

# Uloga geoprostornih tehnologija u oblikovanju virtualne kulturne baštine

---

Majetić, Igor

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:093090>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-20**



**Sveučilište u Zadru**  
Universitas Studiorum  
Jadertina | 1396 | 2002 |

Repository / Repozitorij:

[University of Zadar Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Diplomski sveučilišni studij Primijenjene geografije (jednopedmetni)

**Igor Majetić**

**Uloga geoprostornih tehnologija u oblikovanju  
virtualne kulturne baštine**

**Diplomski rad**

Zadar, 2021.

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Diplomski sveučilišni studij Primijenjene geografije (jednopedmetni)

Uloga geoprostornih tehnologija u oblikovanju virtualne kulturne baštine

Diplomski rad

Student/ica:

Igor Majetić

Mentor/ica:

Izv. prof. dr. sc. Ante Šiljeg

Komentor/ica:

Izv. prof. dr. sc. Lena Mirošević

Zadar, 2021.



## Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Igor Majetić**, ovime izjavljujem da je moj **diplomski** rad pod naslovom **Uloga geoprostornih tehnologija u oblikovanju virtualne kulturne baštine** rezultat mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mojega rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 21. listopada 2021.

# TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Diplomski rad

## ULOGA GEOPROSTORNIH TEHNOLOGIJA U OBLIKOVANJU VIRTUALNE KULTURNE BAŠTINE

Igor Majetić

### Izvadak

Posljednjih desetljeća u području kulturne baštine, potaknute razvojem računala i pojavom novih tehnologija prikupljanja i obrade prostornih podataka, otvorile su se brojne nove mogućnosti u očuvanju kulturne baštine te se naglasak sve više stavlja na obilježja položaja, oblika i geometrije te baštine. Terensko istraživanje je provedeno u Ninu, a objekt istraživanja je bila crkva Sv. Križa. Prikupljanje podataka je napravljeno pomoću terestričkog laserskog skenera Faro Focus<sup>m</sup> 70. Napravljeno je 13 snimki, 7 s izvrsnom kvalitetom i 6 sa zadovoljavajućom kvalitetom. Programi korišteni pri obradi podataka su *SCENE*, *CloudCompare* i *MeshLab*. Srednja greška udaljenosti gustog oblaka točaka se nalazi u rasponu od 1,44 mm do 20,49 mm a srednja vrijednost izmjerenih greški udaljenosti gustog oblaka točaka iznosi 6,95 mm. Ukupni nesklad između snimaka (Mean) iznosi 6,53 mm a vrijednosti su u rasponu od 1,437 do 20,49 mm. Njihovom uporabom izrađena su dva 3D modela, A i B, na kojima je prikazana razlika u algoritmima koji programi koriste, utjecaj obrade podataka na izlazni rezultat te je napravljena usporedba dva modela. U programu *Lumion* napravljena je virtualna šetnja za izradu koje je korišten ranije napravljeni model visoke rezolucije.

**Ključne riječi:** LiDAR, TLS, kulturna baština, virtualna baština, VR, AR, 3D model

**Voditelj:** izv. prof. dr. sc. Ante Šiljeg, **Suvoditelj:** izv. prof. dr. sc. Lena Mirošević

**Povjerenstvo:** prof. dr. sc. Josip Faričić, doc. dr. sc. Denis Radoš, doc. dr. sc. Branimir Vukosav (zamjenski član)

## BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zadar

Department of Geography

Graduation thesis

### THE ROLE OF GEOSPATIAL TECHNOLOGIES IN VIRTUAL CULTURAL HERITAGE MODELLING

Igor Majetić

#### Abstract

In recent decades, in the field of cultural heritage, stimulated by the development of computers and the emergence of new technologies for the collection and processing of spatial data, numerous new opportunities have opened up in the preservation of cultural heritage, and the emphasis is increasingly placed on the characteristics of the location, shape and geometry of the heritage. The field research was conducted in Nin, and the object of the research was the church of Holy Cross. Data collection was done using a terrestrial laser scanner Faro Focus<sup>m</sup> 70. 13 scans were taken, 7 with excellent quality and 6 with satisfactory quality. The softwares used for data processing are *SCENE*, *CloudCompare* and *MeshLab*. The mean scan point distance error is in the range of 1.44 mm to 20.49 mm, and the mean value of the measured distance errors of the point cloud is 6.95 mm. The total discrepancy between the scans (Mean) is 6.53 mm and the values range from 1.437 to 20.49 mm. Using them, two 3D models, A and B, were created, showing the difference in the algorithms used by the programs, the impact of data processing on the output, and a comparison of the two models. In the software *Lumion* a virtual walk was made, for the creation of which previously created high-resolution model was used.

**Keywords:** LiDAR, TLS, cultural heritage, virtual heritage, VR, AR, 3D model

**Supervisor:** Ante Šiljeg, PhD, Associate Professor, **Co-supervisor:** Lena Mirošević, PhD, Associate Professor

**Reviewers:** Josip Faričić, PhD, Professor, Denis Radoš, PhD, Assistant Professor, Branimir Vukosav, PhD, Assistant Professor (alternate member)

# SADRŽAJ

## PREDGOVOR

1. UVOD .....	1
2. OBJEKT I CILJ ISTRAŽIVANJA .....	3
HIPOTEZA RADA .....	3
3. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA .....	4
4. TEORIJSKA OSNOVA .....	7
4.1. GEOPROSTORNE TEHNOLOGIJE.....	7
4.2. DALJINSKA ISTRAŽIVANJA.....	8
4.2.1. Daljinska istraživanja u kulturnoj baštini.....	9
4.3. KULTURNA BAŠTINA .....	10
4.3.1. UNESCO .....	10
4.3.2. Materijalna i nematerijalna kulturna baština .....	11
4.3.3. Zaštita kulturne baštine u Republici Hrvatskoj .....	12
4.3.4. Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske .....	13
4.3.5. Digitalna kulturna baština .....	15
4.3.6. Digitalizacija kulturne baštine.....	16
4.3.6. Virtualna baština .....	17
4.4. 3D MODELIRANJE .....	18
4.4.1. 3D model.....	20
4.5. VIRTUALNA I PROŠIRENA STVARNOST (VR I AR).....	22
4.6. MJERENJE UDALJENOSTI POMOĆU SVJETLOSTI.....	23
4.6.1. Triangulacijska metoda .....	24
4.6.2. Pulsna metoda izmjere .....	26
4.6.3. Fazna metoda izmjere (AMCW skeneri) .....	26
4.6.4. Laser radar (FMCW skeneri) .....	29
4.6.5. Interferometrija.....	30
4.7. LASERI .....	30
4.7.1. Defleksija, enkoderi i prozor snimanja .....	32
4.8. MJERENJE POMOĆU TERESTRIČKIH LASERSKIH SKENERA.....	35
5. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA .....	37
6. METODOLOGIJA RADA .....	40
6.1. 3D DOKUMENTACIJA CRKVE SV. KRIŽA .....	41

6.1.1. Faro Focus <sup>m</sup> 70 .....	41
6.1.2. Prikupljanje prostornih podataka .....	44
6.1.3. Faro SCENE .....	47
6.1.4. CloudCompare .....	47
6.1.5. MeshLab.....	48
6.2. REGISTRACIJA OBLAKA TOČAKA.....	48
6.3. DALJNJA OBRADA PODATAKA .....	51
6.4. IZVOĐENJE VIRTUALNE ŠETNJE OKO CRKVE SV. KRIŽA .....	52
7. REZULTATI.....	54
7.1.REGISTRACIJA TOČAKA.....	54
7.2. MODEL A .....	58
7.3. MODEL B .....	62
8. RASPRAVA.....	68
9. ZAKLJUČAK .....	70
10. LITERATURA.....	71
11. IZVORI .....	77
12. POPIS GRAFIČKIH PRILOGA .....	79
13. POPIS TABLIČNIH PRILOGA .....	81
14. SAŽETAK.....	82
15. SUMMARY .....	83



## **PREDGOVOR**

Razvoj računalne tehnologije potaknuo je razvoj drugih znanstvenih grana, između ostalih i geografije. Taj proces je potaknuo razvoj novih metoda prikupljanja i obrade prostornih podataka, a naziv za tu disciplinu su geoprostorne tehnologije. Uz sve veće prijetnje uzrokovane klimatskim promjenama, ratovima i drugim opasnostima za kulturnu baštinu, važno je iskoristiti te nove mogućnosti. Geoprostorne tehnologije se mogu iskoristiti pri stvaranja 3D modela visoke rezolucije i kvalitete kako bi u slučaju oštećenja postojala mogućnost vraćanja kulturnog dobra u prvobitno stanje. Takvi modeli se pohranjuju u digitalne repozitorije što ih čini dostupnijima te mogu služiti i za promociju kulture.

Želio bih se zahvaliti mentoru izv. prof. dr. sc. Anti Šiljegu. Trud, volja i pristup prema nama studentima, te veliko znanje koje posjeduje su me usmjerili prema daljinskim istraživanjima i mojoj želji za nastavkom rada u ovom znanstvenom polju. Također bih se želio zahvaliti i komentorici izv. prof. dr. sc. Leni Mirošević na potpori i savjetima prilikom pisanja rada. Veliko hvala kolegama dr. sc. Ivanu Mariću i mag. geogr. Franu Domazetoviću na pomoći prilikom terenskog prikupljanja podataka te pomoći i korisnim savjetima prilikom njihove inicijalne obrade. Također veliko hvala i članovima povjerenstva za obranu i ocjenu ovoga rada, prof. Dr .sc. Josipu Faričiću i doc. dr. sc. Denisu Radošu, na njihovom vremenu, savjetima i komentarima.

Posebne zahvale mojoj obitelji, sestri Luciji, baki Anki i tetki Željki koji su cijelo vrijeme bili uz mene i pružali mi podršku u životu i obrazovanju. Na posljetku, najveće hvala mojim roditeljima Peri i Vlatki koji su oduvijek poticali moju znatiželju i pružili mi najbolje moguće obrazovanje. Bez njihove pune potpore ovaj diplomski rad ne bi bio moguć.

## 1. UVOD

Posljednjih desetljeća u području kulturne baštine prisutan je značajan interes znanstvenika koji u proučavanju kulturnog područja ili objekta naglasak stavljaju na obilježja položaja, oblika i geometrije (Vacca i dr., 2012; Guarnieri i dr., 2017; Canevese i De Gottardo, 2017; Pérez-Álvarez i dr., 2020). Razvojem računala i pojavom novih tehnologija prikupljanja i obrade prostornih podataka otvorile su se brojne mogućnosti u očuvanju kulturne baštine (Remondino i Rizzi, 2010). Trenutne tehnike omogućuju postizanja novih načina predstavljanja i vizualizacije kulturnog područja, s ciljem kvalitetnijega metričkog opisa (Vacca i dr., 2012).

Kulturnom baštinom smatraju se svi običaji, vrijednosti, umjetnički izričaji, mjesta i objekti koje su prijašnje generacije ostavile u nasljeđe te se najčešće dijeli na nematerijalnu i materijalnu (Koboldt, 1997; Xiao i dr., 2018). Kulturna baština predstavlja tradiciju i bogatstvo pojedinog naroda te se kao takva treba zaštititi (URL1). Upravo je iz ove činjenice proizašla potreba primjene suvremenih tehnologija poput fotogrametrije, laserskog skeniranja ili generalno daljinskih istraživanja (Remondino i Rizzi, 2010; Xiao i dr., 2018). Za ove sustave se najčešće koristi naziv geoprostorne tehnologije (GST) (Rajangam i Rajani, 2017) koje imaju važnu ulogu u povezivanju konceptualne dimenzije određenog projekta i fizičkog okvira stvarnosti (Pérez-Álvarez i dr., 2020). Sveobuhvatno GST se mogu promatrati kao skup tehnologija (GIS, RS, GNSS) koji omogućuje modeliranje kompleksnih procesa i oblika različite razine detaljnosti ovisno o svrsi istraživanja (Šiljeg, 2019). Primjena i dostupnost moderne tehnologije omogućili su 3D dokumentaciju, konzervaciju i digitalnu promociju zaštićenih područja i objekata (Remondino i Rizzi, 2010) gdje 3D dokumentacija označava proces prikupljanja, obrade, reproduciranja i prezentiranja geoprostornih podataka kroz određivanje položaja, oblika i dimenzija nekog objekta ili područja u trodimenzionalnom prostoru u svrhu očuvanja trenutnog stanja kulturne baštine (Marić i dr., 2019). Ovakvo prikupljanje podataka za cilj ima generiranje 3D modela (Remondino i El-Hakim, 2006) odnosno virtualnog modela s kojim se može vršiti interakcija i manipulacija pomoću računala (Remondino i Zhang, 2006). Trodimenzionalni modeli uobičajena su rješenja mnogih problema u inženjerstvu i drugim znanstvenim disciplinama jer raspoređuju informacije na intuitivniji i vizualniji način od ostalih tradicionalnih pristupa utemeljenih u 2D dokumentima (Pérez-Álvarez i dr., 2020). Generirani modeli se mogu koristiti za stvaranje virtualne ili proširene stvarnosti koja omogućava bolji doživljaj izrađenog modela (Deggim i dr., 2017; Brennan i Christiansen, 2018).

S obzirom na to da je oblikovanje virtualne kulturne baštine opsežan proces koji obuhvaća više znanstvenih disciplina, u radu je opisana teorijska osnova kulturne baštine, virtualne baštine, 3D modela, 3D modeliranja, virtualne i proširene stvarnosti, elektromagnetskog zračenja, laserskih sustava te prikupljanja prostornih podataka pomoću laserskih skenera.

U radu su obrađene tri glavne domene virtualne kulturne baštine: 3D dokumentacija, 3D reprezentacija i 3D diseminacija (širenje, promicanje). Primarni cilj rada je prikaz optimalnog procesa modeliranja (tijeka rada) s naglaskom na izradu 3D modela visoke točnosti crkve sv. Križa u Ninu iz podataka prikupljenih terestričkim laserskim sustavom. Ova tehnika je moćan alat za analizu mjesta ili objekta (Vacca i dr., 2012; Guarnieri i dr., 2017; Canevese i De Gottardo, 2017; Pérez-Álvarez i dr., 2020). Dokumentacija i arhiviranje stanja spomenika ili područja bitna je u procesu proučavanja, obnove ili konzervatorskog elaborata kulturnog nasljeđa.

## 2. OBJEKT I CILJ ISTRAŽIVANJA

Objekt istraživanja ovoga diplomskog rada je oblikovanje virtualne kulturne baštine na primjeru crkve sv. Križa u Ninu.

U zadnjih nekoliko godina došlo do naglog razvoja i povećanja dostupnosti terestričkih laserskih skenera zbog čega se javila potreba njihove valorizacije u domeni kulturne baštine. Cilj diplomskog rada je izrada fotorealističnog 3D modela visoke točnosti crkve sv. Križa iz geopodataka prikupljenih terestričkim laserskim skenerom. Sekundarni cilj rada je prikazati primjenu geoprostornih tehnologija u oblikovanju virtualne kulturne baštine, objasniti razlike među terestričkim skenerima, obradu prikupljenih podataka te probleme koji se javljaju pri obradi takvih podataka.

### HIPOTEZA RADA

Polazne hipoteze ovoga diplomskog rada utemeljene su na pretpostavkama da će korištene GST omogućiti prikupljanje podataka, detekciju specifičnih oblika na crkvi sv. Križa u Ninu, generiranje visoko-kvalitetnih modela i njihovu vizualizaciju.

H1 Geoprostorne tehnologije omogućavaju brzo prikupljanje i obradu prostornih podataka

H2 Srednja greška registracije udaljenosti skupova gustog oblaka točaka u računalnom programu Faro SCENE biti će manja od 1cm

H3 Kvaliteta izlaznih rezultata je ograničena metodom obrade podataka

### 3. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

S pojavom novih tehnologija te pojavom mogućnosti spremanja velikih količina podataka dolazi do promjene u konceptu očuvanja kulturne baštine (Pieraccini i dr., 2001). Uvodi se novi pojam, oblikovanje virtualne kulturne baštine. Proučavanje kulturne baštine koristi generiranje 3D modela, 3D modeliranje, u dokumentaciji kulturne baštine, njezinom očuvanju i restauraciji te u primjeni novih tehnika prilikom analize kulturne baštine. Digitalizacija kulturne baštine postala je ustaljeni proces (Shao i dr., 2018).

Seiter-Šverko i Križaj (2012) u radu *Digitalizacija kulturne baštine u Republici Hrvatskoj : od trenutne situacije prema nacionalnoj strategiji* daju pregled trenutnog stanja digitalizacije kulturne baštine u Republici Hrvatskoj. Navode pravni okvir za razvoj informacijskog društva te daju popis ustanova koje su sudjelovale u digitalizaciji. Također navode zaključke radne skupine iz 2005. godine o izradi nacionalnog programa digitalizacije.

Pieraccini i dr. (2001) u radu *3D digitizing of cultural heritage* objašnjavaju razloge za izvođenje digitalizacije kulturne baštine. Kao razloge navode digitalnu restauraciju, stvaranje fizičkih kopija baštine, daljinski pristup, proučavanje i korištenje baštine te stvaranje digitalnih arhiva koji bi pomogli u nadgledanju kulturne baštine. U radu također navode i tehnike koje se koriste prilikom digitalizacije kulturne baštine te proces obrade 3D podataka i izrade 3D modela. Također navode i dva istraživanja u kojima su primijenjene navedene tehnike.

Brennan i Christiansen (2018) u radu *Virtual Materiality: A Virtual Reality Framework for the Analysis and Visualization of Cultural Heritage 3D Models* definiraju 3D modele i virtualnu stvarnost. Daju popis tehnologija korištenih prilikom analize i vizualizacije 3D modela kulturne baštine. Navode metode i alate koji se koriste prilikom ovoga procesa poput manipulacije i transformacije, vizualizacije i osvjetljenja modela te materijala i tekstura te kako se koriste prilikom modeliranja.

Scianna i dr. (2020) u radu *Digital Photogrammetry, Tls Survey and 3d Modelling for VR and AR Applications in CH* predlažu tijekom rada i objašnjavaju proces generiranja 3D modela. Oni rade istraživanje na crkvi San Giorgio dei Genovesi u Palermu. Prilikom istraživanja koristili su terestrički laserski skener te objašnjavaju kako i zašto su prikupljeni podatci tim uređajem. Nadalje objašnjavaju proces 3D modeliranja te navode računalni program

CloudCompare kao program u kojemu je napravljena obrada podataka te Poisson Surface Reconstruction kao metodu kojom je izrađena poligonska mreža (*mesh*).

Canevese i De Gottardo (2017) u radu *Beyond point clouds and virtual reality innovative methods and technologies for the protection and promotion of cultural heritage* objašnjavaju rad s laserskim skenerima. Navode razlike između pulsni, faznih i triangulacijskih lasera te u kojim granama se koriste i na kojim udaljenostima su efektivni u radu. Klasificiraju podatke prikupljene laserskim skeniranjem, objašnjavaju 3D modeliranje te navode vrste modela. Također navode i načine korištenja modela u kulturnoj baštini.

Guarnieri i dr. (2017) u svom radu *From Tls Survey To 3D Solid Modeling for Documentation of Built Heritage: the Case Study of Porta Savonarola in Padua* generiraju 3D model vrata u obrambenim zidinama Padove Porta Savonarola. U radu se objašnjava prikupljanje podataka laserskim sustavima, objašnjava se pojam prostorne rezolucije te preciznosti skenera. Nadalje se objašnjava korištenje računalnog programa CloudCompare i *octree* struktura unutar toga programa.

Ibrahim i dr. (2011) u radu *Cultural Learning in Virtual Heritage: An Overview* definiraju virtualnu baštine. Također definiraju tri glavne domene virtualne baštine. Te domene su 3D dokumentacija, 3D reprezentacija i 3D diseminacija. U svome radu predlažu koncept približavanja virtualne baštine krajnjim korisnicima te učenje iz takvih aplikacija.

Pérez-Álvarez i dr. (2020) u radu *3D Documentation with TLS of Caliphal Gate (Ceuta, Spain)* daju kratki pregled korištenja GST u domeni kulturne baštine, mogućnosti i karakteristike terestričkih laserskih skenera te druga područja primjene ove tehnologije. Navode važnost planiranja rada s laserskim sustavima, prvenstveno lokacije za stajališta i referentne sfere te kako razmišljanje o tome štedi vrijeme prilikom obrade podataka. Također predlažu redoslijed rada s laserskim podacima. Navode načine obrade podataka te spremanje podataka u formatima koji su iskoristivi u više vrsta računalnih programa za obradu tih podataka. U radu se spominju i besplatni programi MeshLab i CloudCompare, navode se njihove mogućnosti, međusobna usporedba ta dva programa te njihove prednosti i nedostaci. Predstavljen je i generirani 3D model.

Vacca i dr. (2012) su u radu *Laser scanner survey to cultural heritage conservation and restoration* objavili rezultate istraživanja na dvije lokacije na Sardiniji, dvorcu Sivillier u

Villasoru te zvoniku u Moresu. Prikupljanje podataka obavili su pomoću uređaja Faro Focus 3D. U svome radu opisuju plan izmjere na obje lokacije. Također predlažu redosljed radnji prilikom obrade podataka prikupljenih laserskim skenerom. Navode da se obrada podataka uključuje čišćenje oblaka točaka, registraciju skenova, georeferenciranje gustih oblaka točaka, generiranje poligonske mreže, zatvaranje mreže i ispravljanje grešaka te generiranje punog 3D modela.

Remondino i Rizzi (2010) u radu *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites-techniques, problems, and examples* raspravljaju o tehnikama, problemima i primjerima 3D dokumentacije prirodne i kulturne baštine. Navode kriterije za izradu 3D modela. Ti kriteriji su točnost i preciznost modela, prenosivost (kao odgovor na prepreke na mjestima prikupljanja podataka), niska cijena, brza realizacija i fleksibilnost. Također navode i probleme koji se javljaju prilikom prikupljanja, obrade i manipulacije 3D podacima.

Marić i dr. (2019) u radu *Geoprostorne tehnologije u 3D dokumentaciji i promociji kulturne baštine – primjer utvrde Fortica na otoku Pagu* koriste aerofotogrametriju i bliskopredmetnu fotogrametriju za 3D dokumentaciju. Prostor njihovog istraživanja je uže područje oko utvrde Fortica na Pagu. Za ciljeve rada su postavljeni izrada modela visoke rezolucije, izrada virtualne šetnje te izrada promotivnih materijala pomoću 3D printera. U radu je detaljno objašnjena metodologija istraživanja koja je djelomično korištena prilikom izrade ovog diplomskog rada.

## 4. TEORIJSKA OSNOVA

### 4.1. GEOPROSTORNE TEHNOLOGIJE

Geoprostorne tehnologije (GST) (Slika 1.) predstavljaju širok pojam i uključuju veliki broj različitih suvremenih alata koji se koriste za prikupljanje ili obradu prostornih podataka. One predstavljaju raspon različitih znanstvenih disciplina koje pridonose proučavanju Zemljine površine, društveno-geografskim spoznajama i kartiranju (URL12) a omogućavaju prikupljanje, pohranu, manipuliranje, transformaciju i analizu prostornih podataka te dobivanje informacija koje se mogu prikazati kao kartografski prikazi, grafovi, tablice, 3D i virtualni modeli.

Neke od najvažnijih su geografski informacijski sustavi (GIS), globalni položajni sustav (GPS) ili globalni navigacijski satelitski sustav (GNSS) (Šiljeg i dr., 2018; URL12), internetske kartografske tehnologije koje uključuju programe poput *Google Earth*-a te omogućavaju bolji prikaz geoprostornih podataka (URL12) te daljinska istraživanja koja uključuju podatke prikupljene bez direktnog kontakta senzora s promatranim područjem (Šiljeg i dr., 2018; URL12). Također uključuju digitalno kartiranje i modeliranje reljefa te različite vrste skeniranja (URL14).



