

## 3D skener

---

*U ovom radu je predstavljen dizajn, konstrukcija i test 3D skenera koji radi na principu profilnog skeniranja pomoću lasera i kamere. Pronalaženje koordinata tačaka je vršeno principom triangulacije. Varirana je pozicija lasera u odnosu na kameru kako bi se odredila optimalna konfiguracija. Za potrebe testiranja napravljena su tri standardna modela za testiranje 3D skenera (kocka, cilindar i model broda). Modeli su skenirani, a dobijeni skupovi tačaka su poređeni sa originalnim modelima. Rezultati su pokazali da preciznost skenera raste sa povećanjem udaljenosti između lasera i kamere. Srednja vrednost odstupanja tačaka od referentnog modela se pri pomeraju lasera sa udaljenosti od 65 do 95 mm smanjuje sa 1.2 na 0.6 mm. Optimalna pozicija nije pronađena jer teorija o korelaciji količine zasenčenja i udaljenosti izvora lasera i kamere nije dokazana u praksi. Pokazalo se da na tačnost više utiče oblik i pozicija modela pri skeniranju. Skener je parirao komercijalno dostupnim modelima skenera u domenu preciznosti, ali je bio daleko sporiji u izvršavanju.*

---

## Uvod

Kompjuterska vizija je jedna od grana digitalne obrade slike i bavi se posmatranjem i prepoznavanjem prostora i objekata u prostoru. Primene kompjuterske vizije su raznovrsne i mnogobrojne, poput navigacije u vozilima ili prepoznavanja oblika. Poseban problem u okviru ove oblasti je rekonstrukcija scene sa digitalne slike. Jedan od vidova rekonstrukcije je i rekonstrukcija 3D modela na osnovu 2D slike ili takozvano 3D skeniranje.

3D skeniranje se bazira na korišćenju određenih senzora koji prikupljaju informacije sa stvarnih objekata. Senzori mogu biti kamere, dok se predmet osvetljava laserima, strukturiranom svetlošću (projektor) ili infracrvenom svetlošću. Postoji više načina skeniranja objekata, a oni se grupišu u tri kategorije: displacement, profile i snapshot skeniranje. Displacement skeniranje (slika 1a) koristi tačkastu projekciju lasera mreči visinu ili poziciju tog objekta. Profile skeniranje (slika 1b) koristi linijsku projekciju lasera koja se seče sa objektom čime se dobijaju podaci o konturi objekta. Okretanjem objekta dobija se kompletan 3D oblik. Snapshot skeniranje (slika 1c) koristi struktuisanu svetlost i stereo kameru odakle se dobijaju podaci o kompletnoj 3D zapremini objekta. Pošto je broj podataka veliki, objekat mora biti stacionaran za vreme skeniranja (LMI Technologies 2013).

Cilj ovog projekta je konstrukcija 3D skenera profilnim skeniranjem i određivanje njegovih karakteristika. Korišćen je metod profilnog skeniranja, gde se rekonstrukcija vrši po liniji lasera. Proces rada se sastoji od kalibracije, obrade slike i rekonstrukcije (slika 2).

## Metod

### Triangulacija

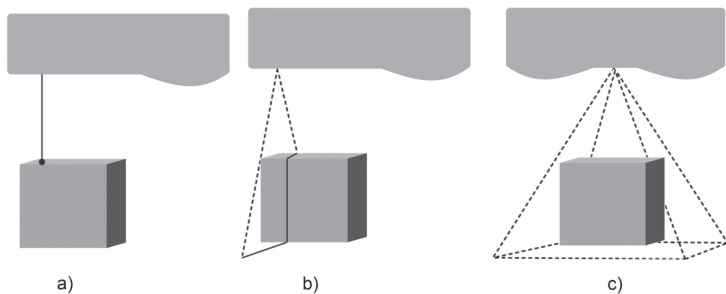
Kamera se može predstaviti modelom pinhol (eng. pinhole) modelomkamere koji omogućava lakši matematički opis lokacija žižne tačke i piksela u prostoru (slika 3). Položaj tačke  $P$  se nalazi na osnovu poznatih geometrijskih konstrukcija koje se u toj tački seku. U konkretnom slučaju 3D skenera poznata je prava koja spaja traženu tačku  $P$  i žižnu tačku  $Q$  kao i parametri koji određuju ravan lasera (slika 3). Na osnovu toga mo-

