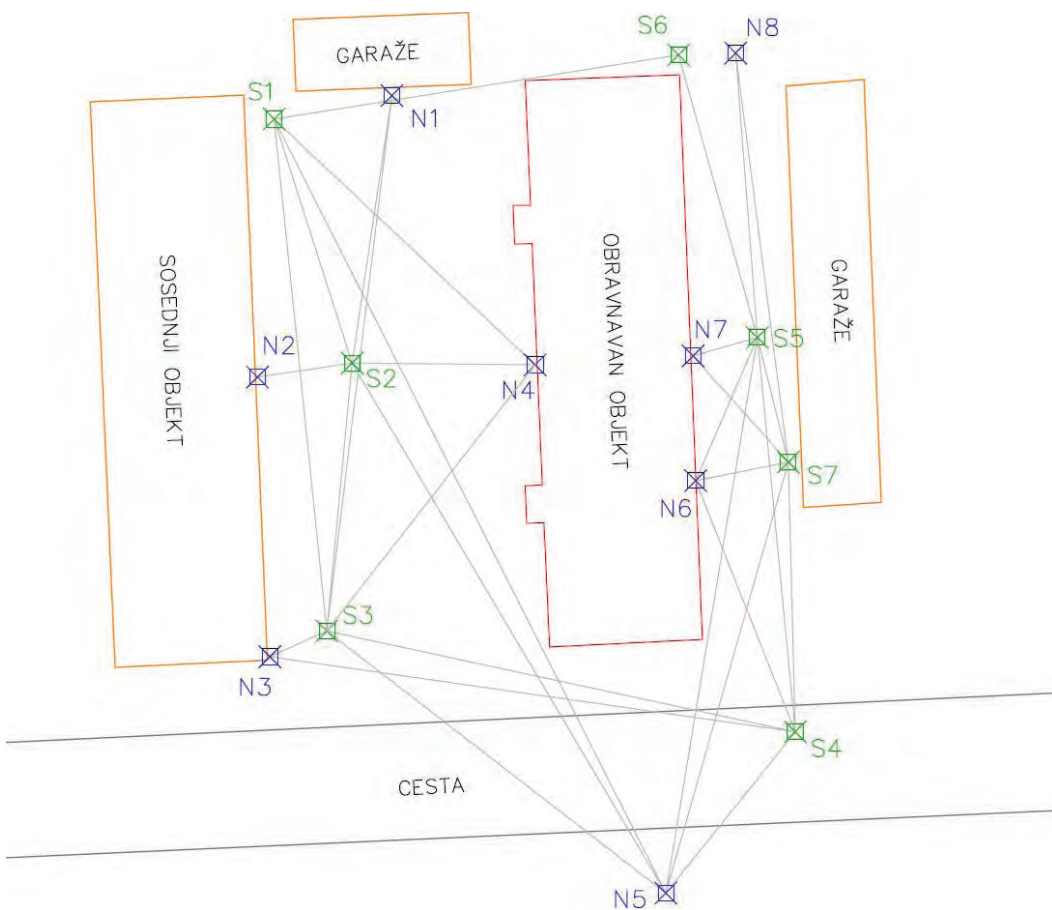
Izmeritveno geodetsko mrežo sestavlja 8 referenčnih točk (N) ter 7 stojišč instrumenta (S). Tri referenčne točke se nahajajo na obravnavanem objektu, pet pa na sosednjih objektih (glej sliko 5). Izbrani položaji točk omogočajo navezavo vsakega stojišča na najmanj dve referenčni točki ter dodatno na dve do tri ostala stojišča. Na sliki 4 so prikazane referenčne točke, ki so signalizirane z odbojnimi folijami *Leica Geosystems GZM29* (20 × 20 mm) in *GZM30* (40 × 40 mm).



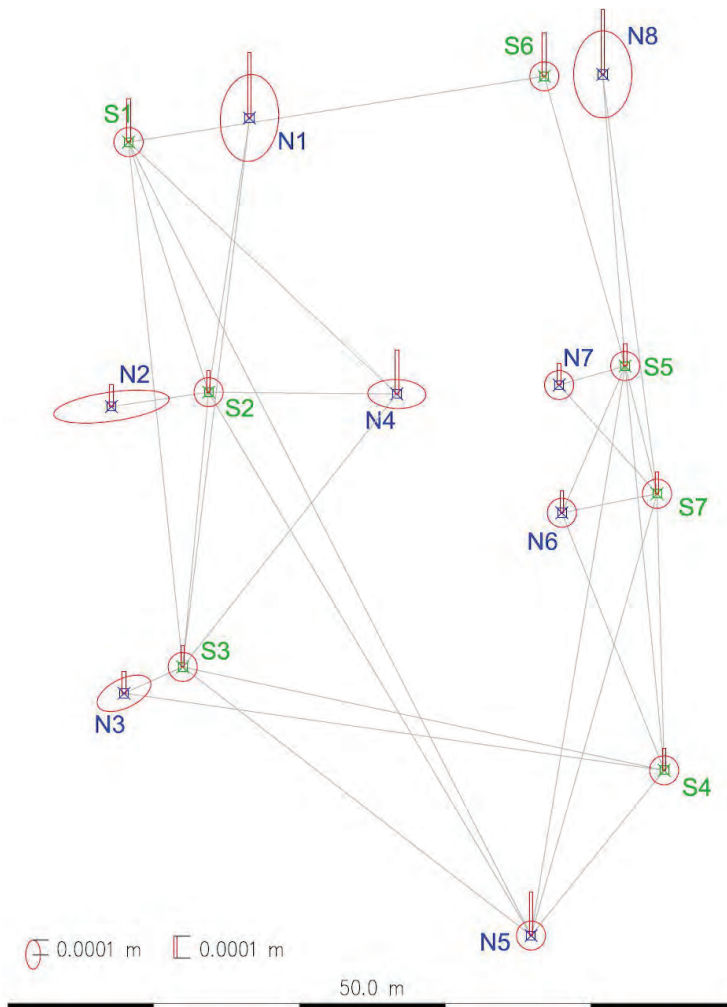
Slika 4: Signalizacija referenčnih točk.