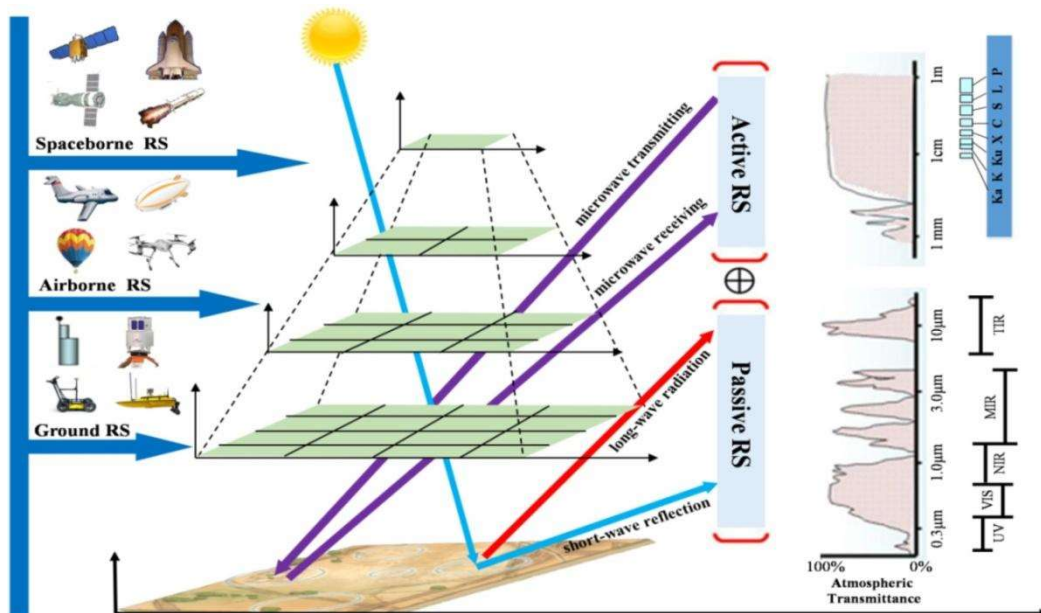
Slika 1. Glavni alati geoprostornih tehnologija (URL14)



GIS i prostorne analize zauzimaju središnje mjesto u GST-u. GIS i prostorne analize pružaju mogućnost prikupljanja, spremanja, obrade, analize i interpretacije podataka te prepoznavanje trendova i uzoraka proizašlih iz tih podataka. Glavna podjela GIS aplikacija je na Desktop GIS, osnovni oblik aplikacija koji uključuje instaliranje programa na računala, Web i Cloud GIS aplikacije koje omogućavaju spajanje računala na GIS servere te Mobile GIS aplikacije koje koriste kapacitete pametnih telefona i tableta. GPS ili GNSS također zauzima važno mjesto među GST a sastoji se od mreže satelita koja pruža mogućnost izuzetno preciznog određivanja koordinata na Zemljinoj površini (URL15).

#### 4.2. DALJINSKA ISTRAŽIVANJA

Daljinska istraživanja se definiraju kao znanost i tehnike pribavljanja pouzdanih informacija o objektu, prostoru ili fenomenu koja se prikupljaju uređajima koji nisu u direktnom kontaktu s promatranim objektom, prostorom ili fenomenom (Chawla i dr., 2020) kroz proces snimanja, mjerenja i interpretacije snimki i digitalne reprezentacije energetske uzoraka očitanih iz senzora (URL13). Prikupljanje se radi pomoću dronova (bespilotnih letjelica), zrakoplova ili satelita s udaljenosti od nekoliko metara do nekoliko stotina kilometara (Mouazen i dr., 2020).



Slika 2. Primjeri metoda daljinskih istraživanja (preuzeto od Luo i dr., 2019)

Dijele se na aktivne i pasivne sustave (Slika 2.). Pasivni sustavi registriraju dugovalnu i kratkovalnu radijaciju koja se emitira s promatranog područja dok aktivni sustavi sami emitiraju zračenje koje im služi za prikupljanje podataka. Pasivni senzori se dijele na pankromatske, multispektralne i hiperspektralne. Aktivni senzori su radarski sustavi i LiDAR (*Light detection and ranging*) (Kupfer i Emerson, 2005).

#### 4.2.1. Daljinska istraživanja u kulturnoj baštini

Daljinska istraživanja koja se koriste u području kulturne baštine obuhvaćaju sve tehnike koje se ne baziraju na direktnom kontaktu uređaja ili senzora s promatranim objektom neovisno o tome radi li se o snimanju sa zemlje ili o snimanju iz zraka. Tako se metode snimanja dijele na geofizičke i akustične. Geofizičke metode uključuju georadare (*Ground penetrating radar, GPR*) i druge radarske sustave poput radarske interferometrije, električnu tomografiju i sve metode koje se baziraju na detekciji elektromagnetskog zračenja poput terestričkih laserskih sustava te RGB, multispektralnih i infracrvenih kamera (Nolesini i dr., 2016; Rodríguez-González i dr., 2017; Luo i dr., 2019). Akustične metode se sastoje od sonarskih sustava (Luo i dr., 2019). Također postoje i hibridni sensor poput pokretnih LiDAR sustava koji koriste više vrsta tehnika daljinskih istraživanja poput globalnog navigacijskog satelitskog sustava, inertne jedinice za mjerenje i aktivnog senzora (Rodríguez-González i dr., 2017).

Tehnologije koje se koriste prilikom prikupljanja podataka u svrhu dokumentacije kulturne baštine moraju imati svojstva poput točnosti, učinkovitosti i benefita korištene tehnologije, prenosivosti i brzine prikupljanja podataka (Remondino i Rizzi, 2010). Također je važna fleksibilnost prilikom modeliranja podataka, geometrijska točnost podataka, fotorealizam dobivenih rezultata, detaljno modeliranje podataka te automatizacija cijeloga procesa. Dokumentacija se radi kako bi se stvorili virtualni muzeji i repozitoriji modela, kako bi se omogućila interakcija s kulturnom baštinom bez rizika od oštećenja kulturne baštine, kako bi se pomoću tih podataka mogli napraviti konzervatorski ili rekonstrukcijski zahvati te u edukacijske svrhe (Remondino i El-Hakim, 2006). Dokumentacija i vizualizacija kulturne baštine doprinose očuvanju povijesti, arheoloških nalazišta te kulturnih lokaliteta (Guarnieri i dr., 2017).

### 4.3. KULTURNA BAŠTINA

Prema definiciji Ministarstva kulture i medija Republike Hrvatske „ kulturna baština, materijalna i nematerijalna, je zajedničko bogatstvo čovječanstva u svojoj raznolikosti i posebnosti, a njena zaštita jedan je od važnih čimbenika za prepoznavanje, definiranje i afirmaciju kulturnog identiteta.“ Pod kulturnu baštinu se ubrajaju pokretna i nepokretna kulturna dobra od umjetničkog, povijesnog, paleontološkog, arheološkog, antropološkog i znanstvenog značenja (URL1).

#### 4.3.1. UNESCO

Prema UNESCO-u baština je podijeljena u tri glavne skupine. Prvu skupinu čini prirodna baština koju čine lokaliteti od posebnoga kulturnog, geološkog ili biološkog značaja. Drugu skupinu čini baština ugrožena vojnim sukobima. Treću skupinu čini kulturna baština. Ona se dijeli na materijalnu kulturnu baštinu, koja uključuje pokretnu kulturnu baštinu poput slika, zapisa ili skulptura, nepokretnu kulturnu baštinu poput spomenika ili arheoloških nalazišta te podvodnu kulturnu baštinu poput potopljenih brodova ili gradova i zgrada, i nematerijalnu kulturnu baštinu koja uključuje običaje poput usmene predaje ili plesova (URL2). Na UNESCO-ovom popisu svjetske baštine se nalazi 10 nepokretnih kulturnih dobara iz Hrvatske, među kojima su obrambeni sustavi Republike Venecije 16. i 17. st. u Zadru i Šibeniku, stari grad Dubrovnik ili Starogradskog polje na otoku Hvaru (URL33) dok se na UNESCO-ovom reprezentativnom popisu nematerijalne kulturne baštine nalazi 15 običaja iz Hrvatske te uključuje običaje poput godišnjeg proljetnog ophoda Kraljica ili Ljelja iz Gorjana, vokalno-instrumentalnog napjeva bećarac te mediteranske prehrane na hrvatskom Jadranu, njegovoj obali, otocima i dijelu zaleđa (URL34).

Ova definicija baštine je skup više donesenih konvencija. Uključuje Hašku konvenciju za zaštitu kulturnih dobara u slučaju oružanog sukoba iz 1954. godine, UNESCO-vu konvenciju o načinu zabrane i zaštite ilegalnog uvoza, izvoza i transporta kulturnih dobara iz 1970. godine, Konvenciju za zaštitu svjetske kulturne i prirodne baštine iz 1972. godine, UNIDROIT-ovu konvenciju o ukradenim ili nezakonito izvezenim kulturnim dobrima iz 1995. godine, Konvenciju o zaštiti podvodne kulturne baštine iz 2001. godine, Konvenciju za zaštitu nematerijalne kulturne baštine iz 2003. godine te Konvenciju o zaštiti i promociji različitosti kulturnih izraza iz 2005. godine (URL3).

#### 4.3.2. Materijalna i nematerijalna kulturna baština

Prema Konvenciji za zaštitu svjetske kulturne i prirodne baštine iz 1972. godine kulturna baština obuhvaća spomenike, skupine građevina i lokalne povijesne, estetske, arheološke, znanstvene, etnološke ili antropološke vrijednosti (Kušter, 2017). Tri glavne komponente za definiranje kulturne baštine su:

1. Spomenici u koje pripadaju djela arhitekture, monumentalna djela iz područja skulpture i slikanja, elementi ili strukture arheološke prirode, crteži, pećine i prebivališta, te kombinacije obilježja univerzalne (povijesne, umjetničke ili znanstvene) vrijednosti.
2. Skupine građevina u koje spadaju skupine samostojećih ili povezanih građevina koje zbog svoje arhitekture, položaja u okolišu ili homogenosti posjeduju izuzetnu univerzalnu vrijednost, bilo povijesnu, znanstvenu ili umjetničku.
3. Lokaliteti, što se odnosi na djela čovjeka ili kombinirana djela prirode i čovjeka, te područja koja uključuju arheološke lokalitete izuzetne univerzalne vrijednosti (povijesne, estetske, etnološke ili antropološke) (URL4).

Prema Konvenciji za zaštitu nematerijalne kulturne baštine iz 2003. godine nematerijalna kulturna baština se definira kao „vještine, izvedbe, izričaje, znanja, umijeća, kao i instrumente, predmete, rukotvorine i kulturne prostore koji su povezani s tim, koje zajednice, skupine i u nekim slučajevima, pojedinci prihvaćaju kao dio svoje kulturne baštine“ te „im pruža osjećaj identiteta i kontinuiteta te tako promiče poštivanje kulturne raznolikosti i ljudske kreativnosti“ (URL5). Nematerijalna kulturna baština se manifestira u:

1. Usmena predaja i izričaji, uključujući jezik kao sredstvo komunikacije nematerijalne kulturne baštine
2. Izvedbene umjetnosti
3. Običaji, obredi i svečanosti
4. Znanje i vještine vezani uz prirodu i svemir
5. Tradicijski obrti (URL6)

#### 4.3.3. *Zaštita kulturne baštine u Republici Hrvatskoj*

Kroz povijest je postojala potreba za zaštitom i očuvanjem baštine. Od kraja 19. stoljeća sve do danas ova potreba rezultirala je donošenjem i usvajanjem brojnih deklaracija, povelja i sporazuma o zaštiti kulturne baštine (URL7). Ni teritorij Republike Hrvatske nije iznimka pa tako već u 19. stoljeću osnivanjem Centralne komisije za zaštitu povijesnih i umjetničkih spomenika u Beču započinje organizirano djelovanje zaštite kulturne baštine (Drandić Gorički, 2020).

Početak očuvanje nematerijalne kulturne baštine se veže za rad kulturno-prosvjetnog društva Seljačka sloga koje je osnovano 1925. godine u Zagrebu (Kvaranta, 2016). Iako su i ranije osnovana kulturno umjetnička društva, poput Kulturno-umjetničkog društva Šokica iz Slobodnice koje je osnovano 1915. godine, Seljačka sloga je imala posebnu ulogu. Uz podršku Hrvatske seljačke stranke društvo je radilo na promicanju seljačke kulture, suzbijanju nepismenosti, osnivanju knjižnica i čitaonica, poticalo je rad kulturno-umjetničkih društava, pjevačkih i tamburaških zborova, glumačkih družina te je organiziralo folklorne smotre (URL8). Daljnji naponi za očuvanje kulturne baštine se događaju sredinom 20. stoljeća kada se 1960. godine donosi Zakon o zaštiti spomenika kulture, a 1962. godine osniva Komisija za etnografska muzejsko-konzervatorska pitanja (Kvaranta, 2016).

U Republici Hrvatskoj zaštita kulturne baštine je regulirana Zakonom o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara koji je donesen 1999. godine. Tim zakonom je regulirano uspostavljanje zaštite nad kulturnim dobrom, obavljanje poslova na zaštiti i očuvanju kulturnih dobara, određivanje vrste kulturnih dobara, obveze i prava vlasnika kulturnih dobara, obavljanje inspekcijskih i upravnih poslova, rad i djelokrug Hrvatskog vijeća za kulturna dobra, te financiranje zaštite i očuvanje kulturnih dobara (Mičić, 2012). Prema tom zakonu kulturna dobra su:

1. Pokretne i nepokretne stvari od umjetničkog, arheološkog, povijesnog, antropološkog i znanstvenog značenja
2. Arheološka nalazišta i arheološke zone, krajolici i njihovi dijelovi koji svjedoče o čovjekovoj prisutnosti u prostoru, a imaju umjetničku, povijesnu i antropološku vrijednost
3. Nematerijalni oblici i pojave čovjekova duhovnog stvaralaštva u prošlosti kao i dokumentacija i bibliografska baština

4. Zgrade, odnosno prostori u kojima se trajno čuvaju ili izlažu kulturna dobra i dokumentacija o njima (URL9).

Zakon također definira tko je zadužen za zaštitu i očuvanje kulturne baštine te tko je nadležan za određivanje mjera zaštite i nadzor nad njihovim provođenjem. O kulturnoj baštini skrbe tijela državne uprave, tijela lokalne samouprave i uprave, a zaštita podrazumijeva:

1. Zaštita i očuvanje kulturnih dobara u neokrnjenom i izvornom stanju, te prenošenje kulturnih dobara budućim naraštajima
2. Stvaranje povoljnijih uvjeta za opstanak kulturnih dobara i poduzimanje mjera potrebnih za njihovo redovito održavanje
3. Sprječavanje svake radnje kojom bi se izravno ili neizravno mogla promijeniti svojstva, oblik, značenje i izgled kulturnog dobra i time ugroziti njegova vrijednost
4. Sprječavanje protupravnog postupanja i protupravnog prometa kulturnim dobrima, te nadzor nad iznošenjem i uvozom kulturnih dobara
5. Uspostavljanje uvjeta da kulturna dobra prema svojoj namjeni i značenju služe potrebama pojedinca i općem interesu (URL9).

#### *4.3.4. Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske*

Zakonom o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara se propisuje i osnivanje Registra kulturnih dobara Republike Hrvatske. Registar je javna knjiga koju vodi Ministarstvo kulture i medija a unutar njega kulturna baština se pravno dijeli u 3 liste:

1. Lista zaštićenih kulturnih dobara
2. Lista kulturnih dobara nacionalnog značenja
3. Lista preventivno zaštićenih dobara (URL9).

Upišite traženi pojam  HR  EN

PRETRAŽITE

Web Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske prikazuje rezultate za nepokretna i nematerijalna kulturna dobra. Podatke o pokretnim kulturnim dobrima, kako o onima pojedinačno zaštićenim tako i o zaštićenim zbirkama, potrebno je zatražiti putem elektroničke pošte: registrar-upiti@min-kulture.hr, Odjel za Registar kulturnih dobara.

	Registarski broj	Naziv kulturnog dobra	Adresa	Vrsta kulturnog dobra	Pravni status
<input type="checkbox"/>	1 Z-2949	Arheološko nalazište "Velika pećina"	Goranec, GORANEC	Arheologija	Zaštićeno kulturno dobro
<input type="checkbox"/>	2 Z-3440	Arheološko nalazište Utvrda Grebengrad	Donje Makojišće, DONJE MAKOJIŠĆE	Arheologija	Zaštićeno kulturno dobro
<input type="checkbox"/>	3 Z-2946	Arheološko nalazište "Pod lipom"	Zbelava	Arheologija	Zaštićeno kulturno dobro
<input type="checkbox"/>	4 Z-3441	Arheološko nalazište Aqua lasae	Varaždinske Toplice, PARK DR. IVANA KRSTITELJA LALANGUEA	Arheologija	Zaštićeno kulturno dobro
<input type="checkbox"/>	5 Z-2947	Arheološko nalazište "Utvrda Šćitina"	Čanjevo, ČANJEVO	Arheologija	Zaštićeno kulturno dobro

Slika 3. Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske (URL10)

Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske (URL10) trenutno sadrži popis od 6033 kulturna dobra. Unutar registra kulturna dobra su klasificirana kao nematerijalna baština, kulturno povijesna cjelina, nepokretna pojedinačna baština, kulturni krajolik i arheološka baština. U registru se ne nalazi popis pokretne materijalne kulturne baštine (Slika 3.). Prema registru na UNESCO popisu svjetske kulturne baštine ili reprezentativnoj listi nematerijalne kulturne baštine se nalaze 32 kulturna dobra. O svakom kulturnom dobru unutar registra se navode opći podatci o dobru, njegova lokacija, nadležni konzervatorski odjel, slika kulturnog dobra te kratak opis kulturnog dobra (Slika 4.). Trenutno se u registru ne navodi je li pojedino kulturno dobro digitalizirano ili ne. Ovaj podatak bi se mogao navesti unutar općih podataka ili unutar samog opisa dobra te tako osigurati bolji pregled trenutnog stanja digitalizacije kulturne baštine u Republici Hrvatskoj.

**Opći podatci**

Naziv dobra:	Crkva sv. Križa i okolno područje s prapovijesnim i antičkim nalazima
Naziv dobra (eng):	
Lista i registarski broj:	Nepokretna pojedinačna, Z-1195, N-34
Pravni status:	Zaštićeno kulturno dobro, Kulturno dobro nacionalnog značenja
Vrsta:	Nepokretna pojedinačna
Klasifikacija:	sakralni kompleksi
Datacija:	10 st. p.n.e. - 9 st. n.e.
Autor:	
UNESCO:	

**Smještaj kulturnog dobra**

Županija:	Zadarska županija
Grad/općina:	NIN
Adresa:	Nin, UL. PETRA ZORANIĆA, 8

**Nadležni konzervatorski odjel**

Naziv KO:	Konzervatorski odjel u Zadru za područje Zadarske županije
Adresa KO:	I. Smiljanica 3
Telefon:	023 211 129
e-mail:	igor.miletic@min-kulture.hr

**Opis**

Crkva sv. Križa sagrađena je u IX st. nad ostacima prapovijesnih i antičkih stambenih građevina. To se građevina centralnog tipa s osnovom grčkog križa. Krakovi križa presvođeni su polukulatama na trompama i prekriveni kamenim pločama i podupiru visoki tambur na kojemu je pomoću trompa konstruirana kupola. Na istočnoj strani su tri polukružne apside. Nad portalom na zapadnom kraku crkve je natpis na nadvrtniku s posvetom župana Godečaja ukrašen pleternom ornamentikom. Oko crkve je nekropola.

Slika 4. Izvadak iz Registra kulturnih dobara Republike Hrvatske za crkvu sv. Križa u Ninu (URL35)

#### 4.3.5. Digitalna kulturna baština

Razvojem tehnologije došlo je do razvoja novoga znanstvenog područja pod nazivom digitalna kulturna baština. Korištenjem daljinskih istraživanja prikupljaju se podatci koji su georeferencirani te postaju sve važnija sastavnica u proučavanju kulturne baštine (Koller i dr, 2009).

UNESCO-va Povelja o zaštiti digitalne baštine donesena je 2003. godine. Ona definira digitalnu baštinu kao jedinstveni oblik ljudskog znanja i izražavanja. Također navodi da se sastoji od kulturnih, edukacijskih, znanstvenih i administrativnih resursa te tehničkih, pravnih,



medicinskih i drugih vrsta informacija kreiranih digitalno ili naknadno digitaliziranih (URL11). Digitalna kulturna baština se dijeli na digitalizirane informacije, koje se odnose na sadržaj nastao kopiranjem fizički dostupnih oblika kulturne baštine, informacije nastale u digitalnom obliku i meta podatke koji pružaju dodatne informacije, poput opisa, objašnjenja ili administrativnih informacija, o pojedinim objektima (Navarrete, 2013).

#### 4.3.6. Digitalizacija kulturne baštine

Jedan od prvih projekata digitalizacije pokrenuo je *The National Archives and Records Administration* (NARA) 1984. godine, a zvao se *Optical Digital Image Storage System* (ODISS). Projekt je imao brojne ciljeve, a neki od njih su utvrđivanje odnosa cijene i koristi digitalizacije, utvrđivanje optimalnih parametara digitalizacije dokumenata, kako će javnost reagirati na takvu prezentaciju dokumenata, utvrđivanje potencijalnih problema takvih sustava ili utvrđivanje najefikasnijeg procesa digitalizacije dokumenata (Holmes, 1988). Također, primjer digitalizacije je i digitalizacija rukopisa Beowulfa u Britanskoj knjižnici, gdje je 1993. godine započeo projekt *Electronic Beowulf* (Prescott, 1997).

Danas postoje brojni primjeri digitalizacije baštine, a možda najpopularniji je portal *Google Arts & Culture* (URL39). Na njemu se nalaze brojne virtualne izložbe i digitalizirane slike, poput onih iz Muzeja Van Gogh u Amsterdamu (URL40) ili Galerije Uffizi u Firenci (URL41). Također, na portalu postoje i virtualne šetnje poput one kroz Zabranjeni grad u Pekingu (URL42). Mapire.eu je još jedan od primjera. Na njemu se nalazi digitalizirani pregled europskih povijesnih karata. Karte koje se nalaze na portalu uključuju katastarske planove, karte pojedinih država i povijesne planove gradova (URL43).

Nacionalna i sveučilišna knjižnica u Zagrebu je provela digitalizaciju dijela građe. Građa je podijeljena na digitalizirane knjige, vizualnu, kartografsku, glazbenu i rukopisnu građu. Također, organizirano je i nekoliko virtualnih izložbi, poput virtualne izložbe Ruđer Bošković, Hrvatska glagoljica ili Prvi svjetski rat – svakodnevnica 1914. u starim hrvatskim novinama (URL36). Uz Nacionalnu i sveučilišnu knjižnicu u programu digitalizacije građe su sudjelovale i druge knjižnice (Seiter-Šverko i Križaj, 2012).

U gradu Zadru primjer digitalizacije je preglednik Dikaz koji je preglednik digitalizirane građe Znanstvene knjižnice u Zadru (URL45). Također postoji i portal Pisana baština (URL46) koji obuhvaća pisanu baštinu zadarsko-šibenskog područja. Na njemu se nalaze katalog rukopisa, katalog vodenih znakova te virtualna izložba. U proces digitalizacije baštine uključena je i gradska knjižnica Zadar (URL47). Prema Planu razvoja kulture Grada Zadra 2019.-2026. (URL48) od ove godine se trebalo krenuti u kartiranje i digitalizacija kulturnih objekata na Poluotoku koje su trebali provesti Društvo arhitekata Zadra te Konzervatorski odjel Zadar. Također se trebao pokrenuti i projekt *eKultura* Grada Zadra; digitalizacija arhivske i ostale građe koji bi trebao omogućiti bolju pristupačnosti kulturi primjenom raznovrsnih digitalnih medija.

U Hrvatskoj je 2020. godine pokrenut projekt „e-Kultura – Digitalizacija kulturne baštine“ koji će za cilj imati uspostavu centralnog repozitorija. On će omogućiti prikaz, pohranu i korištenje digitalnog i digitaliziranog sadržaja. Temeljni procesi unutar projekta su digitalizacija, trajna pohrana i digitalno očuvanje baštine (URL37). Također, postoji i Nacionalni plan digitalizacije kulturne baštine 2025. koji se temelji na 5 ključnih postavki koje su infrastruktura, digitalni sadržaj, interoperabilnost, e-usluge i održivost. U njemu se navode 2 strateška cilja. Prvi je unapređenje mrežne dostupnosti digitalne kulturne baštine a drugi je osiguravanje održivosti umreženoga središnjeg sustava za digitalnu kulturnu baštinu odnosno kontinuirano praćenje, vrednovanje i izvještavanje o rezultatima Plana te razvoj novih proizvoda i usluga (URL38).

#### 4.3.6. *Virtualna baština*

Virtualna kulturna baština koristi informacijske tehnologije kako bi zabilježila i reprezentirala prostorne podatke za njihovo lakše proučavanje. Ona koristi elektroničke medije kako bi rekreirala kulturnu baštinu te kako bi pomogla u interpretaciji kulturne baštine i njezine uloge u prošlosti i sadašnjosti (Jacobsen i Holden, 2007). Koristi arhitekturu kao okvir za rekreiranje prošlosti gdje su rekonstrukcije orijentirane na zgrade i spomenike. Virtualna baština služi za rekreiranje starih kultura kao živih elemenata, odnosno mora pružati pogled na baštinu kroz vizuru kreatora te baštine kako bi osigurala bolje razumijevanje (Jacobsen i Holden, 2007; Champion, 2017).