---

*Aleksa Račić (2000), Banja Luka (RS, BiH),  
Petra Kočića 101/5, učenik 3. razreda  
Gimnazije Banjaluka*

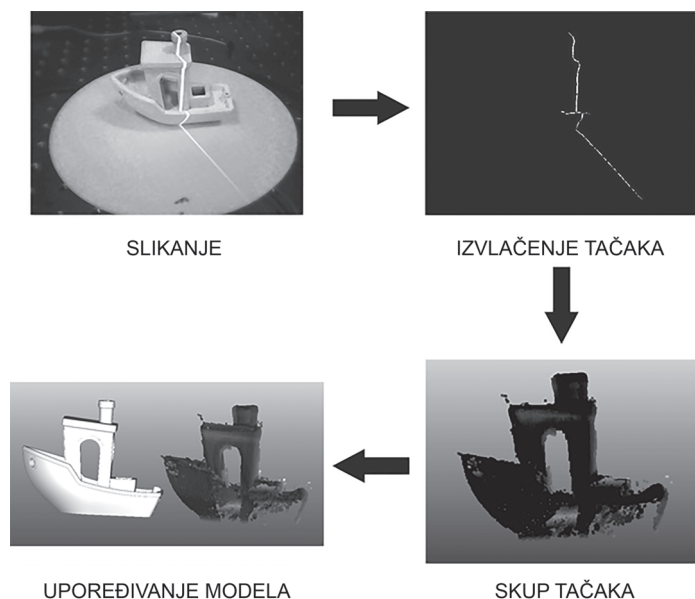
*Aleksa Stefanović (2000), Pirot, Jevrejska 4/23,  
učenik 3. razreda Gimnazije Pirot*

*MENTOR: Marko Skakun, student  
Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u  
Beogradu*



Slika 1. Tipovi skeniranja

Figure 1. Types of scanning



Slika 2. Grafički abstrakt projekta koji objedinjuje konstrukciju skenera i samo skeniranje, koje se sastoji iz slikanja predmeta kamerom, izvlačenja presečnih tačaka lasera i predmeta, kreiranja skupa izdvojenih tačaka i upoređivanja sa referentnim modelom.

Figure 2. Graphic abstract illustrating the scanner construction and scanning process. The latter consists of: taking pictures of the object, detecting intersecting points of the laser and the object, extracting point cloud and comparison with the referential model.

guće je odrediti koordinate tačke  $P$  relacijom (1), gde je  $Q$  – žižna tačka,  $v$  – vektor koji žižnu tačku translira u tačku piksela  $U$ ,  $n$  – vektor normale na koji određuje ravan lasera,  $C$  – tačka koja se nalazi u ravni lasera (Lenman i Taubin 2009). Normalni vektor normale se dobija iz kalibracije ravni lasera, dok se veličina vektora  $v$  dobija iz karakterizacije kamere:

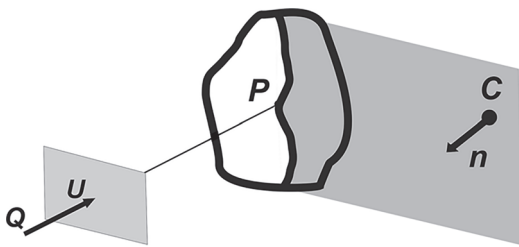
$$P = Q + \frac{n^T \cdot C - n^T \cdot Q}{n^T \cdot v} v \quad (1)$$

## Aparatura

Skener se sastoji iz dva dela, horizontalnog i vertikalnog. Na kraju horizontalnog dela nalazi se koračni motor za koji je zakačeno kružno postolje (slika 4a). Na vertikalnom delu je posta-

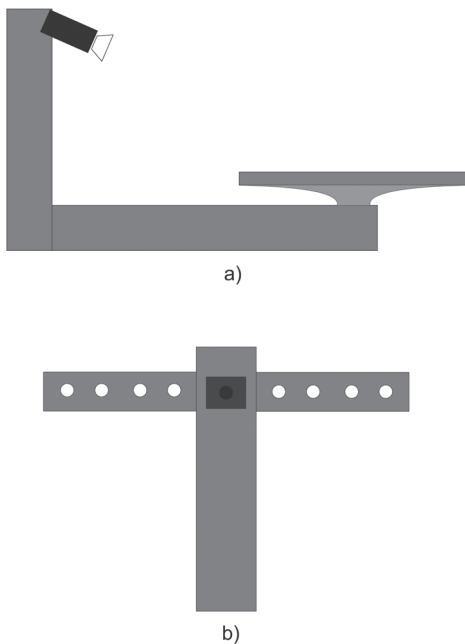
vljena kamera, a levo i desno od kamere, na istoj visini, dva stalka za lasere duž kojih je moguće pomerati laser (slika 4b, beli krugovi predstavljaju pozicije lasera). Korišćena kamera je rezolucije 0.3 MP.