Odbojne folije omogočajo natančno ročno viziranje ter zagotavljajo identično deklarirano natančnost merjenja dolžin kot na standardne prizme ($\sigma_{\text{ISO-EDM}}$: 1 mm; 1,5 ppm). Pet referenčnih točk je nameščenih na sosednje objekte, s čimer zagotovimo uporabnost mreže v času sanacije fasade kot izhodišče za zakoličbo fasadnih elementov. Te točke omogočajo vzpostavitev prostih stojšč, s katerih izvedemo zakoličbo. Stojšča so bila začasno stabilizirana s stativi in trinožnimi podstavki. Položaj in število stojšč je bilo izbrano tako, da je bilo zagotovljeno čim večje število povezav v mreži (glej sliko 5). Način stabilizacije stojšč je omogočal prisilno centriranje v času izmere mreže. Stojšča smo signalizirali s preciznimi reflektorji Leica GPH 1P.

Pri merjenju mreže smo uporabili sistem avtomatskega viziranja na precizne reflektorje (*Leica Geosystems ATRplus*), na odbojne folije smo uporabili način ročnega viziranja. Na vseh stojščih so bile merjene horizontalne smeri po girusni metodi ter zenitne razdalje in poševne dolžine v treh ponovitvah. Vpliv atmosfere smo upoštevali na osnovi merjenih meteoroloških parametrov na vsakem stojšču.



Slika 5a: Izmeritvena mreža - referenčne točke (N) in stojšča (S).



Slika 5b: Elipse pogreškov in standardni odkloni višin.

Izmeritveno geodetsko mrežo smo izravnali s programom *Leica Geo Office* kot prosto prostorsko mrežo. Koordinate točk mreže so določene v lokalnem koordinatnem sistemu na nivoju objekta. Slika 5a prikazuje obliko mreže, slika 5b pa doseženo položajno in višinsko natančnost točk mreže. Standardni odklon horizontalnega položaja ter standardni odklon višin sta na vseh točkah manjša od 0,5 mm. Natančnost določitve koordinat točk izmeritvene mreže je glede na zahtevano natančnost detajlne izmere zelo visoka.

3.2 Izmera fasade TPS

Za izmero vseh predvidenih detajlov na stavbi je bilo potrebnih 7 stojišč. Koordinate stojišč so bile določene z metodo prostega stojišča z navezavo na dve ali več referenčnih točk. Zaradi bližine sosednjih objektov in dreves so bila mesta stojišč izbrana relativno blizu obravnavane stavbe. Posledično to povzroča težave pri viziranju točk v višjih nadstropjih. Pomagamo si lahko z zenit okularjem, ali pa točko viziramo

s pomočjo laserskega žarka. Zaradi strmih vizur se pojavlja večje število skritih točk, ki jih ni mogoče meriti. Najpogosteje je bil to spodnji notranji rob okenske odprtine. Izmera roba je nujna za korekten prikaz detajla. Skrite točke lahko izmerimo z uporabo dvojnega reflektorja na togem grezilu (npr. *Leica Geosystems GMP111* in *GMP112*) (Billings, 2008).

Detajlne točke v zgornjih nadstropjih smo merili s funkcijo merjenja dolžin brez uporabe reflektorja. Okenske odprtine (okno, špaleta, polica) izbiramo selektivno ob predpostavki, da so dimenzije tipskih oken ob serijski vgradnji enake. S tem lahko bistveno zmanjšamo količino terenskega dela. Najzahtevnejši detajl na objektu je bil vhod. Poleg vratne odprtine je bil izmerjen nadstrešek in stopnica. Kljub temu, da obravnavamo enostaven objekt, je bilo skupno izmerjeno več kot 600 detajlnih točk.

Stavbo smo skonstruirali na osnovi minimalnega števila merjenih detajlnih točk in znanih geometričnih oblik elementov stavbe. Za okno npr. potrebujemo vsaj tri posnete vogale ter globino špalet. V splošnem je izris zelo podoben izrisu 2D-topografskih načrtov. Nekoliko zahtevnejši je le zaradi prekrivanja detajla pri posameznih kotih pogleda, ob tem pa obstaja možnost, da kakšen detajl izpustimo. Rezultat naknadne obdelave tahimetrične izmere fasade stavbe je žični model (slika 6).



Slika 6: Žični model obravnavane stavbe – izmera TPS.

3.3 Izmera fasade TLS

S terestričnim laserskim skeniranjem je bila izmerjena le vzhodna fasada. Zadoščali sta dve stojišči. S kombiniranim notranjim urezom sta bila določena položaja stojišč instrumenta v lokalnem koordinatnem sistemu izmeritvene geodetske mreže. Instrument je bil ob skeniranju orientiran, zato postopka registracije in georeferenciranja nista bila potrebna. Ločeno smo skenirali vzhodno fasado z izbrano ločljivostjo skeniranja 5 cm, nato smo izbrani detajl (okensko odprtino) skenirali z visoko ločljivostjo 2 mm. Skeniranje na enem stojišču je trajalo približno petnajst minut. Pridobili smo štiri oblake točk, dva sta zajela celotno fasado, dva pa izbran detajl-okensko odprtino in vhod. Združeni oblak točk vsebuje več kot 700.000 točk.