Dva obilježja virtualne baštine su kvaliteta i valjanost informacija odnosno njihova autentičnost te točnost prilikom reprezentacije informacija. Virtualizacija baštine označava proces simulacije baštine kroz upotrebu računalne grafike, odnosno prikazivanje baštine u digitalnom obliku. U praktičnom smislu to znači generiranje 3D računalnih modela građevina ili pojedinačnih artefakata kroz vizualizaciju uz upotrebu digitalne tehnologije te omogućavanje uranjanje i interakciju korisnika sa sadržajem (Roussou, 2002; Jacobsen i Holden, 2007). Virtualna baština uključuje sintezu, konzervaciju, reprodukciju i reprezentaciju, digitalno reprocessiranje te prikaz kulturne baštine kroz VR tehnologiju (Roussou, 2002).

Domene virtualne baštine su 3D dokumentacija, 3D reprezentacija i 3D diseminacija (Ibrahim i dr., 2011). Dokumentacija se odnosi na što točnije prikupljanje podataka te se sastoji od više tehnika prikupljanja od kojih je svaka pogodna za određenu lokaciju prikupljanja. Reprezentacija se odnosi na obradu prikupljenih podataka, njihovu replikaciju u virtualnom svijetu, njihovu replikaciju pomoću novih tehnologija poput 3D printera. Također ova domena uključuje i vizualizaciju objekata koji su uništeni, izgubljeni ili oštećeni. Fokusira se na 3D modeliranje, teksturiranje, renderiranje te procesiranje podataka. Diseminacija se odnosi na način na koji se kreirani 3D modeli prezentiraju korisnicima gdje aplikacije koje koriste virtualnu stvarnost služe kao medij za prezentaciju sadržaja. Fokus ove domene virtualne baštine je na valjanosti i kvaliteti podataka (Ibrahim i dr., 2011).

#### 4.4. 3D MODELIRANJE

Razvojem elektroničke tehnologije, poglavito razvojem procesnih i grafičkih kapaciteta računala, dolazi do otvaranja novih mogućnosti u obradi prostornih podataka (Brennan i Christiansen, 2018; Entwistle i dr, 2009). Ključnu ulogu u tome procesu je imao razvoj mikroprocesora te novih programskih i grafičkih rješenja koja su omogućila realniji prikaz prostornih podataka. Također je važnu ulogu u samom razvoju imalo i stvaranje jednostavnijih (dostupnijih) operacijskih sustava poput Windowsa (Vernon i Peckham, 2002).

3D modeliranje se može promatrati kao cjeloviti proces stvaranja interaktivnog modela koji počinje prikupljanjem podataka, a završava vizualizacijom u obliku 3D virtualnog modela s kojim se može vršiti interakcija i manipulacija pomoću računala (Remondino i Zhang, 2006; Remondino i El-Hakim, 2006). Također se za modeliranje može reći i da je to stvaranje

geometrijskih i opisnih modela stvarnih objekata ili površina iz ranije prikupljenih podataka (Dorai i dr., 1998).



Slika 5. Generiranje modela korištenjem ručnog skenera (URL16)

Generiranje modela može se obaviti na dva glavna načina. To su CAD (*Computer aided design*), u koji spadaju računalni programi poput Blendera, AutoCAD-a te Autodesk Maya-e (Remondino i El-Hakim, 2006; Remondino i dr, 2009; Koller i dr, 2009; Barazzetti i dr, 2010). Oni pak koriste dva načina generiranja modela, matematičko CAD modeliranje i poligonsko CAD generiranje. Takvi računalni programi se mogu koristiti za generiranje virtualnih kopija stvarnih objekata ili za kreiranje potpuno novih virtualnih objekata (Guildi i Remondino, 2012; Champion, 2017). Drugi oblik generiranja modela je onaj koji se bazira na kontaktu u realnom vremenu s promatranim područjem (*Reality based*) (Slika 5.) (Remondino i Rizzi, 2010; Remondino i dr., 2009; Guildi i Remondino, 2012). Za taj način generiranja modela se koristi i naziv geometrijsko modeliranje (Remondino i Rizzi, 2010). Tako se u metode koje se oslanjaju na prikupljanje prostornih podataka ubrajaju lasersko skeniranje, fotogrametrija koja se oslanja na prikupljanje velikog broja fotografija pomoću kojih se stvaraju modeli visoke točnosti, senzori koji prikupljaju RGB-D slike, metoda fotometrijskog sterea koja se oslanja na albedo promatrane površine, tehnologija strukturiranog svjetla (Doulamis i dr., 2015), ultrazvučni i mikro valovi te brojne hibridne verzije (Gruen, 2008) a metodologija i tehnologija korištena za prikupljanje podataka uvjetuje i njihovu daljnju obradu odnosno određuje metodu dobivanja rezultata (Doulamis i dr., 2015).

U ovoj fazi obrade podataka, najvažnije je napraviti funkcionalni model u kojemu se lako orijentirati. Zbog toga se ovaj dio obrade podataka može smatrati njezinim najvažnijim dijelom jer za posljedicu ima stvaranje pojednostavljenog modela s manjim brojem poligona koji ipak posjeduje dovoljnu količinu detalja (*LOD, Level of details*) kako bi i dalje bio upotrebljiv. U izradi funkcionalnih modela pomažu programi za obradu gustih oblaka točaka koji posjeduju sposobnost generiranja pojednostavljenih modela koji zadovoljavaju ranije navedene osobine, dovoljnu kvalitetu sa smanjenim brojem poligona. Također u obzir treba uzeti i situacije kada su podatci nepotpuni ili nisu dovoljno kvalitetni. Neki računalni programi imaju mogućnost popunjavanja rupa u prikupljenim podacima uz redukciju kvalitete i u nekim slučajevima, ovisno u veličini rupa, deformaciju oblika i nemogućnost generiranja teksture (Scianna i dr., 2020).

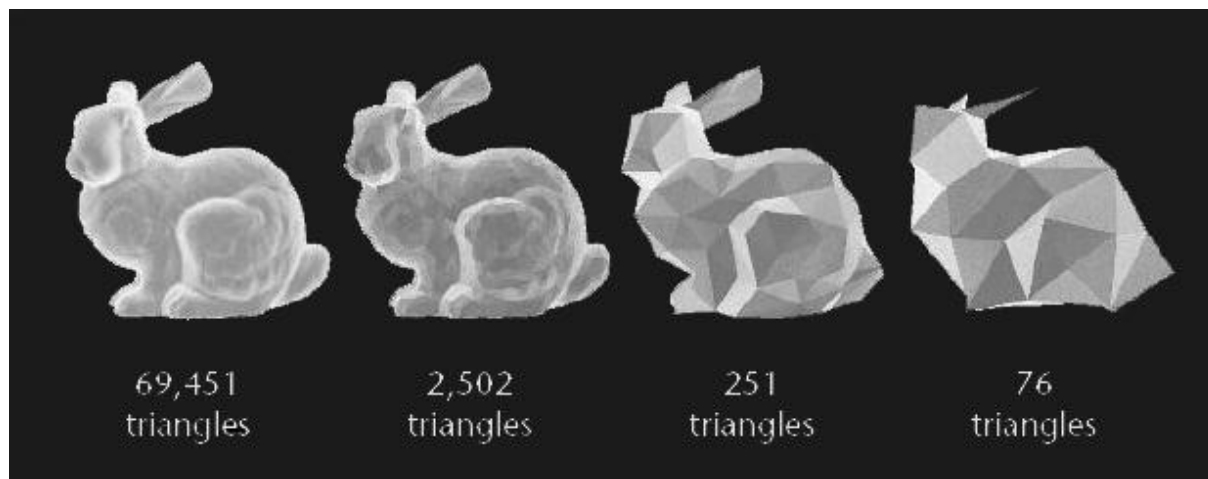
Danas 3D modeliranje ima široku primjenu u industriji, kulturi, medicini i obrazovanju (Dorai i dr., 1998; Vernon i Peckham, 2002). Također ima primjene u animaciji, 3D vizualizaciji, navigaciji, nadzoru i inspekciji objekata, dokumentaciji, vojnoj tehnologiji te autonomnim automobilima (Remondino i El-Hakim, 2006).

#### 4.4.1. 3D model

Modeliranjem prostornih podataka dolazi do stvaranja 3D modela. Kada se 3D modele promatra kao geoobjekte, tada se za njih može reći da su oni geometrijski ispravna topološka vizualizacija prostornih informacija, nastala na temelju kontakta s promatranim objektom u kojem svaka točka posjeduje svoju x, y i z lokaciju u prostoru (Apollonio i dr, 2012). Oni su računalno generirana reprezentacija stvarnog objekta u 3D okruženju (Gruen, 2013).

Ovisno o njihovoj namjeni, 3D modeli mogu imati veću ili manju količinu detalja (*Level of details*) (Brennan i Christiansen, 2018; Apollonio i dr, 2012) (Slika 6.). Količina detalja na modelu se određuje ovisno o namjeni modela. Dobra i kvalitetna vizualizacija se može postići samo uz korištenje kvalitetnih i snažnih računala, u protivnome se mora napraviti redukcija kvalitete podataka. To znači smanjivanje broja poligona te u konačnici smanjenu rezoluciju i kvalitetu modela (Tschirschwitz i dr, 2019). Također, ovisno o količini detalja te naglašavanju tih detalja se mogu obaviti različite analize modela. S povećanjem količine detalja na modelu otkrivaju se značajke koje su nevidljive golim okom, a daljnjim naprednim procesiranjem podataka te samim procesom vizualizacije mogu se posebno naglasiti određena svojstva modela

kako bi se olakšala analiza. Takav način obrade podataka se naziva ekspresivno renderiranje. Takva vrsta naglašavanja određenih karakteristika je dozvoljena samo u onoj mjeri gdje rezultat ne odstupa od osnovnih karakteristika objekta na temelju kojega se radi 3D model (Ridel i dr., 2014).



Slika 6. Razlika u broju trokuta u modelu i vizualne kvalitete modela (URL 17)

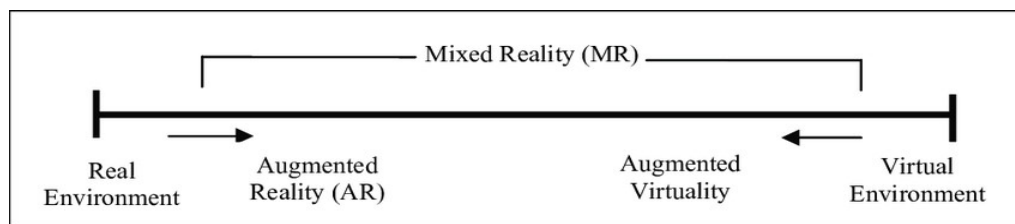
Postoje četiri tipa 3D modela nastalih iz prostornih podataka. To su digitalni modeli reljefa, posebni modeli poput modela vegetacije ili voda, modeli gradova ili zgrada te modeli kulturne ili prirodne baštine (Gruen, 2013). Tri su glavne vrste reprezentacije modela. To su žičani (*wireframe*), površinski (*surface*) i puni (*solid*). Površinski modeli se najčešće koriste u topografiji i GIS-u. Površinski modeli mogu biti 2,5D ili 3D, a razlika je u tome kojom se metodom triangulacije dolazi do rezultata. Puni modeli se koriste u filmovima, video igrama te dizajnu (Canevese i De Gottardo, 2017). Takvi tipovi modela daju podatke o geometriji te omogućuju lakšu manipulaciju i vizualizaciju (Guidi i Remondino, 2012).

Osnovni parametri 3D modela su njegova točnost, kvaliteta renderiranja te veličina seta podataka. (Gruen, 2013). Sama kvaliteta 3D modela se određuje pomoću dva kriterija. To su točnost i pouzdanost. Točnost se određuje tako da se izmjerene vrijednosti usporede s referentnim vrijednostima na objektu čijem se mjerenju pristupilo. Oblak točaka nastao prikupljanjem podatak se uspoređuje s modeliranom površinom te se mjere odstupanja nastala u procesu modeliranja. Pouzdanost 3D modela se utvrđuje tako da se utvrdi preciznost samog modela te da se ti rezultati usporede s greškama nastalim u 3D poligonalnom modelu (*meshu*). Ovakva metoda dopušta otkrivanje grešaka u bilo kojoj fazi obrade na bilo kojoj površini

stvorenog modela (Canevese i De Gottardo, 2017). Također jedan od važnijih aspekata 3D modela je količina geometrijskih detalja koja osigurava kvalitetno renderiranje (El-Hakim i dr., 2007).

#### 4.5. VIRTUALNA I PROŠIRENA STVARNOST (VR I AR)

U cilju razumijevanja virtualne i proširene stvarnosti nužno je definirati osnovnu terminologiju. Iako dijele određena obilježja, ipak se radi o dva različita sustava prikaza modeliranih podataka. Prema Milgramu i Kishonou (1994) trajnost između stvarnog i virtualnog okruženja se naziva kontinuum stvarnost virtualnost (*Reality Virtuality Continuum*) (Slika 7.). Dijelovi kontinuuma su proširena stvarnost (AR), proširena virtualnost (AV), virtualna stvarnost (VR) te miješana realnost (MxR). Zajednički naziv za sve te dijelove je uranjajuća stvarnost (*immersive reality*) (Bekele i Champion, 2019). Na kontinuumu proširena stvarnost se nalazi bliže stvarnom okruženju, a virtualna stvarnost bliže virtualnom svijetu (Carmigniani i dr., 2011).



Slika 7. Kontinuum stvarnost virtualnost (preuzeto od Carmigniani i dr., 2011)

Virtualna stvarnost je okruženje u kojem je korisnik u potpunosti okružen i u interakciji s u cijelosti umjetno stvorenim svijetom. Takav svijet u potpunosti može oponašati fizička svojstva i biti vjerodostojna reprodukcija stvarnog svijeta, ali isto tako može biti konstruiran tako da negira fizičke zakone (Milgram i Kishino, 1994). Kod kreiranja virtualne stvarnosti dolazi do zamjene stvarnog svijeta onim digitalno kreiranim koji omogućuje korisniku bolji doživljaj 3D modela (Deggim i dr., 2017; Brennan i Christiansen, 2018). Ona omogućuje kompletno uranjanje korisnika i njegovu interakciju s umjetno stvorenim svijetom bez ikakve mogućnosti pogleda na stvarno okruženje osim kroz računalno generiranu reprezentaciju stvarnosti (Carmigniani i dr., 2011, Iacovino i dr., 2020).

Proširena stvarnost je definirana kao izravan ili neizravan pogled na stvarni svijet koji je obogaćen dodavanjem virtualnih, računalno generiranih informacija u stvarnom vremenu.

Proširena stvarnost kombinira stvarne i virtualne objekte te je istodobno interaktivna i zabilježena u virtualnom svijetu (Carmigniani i dr., 2011). Kod proširene stvarnosti dolazi do kombiniranja stvarnosti i virtualnog sadržaja te se tako stvara interaktivno okruženje u stvarnom vremenu (*real time*) (Bekele i dr., 2018). Sve te definicije su proizašle iz definicije proširene stvarnosti koju je dao Azuma (1997), gdje proširena stvarnost mora kombinirati stvarno i virtualno, mora biti interaktivna u stvarnom vremenu te registrirana u 3D okruženju.

Virtualna i proširena stvarnost omogućavaju dodavanje slika, videa, zvukova, animacija, tekstualnih zapisa te interakciju s krajnjim korisnicima što joj daje prednosti pred tradicionalnim metodama očuvanja kulturne baštine (Tschirschwitz i dr., 2019). One omogućavaju i kreiranje povijesno točnih rekonstrukcija. Razvoj 3D virtualnih aplikacija je doprinijelo dostupnosti te tehnologije. Dostupnost pametnih telefona i tableta ima izuzetno važnu ulogu u tome gdje oni osiguravaju nove načine korištenja te tehnologije, poput virtualne navigacije unutar virtualne stvarnosti (VR) ili dodavanja novih informacija stvarnome svijetu u slučaju proširene stvarnosti (AR). Obje tehnologije zahtijevaju kompleksne 3D modele koji posjeduju detaljnu teksturu ali zbog težine samih modela moraju imati ograničenu količinu poligona što opet predstavlja kompromis između kvalitete i veličine seta podataka (Scianna i dr., 2020).

Danas se virtualna i proširena stvarnost uz zaštitu kulturne baštine primjenjuju i u brojnim drugim poljima među kojima su najpoznatiji film, industrija zabave, edukacija, vojne potrebe, moda, mediji, zdravstvo i turizam (Iacovino i dr., 2020). Koriste se kao metode u očuvanju, promociji i približavanju kulturne baštine osobama koje nisu u mogućnosti fizički posjetiti muzeje i arheološka nalazišta (Loizides i dr., 2014).

#### 4.6. MJERENJE UDALJENOSTI POMOĆU SVJETLOSTI

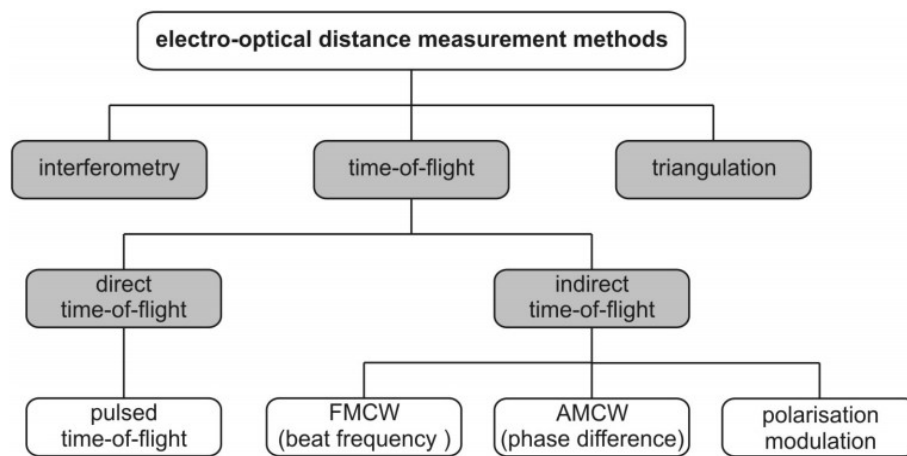
Svjetlost se koristi u brojnim slučajevima prilikom mjerenja objekata. Senzori koji se koriste za prikupljanje podataka se dijele na aktivne i pasivne. Pasivni sustavi ovise o radijaciji iz okruženja, najviše o vidljivom dijelu spektra zbog toga što je najdostupnije ali se može koristiti i infracrvena radijacija (Van Genechten i dr., 2008).

Aktivni senzori imaju svoj izvor radijacije te detektiraju refleksiju tog zračenja prilikom snimanja. Koriste svjetlost, ultrazvuk ili rendgenske zrake. Sastoje se od odašiljača i detektora.



Ovakvi uređaji izvode operacije mjerenja samostalno i neselektivno te imaju veliku brzinu i točnost prilikom prikupljanja podataka (Van Genechten i dr., 2008).

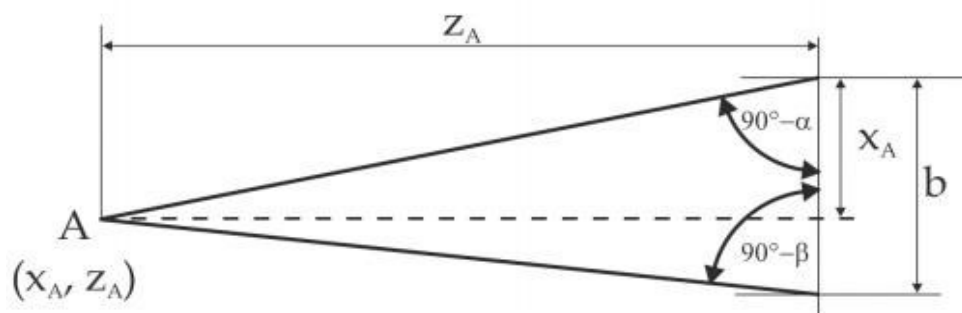
Tri su glavna principa određivanja udaljenosti između uređaja i objekta a to su triangulacija, interferometrija i *time of flight* (Slika 8.). *Time of flight* se dalje dijeli na direktnu ili pulsnu metodu i indirektnu odnosno FMCW, AMCW odnosno faznu metodu i polarizacijsku modulaciju. Pulsna metoda i fazna metoda se najčešće koriste kod terestričkih laserskih sustava (Zogg, 2008, Kopáček i dr, 2020).



Slika 8. Metode daljinskog prikupljanja podataka (preuzeto od Zogg, 2008)

#### 4.6.1. Triangulacijska metoda

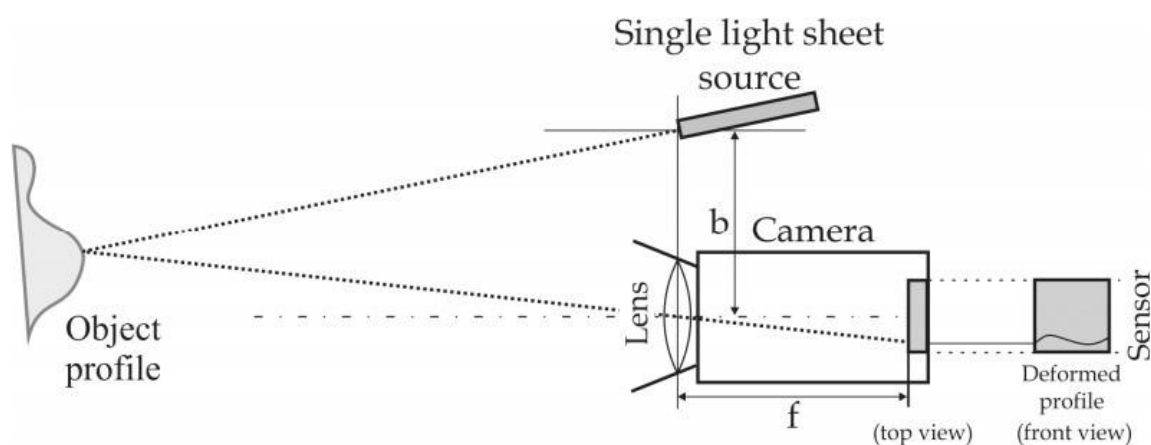
Triangulacijska metoda izmjere se bazira na poznavanju triangulacijskih principa, gdje se iz poznatih vrijednosti ekstrapolira nepoznata. Bazira se na poznavanju odnosa poznatih i nepoznatih vrijednosti u trokutu (Slika 9.). To je metoda kod koje se udaljenost ne mjeri direktno, nego se mjere kutovi izlaska i upada zraka u senzore (Guidi i Remondino, 2012).



Slika 9. Mjerenje udaljenosti triangulacijom (preuzeto od Guidi i Remondino, 2012)

Postoje dvije vrste triangulacije, pasivna i aktivna. Pasivna triangulacija ima primjenu u geodeziji, kod geodetskih izmjera tahometrom. Kod aktivne triangulacije, potrebna su dva senzora. Jedan senzor koji je izvor svjetlosti, i drugi koji registrira reflektirano svjetlo od objekta (Zogg, 2008). Senzor koji čini taj sustav aktivnim je laser koji emitira elektromagnetski impuls u rotirajuće zrcalo ili cilindričnu leću. Tako reflektirana laserska zraka proizvodi svjetlosnu plohu koja se reflektira od promatrane površine u CCD senzor (Guidi i Remondino, 2012). CCD senzor je elektronička komponenta koja se sastoji od više nizova fotosenzitivnih poluvodiča. Svaki takav poluvodič predstavlja foto detektor koji zaprimljene fotone pretvara u elektrone (URL18).

Zbog toga što je kut izlaska zrake na rotirajućem zrcalu i kut upada zrake na CCD senzoru poznat, a udaljenost nelinearno ovisi o kutu zraka, moguće je odrediti udaljenost mjernog instrumenta od promatranog objekta (Zogg, 2008). Taj proces omogućava računanje koordinata za svaku točku na promatranom profilu (Slika 10.). 3D laserski skeneri ponavljaju ovaj proces te tako generiraju podatke koji opisuju geometriju cijelog promatranog prostora. Takav oblik prikupljenih podataka se još naziva i strukturirani 3D oblak točaka (Guidi i Remondino, 2012). Triangulacijski laserski skeneri su izuzetno točni i precizni. Točnost ovih uređaja iznosi od 0,05 mm do 0,1 mm (Canevese i De Gottardo, 2017) ali glavni nedostatak ove metode izmjere je dometa koji je ograničen te iznosi do 1 m (Pieraccini i dr., 2001; Canevese i De Gottardo, 2017). Ovo ih čini neprikladnima za prikupljanje podataka na velikim površinama (Zogg, 2008). Ovakvi sustavi se najviše koriste medicini, preciznoj industriji te drugim područjima gdje je potrebna velika količina detalja na modelima (Canevese i De Gottardo, 2017).