Rad lasera i koračnog motora kontroliše se preko mikrokontrolera i upravljača koračnog motora (EasyDriver). Mikrokontroler koji je korišćen je Arduino UNO (na slici 5 obeležen brojem 1). Kontrola arduina se ostvaruje putem računara. Prilikom skeniranja kontroler šalje signal laseru (slika 5, broj 4) i menja njegovo stanje (upaljen ili ugašen). Kontrola rada koračnog motora, koji je zadužen za rotiranje postolja, ostvaruje se preko upravljača koračnog motora (na slici 5 obeležen brojem 2). Upravljač sa kontrolera prima informaciju o veličini koraka koji koračni motor (slika 5, broj 3) treba da ostvari.



Slika 3. Triangulacija presekom zraka i ravni

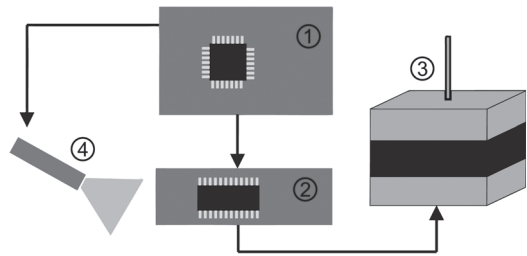
Figure 3. Triangulation by ray-plane intersection



Slika 4. a) prikaz skenera iz profila, b) prikaz stalka za kameru i lasere

Figure 4. a) profile view of the scanner, b) camera and laser stand view

Prilikom skeniranja korišćena je polovina osnovnog koraka koračnog motora, odnosno jedan korak je iznosio  $0.9^\circ$ . Zbog takve konfiguracije motora svako skeniranje se sastoji od 400 pojedinačnih slika.



Slika 5. Šematski prikaz kontrolne jedinice

Figure 5. Schematic view of the control unit

## Kalibracija

**Kalibracija kamere.** Kalibracija kamere je proces kojim se određuju intrinzični i ekstrinzični parametri koji opisuju model pinhol kamere. Oni opisuju poziciju piksela na kameri u koordinatnom sistemu sveta koji se nalazi izvan kamere i čiji su ortogonalni bazni vektori dužine 1 mm. Relacija između koordinata tačke u koordinatnom sistemu kamere i koordinatnom sistemu sveta je data relacijom:

$$P_C = K(R \times P_W + T) \quad (2)$$

U jednačini (2)  $P_C = [x, y, 1]^T$  su koordinate piksela na ravni slike sa početkom u gornjem levom uglu, dok su  $P_W = [x_w, y_w, z_w]^T$  koordinate tačke u koordinatnom sistemu sveta koja odgovara datom pikselu.  $R$  je matrica rotacije, a  $T$  vektor translacije koji se određuju kalibracijom.

Intrinzični parametri kamere su dati u obliku matrice  $K$ :

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & x_0 \\ & f_y & y_0 \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Oni zavise od oblika i položaja senzora i sočiva te opisuju sledeća svojstva:

- žižna daljina sočiva po osi  $x$  ( $f_x$ )
- žižna daljina sočiva po osi  $y$  ( $f_y$ )
- odstupanje centra sočiva od senzora po  $x$  osi ( $x_0$ )

- odstupanje centra sočiva od senzora po  $y$  osi ( $y_0$ )
- zakrivljenost piksela ( $s$ )

S druge strane, ekstrinzični parametri određuju poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema sveta u odnosu na kameru. Te veličine su opisane u jednačini (2) matricom translacije  $T$  i matricom rotacije  $R$  (Lanman i Taubin 2009).

Za određivanje intrinzičnih i ekstrinzičnih parametara korišćena je Zhangova metoda, a za određivanje ekstrinzičnih parametara EPnP metoda koje je implementirana u biblioteci OpenCV. Ona podrazumeva slikanje šahovske table sa različitim pozicija (Hartley i Zisserman 2003). Da bi kalibracija bila potpuna, bilo je neophodno odrediti koeficijente tangencijalne i radijalne distorzije, koji određuju zakrivljenost i pomeraj same slike u odnosu na stvarni prikaz.