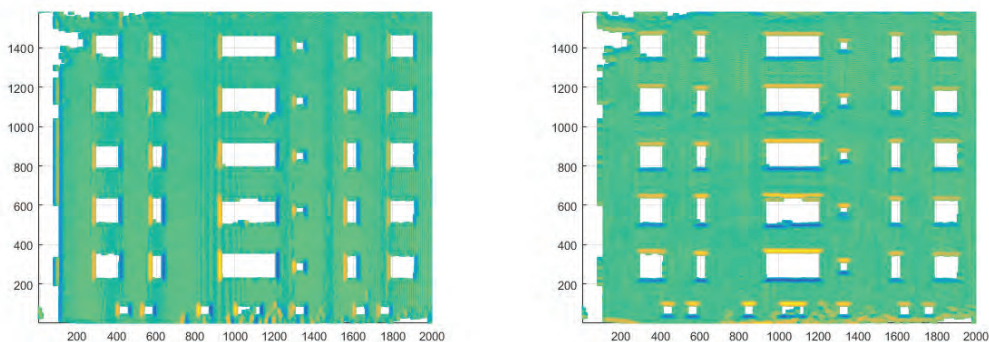
3.3.1 Filtriranje oblaka točk in izračun ravnine fasade

Združeni oblak točk vsebuje šume, ki jih odstranimo z ustreznimi algoritmi ali ročno. Za ročno odstranjevanje točk, ki ne pripadajo obravnavanemu objektu, smo uporabili program *RiSCAN PRO*. Samodejno filtriranje smo izvedli z algoritmom *Ransac* (*Random Sample Consensus*), ki lahko najde točke, pripadajoče izbrani geometrijski obliki kljub prisotnosti velikega deleža neuporabnih (odstopajočih) točk (*outliers*). Postopek je iterativen. Cilj algoritma je najti geometrijsko obliko, v našem primeru je to ravnina, ki se najbolje prilega oblaku točk, pri čemer kakovost prileganja vrednotimo z deležem točk, ki so od modela oddaljene manj od izbrane tolerance (Fischler in Bolles, 1981; Zuliani, 2014; Urbančič et al., 2016).

Dejanska gostota skeniranih točk na obravnavani steni je bila med 4 cm in 10 cm (zaradi različne oddaljenosti stene od skenerja). Oblak točk smo filtrirali z metodo *Ransac* in tako odstranili vse točke, ki so od glavne ravnine stene oddaljene za več kot 2 cm. Skozi filtrirane točke smo izravnali ravnino ter nanjo projicirali vse točke. Vektorja, ki napenjata ravnino, sta izbrana tako, da je prvi pravokoten na normalni vektor ravnine in navpični vektor $[0, 0, 1]$, drugi pa je pravokoten na normalo ravnine in na prvega. Na ta način sta abscisna in ordinatna os ravninskega koordinatnega sistema usmerjena vodoravno in navpično, kljub temu, da izravnana ravnina ni nujno popolnoma vertikalna.

3.3.2 Iskanje robov oken

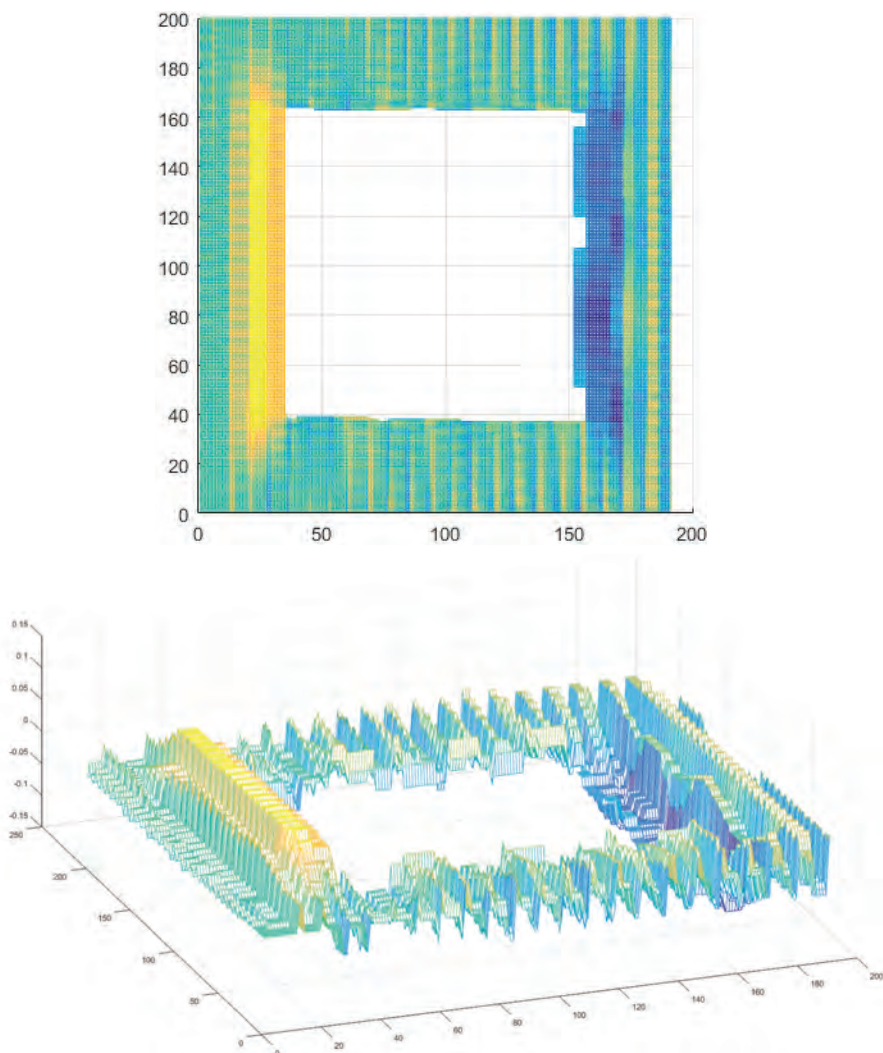
Iz oblaka točk smo ustvarili rastrsko podobo, tako da smo preko območja točk položili kvadratno mrežo. Celicam, v katerih se nahaja vsaj ena skenirana točka, smo pripisali vrednost 1, celicam, ki ostanejo prazne, pa vrednost 0 (Grigillo et al., 2015). Za določitev območja iskanja robov posameznega okna smo izdelali rastrsko podobo s prostorsko ločljivostjo 10 cm, za dejansko iskanje robov pa rastrsko podobo s prostorsko ločljivostjo 1 cm.