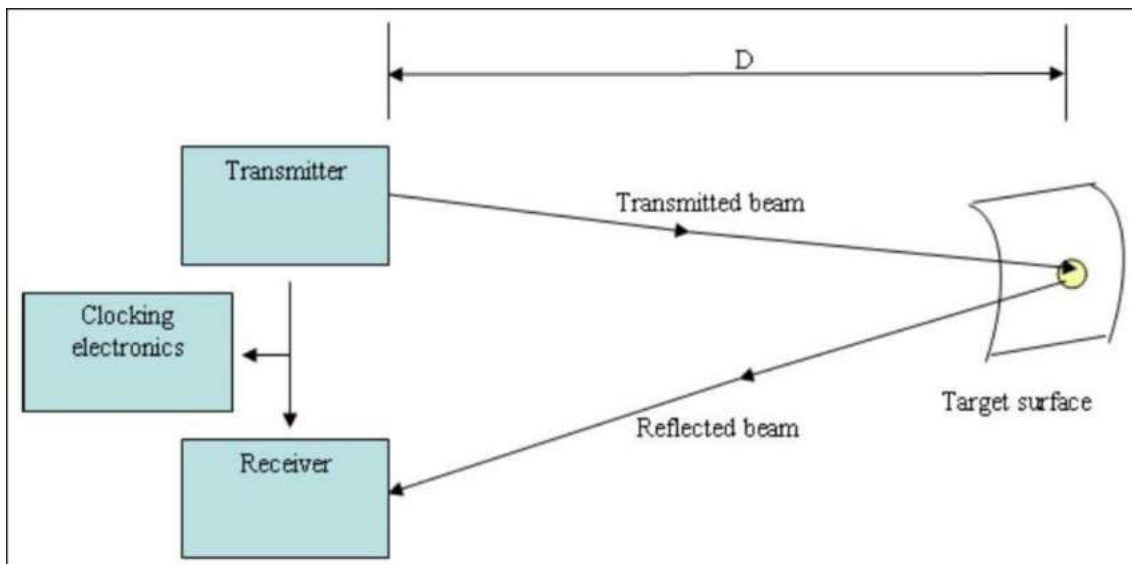


Slika 10. Princip rada aktivnog triangulacijskog uređaja (preuzeto od Guidi i Remondino, 2012)

#### 4.6.2. Pulsna metoda izmjere

Pulsna metoda se bazira na vremenu koje je potrebno da se odašlani svjetlosni signal reflektira od promatrane površine i ponovno zabilježi na prijemniku (Yastikli, 2007). Pulsni uređaji se sastoje od odašiljača i prijemnika. U trenutku kada odašiljač emitira lasersku zraku, ta zraka se dijeli na dva dijela. Jedan dio te zrake odlazi u prijemnik na kojemu se nalazi mjerni mehanizam s diskriminatorom dok drugi odlazi prema objektu (Slika 11.). Tada uređaj počinje mjeriti vrijeme koje je potrebno detektoru za ponovnu registraciju reflektiranog signal. Prilikom ponovne registracije signala diskriminator zaustavlja mjerenje vremena (Reshetyuk, 2009).

Taj proces se ponavlja dok se svim točkama ne odredi lokacija te se kao konačni rezultat dobije 3D sken u kojem svaka točka posjeduje svoju x,y i z koordinatu u lokalnom mjernom sustavu (Guidi i Remondino, 2012). Takvi laserski sustavi ne koriste kontinuiranu zraku te senzor ne može odaslati novi puls dok ponovno ne registrira signal koji je ranije poslan. Zbog toga je maksimalni broj točaka koji sustav može prikupiti ograničen na 2 000 do 50 000 točaka po sekundi (Van Genechten i dr., 2008). Kod takvih lasera točnost na 20 m iznosi  $\pm 3$  mm dok je domet veći od jednog kilometra. Takvi uređaji se koriste kada je potrebno skenirati veliko područje (Canevese i De Gottardo, 2017).



Slika 11. Princip rada pulsno lasera (preuzeto od Van Genechten i dr., 2008)

#### 4.6.3. Fazna metoda izmjere (AMCW skeneri)

Fazni laseri spadaju u podskupinu lasera korištenih za prikupljanje prostornih podataka. Za razliku od pulsni, koji se baziraju na vremenskom pomaku od trenutka slanja do ponovnog registriranja svjetlosti, fazni laseri se baziraju na refleksiji vala od površine, kada dolazi do promjene u fazi vala, takozvani fazni pomak, te se na temelju toga određuje udaljenost promatranog objekta od mjesta mjerenja (Slika 12.) (Van Genechten i dr., 2008; Guidi i Remondino, 2012).

Izlazni valovi se generiraju tako da se na osnovni val, val nosilac, modulira sinusoidni val poznate frekvencije, te se tako stvara kontinuirani val svjetlosti. Taj sinusoidni val je onaj koji nosi informacije o lokaciji određene točke, jer je on onaj na kojem se događa fazni pomak (Guidi i Remondino, 2012). Modulacija je tehnika dodavanja novih informacija na val nosilac kroz mijenjanje jedne ili više osnovnih karakteristika, poput amplitude, frekvencije ili faze toga vala (URL21). Kod ovog tipa skenera radi se o modulaciji amplitude (AM) (Zogg, 2008).

Fazni pomak se može promatrati kao vremenski pomak. Vremenski pomak ( $t$ ) kod faznih lasera se izražava kao:

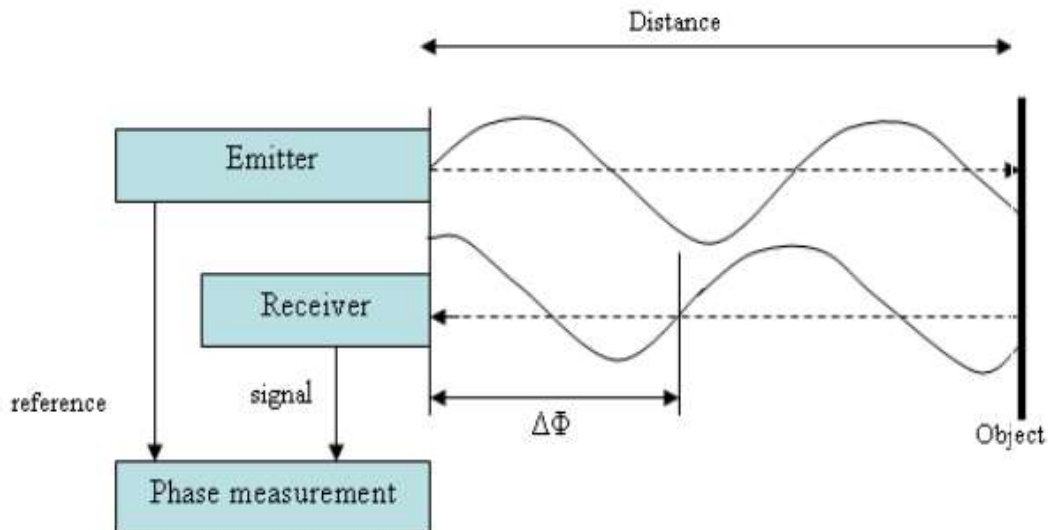
$$t = \frac{\Delta\varphi}{\omega}$$

gdje je  $\Delta\varphi$  fazni pomak a  $\omega$  kutna ili rotacijska brzina. Kutna brzina se može iskazati kao:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

te iz toga proizlazi da je:

$$t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi \cdot f_{modulirano}}$$



Slika 12. Princip rada faznog lasera (preuzeto od Van Genechten i dr., 2008)

Udaljenost mjerenog objekta od lasera kod ove vrste sustava se računa preko formule:

$$d = \frac{c}{2} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} T$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti,  $\varphi$  je fazni pomak a  $T$  je period moduliranog signala ili prema formuli:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi \cdot f_{modulirano}}$$

Takva vrsta lasera pogodnija je od pulsniha za prikupljanje podataka na manjim udaljenostima zbog toga što je emitirana zraka kontinuirana te se na taj način može odaslati više energije, pa je samim time omjer signala i šuma bolji. Nadalje, zbog potrebe za filtracijom podatka pri samom procesu prikupljanja taj omjer se također poboljšava. To se događa zbog upotrebe nisko propusnog filtera. Kada se prijeđe maksimalni domet odaslanog vala, tada šumovi (*noise*) postaju pre jaki i prikupljaju se ne jasni podatci (Guidi i Remondino, 2012). Rezolucija prikupljenih podataka ovisi o preciznosti pri određivanju faznog pomaka ( $\Delta\varphi$ ) i o frekvenciji moduliranog signala. Zbog svojstava tako generiranih valova, najniža frekvencija je ta koja određuje maksimalni domet mjerenja, a najviša ta koja određuje rezoluciju prikupljenih podataka. Zbog toga se pri generiranju valova koristi više različitih frekvencija kod modulacije valova (Zogg, 2008). Točnost kod faznih laserskih skenera iznosi  $\pm 0,5$  mm na

20 m a domet im je uglavnom oko 200 m. Koriste se za skeniranje arhitekture i arheoloških nalazišta (Canevese i De Gottardo, 2017).

#### 4.6.4. Laser radar (FMCW skeneri)

Laser radari su jedan od oblika prikupljanja daljinskih podataka. Za razliku od AMCW skenera, gdje se modulira amplituda signala, kod laser radara modulira se frekvencija elektromagnetskog zračenja. Zbog toga što je moduliranje frekvencije linearno omogućava takvu izmjeru. Dodaje se takozvana *beat* frekvencija preko koje se računa domet (Zogg, 2008). Povećavanjem beskonačno broj koraka između niske i visoke modulacijske frekvencija, generira se takozvana *chirp* frekvencijska modulacija (FM) s linearnim rastom modulacijske frekvencije u operativnom dometu (Guidi i Remondino, 2012).

Valna duljina treba biti dovoljno dugačka kako bi se izbjegla nejasnost, što utječe na domet uređaja za koje je bolje kada je valna duljina kraća. Zbog toga se koristi više modulacija frekvencije. Niže frekvencije se koriste kako bi se postigla veća točnost, a više frekvencije za povećanje kutne rezolucije odnosno dometa lasera. Kako se svjetlost generira kontinuirano, ova se vrsta instrumenta zove FM-CW (Guidi i Remondino, 2012). Sličan proces ovomu se odvija kod radarskih sustava pa se i ovi sustavi nazivaju laser radari (Zogg, 2008; Guidi i Remondino, 2012).

Takav način izmjere osigurava veću točnost mjerenja nego kod pulsnih laserskih skenera ( $\pm 3$  mm) i faznih laserskih skenera ( $\pm 0,5$  mm) te su usporedivi s triangulacijskim skenerima ( $\pm 0,1$  mm). Takvi uređaji imaju prednost sfernog prikupljanja tipičnog za TOF laserske skenere s performansama specifičnim za triangulacijske uređaje i to na udaljenostima koje su puno veće (1-20 m) nego kod triangulacijskih laserskih skenera (Guidi i Remondino, 2012). U praksi maksimalni domet laser radara ovisi o snazi senzora i količini šumova (Zogg, 2008). Takvi tipovi uređaja su u uporabi gdje je istodobno potrebno skenirati veliko područje i potrebna je visoka preciznost mjerenja, poput industrije i kulturne baštine (Guidi i Remondino, 2012).

#### 4.6.5. Interferometrija

Interferometrija je sustav u kojemu se dva elektromagnetska vala sudaraju jedan s drugim te tako određuju udaljenosti objekata na kojima se rade mjerenja (Zogg, 2008). To je proces korištenja upletanja različitih svjetlosnih valova kako bi se odredila trodimenzionalna pozicija u prostoru (Van Genechten i dr., 2008).

Optička interferometrija se za mjerenja koristi od 19. stoljeća. Zbog limitiranosti tadašnje tehnologije, prvenstveno limitiranosti u vidu intenziteta i koherentnosti običnih izvora svjetla, mjerenja su ograničena na udaljenosti od nekoliko centimetara. Tek se izumom laserske tehnologije interferometrija razvija u metodu pogodnu za daljinska mjerenja odnosno laserska tehnologija je dozvolila interferometriji da se razvije u brzu i točnu tehniku za mjerenje većih udaljenosti (Van Genechten i dr., 2008).

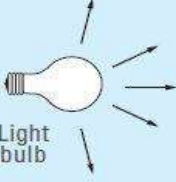
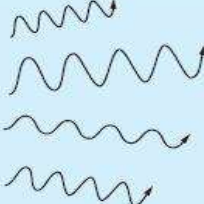
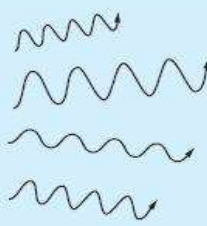

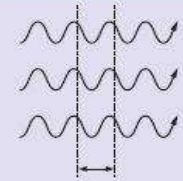
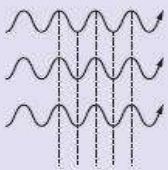
Kod interferometrijskih laserskih skenera laserska zraka se dijeli preko djelitelja zrake na dva dijela (Zogg, 2008). Jedan dio zrake, koji se naziva i referentni, putuje do fiksiranog unutarnjeg reflektora, a drugi dio, koji se naziva i mjerni, odlazi do pokretnog reflektora preko kojega se i emitira (Zogg, 2008; Van Genechten i dr., 2008). Prilikom ponovne detekcije zrake na uređaju podatci se uspoređuju. Na ovaj način se može detektirati jako mala fazna razlika (u visini djelića valne duljine, nekoliko nanometara) te se tako veće udaljenosti mogu mjeriti s malom razinom nesigurnosti (Van Genechten i dr., 2008). To ih također čini izuzetno preciznima, mogu detektirati submilimetarske razlike (Zogg, 2008). Koriste se za mjerenja u kontroliranim uvjetima i ne za mjerenja na udaljenostima većima od nekoliko desetaka metara te su izuzetno skupi (Van Genechten i dr., 2008).

#### 4.7. LASERI

Razvojem tehnologije i razmišljanjem o njezinoj primjeni te razvojem računalnih programa dolazi do sve veće prihvaćenosti terestričkog laserskog skeniranja kao dostupne metode daljinske izmjere. Laserski sustavi pripadaju skupini aktivnih sustava prikupljanja podataka. To ih čini neovisnima o vanjskim izvorima svjetlosti. Laserske sustave obilježava velika brzina prikupljanja točaka i velika preciznost prikupljanja (Wang i dr., 2014).

Laser je akronim za *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, a prvi laser je napravljen 1960. godine u *Hughes Research Laboratoriesu* u Sjedinjenim Američkim

Državama, u Kaliforniji. Njegov rad demonstrirao je Theodore Maiman (Van Genechten i dr., 2008; Jaafar, 2017).

	Directivity (light waves travel in straight line)	Monochromaticity	Coherence
Ordinary light	 <p>Light bulb</p>	 <p>Many different wavelengths</p>	
Laser beam	 <p>Laser</p>	 <p>Single wavelength</p>	 <p>Peaks and troughs align</p>

Slika 13. Razlika između običnog svjetla i lasera (URL19)

Laseri su uređaji stvaraju zrake koncentrirane i intenzivne monokromatske svjetlosti (Slika 13.). To je moguće zbog svojstava elektromagnetskog zračenja. Čestice se ponašaju neovisno jedna o drugoj te je zbog toga moguće proizvesti svjetlost raznih valnih duljina. Poznavanjem svojstava svjetlosti moguće je proizvesti svjetlost točno određene valne duljine. Valna duljina se određuje količinom energije oslobođene padom elektrona u nepobuđeno stanje. Zraka koja se proizvodi na taj način se naziva koherentna svjetlost (Lemmens, 2011). Koherentna svjetlost je svjetlost emitirana ih koherentnih izvora u kojima se titranja pojedinih atoma vremenski i prostorno podudaraju (URL22). Zbog toga svojstva laserske zrake imaju veliki domet te mogu biti izrazito fokusirane (Van Genechten i dr., 2008).

Lasere obilježava visoki stupanj prostorne koherentnosti što im omogućava širenje u ranije definiranom smjeru s malom divergencijom zrake. Također ih obilježava i velika vremenska koherentnost, odnosno dugačko trajanje koherentnosti. Strogi fazni pomaci kroz relativno dugački vremenski period omogućavaju veliko prostorno širenje zrake, odnosno širenje zrake na velike udaljenosti, često i nekoliko kilometara. Velika temporalna koherentnost i dugačko trajanje koherentnosti rezultira uskom spektralnom linijom (*bandwidth*). To znači da vidljiva laserska zraka ima određenu čistu boju. Većina uređaja u *mid* i *close rangeu* koristi valne duljine od 1064 nm (NIR) ili 532 nm što korespondira zelenoj boji. Dužina koherentnosti



dovodi do pojave laserske pjegavosti (*laser speckle*), odnosno pojavu granularnog uzorka. Ona se događa kada se visoko koherentna zraka difuzno reflektira od grube površine (URL23). Lasersko svjetlo je linearno polarizirano što znači da električno polje oscilira u jednom određenom smjeru. Znajući sva ta svojstva laserskih sustava, tada se može reći da laser predstavlja uređaj koji emitira usku, nisko divergentnu zraku točno određene valne duljine koja, kada se nalazi u vidljivom spektru, odgovara točno određenoj boji (Jaafar, 2017).

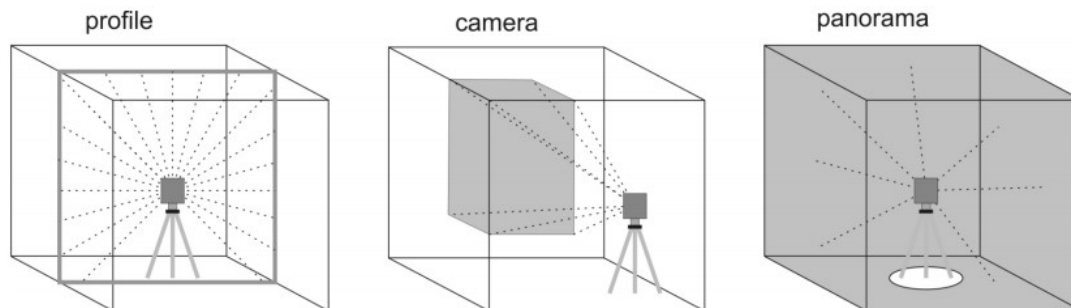
Laserske zrake se šire konstantnom brzinom kroz određeni medij što ih čini pogodnima za daljinska mjerenja. Laserska zraka se može pretvoriti i u kratki ili ultra kratki puls te tada ona može sadržavati izuzetno veliku energiju (Van Genechten i dr., 2008). To lasere čini pogodnima za korištenje u industriji. Uz daljinska istraživanja i industriju, laseri se koriste i u vojsci i medicini (Jaafar, 2017).

#### 4.7.1. Defleksija, enkoderi i prozor snimanja

Defleksija zraka kod laserskih sustava se odvija preko horizontalno ili vertikalno rotirajućeg ili oscilirajućeg optičkog ogledala. Orijehtacija toga optičkog ogledala se detektira pomoću pretvornika pomaka (Zogg, 2008; Reshetyuk, 2009). Pretvornici pomaka (*encoders*) su uređaji koji pretvaraju gibanje u električni signal koji se može pročitati od strane kontrolnog uređaja u kontrolnom sustavu (URL24). Preko signala koji enkoderi šalju kontrolnom uređaju određuje se pozicija, broj, brzina ili smjer. Dije se na linearne i rotacijske. Rotacijski enkoder je elektromehanički uređaj koji pretvara kutni položaj ili rotacijsko kretanje u analogni ili digitalni signal (Crnčević, 2012). Terestrički laserski sustavi prilikom rada koriste digitalne enkodere. Digitalni enkoderi se dijele na inkrementalne (relativne) i binarne (apsolutne) (Crnčević, 2012). Najviše se koriste binarni pretvornici pomaka, iako kada postoji potreba za visokom rezolucijom onda se koriste inkrementalni. Oni ograničavaju horizontalnu i vertikalnu kutnu rezoluciju te zbog toga određuju i rezoluciju terestričkih laserskih skenera (Zogg, 2008).

Binarni enkoderi se nazivaju i apsolutni zbog toga što svaka pozicija koju enkoder zabilježi na izlazu dobiva svoj jedinstveni binarni kod. On najčešće ima četiri znamenke koje se zapisuju svaka na posebnu traku. Inkrementalni enkoderi se koriste kada je potrebno mehanički pokret (kretanje) pretvoriti u digitalni signal. Koriste se za precizno određivanje brzine, udaljenosti, pozicije ili smjera. Nazivaju se i relativni zbog toga što informaciju o pomaku bilježe relativno u odnosu na referentnu točku (Crnčević, 2012).

Prozor snimanja je podatak koji govori o tome koliko područje terestrički laserski sustav može snimiti s jednog stajališta. Prema prozoru snimanja terestrički laserski skeneri se dijele u 3 skupine (Slika 14.). To su profilni skeneri, kamere skeneri i panoramski skeneri (Zogg, 2008).



Slika 14. Prozor snimanja korišten kod terestričkih laserski skenera (preuzeto od Zogg, 2008)

Profilni skeneri imaju ograničenu upotrebu. Njihov prozor snimanja je ograničen na  $180^\circ$  ili  $360^\circ$  dvodimenzionalnog prostora. Orijentacija te ravnine je proizvoljna, odnosno određuje se u odnosu na prostor koji se snima (Zogg, 2008). Svaki profil se sastoji od pojedinačnog seta podataka (Fröhlich i Mettenleiter, 2004). Dodavanjem pokreta skeneru se dodaje i mogućnost snimanja treće dimenzije. Vezanjem profila dolazi do stvaranja cijele slike prostora na kojemu je napravljeno mjerenje. Upotrebljavaju se u specifičnim situacijama, a potrebno je upotpunjavanje s podacima prikupljenim drugim metodama mjerenja. Također zahtjeva velike količine prikupljanja podataka kako bi se stvorili kvalitetni profili bez rupa u prikupljenim podacima (Fröhlich i Mettenleiter, 2004).

Kamere skeneri imaju prozor snimanja koji je ograničen horizontalno i vertikalno (Zogg, 2008). Rade na principu dva oscilirajuća (*galvo*) zrcala koja su sinkronizirana a osciliraju po vertikalnoj i horizontalnoj osi. Jedno bilježi horizontalnu a drugo vertikalnu defleksiju (Fröhlich i Mettenleiter, 2004; Reshetyuk, 2009; Jaafar, 2017). Takav način rada omogućava visoku preciznost kutnog mjerenja što pak znači da ovi uređaji imaju izuzetnu točnost prilikom prikupljanja podataka. Ovakav način prikupljanja podataka je sporiji u odnosu na druge, ali prednost mu je veliki domet unutar kojega se mogu raditi mjerenja (Fröhlich i Mettenleiter, 2004). Prilikom rada glava skenera ostaje nepomična, zbog toga je drugi naziv za te skenere *fixed head* (Reshetyuk, 2009; Jaafar, 2017). Objekt snimanja mora biti u radnom području instrumenta. Najčešći prozor snimanja kod ovih uređaja iznosi  $40^\circ \cdot 40^\circ$  (Zogg, 2008; Reshetyuk, 2009; Jaafar, 2017). Neki sustavi toga tipa automatski pomiču zrcala te zbog toga imaju mogućnost snimanja i do  $360^\circ$  horizontalno (Fröhlich i Mettenleiter, 2004).

Panoramski skeneri komparativno imaju najveći prozor snimanja. Prozor snimanja kod ovakvih vrsta uređaja iznosi 360° horizontalno i 310° vertikalno (Zogg, 2008). Tako su i dobili naziv panoramski skeneri. Ova vertikalna restrikcija je posljedica toga što uređaj zaklanja dio prostora ispod samoga uređaja. Teoretski horizontalni i vertikalni prozor snimanja bi mogao biti identičan (Fröhlich i Mettenleiter, 2004). Kod ove vrste terestričkih laserskih skenera vertikalna defleksija zrake se obavlja pomoću ravnoga jednostranog rotirajućeg zrcala (*monogon*) centriranog na rotirajućoj osi. Horizontalno pokretanje uređaja se obavlja pomoću servomotora u malim pomacima po centralnoj osi (Reshetyuk, 2009; Jaafar, 2017). Zbog nešto manjeg dometa, velikog prozora snimanja te velike brzine prikupljanja podataka to je najbolja tehnologija za prikupljanje podataka u unutrašnjosti objekata (Reshetyuk, 2009; Jaafar, 2017). Ovakva vrsta tehnologije se koristi u kombinaciji s AMCW tehnologijom gdje se daljinska mjerenja vrše kontinuiranom zrakom (Fröhlich i Mettenleiter, 2004; Reshetyuk, 2009).