**Kalibracija ravni postolja.** Kalibracija ravni postolja je potrebna kako bi se odredio položaj koordinatnog sistema sveta svake skenirane pozicije u odnosu na kameru. Na postolje se u sredini postavi šahovnica i u svakom koraku vrši se kalibracija kamere EPnP metodom (Hartley *et al.* 2003). Postavljanjem centra koordinatnog sistema u žižu kamere, kalibracijom se dobija tačna pozicija ravni šahovnice, a samim tim i ravni postolja. Kreira se koordinatni sistem sa početkom u centru postolja. Znajući položaj ovih sistema, u svakom koraku se koordinate tačaka sa slike mogu transformisati u koordinate postolja. Svaki koordinatni sistem je rotiran za određeni ugao u odnosu na prvi, samim tim se tačke preuzete iz dva različita koraka neće preklapati.

**Kalibracija ravni lasera.** Pri rekonstrukciji potrebno je znati položaj ravni lasera u odnosu na kameru. Da bi se odredio položaj traže se dve prave koje pripadaju ravni lasera. Prave se određuju postavljanjem šahovnice na dve pozicije u prostoru i slikanjem trenutne scene dok je laser upaljen. Svetlost lasera se prostire u vidu ravni i presek te ravni sa ravni šahovnice jeste crvena linija na šahovnici. Tačke koje pripadaju tim dvema linijama obrazuju ravan lasera, a RANSAC algoritmom (Derpanis 2010) određuje se najbolja moguća ravan.

## Skeniranje

Ceo proces skeniranja se sastoji iz nekoliko elemenata. Na početku se objekat postavi na postolje i pričvrsti tako da pomeranje prilikom

rotiranja bude što manje. Zatim se točak rotira određen broj koraka, u zavisnosti od toga koliko se slika zahteva prilikom skeniranja. Nakon što se točak okrene za jedan korak, pali se laser, kamera slika trenutnu scenu, laser se gasi i čeka se sledeća rotacija. Kao izlaz se dobija CSV dokument sa koordinatama svih detektovanih tačaka.

Svetlost lasera se prostire u vidu ravni, i presek te ravni i objekta predstavlja jednu ili nekoliko linija. Te linije su širine veće od jednog piksela, a najčešće su okolni pikseli šumovi lasera, dok je glavni piksel u sredini. Zbog toga je neophodno da se sa slike izdvoje linije širine od tačno jednog piksela.

Pošto je laser crven, vrši se binarizacija slike tako da samo najveći intenziteti crvene boje ostanu na slici.

Nakon binarizacije se gube pojedini delovi linija i one postaju isprekidane iako ne bi trebalo da budu. Da bi se linije ponovo spojile primeњуje se dilatacija, koja povećava već formirane celine belih piksela.

Poslednja faza je stanjivanje linije Zhang-Suen algoritmom. Za svaki piksel na slici posmatraju se njegovi najbliži susedi. Cilj algoritma je da ukloni sve konturne piksele iz skeleta linije i, nakon više iteracija, potpuno stanji liniju. Svaka iteracija se sastoji iz dva dela: prvi teži brisanju piksela koji su gore-levo i dole-desno u odnosu na izabrani piksel, a drugi brisanju onih gore-desno i dole-levo. Krajnje tačke i povezanost piksela su očuvani. Ispitivanje određenih uslova algoritma se vrši sve dok se ne postigne stacionarno stanje i prilikom neke iteracije nijedan piksel ne bude obrisan. Tako se dobija linija širine koja inosi tačno jedan piksel (Zhang i Suen 1984).

Nakon obrade slike, sledi pretvaranje tačaka iz koordinatnog sistema kamere u globalni. Svaka tačka se pomoću rotacionih i translacionih vektora dobijenih kalibracijom ravni postolja transformiše u sebi odgovarajuću u koordinatnom sistemu čiji je početak u centru postolja. Sve tačke se skladište u jedan CSV dokument.

## Hipoteze

1. Udaljavanjem lasera od kamere će se povećati zasenčavanje.

Teorija: Zasenčavanje predstavlja situaciju kada kamera ne vidi liniju lasera zbog oblika tela

koje se skenira (slika 6 levo). Na tim pozicijama će u finalnoj rekonstrukciji ostati rupe.