Slika 7: Korelacije za zaznavo robov (levo: levi in desno rob, desno: zgornji in spodnji).

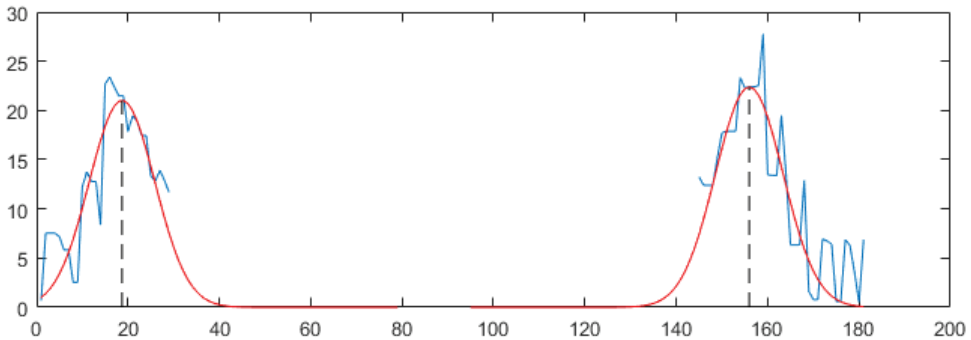
Robove okenskih odprtin smo poiskali z izračunom slikovne korelacije med rastrsko podobo in matriko tarčo velikosti 30×30 pikslov, v kateri so na levi polovici same enice, na desni pa same ničle. Na ta način dobimo največje korelacije na levem robu okna, najbolj negativne pa na desnem robu okna. Podobno naredimo za horizontalne robove okenskih odprtin (slika 7).

Robove oken moramo iskati za vsako okno posebej. S postopkom »rasti regij« (region growing) na rastrski podobi z dimenzijo celice 10 cm določimo območje posameznega okna (Gonzalez in Woods, 2002). S klikom v odprtino okna na rastrski podobi programu podamo začetni piksel. Z iterativnim postopkom za vse sosedne začetnega piksla preverimo, ali pripadajo okenski odprtini ali steni (vrednost 0 ali 1). Nadaljujemo s preverjanjem sosedov vseh piksllov, za katere smo že ugotovili, da pripadajo odprtini tako dolgo, da najdemo vse piksele posamezne okenske odprtine. V obravnavo posameznega okna vzamemo območje, najdeno s postopkom rasti regij, razširjeno na njegovo 30 cm okolico.



Slika 8: Korelacijska podoba za izbrano območje okna (pravokotni in perspektivni pogled).

Rezultat rasti regij, ki je vhodni podatek za izračun slikovne korelacije, prikazuje slika 8. Za prepoznavanje vertikalnih robov oken smo sešteli absolutne vrednosti v korelacijski matriki po stolpcih in na ta način izdelali krivuljo vsot, ki jo prikazuje slika 9. Podobno izvedemo prepoznavanje horizontalnih robov oken.



Slika 9: Vsota absolutnih vrednosti korelacij po stolpcih (modra) in prilagojena krivulja (rdeče).

Poiščemo vrhova na levi in desni strani krivulje vsot. Za iskanje vrha lahko uporabimo različne metode. Uporabili smo izravnavo Gaussove zvončnice. Z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov določimo tri parametre krivulje, ki določajo višino, položaj in širino zvončnice. Na tak način smo izračunali vse štiri robove večine oken, ki so vidni na sliki 8. Teoretična natančnost izravnane položaja krivulje je v večini primerov med 0,2 in 0,5 rastrske celice (v našem primeru je to 2 do 5 cm). Postopek je do velike mere avtomatiziran. Za vsako okno je potreben le klik v območje želenega okna na 10 cm rastrski podobi. Težave so se pojavljale pri spodnji vrsti oken zaradi rastja, ki je prekrivalo steno pod okni.