Uz navedene tri vrste prozora snimanja postoji još jedna. Takvi sustavi se nazivaju hibridni sustavi. Oni kombiniraju tehnologiju defleksije koja se koristi kod kamera skenere i panoramskih skenera (Zogg, 2008). Kod tih skenera vertikalna defleksija se ostvaruje preko oscilirajućeg (*galvo*) ili rotirajućeg poligonalnog (*monogon*) zrcala. Horizontalna defleksija se događa pomoću servomotora koji glavu skenera rotira u malim pomacima po vertikalnoj osi uređaja. To kombiniranje tehnologija im omogućava 360° horizontalnog prozora snimanja, ali su vertikalno i dalje limitirani (Reshetyuk, 2009; Jaafar, 2017).

Oscilirajuća (*galvo*) zrcala su ravna zrcala koja osciliraju konstantnom frekvencijom, između dvije kutne pozicije, maksimalne i minimalne (Slika 16.). Sporija su u odnosu na monogonska te zbog toga pružaju limitirani vertikalni prozor snimanja koji maksimalno iznosi 90°. Najčešće se koriste kod pulsnih laserskih skenera. Trenutni kut skeniranja oscilirajućeg zrcala se definira kao:

$$\theta(t) = \frac{\theta_{max}}{2} \sin(\omega t)$$

gdje je  $\theta_{max}$  maksimalni kut skeniranja,  $\omega$  je frekvencija osciliranja zrcala a  $t$  je vrijeme (Reshetyuk, 2009).

Rotirajuća poligonska (*monogon*) zrcala su izuzetno brza, a brzina rotacije je konstantna (Slika 15.). Zbog toga je vertikalni prozor snimanja velik i može iznositi do 180°. Ta tehnologija

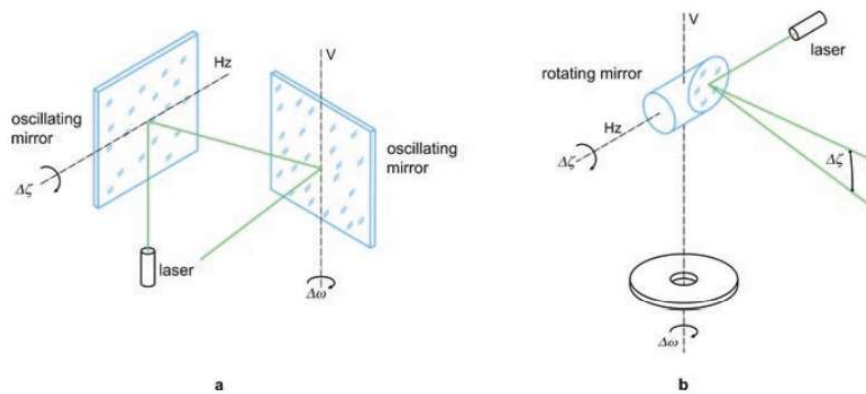
se koristi kod AMCW lasera (Reshetyuk, 2009). Maksimalni vertikalni kut snimanja koji se može ostvariti rotirajućim poligonskim zrcalom se izražava kao :

$$\theta = \frac{720^\circ \cdot C}{n}$$

gdje  $n$  predstavlja broj faceta na poligonskom zrcalu, a  $C$  predstavlja omjer između vremena skeniranja i ukupnog vremena te uglavnom iznosi između 30% i 90% (Reshetyuk, 2009). Ostvariva brzina skeniranja se može izraziti kao :

$$f_{sc} = n \cdot v$$

gdje je  $n$  broj faceta na poligonskom zrcalu a  $v$  rotacijska brzina (Reshetyuk, 2009).



Slika 15. Defleksija laserske zrake preko galvo zrcala i monogon zrcala (Kopáček i dr., 2020)

#### 4.8. MJERENJE POMOĆU TERESTRIČKIH LASERSKIH SKENERA

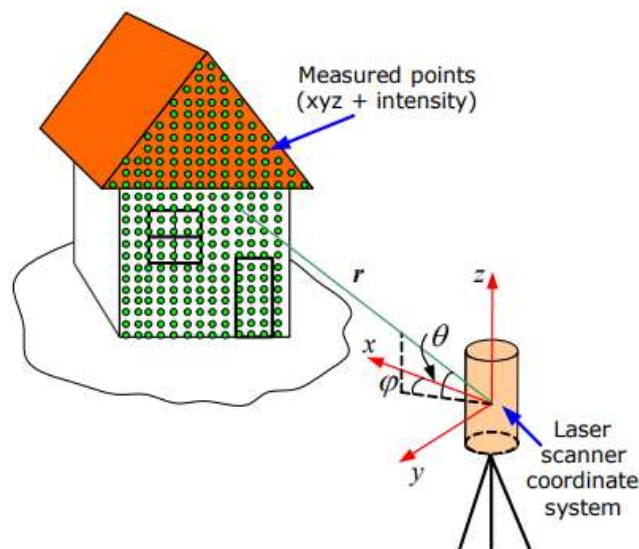
Terestrički laseri skeneri omogućavaju beskontaktno prikupljanje koordinata za točke koje se nalaze na površini mjerenog objekta. Princip rada TLS-a se bazira na prijenosu laserske zrake koja se nalazi u vidljivom ili infracrvenom dijelu spektra s TLS uređaja na promatrani objekt, te refleksiji te iste zrake s površine objekta koja se zatim ponovno registrira na samom uređaju (Jaafar, 2017; Kopáček i dr, 2020)

Sirovi podatci koje skener prikuplja se sastoje od udaljenosti ( $d$ ), horizontalnog kuta ( $\phi$ ) i vertikalnog kuta ( $\theta$ ) (Pérez-Álvarez i dr., 2020). Pojedini skeneri registriraju i intenzitet reflektiranog signala. Skeniranjem se dobiva kolekcija gusto i pravilno uzorkovanih točaka, najčešće nekoliko milijuna njih, koji se zove gusti oblak točaka ili *point cloud*. Svaka točka u

*point cloud* je definirana svojim sfernim koordinatama ( $r, \phi, \theta$ ) ili kartezijanskim ( $x, y, z$ ) koordinatama u lokalnom (skenerovom) mjernom sustavu (Pérez-Álvarez i dr., 2020), te intenzitetom (Slika 16.) (Reshetyuk, 2009). Iako sustavi podatke bilježe kao  $r, \phi$  i  $\theta$ , većina ih samostalno konvertira u  $x, y$  i  $z$  koordinate (Reshetyuk, 2009). Odnosi između sfernih i kartezijanskih koordinata se opisuje kao :

$$X_l = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \cos \theta_n \\ d_n \cdot \sin \varphi_n \cdot \cos \theta_n \\ d_n \cdot \sin \theta_n \end{bmatrix}$$

gdje je  $d_n$  izmjerena udaljenost,  $\varphi_n$  horizontalni smjer i  $\theta_n$  vertikalni kut do  $n$ -te točke u oblaku točaka a  $x_n, y_n$  i  $z_n$  kartezijanske koordinate tih točaka u lokalnom mjernom sustavu koji se za potrebe ovoga rada označava kao  $X_l$  (Reshetyuk, 2009; Kopáček i dr, 2020).



Slika 16. Princip mjerenja pomoću terestričkog laserskog sustava (preuzeto od Reshetyuk, 2009)

## 5. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Grad Nin je jedno od najznačajnijih mjesta rane hrvatske povijesti. Od liburnijskog razdoblja preko rimske uprave sve do ranosrednjovjekovne hrvatske države predstavlja jedno od najvažnijih kulturnih, vjerskih i političkih centara. Za vrijeme Liburna bio je izuzetno važno središte, a važnost održava i za vrijeme rimske uprave kada stječe status municipija. Rimljani su uredili i gradsku matricu te najveći hram na Jadranu. Nin se nalazi u močvarnom, lako obranljivom prostoru što je pogodovalo njegovom razvoju kao važnog središta. Međutim, to prirodno obilježje imalo je i negativne učinke, posebno u pogledu širenja zaraznih bolesti. Ninska županija je bila važna teritorijalna jedinica u sastavu hrvatske srednjovjekovne države. Uz to što je Nin bio središte župana, također je bio i sudsko i upravno središte te biskupsko sjedište koje je okupljalo velik dio Ravnih kotara, Bukovice te južne Like i Krbave. U početku je Nin središte knezova, a zatim dobiva i kraljevski dvor (Regan i Nadilo, 2009). To ga je činilo političkim, kulturnim i vjerskim središtem srednjovjekovne hrvatske političke jezgre (Magaš, 2013). Od 1409. godine se nalazi pod mletačkom upravom. Mlečani su ninski poluotoka prokapanjem kanala pretvorili u otok radi lakše obrane grada. Pod mletačkom upravom ostao je do 1797. godine, uz iznimku kraće osmanlijske okupacije tijekom 1646. godine. Još u 16. st. Nin je počeo depopulirati, a s time je i njegovo značenje u društveno-gospodarsko sustavu sjeverne Dalmacije opadalo. Mlečani su ga u nekoliko navrata, posebno temeljito tijekom Kandijskog rata, uništavali kako ne bi, u slučaju osmanlijskog osvajanja, postao njihovo obalno uporište. Kratkoročno se ta taktika pokazala opravdanom, ali na veliku i trajnu štetu za bogato kulturno nasljeđe jer su nepovratno uništeni velik dio fortifikacijskog sustava te brojne sakralne i profane građevine. Nin je izgubio status biskupskog sjedišta 1828., što je generiralo daljnje slabljenje njegovih urbanih funkcija. Upravni status grada dobio je 1997. godine (Regan i Nadilo, 2009), čime je honorirano njegovo povijesno značenje.

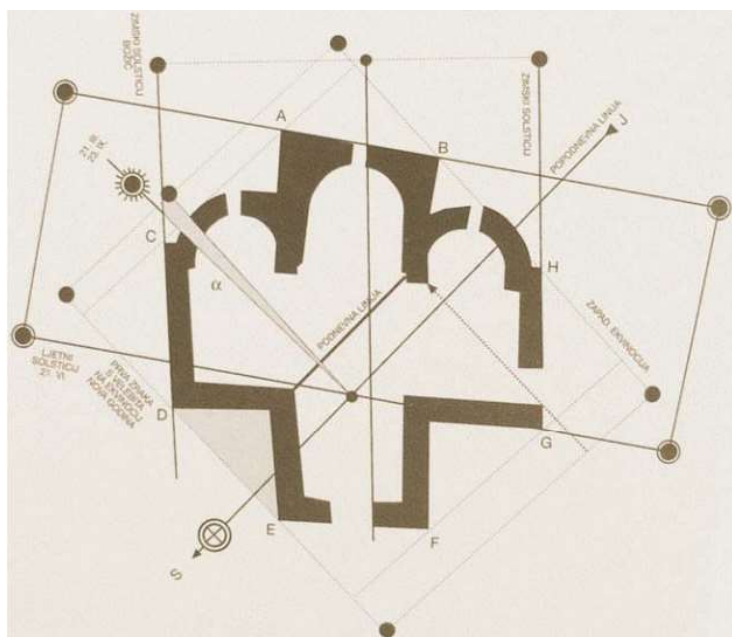


Slika 17. Natpis pred crkvom sv. Križa

Među sakralnim spomenicima u Ninu na poseban se način ističe crkvice Sv. Križa. Ta se crkvice nalazi u središtu grada, a izgrađena je u 9. stoljeću (Slika 17.). Vjerojatno ju je dao izgraditi ninski župan Godečaj, čije se ime nalazi na nadvratniku. Izgrađena je na ostacima rimskih građevina. Oko crkvice je otkrivena nekropola s 202 groba (Belošević, 1998). Dio plašta sjeverne bočne apside je obnovljen u konzervatorskom zahvatu 1969. godine. Tada su provedena i ispitivanja stabilnosti konstrukcije. Otkriveni su prozori u tjemenu bočnih apside i tragovi većeg prozora u tamburu. Izvorni nadvratnik je zamijenjen zbog mogućih daljnjih mehaničkih, bioloških i kemijskih oštećenja prilikom čega je otkriveno da je ugrađen istodobno s izgradnjom crkve (Regan i Nadilo, 2009).

Crkva Sv. Križa je predromanička crkva. Turistički se reklamira kao najmanja katedrala na svijetu iako ne postoje nikakvi dokazi da je ikada imala funkciju glavne crkve u Ninskoj biskupiji. Tlocrt crkve podsjeća na grčki jednokraki križ ali su sve linije na crkvi nepravilne. Još jedna zanimljiva činjenica o crkvi je to da su joj mjere svojim najdužim dijelovima identične, te visina, širina i dužina iznose 9 m. Crkva se sastoji od 4 pravokutna kraka, 3 apside i tambura s kupolom koji se nalazi na križištu. Unutrašnjost crkve čini svetište s 3 polukružne apside gdje je glavna upisana, a bočne istaknute u prostoru. U tjemenu svake od tih apside je prozor, a prozor se također nalazi i na južnom dijelu tambura. Vanjski plašt crkve i tambura je raščlanjen nišama. Kupola je nepravilnog elipsoidnog oblika koji se sužava prema vrhu (Regan i Nadilo, 2009).

Mladen Pejaković, hrvatski slikar, scenograf i autor animiranih filmova, je dao teoriju da su pomaci od pravilne osi i greške u izgradnji namjerno napravljene te da su posljedica praćenja Sunca (Slika 18.). Prema njegovoj teoriji, služila je kao sat i kalendar, posebno za vrijeme ekvinokcija i solsticija (Regan i Nadilo, 2009). To je umnogome demantirao Milutin Tadić u članku *Mathematical-Geographical Analysis of Orientation of Church of the Holy Cross in Nin* (2014).



Slika 18. Tumačenje prema kojemu je crkva mjerac vremena (preuzeto od Regan i Nadilo, 2009)



## 6. METODOLOGIJA RADA

Svrha ovoga istraživanja je izrada virtualnog modela visoke točnosti crkve sv. Križa u Ninu. Metode korištene u izradi ovoga diplomskog rada su analiza literature, terensko istraživanje, daljinska istraživanja, modeliranje podataka i vizualizacija podataka. Za prikupljanje prostornih podataka je korišten terestrički laserski skener Faro Focus<sup>m</sup> 70. Za obradu podataka i dobivanje modela su korišteni računalni programi *Faro SCENE*, *CloudCompare* i *MeshLab*. Za generiranje virtualne šetnje je iskorišten računalni program *Lumion*. Također je korišten i *Microsoft Office* skup programa.

Na početku istraživanja prikupljena je dostupna literatura koja je analizirana te su pronađeni primjeri dobre prakse (Slika 19.). Takav način rada osigurao je uštedu vremena jer se na taj način minimalizirala mogućnost pogreške prilikom prikupljanja, obrade i analize podataka. Nakon prikupljanja i analize literature slijedilo je planiranje i provođenje terenskog istraživanja. Terenskim istraživanjem su prikupljeni prostorni podatci koji su bili potrebni za samu izradu modela. Slijedeći korak je bila obrada tih podataka te izrada 3D modela. Nakon izrade 3D modela napravljena je njegova transformacija u model prigodan za interakciju s korisnikom.



Slika 19. Tijek rada s terestričkim laserskim skenerom (preuzeto od Van Genechten i dr., 2008)

Cilj svakoga istraživanja treba biti SMART (Specific – određen; Measurable – mjerljiv; Attainable – ostvariv; Relevant – relevantan; Time bound – vremenski ograničen) (URL27).

Zbog aktualnosti zaštite kulturne baštine i njezine važnosti za povijest cijelog čovječanstva te zbog razvoja novih tehnologija i razvoja kapaciteta računala ova tema je sve bolje obrađena u znanstvenim krugovima. U prilog sve veće količine radova i stručnih knjiga ide i to što je ova disciplina izuzetno interdisciplinarna te zahtjeva znanja i surađivanje znanstvenika iz više znanstvenih grana. Znanstveni radovi na temu korištenja GST u oblikovanju kulturne baštine su pomogli u osmišljavanju cijeloga istraživanja te dali okvir za metode korištene prilikom obrade podataka. Za izradu ovoga rada prikupljeni su podaci o GST, vrstama i načinu rada laserskih sustava, kulturnoj baštini, 3D modelima i modeliranju, virtualnoj i proširenoj stvarnosti te o samom području istraživanja.

## 6.1. 3D DOKUMENTACIJA CRKVE SV. KRIŽA

Prikupljanje podataka je obavljeno pomoću terestričkog laserskog skenera Faro Focus<sup>m</sup> 70. Snimanje je napravljeno 18. svibnja 2020., a taj datum je odabran zbog povoljnih meteoroloških uvjeta. Zbog toga što je TLS elektronički uređaj potrebno je suho vrijeme kako bi se izbjeglo oštećenje opreme. Snimanje je napravljeno u jednom danu.

### 6.1.1. *Faro Focus<sup>m</sup> 70*

Faro Focus<sup>m</sup> 70 je terestrički laserski 3D skener koji pripada skupini faznih laserskih skenera (Slika 20.). Odlikuje ga mogućnost prikupljanja velike količine podataka u kratkom vremenu, do 488 000 po sekundi rada. Također posjeduje digitalnu kameru s opcijom HDR (*High dynamic range*) koja prikuplja RGB podatke te tako omogućuje stvaranje fotorealističnih skenova. Zbog integriranog GPS-a i elektroničkog kompasa svaki sken je orijentiran. Uređaj posjeduje i elektronički barometar koji se koristi za određivanje visine te inklinometar odnosno dvoosni kompenzator (URL28).



Slika 20. Uređaj Faro Focus<sup>m</sup> 70 (URL25)

Instrument je jednostavan za korištenje. Njime se upravlja pomoću ekrana osjetljivog na dodir te sučelja koje je jasno i jednostavno. *Ranging noise* se definira kao standardna devijacija vrijednosti na ravnini pri brzini mjerenja od 122 kpts/s. Na tome uređaju on iznosi 0,8 mm na 10% refleksivnosti površine na udaljenostima od 10 m i 25 m. *Ranging error* se definira kao sustavna greška u mjerenju nastala na 10 i 25 m udaljenosti. Ona na ovom uređaju iznosi  $\pm 3$ mm. *Step size* iznosi 0,009 vertikalno i 0,0009 horizontalno. Maksimalni prozor snimanja na ovome uređaju iznosi 360° horizontalno i 300° vertikalno. Dimenzije uređaja iznose 23 cm  $\times$  18 cm  $\times$  10 cm, a težina mu je 4,2 kg, što ga čini lako prenosivim. Instrument posjeduje mogućnost povezivanja s računalom putem WLAN-a što omogućava lagano prenošenje podataka (URL28). Također uz TLS dolazi i računalni program *Faro SCENE* i set sfera (Slika 21.) koje služe za orijentaciju snimaka.



Slika 21. Referentne sfere (URL26)

Tablica 1. Specifikacije uređaja Faro Focus<sup>m</sup> 70

Specifikacije	Faro Focus <sup>m</sup> 70
Interval jasnoće	488 kpts/s do 614 m
Domet	0,6 – 70 m
Rezolucija	Do 165 megapixelsa
HDR	2x, 3x, 5x
Brzina prikupljanja	Do 488 000 točaka po sekundi
Greška ( na 10 i 25 m)	± 3mm
Satelitski pozicijski sustav	GPS/GLONASS
Orijentacija	Elektronički kompas
Polje pregleda ( FOV)	Vertikalno 300° Horizontalno 360°
Maksimalna brzina scana (vertikalna)	97 Hz
Klasa lasera	1
Valna duljina	1550 nm
Težina	4,2 kg

Izvor: FARO Focus Laser Scanner Tech Sheet

### 6.1.2. Prikupljanje prostornih podataka

Prilikom prikupljanja korišten je instrument Faro Focus<sup>m</sup> 70 sa pripadnim sferama koje služe za međusobno povezivanje raznih stajališta u zajednički koordinatni sustav kako bi se olakšala daljnja obrada podataka. Prikupljanje podataka interijera je obavljeno na uređaju podešenom na 1/8 rezolucije sa faktorom kvalitete 4. Faktor kvalitete na Faro Focus uređajima označava količinu vremena koju uređaj potroši na registriranje reflektirane laserske svjetlosti. Faktor kvalitete 4 znači da skener promatra zraku 8 mikrosekundi ( $\mu$ s) po skeniranoj točki (URL29). Takva rezolucija je postavljena zbog velikog broja stajališta. Na takvim postavkama uređaj je prikupljao oko 11 milijuna točaka po stajalištu. Nadalje, u postavkama je odabrana opcija prikupljanja RGB podataka (Slika 22.) kako bi se u daljnjoj obradi mogla napraviti tekstura modela. Time se izbjegla potreba za korištenjem neke druge metode prikupljanja prostornih podataka, poput fotogrametrije. Udaljenost između prikupljenih točaka na ovakvim postavkama iznosi 12,3 mm na 10 m udaljenosti od skenera (URL30).

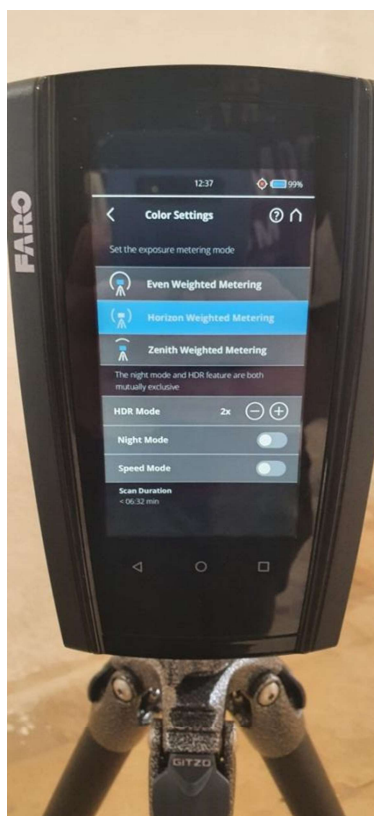


Slika 22. Sučelje s postavkama skeniranja na uređaju Faro Focus<sup>m</sup> 70

Prije početka prikupljanja podataka, uređaj je bilo potrebno postaviti na stalak i kalibrirati (Slika 23.). Kalibracija uređaja se vrši pomoću ugrađenog kompasa, altimetra, inklinometra i GPS-a. Inklinometar je postavljena tako da odstupanje bude manje od 2°. Veće odstupanje od toga bi izazvalo pogreške pri mjerenju inklinacije te potencijalno ugrozilo kvalitetu prikupljenih podataka (URL30).



Slika 23. Postavljanje i kalibracija uređaja Faro Focus<sup>m</sup> 70



Slika 24. Određivanje postavki za RGB skeniranje na laserskom skeneru

Zbog toga što su se radila dva seta snimanja, snimanje interijera i eksterijera, kao postavka za prikupljanje RGB podataka je izabrana *horizon weighted metering* (Slika 24.). Kod te postavke kamera koristi količinu svjetlosti koja dopire iznad nje (horizont) kako bi odredila

ekspoziciju. Kako je snimanje rađeno u dobrim vremenskim uvjetima s velikom količinom sunčeve svjetlosti, ta opcija se pokazala kao izuzetno korisna.

Ukupno je napravljeno 13 snimanja s 13 različitih stajališta. Napravljena su 3 snimanja interijera (Tablica 2.) i 10 snimanja eksterijera (Tablica 3.). Snimanje sa prvih 6 stajališta eksterijera napravljeno je na postavkama rezolucije od 1/2 te faktorom kvalitete 2x, a na takvim postavkama uređaj prikuplja 488 kpts/s (URL30), te 4 snimanja na postavkama rezolucije od 1/4 te faktorom kvalitete 2x, gdje uređaj također prikuplja 488 kpts/s.

Tablica 2. Vrijeme, rezolucija i faktor kvalitete prilikom snimanja interijera

<b>Interijer</b>				
<b>Scan broj</b>	<b>Od</b>	<b>Do</b>	<b>Rezolucija</b>	<b>Faktor kvalitete</b>
1	12:42	12:47	1/8	4x
2	12:48	12:53		
3	12:55	13:00		

Tablica 3. Vrijeme, rezolucija i faktor kvalitete prilikom snimanja eksterijera

<b>Eksterijer</b>				
<b>Scan broj</b>	<b>Od</b>	<b>Do</b>	<b>Rezolucija</b>	<b>Faktor kvalitete</b>
1	13:11	13:22	1/2	2x
2	13:32	13:42		
3	13:46	13:56		
4	14:01	14:10		
5	14:13	14:23		
6	14:25	14:31		
7	14:33	14:38	1/4	2x
8	14:40	14:45		
9	14:47	14:52		
10	14:53	14:58		

Zbog ograničenog broja sfera, između svakog snimanja bilo je potrebno premješati određeni broj sfera. Prilikom premještanju sfera potrebno je paziti na to da se sa novog stajališta vidi barem jedna sfera koja je bila vidljiva pri ranijem skeniranju. Prozor snimanja je postavljen horizontalno od 0° do 360° i od -60° do 90° vertikalno.