Ako geometrijski predstavimo dve postavke skenera sa različitim udaljenostima lasera i poravnamo ih tako da se ravni lasera poklapaju (slika 6 desno), tada obe postavke rekonstruišu tačku koja se nalazi na pravnoj OL. Na slici 6 desno tačka C predstavlja poziciju kamere kada je laser bliži, dok je C' pozicija kamere kada je laser udaljeniji, L i L' su pozicije lasera, a O centar postolja. Ako izaberemo nasumičnu tačku T, tako da kroz duž OT kamere ne mogu ništa da vide, tada kamera C' ne vidi ni jednu tačku koja se nalazi na duži OB, dok kamera C ne vidi ni jednu tačku koja se nalazi na duži OA. Tačka A je između tačaka O i B što znači da kamera C' vidi manje diskretnih tačaka od kamere C. Pošto je C'L' veće od CL sledi da je laser udaljeniji od kamere u prvom slučaju što potkrepljuje teoriju hipoteze da će se udaljavanjem povećati zasenčenje.

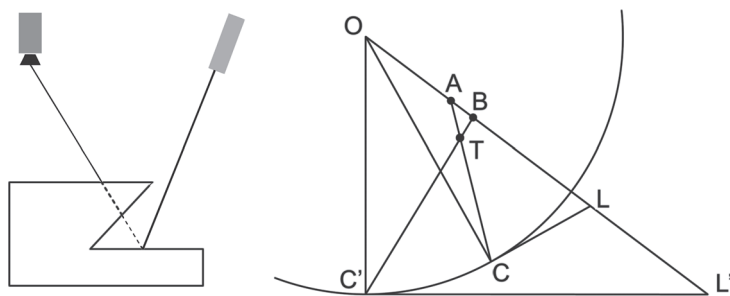
Konkretan primer je da ako se tačka koju treba rekonstruisati nalazi na duži AB, tada će je kamera C videti i odrediti njene kordinate dok druga (C') neće.

Metrika: Zasenčavanje umanjuje broj tačaka u skupu izdvojenih tačaka. Zbog toga broj tačaka

predstavlja direktan uvid u zasenčavanje. Primenjen je filter koji spaja tačke koje se nalaze na udaljenosti manjoj od 0.7mm (Merge Close Vertices, MeshLab), ovim je otklonjeno gomilanje tačaka na vodoravnim površinama gde je više puta rekonstruisana ista tačka.

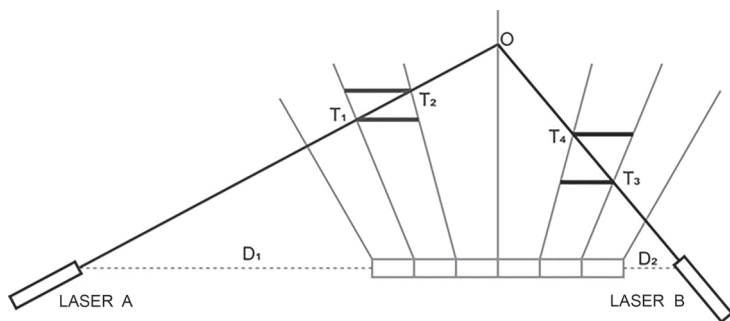
2. Udaljavanjem lasera od kamere će se povećati preciznost.

Teorija: Preciznost predstavlja meru koliko se dobijane koordinate tačke poklapaju sa odgovarajućim tačkama u referentnom modelu. Slikanje pomoću fotoaparata je diskretno detektovanje svetlosnih talasa koji padnu na senzor kamere, što znači da će jedan piksel na slici predstavljati zbir svih svetlosnih talasa koji padnu na njegovu površinu. Zbog toga piksel ne predstavlja tačku nego kvadrat u realnom sistemu (slika 7). Na slici su prikazani položaji dva lasera na različitim udaljenostima od kamere, D<sub>1</sub> i D<sub>2</sub>. Presek linije lasera A i predmeta su tačke T<sub>1</sub> i T<sub>2</sub>, a lasera B i predmeta tačke T<sub>3</sub> i T<sub>4</sub>. Veća preciznost podrazumeva manje rastojanje između dve susedne detektovane tačke. To rastojanje je srazmerno tangensu ugla između linije lasera i linije kamere. Laser A je udaljeniji od