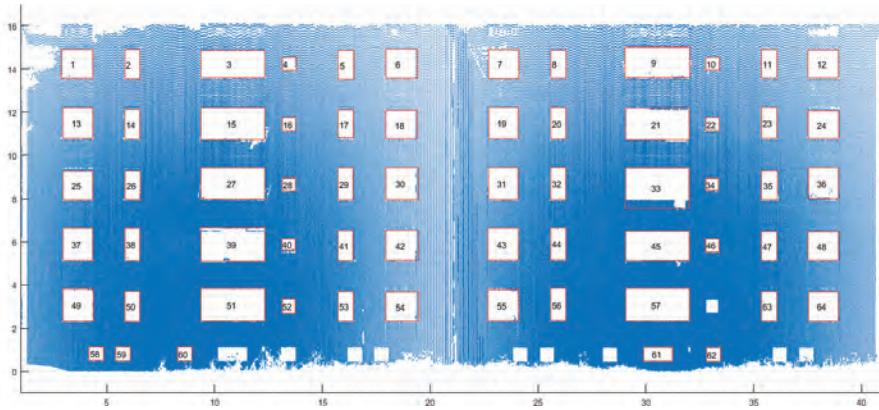
3.4 Vrednotenje kakovosti iskanja okenskih odprtín

Kakovost iskanja okenskih odprtín smo na obravnavanem testnem primeru vrednotili na dva načina. V prvem primeru smo uporabili skeniran oblak točk celotne vzhodne fasade z grobim rastrom skeniranja 5 cm. V drugem primeru pa smo uporabili skeniran oblak točk detajla okenske odprtine z rastrom 2 mm. Rezultati obdelave oblakov točk so bili v obeh primerih robovi okenske odprtine, ki smo jih v drugem primeru primerjali z referenčnimi vrednostmi značilnih točk okenske odprtine, pridobljenimi z meritvami TPS.

3.4.1 Kakovost iskanja robov oken iz oblaka točk skenirane fasade

Rezultat postopka iskanja robov oken iz oblaka točk je prikazan na Sliki 10. Za vsako okno so določene vrednosti koordinat x za levi in desni rob ter vrednosti koordinat y za zgornji in spodnji rob. Koordinate se nanašajo na ravninski koordinatni sistem ravnine fasade, ki je izvajalcu sanacije fasad uporabnejši, po potrebi pa se vrednosti koordinat seveda lahko preračunajo v koordinatni sistem geodetske mreže.

Izračunamo lahko nekatere mere natančnosti, ki bodo opisale kakovost določitve robov oken. Pričakujemo, da imajo vsa okna v nadstropju stavbe podobne položaje spodnjega in zgornjega roba oken, razen malih kvadratnih oken, ki očitno ne ležijo na istem nivoju kot ostala. Standardni odkloni zgornjih in spodnjih robov oken v posameznem nadstropju so v preglednici 1, iz katere lahko razberemo, da so zgornji robovi oken določeni z nekoliko slabšo natančnostjo od spodnjih robov.



Slika 10: Robovi oken na ravnini filtriranih točk.

Preglednica 1: Standardni odkloni zgornjih in spodnjih robov oken posameznega nadstropja v [cm].

nadstropje	spodnji rob	zgornji rob
1.	2.7	4.2
2.	2.6	6.2
3.	13.3 (1.8) ¹	7.4
4.	1.6	8.1
5.	1.2	6.6

¹ Okno št. 33 ima očitno napačno določen spodnji rob (slika 10), zato podajamo standardni odklon spodnjih robov oken 3. nadstropja brez tega roba.

Enako analizo lahko naredimo za leve in desne robove oken, ki ležijo v koloni eno pod drugim. Standardni odkloni robov so v preglednici 2.

Preglednica 2: Standardni odkloni levih in desnih robov oken posamezne kolone v [cm]

kolona	levi rob	desni rob	kolona	levi rob	desni rob
1.	3.7	1.4	7.	2.1	1.5
2.	0.5	1.3	8.	0.2	0.3
3.	0.3	0.3	9.	1.6	1.2
4.	0.5	2.3	10.	0.2	2.0
5.	0.2	1.6	11.	0.5	1.6
6.	0.2	3.1	12.	1.2	0.7

Razpršenosti vrednosti robov kažejo na dobro natančnost rezultatov metode, saj v povprečju znašajo okrog 1 cm. Pri vrednotenju kakovosti moramo upoštevati gostoto skeniranih točk na fasadi, ki znaša med 4 cm in 10 cm, odvisno od oddaljenosti stojišča od skeniranih točk in orientacije odbojne ploskve. Razpršenost vrednosti robov presega zahtevano točnost 0,5 cm (Larsen et al., 2011), zato ocenjujemo, da bi bila za sanacijo s predhodno izdelanimi fasadnimi elementi potrebna večja gostota skeniranja. V nekaterih vrstah je slabša natančnost posledica enega slabo določenega roba. Če bi ročno odstranjevali grobe pogoške iz rezultatov, bi težko postavili mejo, kje končati.

Za vsa okna izračunamo dimenzije (širino in višino) kot razliki med koordinatama desnega in levega ter

zgornjega in spodnjega roba. Glede na dimenzije lahko okna klasificiramo v pet razredov:

- malo okno – 60 × 60 cm (okna 4. in 10. kolone),
- ozko okno – 70 × 140 cm (okna 2., 5., 8., in 11. kolone),
- navadno okno – 140 × 140 cm (okna 1., 6., 7., in 12. kolone),
- široko okno – 300 × 140 cm (okna 3. in 9. kolone).

Izračunajmo standardne odklone širin in višin oken iz posameznega razreda.

Preglednica 3: Standardni odkloni širine in višine oken po razredih v [cm].

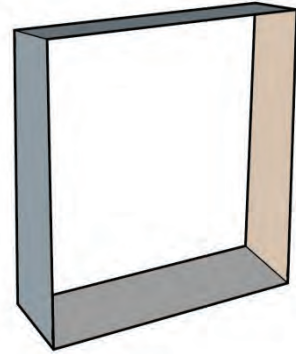
	širina	višina
malo	2.4	3.2
ozko	1.7	6.7
navadno	5.4	7.0
široko	1.9	15.9 (6.5) ²

² Izločimo višini oken 3 in 33, ki sta značilno različni od ostalih.