### 6.1.3. Faro SCENE

*Faro SCENE* je računalni program tvrtke Faro koji omogućuje registraciju i obradu podataka prikupljenih terestričkim laserskim skenerom. Odlikuje ga velika brzina obrade podataka te mogućnost rada s velikom količinom podataka. Posjeduje sposobnost registriranja skeniranih podataka u stvarnom vremenu (*real time*) te automatsko prepoznavanje objekata, povezivanje oblaka točaka pomoću velikog broja registracijskih metoda te pozicioniranje oblaka točaka u zajednički koordinatni sustav. Automatsko registriranje obavlja pomoću referentnih sfera, kodnih markera te nekih oblika iz okruženja. Kreiranje tekstura na 3D poligonalnom modelu (*meshu*) je korisno prilikom korištenja podataka u drugim aplikacijama, a generiranje boja se vrši pomoću fotografija visoke rezolucije ili HDR opcijom na samom laseru. Unutar programa su ugrađeni brojni filteri poput onoga za uklanjanje neželjenih objekata iz prikupljenih podataka. Kompatibilan je s više vrsta formata laserskih podataka (*FARO Scan, FARO Cloud, ASTM E57, .txt, .xyz, .xyb, .pts, .ptx, .ptz, .pod*), što ga čini pogodnim programom za pretvaranje (*konvertiranje*) podataka u druge standardizirane formate oblaka točaka, te također daje mogućnost pohranjivanja velikog broja formata 3D poligonalnog modela (*mesha*) (*.stl, .obj, .ply i .wrl*).

### 6.1.4. CloudCompare

*CloudCompare* je *open source* program za procesiranje i obradu 3D podataka. Program je napravljen kao rješenje koje će omogućiti izravnu usporedbu velikih oblaka točaka preko računanja *octree* struktura na računalima s manjim kapacitetom obrade podataka. Program je razvijen na temelju C++ programskog jezika te je kompatibilan s Windows, Linux i Mac OS operacijskim sustavima, a dostupan je u 32 i 64 bitnom obliku (URL31). Uz usporedbu gustih oblaka točaka, računalni program sadržava i algoritme za registraciju i ponovno uzorkovanje podataka. Odlikuje ga i mogućnost računanja normala, upravljanje vektorskim i skalarnim poljima, rađanje statističkih analiza. Također, u sebi sadrži i algoritme za normalizaciju i koloriranje podataka, interaktivnu ili automatsku segmentaciju te računanje geometrijskih podataka poput zakrivljenosti ili hrapavosti površine generiranih modela. Još jedna od odlika toga programa je i mogućnost kreiranja 3D poligonalnog modela (*mesha*) iz gustih oblaka točaka. Pohranjivanje gustih oblak točaka omogućava u ASCII (*.asc, .txt, .xyz, .neu i .pts*), *.bin, .ply, .vtk, .e57, .las i .laz* formatima. Pohranjivanje 3D poligonalnih modela se vrši u *.ply, .obj, .vtk, .stl, .fbx i .off* formatima. Taj program omogućava i otvaranje *.shp* formata podataka kao i



registraciju podataka prikupljenih Leica (.ptx), Faro (.fls i .flw) i Riegel (.rdb, .rdbi i .rds) uređajima. Također je kompatibilna sa *Photoscan* programom što mu omogućava otvaranje .psz podataka. Sve ovo ga čini i izuzetno pogodnim za razmjenu podataka s drugim računalnim programima. Prilikom rada na ovome projektu korištena je verzija programa *CloudCompare* 2.11.3.

#### 6.1.5. MeshLab

*MeshLab* je *open source* program za procesiranje i obradu velikih nestrukturiranih 3D triangularnih modela proizašlih iz podataka prikupljenih 3D skeniranjem. Unutar sebe sadrži alate za registraciju, rekonstrukciju, teksturiranje, čišćenje, simplifikaciju, zatvaranje, vizualizaciju, prezentaciju, mjerenje, analizu, renderiranje i konvertiranje 3D poligonalnih modela (Cignoni i dr, 2008). Sustav se temelji na knjižnici koda VCG (*The Visualization and Computer Graphics Library*) koja je nastala u *Visual Computing Labu* na *Institute of Information Science and Technologies Alessandro Faedo* u Pisi, u Italiji. Knjižnica je razvijena na C++ programskom jeziku, a program je kompatibilan s Windows, Mac OS i Linux operacijskim sustavima (URL32). Alati za čišćenje uključuju uklanjanje duplih podataka, unificiranja normala i automatsko popunjavanje rupa u *meshu*. Također, sadržava filtere za zaglađivanje poligonalnih modela te alate za inspekciju i bojanje poligonalnih modela prema Gaussovoj i srednjoj zakrivljenosti. Posjeduje mogućnost mjerenje duljina na *meshu* kao, računanja ambijentalne okluzije, alate za spajanje više mesheva i kod za Poissonovu rekonstrukciju površina (Cignoni i dr, 2008). Uz sva navedena svojstva također se može koristiti i kao alat za usporedbu modela te može služiti u pripremi modela za 3D printanje. Format podataka ovaj računalni program može učitati uključuju .ply, .stl, .off, .obj, .3ds, .ptx, .x3d, .wrl, .wrz, .dxf i COLLADA (.dae) (Cignoni i dr, 2008). U izradi ovog projekta je korištena verzija programa 2020.09.

## 6.2. REGISTRACIJA OBLAKA TOČAKA

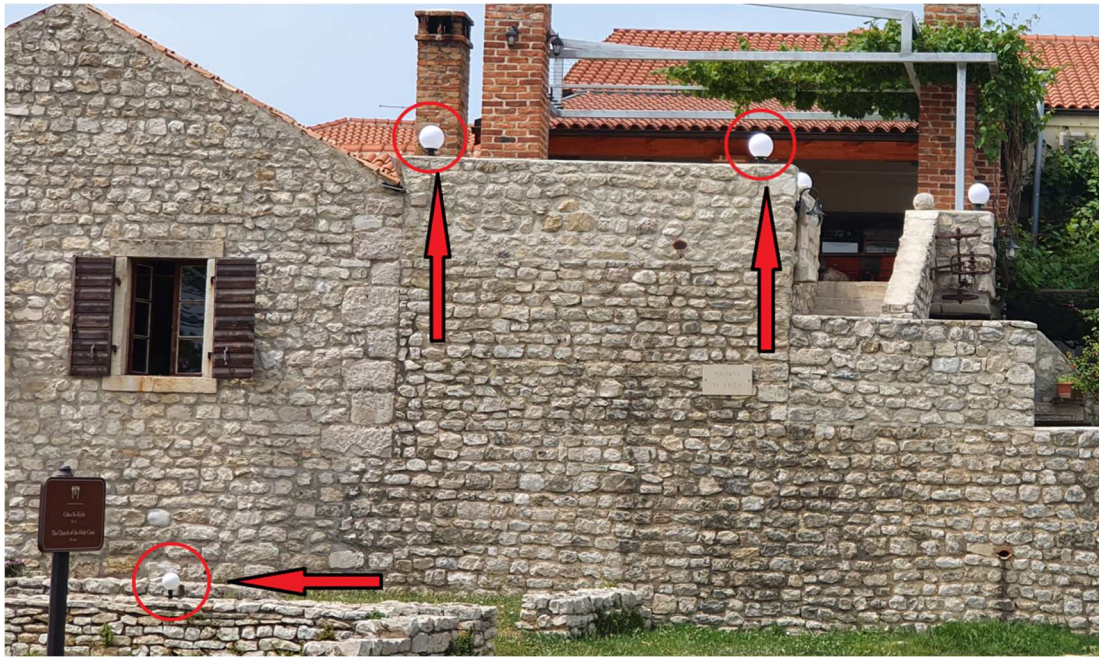
Registracija oblaka točaka je obavljena pomoću programa *Faro SCENE*. Unutar toga računalnog programa registracija točka je jednostavna i brza. Učitavanje se radi tako da se svi prikupljeni podatci koji su spremljeni u .fls formatu učitaju u računalni program. U ovome slučaju radilo se o 13 odvojenih stajališta. Također prilikom učitavanja podataka je utvrđeno koliki je broj točaka (Tablica 4.) prikupljen po svakom stajalištu.

Tablica 4. Broj točaka prikupljenih s pojedinog stajališta

<b>Scan broj</b>	<b>Broj Točaka</b>
1	11 866 810
2	11 932 239
3	11 714 192
4	69 389 991
5	62 153 055
6	62 697 947
7	65 725 239
8	61 396 809
9	88 045 077
10	16 730 670
11	17 405 370
12	16 765 007
13	16 710 476
<b>Ukupno</b>	<b>512 532 882</b>

Zbog velikog broja točaka, njih 512 milijuna, i obilježja korištenog procesora bilo je nužno napraviti redukciju broja točaka. Uz ograničenu snagu procesora ulogu u redukciji broja točaka je imalo i to što cijeli prostor koji je skeniran laserom nije u fokusu ovoga istraživanja.

Nakon učitavanja podataka obavljeno je pretprocesiranje. Kod toga koraka obrade podataka važne su ranije spomenute referentne sfere. Ta funkcija računalnog programa detektira sfere, „lijepi“ skenove jedan na drugi te daje okvir za transformaciju. Unutar te funkcije programa postoji mogućnost automatske registracije referentnih sfera. Zbog velike sličnosti između referentnih sfera i rasvjete postojala je mogućnost greške u slučaju da računalni program registrira rasvjetu na obližnjoj zgradi kao referentne sfere (Slika 25.).



Slika 25. Sličnost između referentne sfere i rasvjete

Zbog mogućnosti uređaja za prikupljanje RGB podataka, pri obradi je moguće iskoristiti te podatke te dodati informacije o bojama točkama. Nakon registracije točaka i prve obrade preostalo je 383 561 428 točaka što bi i dalje činilo poteškoće u daljnjoj obradi (Slika 26.).



Slika 26. Gusti oblak točaka nakon registracije snimki

Unutar programa postoje dvije funkcije koje omogućavaju odabir određenih točaka unutar *point clouda*. To su *Selection* i *Clipping Box*. Kada se odabere određeni dio *point clouda*, u ovom slučaju se odabir napravio zbog redukcije broja točaka te zbog toga što je predmet istraživanja crkva sv. Križa, preko funkcije programa *SCENE Export Points* je napravljeno prenošenje točaka. Kako *.fls* format u kojemu se snimke nastale Faro skenerima spremaju na

memorijsku karticu nije kompatibilan s drugim programima korištenim u obradi podataka, pri eksportiranju točaka je korišten .xyz format. Odabrani dio *point clouda* je imao 110 547 307 točaka.

Taj računalni program omogućava i daljnju obradu podataka. U ovom slučaju daljnja obrada podataka uključuje kreiranje *mesha*. *Mesh* je kreiran tako da se iz ranije odabranih točaka pomoću alata *Create Mesh* generirao novi set podataka. Taj alat je izuzetno jednostavan za korištenje. Pri kreiranju *mesha* omogućuje određivanje maksimalnog broja trokuta, generiranja boje (preko teksture ili verteksa), zaglađivanje *mesha* te najvažnije za ovo istraživanje, popunjavanje rupa u *meshu* proizašlih zbog nedostatka podataka.

### 6.3. DALJNJA OBRADA PODATAKA

Nakon registracije točaka i generiranja prvoga modela, rezultat nije bio zadovoljavajući. Zbog toga se pristupilo daljnjoj obradi podataka. Prvo se pristupilo čišćenju i filtriranju podataka. To je napravljeno u računalnom programu *CloudCompare*. Čišćenjem se oblak točaka čisti od grubih pogrešaka nastalih prilikom prikupljanja podataka. To nije automatizirani proces nego zahtijeva vlastoručno označavanje i brisanje točaka. Taj proces se izvodi pomoću alata *Segmentation Tool*. Prilikom toga procesa ne dolazi do značajne redukcije broja točaka. Prilikom čišćenja prikupljenih podataka napravljena je pogreška te referentne sfere nisu uklonjene iz seta podataka te su jasno vidljive na novom modelu.

Nakon čišćenja podataka napravljeno je filtriranje. Ono je također napravljeno unutar programa *CloudCompare*. Filtriranje označava proces uklanjanja pogrešnih podataka preko statističke analize oblaka točaka. Za filtriranje važne su dvije funkcije unutar ovoga programa. To su *Noise Filter* koji smanjuje neravnomjeran raspored točaka i *Statistical Outlier Removal* koji služi za uklanjanje pogrešaka za koje program ocijeni da su takve.

Prilikom tih procesa treba paziti na redukciju broja točaka. Treba se znati koja je to željena razina detalja koja je potrebna kako bi se novi model generirao. Ako je premalo detalja, odnosno ako je napravljena prevelika redukcija broja točaka, tada će model biti grub i na njemu se neće moći raspoznati detalji. Ako je pak previše detalja, tada će obrada podataka i izrada 3D modela ili biti vremenski predugačka ili neće uopće biti moguća.

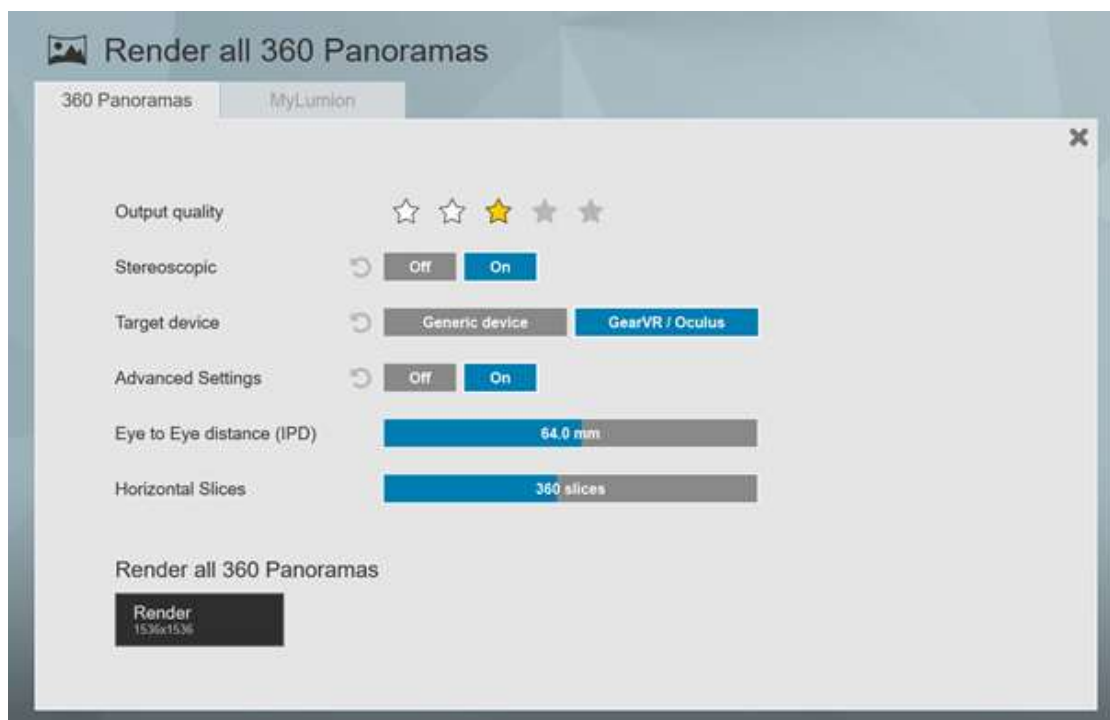
Prije pokretanja izrade novog *mesha* bilo je potrebno izračunati nove normale. To se u računalnom programu *MeshLab* izračunava preko funkcije *Compute Normals From Point Set*.

Za izradu novoga *mesha* je izabran *Screened Poisson Surface Reconstruction*, a parametri koji su odabrani prilikom rekonstrukcije su: *Reconstruction Depth 12*, *Adaptive Octree Depth 8*, *Interpolation Weight 6*, *Gauss-Seidel Relaxation 8*, *Scale Factor 2* i *Minimum Number of Samples 5*. S obzirom na to da su podaci prikupljeni skenerom sadržavali i RGB podatke, tako je i tekstura automatski generirana.

#### 6.4. IZVOĐENJE VIRTUALNE ŠETNJE OKO CRKVE SV. KRIŽA

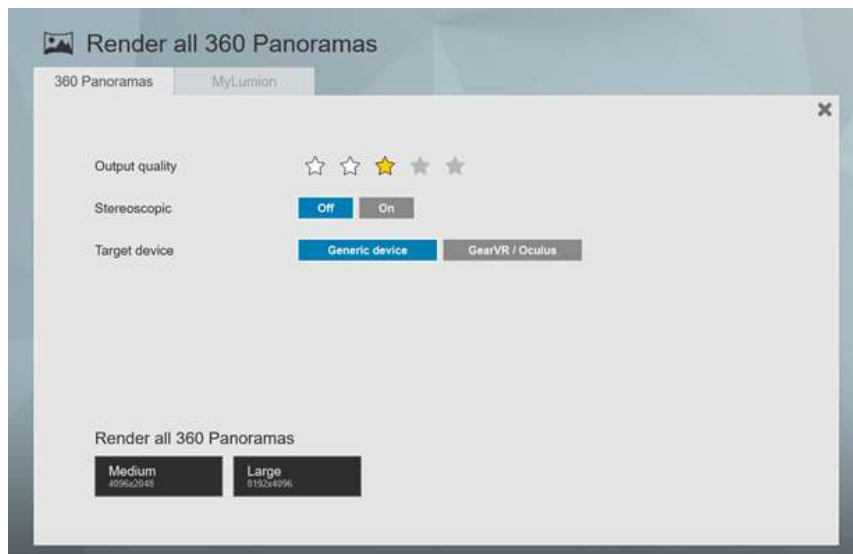
Za izradu virtualne šetnje je korišten računalni program *Lumion 10.3.2*. koji je namijenjen za izradu 3D virtualnog okruženja. Taj računalni program omogućava kreiranja videa, panoramskih i običnih snimaka dorađenih 3D modela (URL44).

Prvi korak prilikom renderiranja virtualnog okruženja bio je uvoz 3D modela iz računalnog programa *SCENE* u *.obj* formatu. Nakon uvoza je obavljena orijentacija modela u prostoru, postavljanje mjerila te odabir lokacije u crkvi koje će najbolje reprezentirati unutrašnjost modela. Završni korak za izradu panoramskih 360° snimki bio je postavljanje parametara u opciji *Render all 360 Panoramas*. Kvaliteta snimki (*Output quality*) je postavljena na 3/5, uključen je stereoskopski pogled (*Stereoscopic*) i postavljen razmak između dva oka na 64,0 mm (*Eye to Eye distance*) kako bi se dobio privid dubine prostora (Slika27.).



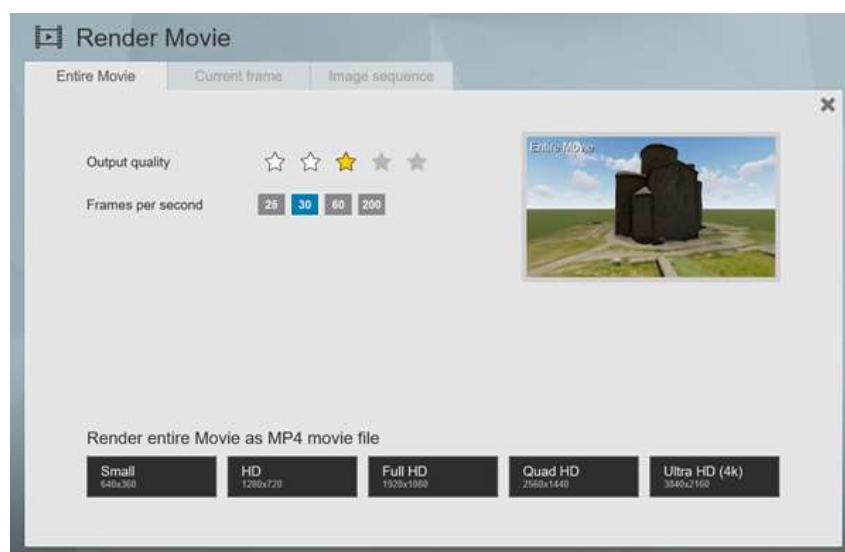
Slika 27. Parametri korišteni prilikom generiranja panoramske 360° snimke za VR naočale

Snimke su izrađene za mogućnost otvaranja i pregledavanja na platformama poput računala ili mobilnih uređaja (*Generic device*) iako se može namjestiti opcija i za VR naočale (GearVR/Oculus). Panorama je izvezena u rezoluciji 4096×2048 piksela što odgovara srednjim (*Medium*) postavkama kvalitete (Slika28.).



Slika 28. Parametri korišteni prilikom generiranja 360° panoramske snimke

Parametri za izvoz videa postavljeni su u opciji *Render Clip*. Kvaliteta videa (*Output quality*) je postavljena na 3/5, a broj slika u sekundi (*Frames per second, FPS*) na 30. Renderiranje slijeda slika iz cijelog videa (*Render image sequence from entire movie*) je postavljeno na *HD*, odnosno rezolucija videa postavljena je na 1280×720 piksela (Slika29.).



Slika 29. Parametri korišteni prilikom generiranja videa u računalnom programu *Lumion*



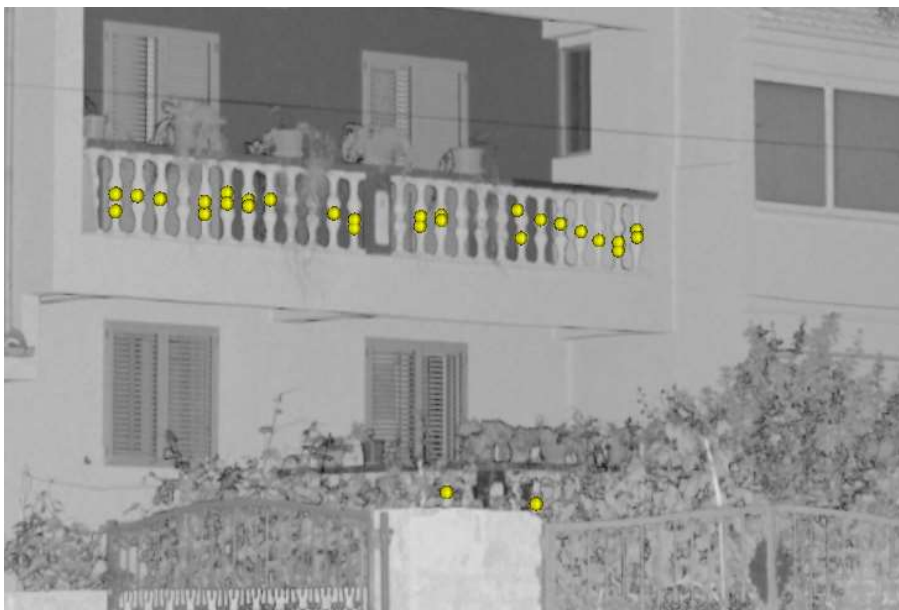
## 7. REZULTATI

### 7.1. REGISTRACIJA TOČAKA

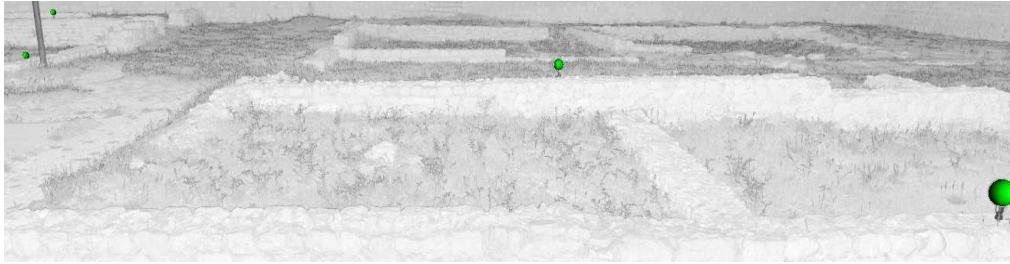
Prilikom spajanja snimki računalni program je prepoznao referentne sfere, ali je registrirao i neke druge oblike (Slika 30. i Slika 31.) kao takve. Kao što je ranije navedeno, uz uređaj dolazi 5 referentnih sfera (Slika 32.), a računalni program je u slučaju jedne snimke pronašao 52 različite referentne sfere (Slika 33.).