Slika 6. Fizički i matematički model zasenčavanja

Figure 6. Physical and mathematical model of shadowing (C – position of camera when laser is closer, C' – position of camera when laser is further away, L and L' – positions of laser, O – center of stand)



Slika 7. Šematski prikaz preseka ravni lasera, predmeta i piksela

Figure 7. Schematic view of the intersection of laser, object and pixel plane

ugao lasera A manji od ugla lasera B, rastojanje između tačaka  $T_1$  i  $T_2$  manje od rastojanja između  $T_3$  i  $T_4$  i preciznost u slučaju lasera A je veća. U teoriji bi značilo da se maksimalna preciznost dostiže beskonačnim udaljavanjem lasera od kamere, međutim fizičke dimenzije skenera, kao i pojava zasenčenja ne dozvoljavaju velika rastojanja.

Metrika: Nakon dobijenog CSV dokumenta sa koordinatama svih tačaka u programu CloudCompare (EDF R&D 2013) se upoređuje dobijeni oblak tačaka sa referentnim modelom. Najpre se primenjuje algoritam najbliže iterativne tačke (iterative closest point – ICP), koji za svaku tačku u oblaku nalazi njemu najbližu u modelu. Nakon svake iteracije izračunava se kvadratna sredina (root mean square) i oblak se približava modelu. Poravnavanje traje sve dok razlika kvadratnih sredina dveju uzastopnih iteracija nije manja od jednog mikrometra. Zatim se kao konačan rezultat uzima srednja vrednost rastojanja svih tačaka iz oblaka u odnosu na referentni model.

## Rezultati

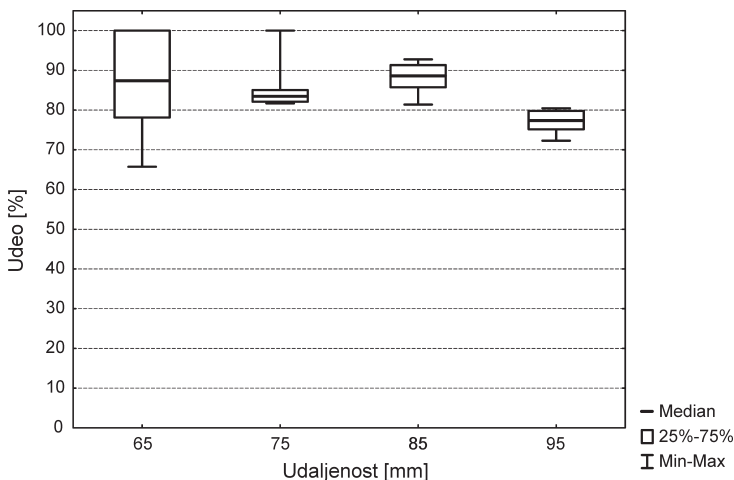
Skenirani su sledeći modeli:

- Cilindar, poluprečnik osnove 25 mm i visina 50 mm
- Kvadar, dimenzije 40 × 50 × 60 mm
- Brod, dimenzija 70 × 35 × 55 mm (Creative Tools 2015)

Za svaki model je izvršeno skeniranje na 8 različitih pozicija lasera (4 sa leve i 4 sa desne strane kamere), a za svaku poziciju po tri skeniranja gde se menjala pozicija objekta na postolju. Prvo merenje na svakoj poziciji vršeno je tako da se objekat postavi što bliže sredini postolja.