Iz Preglednice 3 lahko razberemo, da so natančnosti določitev položajev in oblik ozkih in širokih oken nekoliko nezanesljive, kar pripisujemo nesorazmerju med širino in višino oken. V splošnem lahko zaključimo, da so natančnosti določitev položajev in oblik oken relativno dobre glede na gostoto skeniranih točk na stenah. Rezultate bi lahko izboljšali z bolj individualno obravnavo oken – vizualni pregled morebitnih grobih pogreškov pri posameznem oknu.

3.4.2 Kakovost iskanja robov oken iz oblaka točk skeniranega detajla glede na izmero TPS

Zaradi majhne gostote skeniranja celotne fasade smo zahtevano natančnost iskanja robov oken želeli doseči na izbranem detajlu okenske odprtine, ki smo ga skenirali z ločljivostjo 2 mm. Karakteristične točke (notranje in zunanje vogale okna) smo določili na dva načina, s programom *Pointfuse* in z algoritmom *Ransac*. Program *Pointfuse* za končnega uporabnika predstavlja »black box«, saj ne vemo, na kakšen način program izdelava model. Rezultat je lahko žični ali ploskovni model. Iz obeh lahko enostavno razberemo koordinate osmih vogalnih točk okna (slika 11). Drugi način vključuje uporabo algoritma *Ransac* (Urbančič et al., 2014). Iz skeniranega oblaka točk postopoma poiščemo šest največjih ravnin s toleranco 0,5 cm. Ravnine predstavljajo ravnino okna, ravnino stene ter štiri ravnine špalet, ki so pravokotne nanju. Karakteristične točke so določene s preseki teh ravnin. Algoritem *Ransac* smo uporabili na celotnem oblaku točk detajla ter na razredčenem oblaku na 10 % vseh točk. Zanima nas, ali je res potrebna največja dosegljiva gostota skeniranja, ali lahko ustrezne rezultate dosežemo tudi z desetkrat manjšim številom točk. Koordinate karakterističnih točk okenske odprtine smo določili s polarno izmero TPS že na terenu in jih privzamemo kot referenčne vrednosti (Larsen et al., 2011).



Slika 11: Fotografija, žični ter ploskovni model izbranega detajla – okenske odprtine.

Rezultate laserskega skeniranja smo primerjali s klasično tahimetrično izmero na izbranem detajlu – okenski odprtini, ki smo jo predstavili z osmimi vogalnimi točkami (slika 11).

Preglednica 4: Odstopanja koordinat izmere TLS od referenčnih vrednosti izmere TPS v [cm].

Točka	TLS (<i>Ransac</i>) 10 % - TPS				TLS (<i>Ransac</i>) 100 % - TPS				TLS (<i>Pointfuse</i>) - TPS			
	Δy	Δx	ΔH	Δp	Δy	Δx	ΔH	Δp	Δy	Δx	ΔH	Δp
1.	-0.5	-0.6	0.8	1.1	-0.2	-0.6	0.5	0.8	-0.1	-2.7	1.2	3.0
2.	-0.6	-0.4	1.0	1.2	-0.6	-0.9	0.3	1.1	0.0	-0.2	0.4	0.4
3.	0.3	0.1	-0.1	0.3	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.1	-0.6	0.7
4.	0.0	0.0	-0.2	0.2	-0.1	0.0	0.2	0.3	0.0	-2.2	0.2	2.2
5.	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	-0.7	-2.3	-1.9	3.1
6.	-0.1	0.3	0.0	0.3	-0.3	0.0	0.1	0.3	-0.6	0.4	-2.0	2.1
7.	0.2	0.3	0.0	0.3	0.2	0.6	-0.1	0.6	0.3	0.2	0.3	0.5
8.	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.2	0.1	-2.5	0.6	2.6

$$*\Delta p = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta x^2 + \Delta H^2} : \text{položajno odstopanje točk}$$

V preglednici 4 prikažemo razlike med prostorskimi koordinatami merskih točk glede na referenčne vrednosti. Pri obdelavi v programu *Pointfuse* so odstopanja večja, in sicer tudi do 3 cm. Obdelava v tem programu ne dosega zahtevane točnosti, saj so odstopanja večja od največjega dovoljenega odstopanja 0,5 cm (Larsen et al., 2011). Nasprotno pa razlike pri obdelavi z algoritmom *Ransac* v večini primerov izpolnjujejo zahtevani kriterij natančnosti. Večje razlike zaznamo le na zgornjem notranjem robu okenske odprtine, ko odstopanja v nekaterih primerih presežejo dovoljeno vrednost in dosežejo tudi 1,2 cm. Gotota uporabljenega oblaka točk ne vpliva bistveno na končne rezultate. Pri uporabi dveh gostot (10 % ali 100 %) so razlike minimalne. Podobno ugotovitev navajamo tudi v Kregar et al. (2017). Rezultati so sicer najboljši pri uporabi vseh točk oblaka pri ločljivosti 2 mm (Flerin, 2016).

Na podlagi koordinatnih odstopanj smo ocenili koren srednjega kvadratnega pogreška *RMSE* (*Root Mean Square Error*), srednjo vrednost odstopanj μ in standardni odklon σ v smeri koordinatnih osi in položaja.

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad \mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i), \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta y_i - \mu)^2}$$

kjer je:

y_i ... izmerjena (izračunana) vrednost koordinate y ,

\hat{y}_i ... referenčna vrednost koordinate y .