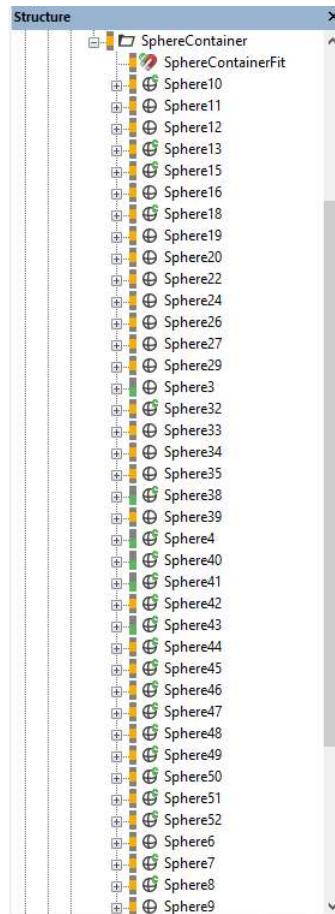
Slika 30. Točke koje je *SCENE* označio kao referentne



Slika 31. Dio točaka koje je *SCENE* odabrao kao referentne



Slika 32. Prave referentne sfere na lokaciji snimanja



Slika 33. Broj referentnih sfera na jednoj snimci

Zbog velikog broja registriranih sfera koje to nisu postojala je mogućnost da program ne uspije zalijepiti snimke. Snimke su ipak uspješno orijentirani i to 7 snimki s izvrsnom kvalitetom i 6 snimki sa zadovoljavajućom kvalitetom (Slika 34.).

Srednja greška udaljenosti gustog oblaka točaka (Slika 34.) na ovome projektu se nalazi u rasponu od 1,44 mm do 20,49 mm. Te vrijednosti se računaju preko formule za srednju vrijednost :



$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Srednja vrijednost izmjerenih greški udaljenosti gustog oblaka točkaka iznosi 6,95 mm.

The screenshot shows the 'Managed Fits' table in the ScanManager software. The table contains 13 rows of data for 'ScanFit' objects. The columns are: 'Fit Object', 'Mean Target Dist. Error [mm]', 'Mean Target Ang. Error [°]', and 'Mean Scan Point Dist. Error [mm]'. The values for the three error columns are as follows:

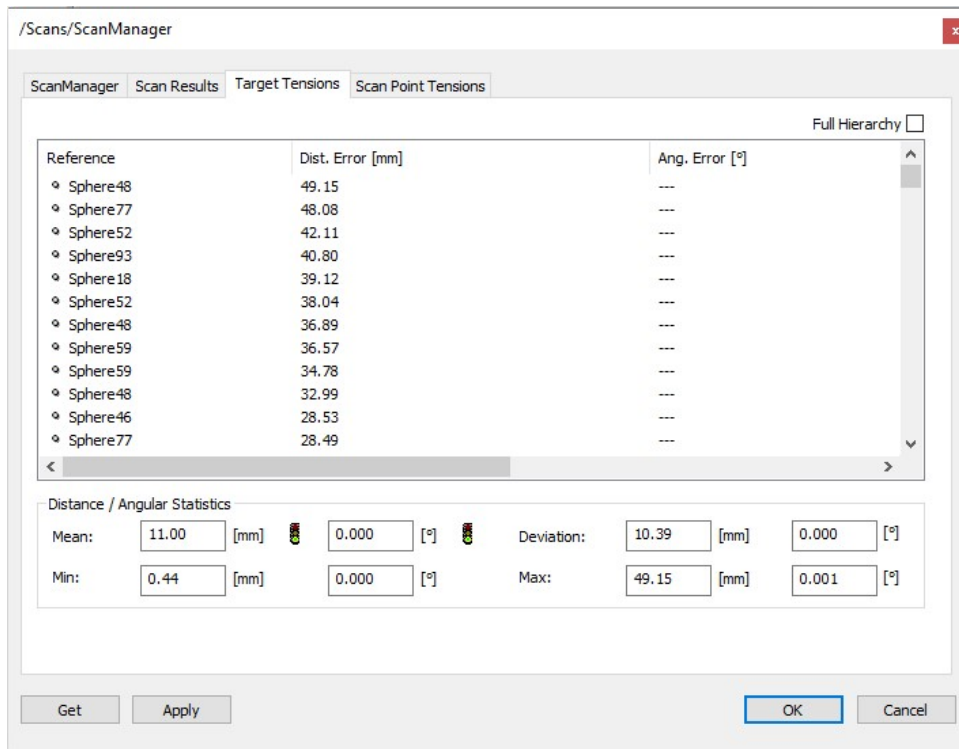
Fit Object	Mean Target Dist. Error [mm]	Mean Target Ang. Error [°]	Mean Scan Point Dist. Error [mm]
ScanFit	14.83	0.000	20.49
ScanFit	12.49	0.000	11.63
ScanFit	11.13	0.000	9.79
ScanFit	12.82	0.000	9.41
ScanFit	15.46	0.000	8.33
ScanFit	9.87	0.000	7.86
ScanFit	5.22	0.000	5.48
ScanFit	6.72	0.000	4.93
ScanFit	12.72	0.001	4.28
ScanFit	3.35	0.000	3.35
ScanFit	2.31	0.000	1.90
ScanFit	1.17	0.000	1.46
ScanFit	1.11	0.000	1.44

Slika 34. Srednja greška udaljenosti gustog oblaka točkaka

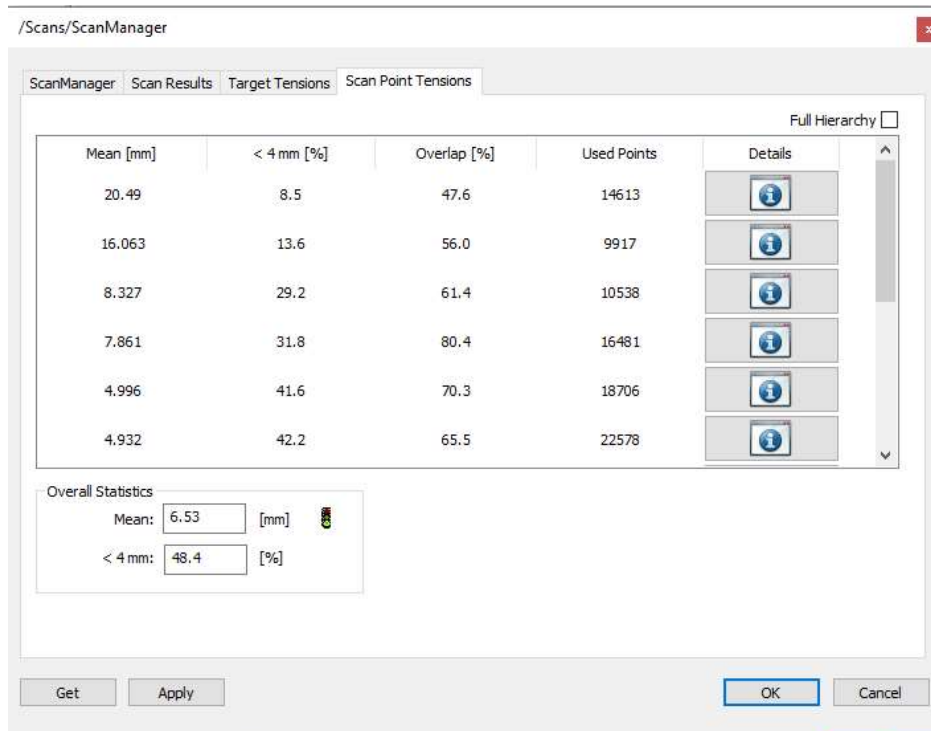
*Target Tension* (Slika 35.) prikazuje referentne parove korištene za registraciju skenova. Ova vrijednost opisuje neslaganja u koordinatnom sustavu između pozicije i orijentacije dva odgovarajuća referentna objekta u dva skena. Kao vrijednosti za računanje *Tensiona* koristi se udaljenost između dvije referentne točke i njihovih lokacija u skenu. Srednja vrijednost ovog skupa podataka iznosi 11 mm. Standardna devijacija skupa podataka koja se računa preko formule :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

a koja iznosi 10,39 mm (Slika 35.). Najviša izmjerena greška udaljenosti iznosi 49,15 mm a najniža 0,44 mm.



Slika 35. Target tension referentnih točaka



Slika 36. Ukupna statistika registriranih oblaka točaka

Broj točaka korištenih za računanje statistike je u rasponu od 5031 do 28671. Vrijednost *Mean* označava nesklad između dva skena i vrijednosti su u rasponu od 1,437 do 20,49 mm. Ukupni *Mean* za sve skenove iznosi 6,53 mm (Slika 36.). Preklapanje skenova (*Overlap*) je u

rasponu od 13,9 do 94,8 %. Postotak broja točaka koje imaju grešku manju od 4 mm iznosi od 8,5 do 89,9 %. Ukupni broj točaka koje imaju grešku manju od 4 mm iznosi 48,4 % (Slika 36.).

## 7.2. MODEL A

Prvi rezultati nisu bili zadovoljavajući. Prilikom obrade podataka bilo je jasno kako će nedostatak prikupljenih podataka na prostoru krova crkve predstavljati problem te će biti potrebno napraviti popunjavanje *mesha*. S obzirom na to da prilikom takvog procesa program na temelju okolnih točaka pretpostavlja kako bi taj dio modela trebao izgledati, dolazi do izuzetno velike redukcije u kvaliteti modela. Kada se na to još doda da su rupe u podacima bile velike za taj prostor postojala je opasnost od potpunog narušavanja geometrije modela. Na generiranom modelu je vidljiva ta redukcija kvalitete. Jasno je vidljiva razlika između prostora za koji su postojali podatci i onoga za kojeg je program morao pretpostaviti. Vidljiva je razlika u teksturi te je i sama geometrija blago narušena (Slika 37.). Prvi model se sastoji od 1 151 879 vrhova i 2 302 994 stranice.



Slika 37. Krov 3D modela crkve sv. Križa



Slika 38. Prednja strana s ulazom 3D modela crkve sv. Križa

Na 3D modelu je vidljivo da se dogodila pogreška prilikom generiranja tekstura. Ta pogreška je izražena na prednjoj strani modela (Slika 38.). Tekstura je granulirana i vizualno ne izgleda dobro. Također, greška je vidljiva i na stražnjoj strani crkve te gotovo na cijelom tamburu. Jedino na bočnoj južnoj strani 3D modela crkve nema te pogreške (Slika 39.). Na teksturi su vidljive i crne mrlje koje su nastale kao posljedica slijevanja vode s krova po zidovima.



Slika 39. Bočna južna strana 3D modela crkve sv. Križa



Slika 40. Stražnja strana 3D modela crkve sv. Križa

Model je geometrijski ispravan. Detalji na vanjskom plaštu su jasno vidljivi. Jasno se razaznaju niše na vanjskom plaštu crkve i tambura (Slika 40.). Također jasno su vidljivi prozori na crkvi i tamburu. I prostor oko crkve je vjerno reprezentiran. Na odabranom dijelu za koji se radio 3D model vidljivi su ostaci zgrada oko crkve (Slika 41.).



Slika 41. Bočna sjeverna strana 3D modela crkve sv. Križa





Slika 42. Presjek 3D modela crkve sv. Križa

U unutrašnjosti crkve također je došlo do pogreške prilikom generiranja tekstura (Slika 42. i Slika 43.). Vidljiva je granulacija u teksturi ali se ipak mogu razaznati pojedini detalji u unutrašnjosti crkve.



Slika 43. Tlocrt 3D modela crkve sv. Križa

### 7.3. MODEL B

Daljnjom obradom podataka se pokušalo popraviti prvi model koji je imao određene greške u teksturi. Također se pokušalo povećati rezoluciju modela te vidjeti koliko se detalja može izvesti iz prikupljenih podataka. Nakon naknadne obrade podataka generiran je novi model (Slika 44.). Novi 3D model crkve sv. Križa vizualno izgleda puno bolje od prvog modela generiranog u računalnom programu *SCENE*. Vanjska tekstura generirana na novom modelu nije više granulirana i vizualno nezadovoljavajuća (Slika 45.). Novi model se sastoji od 10 272 623 vrhova i 20 531 569 stranica. U usporedbi s prvim modelom novi model sadrži deset puta više vrhova i stranica te se to odrazilo i na rezoluciju modela.



Slika 44. Novi model crkve sv. Križa



Slika 45. Prednja strana s ulazom novog 3D modela crkve sv. Križa



Slika 46. Stražnja strana novog 3D modela crkve sv. Križa

Na 3D modelu se mogu bolje razaznati pojedini detalji koji odlikuju crkvu. Kako je povećana rezolucija samoga modela, tako su i ti detalji vidljiviji. Niše na vanjskom plaštu crkve i na tamburu su jasno vidljive (Slika 46. i Slika 47.).



Slika 47. Bočna južna strana novog 3D modela crkve sv. Križa





Slika 48. Greške na modelu nastale zbog manjka prikupljenih točaka

Na 3D modelu je i dalje prisutna redukcija kvalitete na prostoru krova. Iako su napravljeni određeni zahvati na prikupljenim podacima kako bi se reduciralo greške nastale prilikom prikupljanja, nije bilo moguće drastično popraviti izlazne rezultate. Na modelu je i dalje vidljivo i mogu se jasno razaznati mjesta za koja nije bilo prikupljenih podataka (Slika 47., Slika 48., Slika 49. i Slika 50.).



Slika 49. Velika količina detalja na vanjskom plaštu 3D modela



Slika 50. Greške vidljive na krovu novog 3D modela crkve sv. Križa

Posebno je zanimljiv crkveni nadvratnik. S obzirom na to da on nije bio glavni fokus istraživanja, a računalo na kojemu se radio novi model nije namijenjeno za izradu 3D modela, točnije ima manji kapacitet obrade podataka, zbog toga je napravljena redukcija ulaznih podataka, količina detalja i kvaliteta modela je iznenađujuća. To je jasno vidljivo na usporednom prikazu fotografije s mjesta istraživanja te isječaka iz novog modela (Slika 51.).



Slika 51. Fotografija nadvratnika i isječak iz 3D modela crkve sv. Križa

Tekstura u unutrašnjosti crkve je vizualno također bolja (Slika 52.). Daljnjom obradom podataka je eliminirana greška u teksturi nastala tijekom prve obrade.



Slika 52. Presjek s pogledom na ulaz novog 3D modela crkve sv. Križa

Boje u unutrašnjosti su vjernije reprezentirane. Također količina detalja u unutrašnjosti je puno veća nego na prvom modelu (Slika 54.). Na modelu su vidljiva oštećenja boje na unutrašnjim zidovima crkve (Slika 52. i Slika 53.).



Slika 53. Presjek s pogledom na 3 apside novog 3D modela crkve sv. Križa



Slika 54. Tlocrt novog 3D modela crkve sv. Križa



## 8. RASPRAVA

Povećanjem dostupnosti terestričkih laserskih skenera dolazi do njihove sve veće upotrebe u proučavanju i prezentaciji kulturne baštine. Glavni cilj diplomskog rada je bila izrada fotorealističnog 3D modela visoke točnosti crkve sv. Križa u Ninu iz geopodataka prikupljenih terestričkim laserskim skenerom Faro Focus<sup>m</sup> 70. Prilikom prikupljanja podataka je napravljeno testiranje lasera te njegove korisnosti u domeni kulturne baštine, odnosno njegove primjene u oblikovanju virtualne kulturne baštine. Prilikom izrade rada poseban je naglasak stavljen na obradu podataka i testiranje različitih dostupnih računalnih programa.

Hipoteza da geoprostorne tehnologije omogućavaju brzo prikupljanje i obradu prostornih podataka je djelomično potvrđena. Cijeli proces snimanja na 13 različitih stajališta je trajao nešto više od 2 sata. Ako se u obzir uzme količina prikupljenih podataka (512 milijuna točaka) i prostor koji je skener snimio, može se zaključiti da je prikupljanje podataka izuzetno brzo. Drugi dio hipoteze koja je iznesena je u isto vrijeme točan i netočan zbog njegove ovisnosti o potrebnoj kvaliteti završnog modela. Da bi se proizveli modeli visoke kvalitete potrebna je dulja obrada podataka koja, između ostalog, uključuje i ručno uklanjanje točaka.

Potvrđena je hipoteza da će srednja greška registracije udaljenosti skupova gustog oblaka točaka u računalnom programu *Faro SCENE* biti manja od 1 cm. Ona iznosi 6,95 mm. Iako dva skena imaju višu grešku registracije udaljenosti (20,49 i 11,63 mm), oni nisu drastično utjecali na kvalitetu registriranih podataka. Nadalje 3 snimka nastala u unutrašnjosti crkve imaju najmanju grešku registracije udaljenosti (1,44, 1,46 i 1,90 mm). To se može objasniti povoljnijim uvjetima rada skenera. U unutrašnjosti crkve skenirana je manja površina s manje udaljenosti te nije bilo potrebe za pomicanjem referentnih sfera.

Također je potvrđena i hipoteza da je kvaliteta izlaznih rezultata ograničena metodom obrade podataka. Zbog potvrde ili odbacivanja ove hipoteze su izrađena dva modela uz korištenje 3 računalna programa. Prvi model, Model A, je napravljen samo uz korištenje programa *SCENE*. Drugi model, Model B, je izrađen uz korištenje programa *CloudCompare* i *MeshLab*. Kako svaki od ovih programa koristi različite algoritme za obradu podataka tako su i rezultati različiti i drugačiji. *SCENE* se pokazao kao izvrstan program za registraciju i primarnu obradu podataka. Također, njegova mogućnost popunjavanja rupa u gustom oblaku točaka prilikom generiranja *mesha* se pokazala izuzetno korisnom. Nedostatak toga programa je bila njegova nemogućnost generiranja kvalitetne teksture na modelu što je i dovelo do potrebe

daljnje obrade podataka. Prilikom generiranja Modela B korišteni su programi *CloudCompare* i *MeshLab*. Oni su se pokazali bolji prilikom ručne obrade podataka zbog posjedovanja velikog broja alata za filtraciju i finu obradu modela. Prednost *CloudComparea* je njegova brzina i ne preveliko opterećenje procesora u računalu dok se algoritam *Screened Poisson Surface Reconstruction* za generiranje *mesha* unutar *MeshLaba* pokazao kao izvrsna opcija te je pomoću njega izrađen geometrijski ispravan i vizualno kvalitetniji model.

## 9. ZAKLJUČAK

Zbog prirodnih katastrofa, klimatskih promjena, ratova, masovnog turizma i raznih drugih ljudskih aktivnosti sve je veća važnost očuvanja kulturne baštine. Znatnu ulogu u tome imaju nove tehnologije. Takve tehnologije omogućavaju brzo prikupljanje, analizu, pohranjivanje, vizualizaciju i interpretaciju geopodataka. Sve veća dostupnost novih tehnologija prikupljanja podataka kao i ubrzani razvoj računalne tehnologije i kapaciteta obrade podataka utječu na značaj tih tehnologija u očuvanju kulturne baštine i kreiranju virtualne kulturne baštine. Takav način rada na očuvanju kulturne baštine nije savršen, ograničen je brojnim faktorima poput snage računala ili preciznosti mjernih instrumenata te ima puno prostora za daljnji napredak, ali daje novi pogled na upravljanje kulturnom baštinom. S daljnjim povećanjem kapaciteta računala za obradu podataka te povećanjem grafičkih kapaciteta i općenito razvojem računalne tehnologije virtualna baština će postati još bolji oblik čuvanja i prezentacije kulturne baštine. Integracijom kulturne baštine s virtualnom i proširenom stvarnosti otvara se novi oblik interakcije između korisnika i same baštine.

U ovome diplomskom radu je pokušano približiti suvremene tehnologije, u prvom redu terestričko lasersko skeniranje, njihovu upotrebu i sve veći značaj u očuvanju kulturne baštine i kreiranju virtualne kulturne baštine. Također, objašnjen je princip rada laserskih skenera. Objašnjene su prednosti i nedostaci pojedinih vrsta lasera te ograničenja njihove primjene. U radu je naglasak postavljen na generiranje modela visoke točnosti crkve sv. Križa u Ninu te je taj model postavljen kao primjer kako se upotrebom suvremenih tehnologija može napraviti baza prostornih podataka koja se kasnije može valorizirati na razne načine ovisno o potrebi. Također je naglasak postavljen na dostupne besplatne programe za obradu i generiranje 3D modela te testiranje njihovih mogućnosti te je prikazano da se i s besplatnim programima mogu postići impresivni izlazni rezultati.

Iz istraživanja provedenog za potrebe ovoga diplomskog rada je vidljivo da je tehnika terestričkog laserskog skeniranja pogodna za oblikovanje virtualne kulturne baštine te da se usprkos svim ograničenjima s kojima je trenutno suočena prometnula u vrlo važan oblik prikupljanja podataka o kulturnoj baštini te njezinom očuvanju.

## 10. LITERATURA

Apollonio F. I., Gaiani M. i Benedetti B. (2012.), *3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D Gis: a framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area*, Journal of Archaeological Science, 39, 1271-1287

Azuma R. T. (1997.), *A Survey of Augmented Reality*, Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6 (4), 355-385

Barazzetti L., Scaioni M. i Remondino F. (2010.), *Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images : Combining accuracy with automation*, The Photogrammetric Record, 25(132), 356–381

Bekele M. K. i Champion E. (2019.), *Redefining mixed reality: user-reality-virtuality and virtual heritage perspectives*, Intelligent & Informed, Proceedings of the 24th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Wellington, New Zealand, 2, 675-684

Bekele M. K., Pierdicca R., Frontoni E., Malinverni E. S. i Gain J. (2018.), *A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage*, ACM Journal on Computing and Cultural Heritage, 11(2), 7

Belošević J. (1998.), *Srednjovjekovno groblje u okolišu crkve sv. Križa u Ninu*, Radovi Filozofskog fakulteta u Zadru, 37(24), 105-149

Brennan M. i Christiansen L. (2018.), *Virtual Materiality: A Virtual Reality Framework for the Analysis and Visualization of Cultural Heritage 3D Models*, 3rd Digital Heritage International Congress, DigitalHERITAGE 2018, held jointly with 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia, VSMM 2018, San Francisco, CA, USA, 26-30 October 2018.

Canevese E. P. i De Gottardo T. (2017.), *Beyond point clouds and virtual reality innovative methods and technologies for the protection and promotion of cultural heritage*, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-5/W1, 685-691

Carmigniani J., Furht B., Anisetti M., Ceravolo P., Damiani E. i Ivkovic M. (2011.), *Augmented reality technologies, systems and applications*, Multimedia Tools and Applications, 51, 341-377

Champion, E. (2017.), *The Role of 3D Models in Virtual Heritage Infrastructures*, u:A. Benardou, E., Champion, C. Dallas, L. Hughes /ur./, Cultural Heritage Infrastructures in Digital Humanities, Routledge, Oxford i New York, 15-35



Chawla A., Kumar A., Warghat A., Singh S., Bhushan S., Sharma R. K., Bhattacharya A. i Kumar, S. (2020.), *Approaches for conservation and improvement of Himalayan plant genetic resources*, u: N. Tuteja, R. Tuteja, N. Passricha, S. K. Saifi /ur./, *Advancement in Crop Improvement Techniques*, Woodhead Publishing, Cambridge, 297-317.