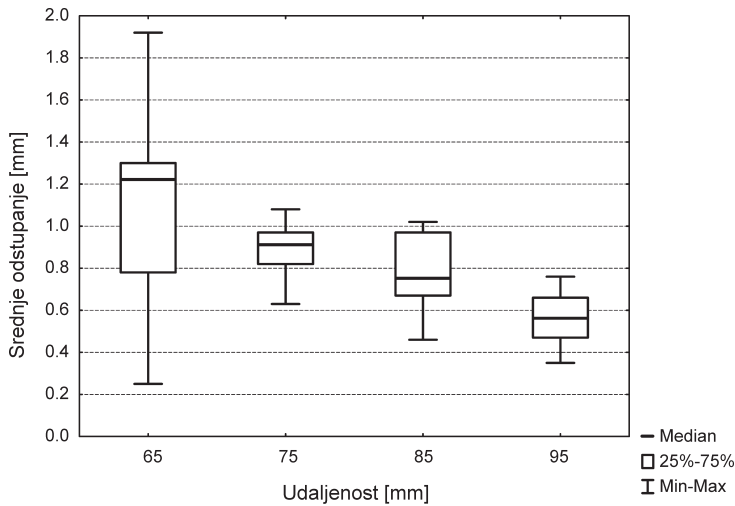
## Analiza zasenčenja

Od tri merenja za svaki model uzimana vrednost sa najviše tačaka. Razlog je to što broj tačaka u velikoj meri zavisi od pozicije na postolju, pa je potrebno izabrati onu na koju je to najmanje uticalo. Za svako skeniranje modela određen je procenat pronađenih tačaka u odnosu na najbolje skeniranje istog modela na istoj poziciji lasera. Grafik je prikazan na slici 8: na horizontalnoj osi su udaljenosti lasera od kamere, a na vertikalnoj udeo rekonstruisanih tačaka. Iako srednje vrednosti, odnosno medijane, monotono ne opadaju, ukupni podaci ukazuju na osnovni trend smanjenja udela rekonstruisanih tačaka sa povećanjem udaljenosti, što ide u prilog hipotezi 1. Veliko rasipanje dobijenih vrednosti pri manjim udaljenostim može biti posledica činjenice da je pri promeni udaljenosti rađena nova kalibracija zbog čega je objekat pomeran. Objekat se nakon kalibracije nije mogao vratiti na isto mesto kao u prethodnim merenjima, što je uticalo na rezultate. U narednim radovima bi trebalo kontrolisati poziciju objekta kako bi se dobila validna merenja i sprečilo veliko rasipanje rezultata, čime bi se i hipoteza 1 pouzdanije ispitala.



Slika 8. Udeo rekonstruisanih tačaka u odnosu na najbolji rezultat za četiri različite udaljenosti lasera od kamere

Figure 8. Graph representing dependence of percentage of reconstructed points normalized by the best result of laser-to-camera distance



Slika 9. Medijana odstupanja od prave vrednosti za različite udaljenosti lasera od kamere za sva tri modela

Figure 9. Graph of dependence of median error from laser-to-camera distance for all three models

## Određivanje preciznosti

Predmet je pomeran po postolju kako bi se videlo kako utiče pozicija predmeta na preciznost. Rezultat je bolji što je predmet bliži centru. Međutim, neće se uvek moći postaviti predmet tačno u centar, tako da, prilikom specifikacije skenera, sve parametre treba generalizovati, kako bi bili validni u svim slučajevima. Zbog toga je od tri merenja na istoj poziciji lasera uzimana medijana. Pošto pomeranje predmeta može značajno da utiče na aritmetičku sredinu, ona u ovom slučaju nije adekvatan parametar. Na slici 9 je prikazan grafik zavisnosti medijane greške skeniranja od udaljenosti lasera od kamere. Sa grafika se može primetiti da se greška smanjuje kako se laser udaljava, što potvrđuje hipotezu broj 2.

## Komparacija sa drugim skenerima

Na osnovu podataka iz tabele 1 dolazi se do zaključka da je najmanja dobijena greška od 0.55mm što znači da je preciznost u rangu sa preciznostima Ciclop-a i MakerBot-a, koji su svojevrsni standard za niskobudžetne 3D skenerne opšte namene. Ono što se posebno izdvaja kao mana konstruisanog skenera jeste veoma niska rezolucija kamere, čije poboljšanje svakako može doprineti boljim rezultatima. Takođe, procesuiranje jedne slike kod konstruisanog skenera traje 4 puta duže nego kod ostalih, tako je optimizacija tog dela skeniranja neophodna u budućim istraživanjima. Prednost korišćenog lasera jeste da se laser i kamera mogu pomerati, što može biti predmet daljih istraživanja.

Tabela 1. Uporedno prikazivanje specifikacija skenera

| Model                             | Petnica Skener | ATLAS Murobo | BQ Ciclop  | MakerBot Digitizer |
|-----------------------------------|----------------|--------------|------------|--------------------|
| Broj lasera                       | 1              | 2            | 2          | 2                  |
| Preciznost [mm]                   | 0.55           | 0.25         | 0.5        | 0.5                |
| Broj koraka po rotaciji           | 400            | do 3200      | do 1600    | 800                |
| Trajanje skeniranja [min]         | 12             | 12+          | 2-8        | 12                 |
| Maksimalne dimenzije objekta [mm] | 130x130        | 200 × 150    | 200 × 200  | 200 × 200          |
| Rezolucija senzora [Mpx]          | 0.3            | 1.3          | 0.92       | 5                  |
| Kalibracija                       | Ručna          | Ručna        | Automatska | Automatska         |
| Podesiva pozicija lasera          | Da             | Da           | Ne         | Ne                 |