Preglednica 5: Parametri kakovosti izračunanih koordinat merskih točk.

metoda	TLS (<i>Ransac</i>) 10 % - TPS				TLS (<i>Ransac</i>) 100 % - TPS				TLS (<i>Pointfuse</i>) - TPS			
	y	x	H	p	y	x	H	p	y	x	H	p
koordinata												
RMSE [cm]	0.3	0.3	0.5	0.6	0.3	0.4	0.2	0.6	0.4	1.7	1.1	2.1
μ [cm]	-0.1	0.0	0.2	0.5	-0.1	-0.1	0.1	0.5	-0.1	-1.1	-0.2	1.8
σ [cm]	0.3	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.2	0.6	0.4	1.8	1.2	2.2

Iz preglednice 5 razberemo, da so parametri kakovosti za rezultate obdelave z algoritmom *Ransac* bistveno boljši od rezultatov programa *Pointfuse*. Standardni odklon posamezne koordinate pri obdelavi z algoritmom *Ransac* ne presega 0,5 cm, kar je skladno s kriteriji dovoljenega odstopanja. Pri obdelavi s programom *Pointfuse* standardni odklon presega 2 cm, kar ne zadošča za precizno zakoličbo predhodno izdelanih fasadnih elementov.

4 ZAKLJUČEK

Za geodetsko stroko so zanimive predvsem energetske sanacije stavb s predhodno izdelanimi fasadnimi elementi. Te zahtevajo visoko natančnost izmere za izdelavo načrta stavbe in visoko natančnost zakoličbe ob montaži fasadnih elementov. Za prikaz stavbe z žičnim modelom ali ploskovnim 3D-grafičnim modelom visoke natančnosti je nujna geodetska izmera. Klasična metoda z uporabo sodobnega tahimetra omogoča visoko natančnost določitve enostavnih oblik fasad. V primeru kompleksnejših struktur, poškodb ali neravnin na fasadi pa je primernejša metoda laserskega skeniranja. Ustrezna visoka ločljivost skeniranja omogoča modeliranje detajla z visoko natančnostjo. Metoda omogoča hitro in učinkovito terensko izmero, ne dosega pa natančnosti klasične izmere. Metodo izmere in podrobnost zajema določimo glede na zahteve naročnika in na podlagi podrobnega ogleda obravnavane stavbe. Pri energetski sanaciji s predhodno izdelanimi fasadnimi elementi je zahtevana visoka natančnost, zato je pomembno, da na terenu čim bolj točno posnamemo vogale fasade ali stavbnega pohištva. Posebej pomembno je zagotoviti zanesljivo in natančno geodetsko mrežo za klasično snemanje detajla ali lasersko skeniranje ter za kasnejšo morebitno zakoličbo predhodno izdelanih fasadnih elementov.

Na referenčnem primeru – večstanovanjski stavbi smo testirali učinkovitost klasične geodetske metode izmere TPS s točkovnim zajemom in laserskega skeniranja TLS za potrebe energetske sanacije stavb s predhodno izdelanimi fasadnimi elementi. Vsaka od obravnavanih metod ima svoje prednosti in slabosti. Pri točkovnem zajemu (TPS) pride do težav skritih točk, strmih vizur in poškodovanih vogalov, kar onemogoča enolično določitev točke. Pri množičnem zajemu (TLS) je poleg skritega detajla in strmih vizur ena glavnih težav gostota skeniranja, ki je praviloma za različno vrsto detajla različna. Pomembno so tudi izkušnje pri modeliranju oblaka točk ter izbira programa za obdelavo.

V članku predlagamo učinkovit način vzpostavitve izmeritvene mreže s signalizacijo referenčnih točk z odbojnimi folijami, kar omogoča natančno zakoličbo predhodno izdelanih fasadnih elementov. Za izmero kompleksnejših stavb predlagamo merski instrument, ki omogoča uporabo tehnologij TPS in TLS ter direktno georeferenciranje. V članku kot izvirno rešitev prikazemo metodo iskanja robov oken. V splošnem lahko zaključimo, da s predlaganim postopkom zaznave robov oken določamo robove z natančnostjo, ki je pet do desetkrat boljša od gostote skeniranja. Kakovost izračunanih koordinat točk na izbranem detajlu skenirane okenske odprtine z izmero TLS (ločljivost skeniranja je bila 2 mm) v primerjavi z izmero TPS je ustrezna in praviloma ne presega dovoljenega odstopanja 0,5 cm. Zanimivo pa gostota uporabljenega oblaka točk (10 % ali 100 %) ne vpliva bistveno na končne rezultate. Iz analize rezultatov lahko sklepamo, da je metoda laserskega skeniranja primerna za izdelavo 3D-grafičnih modelov kompleksnejših stavb z namenom energetske sanacije ob zadostni prostorski ločljivosti detajla in skrbni obdelavi oblakov točk. Metodi klasične geodetske izmere in laserskega skeniranja se pri izmeri fasad stavb lahko učinkovito dopolnjujeta. Ocenjujemo, da lahko geodezija z uporabo naprednih merskih sistemov nudi podporo gradbeništvu in energetiki in s tem poveča učinkovitost in ekonomičnost energetskih sanacij stavb.