Cignoni P., Callieri M., Corsini M., Dellepiane M., Ganovelli F. i Ranzuglia G. (2008.), *MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool*, Sixth Eurographics Italian Chapter Conference, 129-136

Crnčević D. (2012.), *Ugradnja enkodera na ispitni motor DMB 128 A*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

Deggim S., Kersten T. P., Tschirschwitz F. i Hinrichsen N. (2017.), *Segeberg 1600 – Reconstructing a Historic Town for Virtual Reality Visualisation as an Immersive Experience*, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W8, 87-94, 5th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 28-29 November 2017, Hamburg, Germany

Dorai C., Wang G., Jain A. K. i Mercer C (1998.), *Registration and Integration of Multiple Object Views for 3D Model Construction*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(1), 83-89

Doulamis A., Doulamis N., Ioannidis C., Chrysouli C., Nikos, G., Dimitropoulos, K., Potsiou, C., Stathopoulou E. i Ioannides, M. (2015.), *5D Modelling: An Efficient Approach for Creating Spatiotemporal Predictive 3D Maps of Large-Scale Cultural Resources*, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W3, 61-68

Drandić Gorički S. (2020.), *Nematerijalna kulturna baština Istre*, Diplomski rad, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Pula

El-Hakim S., Gonzo I., Voltolini F., Girardi S., Rizzi A., Remondino F. i Whiting E. (2007.), *Detailed 3D Modelling of Castles*, International Journal of Architectural Computing, 5(2), 199-220

Entwistle J., McCaffrey K. i Abrahams P. (2009.). *Three-dimensional (3D) visualisation: The application of terrestrial laser scanning in the investigation of historical Scottish farming townships*, Journal of Archaeological Science, 36, 860-866

Fröhlich C. i Mettenleiter M. (2004.), *Terrestrial laser scanning-new perspectives in 3D surveying*, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI – 8/W2, 7-13, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, 03-06 October 2004, Freiburg, Germany

Gruen A. (2008.), *Reality-based generation of virtual environments for digital earth*, International Journal of Digital Earth, 1(1), 88-106

Gruen A. (2013.), *Reality-based virtual models in cultural heritage*, u: M. Falser, M. Juneja /ur./, „Archaeologizing“ Heritage?, Transcultural Entanglements between Local Social Practices and Global Virtual Realities, Springer, Berlin/Heidelberg, 109-126

Guarnieri A., Fissore F., Masiero A. i Vettore A. (2017.), *From Tls Survey To 3D Solid Modeling for Documentation of Built Heritage: the Case Study of Porta Savonarola in Padua*, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W5, 303-308

Guidi G. i Remondino F. (2012.), *3D modeling from real data*, u: C. Alexandru /ur./, Modeling and Simulation in Engineering, InTech, Rijeka, 69-102

Holmes W. (1988), The ODISS Project, Digital Imaging Research for Archival Institutions, The Journal of Photographic Science, 36, 114-117

Iacovino A., De Paolis L. i Ndou V. (2020.), *Technologies to Support Tourism Innovation and Cultural Heritage: Development of an Immersive Virtual Reality Application*U: De Paolis L., Bourdot P. /ur./, Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics. AVR 2020. Lecture Notes in Computer Science, 12243. Springer, Cham, 3-14

Jaafar H. A. (2017.), *Detection and Localisation of Structural Deformations Using Terrestrial Laser Scanning and Generalised Procrustes Analysis*, Doktorska disertacija, University of Nottingham, Nottingham Geospatial Institute, Nottingham

Jacobsen J. i Holden L. (2007.), *Virtual Heritage: Living in the Past*, Techné: Research in Philosophy and Technology, 10(3), 55-61

Kopáček A., Erdélyi J. i Kyrinovič P. (2020.), *Engineering Surveys for Industry*, Springer International Publishing.

Koboldt C. (1997), *Optimizing the use of cultural heritage*, u: M. Hutter i I. E. Rizzo /ur./, Economic Perspectives on Cultural Heritage, MacMillan, London, 50-73

Kupfer J. A. i Emerson C. W. (2005.), *Remote Sensing*, Encyclopedia of Social Measurement, br. 3, Academic Press, San Diego, 377-383

Kušter K. (2017), *Kulturna baština Republike Hrvatske pod zaštitom UNESCO-a*, Završni rad, Međimursko veleučilište u Čakovcu, Čakovec

Kvaranta B. (2017.), *Nematerijalna kulturna baština Hrvatske pod zaštitom UNESCO-a*, Diplomski rad, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Pula

Lemmens M. (2011.), *Geo-information, Geotechnologies and the Environment* 5, Springer Netherlands

Loizides F, El Kater A, Terlikas C, Lanitis A, Michael D (2014.) *Presenting Cypriot Cultural Heritage in Virtual Reality: A User Evaluation*, Digital Heritage, Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection, 572-579

Luo L., Wang X., Guo H., Lasaponara R., Zong X., Masini N., Wang G., Shi P., Khatteli H., Chen F., Tariq S., Shao J., Bachagha N., Yang R i Yao Y. (2019), *Airborne and spaceborne remote sensing for archaeological and cultural heritage applications: A review of the century (1907–2017)*, Remote Sensing of Environment, 232

Magaš D. (2013.), *Geografija Hrvatske*, Sveučilište u Zadru, Meridijani, Zadar

Marić, I., Šiljeg, A., Domazetović, F. (2019), *Geoprostorne tehnologije u 3D dokumentaciji i promociji kulturne baštine – primjer utvrde Fortica na otoku Pagu*, Geodetski glasnik, 50, 19-44

Mićić N. (2012.), *UNESCO i kulturna baština*, Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Filozofski fakultet, Osijek

Milgram P. i Kishino F. (1994.), *A taxonomy of mixed reality visual displays*, IEICE Transactions on Information Systems, E77-D(12), 1321-1329

Mouazen A. M., Alexandridis T., Buddenbaum H., Cohen Y., Moshou D., Mulla D., Nawar S., Sudduth K. A. (2020.), *Chapter 2—Monitoring*, Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 35-138

Navarrete T. (2013.), *Digital cultural heritage*, Handbook on the Economics of Cultural Heritage, Edward Elgar, Cheltenham, 251-271

Nolesini T., Frodella W., Bianchini S. i Casagli N. (2016.), *Detecting Slope and Urban Potential Unstable Areas by Means of Multi-Platform Remote Sensing Techniques: The Volterra (Italy) Case Study*. Remote Sensing 8(9), 746

Pérez-Álvarez R., de Luis J., Pereda-García R., Fernández-Maroto G. i Malagón-Picón B. (2020), *3D Documentation with TLS of Caliphal Gate (Ceuta, Spain)*, Applied Sciences, 10

Pieraccini M., Guidi G., Atzeni C. (2001), *3D digitizing of cultural heritage*, Journal of Cultural Heritage, 2, 63-70

Prescott A. (1997), *The Electronic Beowulf and Digital Restoration*, Literary and Linguistic Computing, 12, 185-195

Rajangam, K. i Rajani, M. (2017.), *Applications of geospatial technology in the management of cultural heritage sites – potentials and challenges for the Indian region*, Current Science, 113(10), 1948-1960

Regan K. i Nadilo B. (2009.), *Crkve u sjeverozapadnom dijelu zadarskoga zaleđa: Crkve u sjeverozapadnom dijelu zadarskoga zaleđa*, Građevinar (Tisak), 61, 675-688

Remondino F. i El-Hakim S. (2006.), *Image-based 3D modelling: a review*, The Photogrammetric Record, 21(115), 269-291

Remondino F., El-Hakim S., Girardi S., Rizzi A., Benedetti S. i Gonzo L. (2009.), *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures - The 3D-ARCH Project*, ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-5/W1, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25–28 February 2009, Trento, Italy

Remondino F. i Rizzi A. (2010.), *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites-techniques, problems, and examples*, Applied Geomatics, 2, 85-100

Remondino F. i Zhang Li. (2006.), *Surface Reconstruction Algorithms for Detailed Close – Range Object Modelling*, ISPRS –International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI (3)

Reshetyuk Y. (2009.), *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*, Doktorska disertacija, Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm

Ridel B., Reuter P., Laviolle J., Mellado N., Couture N. i Granier X. (2014.), *The revealing flashlight: Interactive spatial augmented reality for detail exploration of cultural heritage artifacts*, Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH), 7(2), 1-18

Rodríguez-Gonzálvez P., Jiménez Fernández-Palacios B., Muñoz-Nieto Á., Arias-Sanchez P. i Gonzalez-Aguilera D. (2017.), *MobileLiDAR System: New Possibilities for the Documentation and Dissemination of Large Cultural Heritage Sites*, Remote Sensing, 9(3), 189

Roussou M. (2002.), *Virtual Heritage: From the Research Lab to the Broad Public*, BAR International Series, 1075, 93-100

Scianna A., Gaglio G. F. i La Guardia, M. (2020.), *Digital Photogrammetry, Tls Survey and 3d Modelling for VR and AR Applications in CH*, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2020, 901-909

Seiter-Šverko D. i Križaj L. (2012), *Digitalizacija kulturne baštine u Republici Hrvatskoj : od trenutne situacije prema nacionalnoj strategiji*, Vjesnik bibliotekara Hrvatske, 55 (2), 29-40

Shao J., Zhang W., Mellado N., Grussenmeyer P., Li R., Chen Y., Wan P., Zhang X. i Cai S. (2018.), *Automated markerless registration of point clouds from TLS and structured light scanner for heritage documentation*, Journal of Cultural Heritage, 32, 16-24

Šiljeg, A. (2019): *Višerezolucijsko modeliranje krajolika primjenom geoprostornih tehnologija*, Međunarodni dan precizne poljoprivrede, Osijek, 2019.

Šiljeg, A., Barada, M., Marić, I. (2018), *Digital Terrain Modelling*, Alfa d.d. i Sveučilište u Zadru, Zagreb.

Tschirschwitz, F., Buyuksalih G., Kersten, T, Kan, T., Enc, G. i Baskaraca, P. (2019.), *Virtualising an Ottoman Fortress - Laser Scanning and 3D Modelling for the development of an Interactive, Immersive Virtual Reality Application*, ISPRS –International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLII-2/W9, 723-729

Vacca G, Deidda M., Dessi A. i Marras M. (2012.), *Laser scanner survey to cultural heritage conservation and restoration*, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B5, 589-594

Van Genechten B., Quintero M. S., Bruyne M. D., Poelman R., Hankar M., Barnes S., Caner H., Budei L., Heine E., Reiner H., Garcia J. L. L. i Taronger J. M. B. (2008.), *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications*

Vernon T. i Peckham D. (2002.), *The benefits of 3D modelling and animation in medical teaching*, Journal of Audiovisual Media in Medicine, 25 (4), 142-148

Wang W., Zhao W., Huang L., Vimarlund V. i Wang Z. (2014.), *Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review*, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 1(5), 325-337

Xiao W., Mills J., Guidi G., Rodríguez-González P., Gonizzi Barsanti S., González-Aguilera D. (2018.), *Geoinformatics for the conservation and promotion of cultural heritage in support of the UN Sustainable Development Goals*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 142, 389-406

Yastikli N. (2007.), *Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning*, Journal of Cultural Heritage, 8, 423-427

Zogg H. M. (2008.), *Investigations of High Precision Terrestrial Laser Scanning with Emphasis on the Development of a Robust Close-Range 3D-Laser Scanning System*, Doktorska disertacija, ETH Zürich, Zürich

## 11. IZVORI

- URL1: <https://min-kulture.gov.hr/izdvojeno/kulturna-bastina/349> (15.12.2020.)
- URL2: <http://www.unesco.org/new/en/culture/themes/illicit-trafficking-of-cultural-property/unesco-database-of-national-cultural-heritage-laws/frequently-asked-questions/definition-of-the-cultural-heritage/> (15.12.2020.)
- URL3: <http://www.unesco.org/new/en/culture/themes/illicit-trafficking-of-cultural-property/unesco-database-of-national-cultural-heritage-laws/for-reference/#c1422636> (15.12.2020.)
- URL4: <http://whc.unesco.org/en/conventiontext/> (15.12.2020.)
- URL5: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/medunarodni/full/2005\\_06\\_5\\_47.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/medunarodni/full/2005_06_5_47.html) (15.12.2020.)
- URL6: <https://ich.unesco.org/en/convention> (15.12.2020.)
- URL7: [http://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/research\\_resources/charters.html](http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/research_resources/charters.html) (15.12.2020.)
- URL8: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=55313> (15.12.2020.)
- URL9: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1999\\_07\\_69\\_1284.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1999_07_69_1284.html) (15.12.2020.)
- URL10: <https://registar.kulturnadobra.hr/#/> (15.12.2020.)
- URL11: <https://en.unesco.org/themes/information-preservation/digital-heritage/concept-digital-heritage> (15.12.2020.)
- URL12: <https://www.aaas.org/programs/scientific-responsibility-human-rights-law/overview-geospatial-project> (22.08.2020.)
- URL13: [https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used?qt-news\\_science\\_products=0#qt-news\\_science\\_products](https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products) (22.08.2020.)
- URL14: <https://geospatialmedia.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2017/10/Geospatial-technology-geospatial-industry.png> (22.08.2020.)
- URL15: <https://www.geospatialworld.net/blogs/what-is-geospatial-industry/> (22.08.2020.)
- URL16: <https://i.ytimg.com/vi/k08nbH0MFyY/maxresdefault.jpg> (22.07.2020.)
- URL17: [https://hydrogen2014imac.files.wordpress.com/2012/10/level\\_of\\_detail2.jpg](https://hydrogen2014imac.files.wordpress.com/2012/10/level_of_detail2.jpg) (31.07.2020.)
- URL18: <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/ccd/> (10.11.2020.)
- URL19: <https://i.pinimg.com/736x/a0/47/e6/a047e6c0177c68164424e81b7695e89e.jpg>
- URL21: <https://www.britannica.com/technology/modulation-communications> (06.10.2020.)
- URL22: <http://struna.ihjj.hr/naziv/koherentna-svjetlost/9287/> (20.01.2021.)

URL23: [https://www.rp-photonics.com/laser\\_speckle.html](https://www.rp-photonics.com/laser_speckle.html) (20.01.2021.)

URL24: <https://www.encoder.com/articles/what-is-an-encoder> (20.01.2021.)

URL25: <https://sc04.alicdn.com/kf/H0bd8f3abfcc54f868beca3cb1bf8754cY.jpg> (15.12.2020.)

URL26:  
[https://cdn.shopify.com/s/files/1/2465/7561/products/IMG\\_20190419\\_001859\\_1024x1024@2x.jpg?v=1555683532](https://cdn.shopify.com/s/files/1/2465/7561/products/IMG_20190419_001859_1024x1024@2x.jpg?v=1555683532) (15.12.2020.)

URL27: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/other/smart-goal/>  
(15.02.2021.)

URL28: <https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resources/2021/01/15/22/34/Tech-Sheet-FARO-Focus-Laser-Scanners-ENG.pdf?rev=cb02264ffcbd4123b82a5c42f29b14be> (15.12.2020.)

URL29:  
[https://knowledge.faro.com/Hardware/3D\\_Scanners/Focus/Quality\\_Setting\\_Function\\_on\\_the\\_Focus3D](https://knowledge.faro.com/Hardware/3D_Scanners/Focus/Quality_Setting_Function_on_the_Focus3D) (15.12.2020.)

URL30:  
[https://echosurveying.com/docs/Faro\\_Focus\\_M70\\_S70\\_S150\\_S350\\_User\\_Manual.pdf](https://echosurveying.com/docs/Faro_Focus_M70_S70_S150_S350_User_Manual.pdf)  
(15.12.2020.)

URL31: <https://www.danielgm.net/cc/> (24.10.2020.)

URL32: <https://www.meshlab.net/#download> (01.11.2020.)

URL33: <https://min-kulture.gov.hr/izdvojeno/kulturna-bastina/vrste-kulturne-bastine/nepokretna-kulturna-bastina/nepokretna-kulturna-dobra-upisana-na-unesco-ov-popis-svjetske-bastine/7244> (18.06.2021.)

URL34: <https://min-kulture.gov.hr/izdvojeno/kulturna-bastina/vrste-kulturne-bastine/nematerijalna-kulturna-bastina/nematerijalna-dobra-upisana-na-unesco-ov-reprezentativni-popis-nematerijalne-kulturne-bastine-covjecanstva/5337> (18.06.2021.)

URL35: <https://registar.kulturnadobra.hr/#/details/Z-1195> (18.06.2021.)

URL36: <http://virtualna.nsk.hr/#izlozbe> (19.06.2021.)

URL37: [https://min-kulture.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/e-kultura%20-%20Digitalizacija%20kulturne%20ba%C5%A1tine\\_prezentacija.pdf](https://min-kulture.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/e-kultura%20-%20Digitalizacija%20kulturne%20ba%C5%A1tine_prezentacija.pdf) (20.06.2021.)

URL38: <https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/MainScreen?entityId=10350> (20.06.2021.)

URL39: <https://artsandculture.google.com/?hl=en> (20.06.2021.)

URL40: <https://artsandculture.google.com/partner/van-gogh-museum?hl=en> (20.06.2021.)

URL41: <https://artsandculture.google.com/partner/uffizi-gallery?hl=en> (20.06.2021.)

URL42: <https://artsandculture.google.com/story/0AWRDHjtAxqnWQ?hl=en> (20.06.2021.)

URL43: <https://maps.arcanum.com/en/> (24.06.2021.)  
URL44: <https://lumion.com/product.html> (21.06.2021.)  
URL45: <http://dikaz.zkzd.hr/index.php> (10.08.2021.)  
URL46: <https://pisanabastina.unizd.hr> (10.08.2021.)  
URL47: <https://www.gkzd.hr/content/virtualni-sadr%C5%BEaji-gradske-knji%C5%BEnice-zadar> (10.08.2021.)  
URL48: <https://www.grad-zadar.hr/repos/doc/PLAN%20RAZVOJA%20KULTURE%20GZ%202019.-2026..pdf> (10.08.2021.)

## 12. POPIS GRAFIČKIH PRILOGA

- Slika 1. Glavni alati geoprostornih tehnologija (URL14)  
Slika 2. Primjeri metoda daljinskih istraživanja (preuzeto od Luo i dr., 2019)  
Slika 3. Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske (URL10)  
Slika 4. Izvadak iz Registra kulturnih dobara Republike Hrvatske za crkvu sv. Križa u Ninu (URL35)  
Slika 5. Generiranje modela korištenjem ručnog skenera (URL16)  
Slika 6. Razlika u broju trokuta u modelu i vizualne kvalitete modela (URL 17)  
Slika 7. Kontinuum stvarnost virtualnost (preuzeto od Carmigniani i dr., 2011)  
Slika 8. Metode daljinskog prikupljanja podataka (preuzeto od Zogg, 2008)  
Slika 9. Mjerenje udaljenosti triangulacijom (preuzeto od Guidi i Remondino, 2012)  
Slika 10. Princip rada aktivnog triangulacijskog uređaja (preuzeto od Guidi i Remondino, 2012)  
Slika 11. Princip rada pulsno lasera (preuzeto od Van Genechten i dr., 2008)  
Slika 12. Princip rada faznog lasera (preuzeto od Van Genechten i dr., 2008)  
Slika 13. Razlika između običnog svjetla i lasera (URL19)  
Slika 14. Prozor snimanja korišten kod terestričkih laserski skenera (preuzeto od Zogg, 2008)  
Slika 15. Defleksija laserske zrake preko galvo zrcala i monogon zrcala (Kopáček i dr., 2020)  
Slika 16. Princip mjerenja pomoću terestričkog laserskog sustava (preuzeto od Reshetyuk, 2009)  
Slika 17. Natpis pred crkvom sv. Križa



Slika 18. Tumačenje prema kojemu je crkva mjerač vremena (preuzeto od Regan i Nadilo, 2009)

Slika 19. Tijek rada s terestričkim laserskim skenerom (preuzeto od Van Genechten i dr., 2008)

Slika 20. Uređaj Faro Focus<sup>m</sup> 70 (URL25)

Slika 21. Referentne sfere (URL26)

Slika 22. Sučelje s postavkama skeniranja na uređaju Faro Focus<sup>m</sup> 70

Slika 23. Postavljanje i kalibracija uređaja Faro Focus<sup>m</sup> 70

Slika 24. Određivanje postavki za RGB skeniranje na laserskom skeneru

Slika 25. Sličnost između referentne sfere i rasvjete

Slika 26. Gusti oblak točaka nakon registracije snimki

Slika 27. Parametri korišteni prilikom generiranja panoramske 360° snimke za VR naočale

Slika 28. Parametri korišteni prilikom generiranja 360° panoramske snimke

Slika 29. Parametri korišteni prilikom generiranja videa u računalnom programu *Lumion*

Slika 30. Točke koje je *SCENE* označio kao referentne

Slika 31. Dio točaka koje je *SCENE* odabrao kao referentne

Slika 32. Prave referentne sfere na lokaciji snimanja

Slika 33. Broj referentnih sfera na jednoj snimci

Slika 34. Srednja greška udaljenosti gustog oblaka točaka

Slika 35. *Target tension* referentnih točaka

Slika 36. Ukupna statistika registriranih oblaka točaka

Slika 37. Krov 3D modela crkve sv. Križa

Slika 38. Prednja strana s ulazom 3D modela crkve sv. Križa

Slika 39. Bočna južna strana 3D modela crkve sv. Križa

Slika 40. Stražnja strana 3D modela crkve sv. Križa

Slika 41. Bočna sjeverna strana 3D modela crkve sv. Križa

Slika 42. Presjek 3D modela crkve sv. Križa

Slika 43. Tlocrt 3D modela crkve sv. Križa

Slika 44. Novi model crkve sv. Križa

Slika 45. Prednja strana s ulazom novog 3D modela crkve sv. Križa

Slika 46. Stražnja strana novog 3D modela crkve sv. Križa

Slika 47. Bočna južna strana novog 3D modela crkve sv. Križa

Slika 48. Greške na modelu nastale zbog manjka prikupljenih točaka

Slika 49. Velika količina detalja na vanjskom plaštu 3D modela

Slika 50. Greške vidljive na krovu novog 3D modela crkve sv. Križa

Slika 51. Fotografija nadvratnika i isječak iz 3D modela crkve sv. Križa

Slika 52. Presjek s pogledom na ulaz novog 3D modela crkve sv. Križa

Slika 53. Presjek s pogledom na 3 apside novog 3D modela crkve sv. Križa

Slika 54. Tlocrt novog 3D modela crkve sv. Križa

### **13. POPIS TABLIČNIH PRILOGA**

Tablica 1. Specifikacije uređaja Faro Focus<sup>m</sup> 70

Tablica 2. Vrijeme, rezolucija i faktor kvalitete prilikom snimanja interijera

Tablica 3. Vrijeme, rezolucija i faktor kvalitete prilikom snimanja eksterijera

Tablica 4. Broj točaka prikupljenih s pojedinog stajališta

## 14. SAŽETAK

U diplomskome radu je izrađen 3D model visoke točnosti crkve sv. Križa u Ninu. Model je rezultat 3D modeliranja prostornih podataka prikupljenih na terenskom istraživanju. Terensko istraživanje i prikupljanje podataka je izvršeno uređajem Faro Focus<sup>m</sup> 70. Taj uređaj pripada skupini faznih laserskih uređaja (AMCW). Ukupno je napravljeno 13 snimanja s 13 različitih stajališta. Napravljena su 3 snimanja interijera i 10 snimanja eksterijera. Prikupljanje podataka interijera je obavljeno na uređaju podešenom na 1/8 rezolucije sa faktorom kvalitete 4. Snimanje sa prvih 6 stajališta eksterijera napravljeno je na postavkama rezolucije od 1/2 te faktorom kvalitete 2x, te 4 snimanja na postavkama rezolucije od 1/4 te faktorom kvalitete 2x. U obradi podataka su korišteni računalni programi *SCENE*, *MeshLab* i *CloudCompare*. Generirana su dva modela. Prvi koji je nastao u programu *SCENE* ima niži broj vrhova i stranica, sastoji se od 1 151 879 vrhova i 2 302 994 stranice te tekstura nije dobro generirana. Drugi 3D model je generiran u programu *MeshLab* s deseterostruko više vrhova i stranica. Novi model se sastoji od 10 272 623 vrha i 20 531 569 stranica. Prije generiranja drugog modela pristupilo se čišćenju i filtriranju podataka. Čišćenjem se oblak točaka čisti od grubih pogrešaka nastalih prilikom prikupljanja podataka i to je napravljeno u računalnom programu *CloudCompare*. U istom programu je napravljeno i filtriranje podataka. Novi poligonski model je napravljen u računalnom programu *MeshLab* pomoću *Screened Poisson Surface Reconstruction* algoritma. Iz ta dva modela je vidljivo da je tehnika terestričkog laserskog skeniranja pogodna za oblikovanje virtualne kulturne baštine te da se usprkos svim ograničenjima s kojima je trenutno suočena prometnula u vodeći oblik prikupljanja podataka o kulturnoj baštini te njezinom očuvanju.

## 15. SUMMARY

In this thesis, a high accuracy 3D model of the church of the Holy Cross in the city of Nin has been made. The model is the result of 3D modeling of spatial data collected in field survey. Field survey and data collection was performed with the device Faro Focus<sup>m</sup> 70. This laser scanner belongs to the group of Amplitude Modulated Continuous Wave (AMCW) systems. In total, 13 scans were made from 13 different stands. 3 interior shots and 10 exterior shots were made. Interior data collection was performed on a device set to 1/8 resolution with a quality factor of 4. Scanning from the first 6 exterior stands was made at a resolution of 1/2 and a quality factor of 2x, and 4 scans at a resolution of 1/4 and a quality factor 2x. Software SCENE, MeshLab and CloudCompare were used in data processing. Two models were generated. The first one created in the SCENE has a lower number of vertices and faces, that model consists of 1,151,879 vertices and 2,302,994 faces, and the texture is not well generated. The second 3D model was generated in MeshLab with ten times the number of vertices and faces. The new model consists of 10,272,623 vertices and 20,531,569 faces. Before generating the second model, the data was cleaned and filtered. By cleaning, the point cloud is cleaned of errors that occurred during data collection, and this was done in the software CloudCompare. Data filtering was done in the same program. The new mesh was created in the software MeshLab using the Screened Poisson Surface Reconstruction algorithm. These two models show that the terrestrial laser scanning technique is suitable for shaping of virtual cultural heritage and that, despite all the limitations it currently faces, it has become the leading form of collecting data on cultural heritage and its preservation.