## Zaključak

Prva hipoteza koja tvrdi da će efekat zasenčavanja biti veći na daljim pozicijama od kamere nije potvrđena. Analizom slika iz kojih su rekonstruisani modeli zaključeno je da pozicija objekta u velikoj meri utiče na efekat zasenčavanja. To je evidentno na modelu valjka. On je zaobljen, i stoga ne bi trebalo da pri rekonstrukciji bude delova koji su zasenčeni. Međutim ako valjak nije tačno centriran, na rekonstruisanom modelu se javlja kružna rupa oko centra. Ovaj problem se može rešiti stavljanjem referentnog modela na istu lokaciju pri promeni pozicija lasera. To nije bilo moguće u našem slučaju, jer se laser iznova morao kalibrisati pri promeni pozicije. Ovo se može rešiti pamćenjem kalibracija za svaku poziciju. Pri tom se smanjuje tačnost merenja, jer je nemoguće ručno prebaciti laser na poziciju na kojoj je kalibrisan. Drugo rešenje jeste da se konstruiše držač koji će predmet zadržati na sredini postolja prilikom promene pozicije lasera. Taj držač ne bi ulazio u finalnu verziju skenera.

Druga hipoteza koja tvrdi da će se udaljavanjem lasera od kamere povećati preciznost je potvrđena. Podaci sa grafika pokazuju jasnu korelaciju između udaljenosti lasera i preciznosti. Problem koji je uočen tokom obrade podataka su zalutale tačke koje su posledica prelamanja svetlosti lasera na oštrim ivicama. Međutim broj takvih tačaka u odnosu na ukupan broj je jako mali, te ne utiču u značajnoj meri na validnost izmerenih podataka.

## Literatura

Creative Tools 2015. #3DBenchy – The jolly 3D printing torture-test by CreativeTools.se. Dostupno na <https://www.thingiverse.com/thing:763622>

LMI Technologies 2013. A Simple Guide To Understanding 3D Scanning Technologies. Dostupno na [http://www.cimtecautomation.com/promo/pdfs/EBOOK\\_A\\_Simple\\_Guide\\_To\\_3D.pdf](http://www.cimtecautomation.com/promo/pdfs/EBOOK_A_Simple_Guide_To_3D.pdf)

Hartley R., Zisserman A. 2003. *Multiple View Geometry In Computer Vision*. Cambridge University Press

Derpanis K. 2010. Overview of the RANSAC Algorithm. Dostupno na [http://www.cse.yorku.ca/~kosta/CompVis\\_Notes/ransac.pdf](http://www.cse.yorku.ca/~kosta/CompVis_Notes/ransac.pdf)

Lanman D., Taubin G. 2009. *Build Your Own 3D Scanner: 3D Photography for Beginners*. ACM SIGGRAPH

Zhang T.Y., Suen C.Y. 1984. A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns. *Communications of the ACM*, **27** (3): 238.

EDF R&D 2013. CloudCompare User Manual For Version 2.1. Dostupno na [https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/Documentation\\_n\\_CloudCompare\\_version\\_2\\_1\\_eng.pdf](https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/Documentation_n_CloudCompare_version_2_1_eng.pdf)

---

*Aleksa Račić and Aleksa Stefanović*

## 3D Scanner

Here we have designed, built and tested a 3D scanner which works on the profile scanning principle with a laser and a camera. The scanner works using laser 3D triangulation technology. The laser's position relative to the camera was varied in order to find the optimal configuration. The 3D scanner was tested on three printed models which are the standard models for testing 3D scanners (a cube, a cylinder and a ship model). The models were scanned and the obtained point cloud was compared to the original mesh. The results showed that the scanner precision grows with distance between the laser and the camera. The average deviation of points from the reference model decreased from 1.2 mm to 0.6 mm when the camera-laser distance was changed from 65 mm to 95 mm. However, the optimal position was not obtained due to the failure of correlation of amount of shadowing and distance theory in practice. The results showed that accuracy is more affected by the shape and the position of the model. The scanner was comparable to commercially available scanners in terms of precision, but was significantly slower in execution. 