Literatura in viri

- Abella, R. J., Daschbach, J. M., McNichols, R. J. (1994). Reverse engineering industrial applications, *Computers and Industrial Engineering* 26, (2), 381–385. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(94\)90071-x](https://doi.org/10.1016/0360-8352(94)90071-x)
- Balon, M. (2007). Analiza uporabnosti tehnologije terestričnega laserskega skeniranja za metrično dokumentacijo zemeljskih plazov. Diplomski naloga. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 89 str. http://drugg.fgg.uni-lj.si/294/1/GEU_0726_Balon.pdf, pridobljeno 5. 1. 2018.
- Billings, S. (2008). Hidden point offset. *The American Surveyor*. November 2008, 4 f. http://www.amerisurv.com/PDF/TheAmericanSurveyor_Billings-HiddenPointOffset_November2008.pdf, pridobljeno 20. 1. 2018.
- Fischler, M. A., Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24 (6), 381–395. DOI: <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
- Flerin, M. (2016). Geodetska izmera fasad stavb za namen energetske sanacije. Magistrski naloga. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 66 str. <http://drugg.fgg.uni-lj.si/5553/>, pridobljeno 18. 1. 2018.
- Gonzalez R. C. in Woods R.E. *Digital Image Processing 2nd Edition*, Prentice Hall, New Jersey, 2002.
- Grigilo, D., Ozvaldič, S., Vrečko A., Kosmatin Fras, M. (2015). Vektorizacija poteka daljnovodnih vodnikov s Houghovo transformacijo iz podatkov aero- in terestričnega laserskega skeniranja. *Geodetski vestnik*, 59(2), 246–261. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.02.246-261
- Herzog, T., Natterer J., Schweitzer, R., Volz, M., Winter, W. (2004). *Timber Construction Manual*, Birkhäuser, Basel. <https://www.slideshare.net/Tupon1944lxGjR/read-timber-construction-manual-4th-edition-pdf-full-ebook-free>, pridobljeno 15. 12. 2017
- Joeckel, R., Stober, M., Huep, W. (2008). Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren, Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag.
- Kregar, K.; Možina, J.; Ambrožič, T.; Kogoj, D.; Marjetič, A.; Štebe, G.; Savšek, S. (2017). Control Measurements of Crane Rails Performed by Terrestrial Laser Scanning. *Sensors*, 17, 1671. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17071671>
- Lattke, F. et al. TES EnergyFacade – prefabricated timber based element systems for improving the energy efficiency of the building envelope. Research project 2008–2009. Technische Universität München. Fakultät für Architektur. Institut für Entwerfen und Bautechnik: 189 f. https://www.holz.art.um.de/fileadmin/w00bne/www/04_Forschung/02_Abgeschlossen/TES_EnergyFacade_manual_2009.pdf, pridobljeno 12. 12. 2017.
- Larsen, K. E., Lattke, F., Ott, S., Winter S. (2011). Surveying and digital workflow in energy performance retrofit projects using prefabricated elements. *Elsevier. Automation in Construction*, 20, 999–1011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.001>
- Scherer, M. (2001). Objekterfassung: Was? – Wie? – Wozu?, Eine Analyse mit Schwerpunkt bei der Bauaufnahme, Flächenmanagement und Bodenordnung 4, 188–199. http://www.scherer.de/objekt/Geoadaesie_internetseite_9-2013a/download/Objekterfassung_Methoden_2001_FuB.pdf, pridobljeno 6. 12. 2017.
- Scherer, M. (2002). Advantages of the Integration of Image Processing and Direct Coordinate Measurement for Architectural Surveying – Development of the System TOTAL, FIG XXII International Congress, Washington, D. C. USA. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_2002/Js28/JS28_scherer.pdf, pridobljeno 9. 12. 2017.
- Smogavec, L. (2015). Uporabnost terestričnega laserskega skeniranja pri izdelavi geodetskega načrta. Diplomski naloga. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 77 str. <http://drugg.fgg.uni-lj.si/5105/>, pridobljeno 10. 1. 2018.

- Urbančič, T., Kosmatin Fras, M., Stopar, B., Koler, B. (2014). The Influence of the Input Parameters Selection on the RANSAC Results. *International Journal of Simulation Modelling*, 13(2), 159–170. DOI: [https://doi.org/10.2507/IJSM13\(2\)3.258](https://doi.org/10.2507/IJSM13(2)3.258)
- Urbančič, T., Vrečko A., Kregar, K. (2016). Zanesljivost Metode RANSAC Pri Ocenici Parametrov Geometrijskih Oblik. *Geodetski vestnik* 60(1), 69–97. http://www.geodetski-vestnik.com/60/1/gv60-1_urbancic.pdf, pridobljeno 10. 2. 2018.
- Volk, R., Stengel, J., Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs, *Automation in Construction* 38, 109–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Wunderlich, T. (2014). *Sensorik und Methodik 1. Vorlesungsskript*. München, TUM, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement: 81 str. https://www.geo.bgu.tum.de/fileadmin/w00blm/www/content_images/lehre/SensorikMethodik_1_VO_WS_2015-16.pdf, pridobljeno 17. 1. 2018.
- Zuliani, M. (2011) *RANSAC for Dummies*. GNU Free Documentation License: 101 str. <http://www.cs.tau.ac.il/~turkel/imagepapers/RANSAC4Dummies.pdf>, pridobljeno 10. 1. 2017.



Savšek S., Flerin M., Kregar K., Kogoj D. (2018). Geodetska izmera fasad stavb za namen energetske sanacije. *Geodetski vestnik*, 62 (2), 201–217. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2018.02.201-217

doc. dr. Simona Savšek, univ. dipl. inž. geod.

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

Matjaž Flerin, mag. inž. geod. geoinf.

GEMETRA, Matjaž Flerin, s.p.
Neveljska pot 9a, SI-1241 Kamnik
e-naslov: matjaz.flerin@gemetra.si

asist. dr. Klemen Kregar, univ. dipl. inž. geod.

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

izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.

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