

Projektiranje 3D skenera strukturiranim svjetlom

Huško, Goran

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:765949>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-11**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODIJEL
Stručni studij Strojарstva

Goran Huško

**Projektiranje 3D skenera
strukturiranim svjetlom**

Završni rad

Karlovac, 2015. godina.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODIJEL
Stručni studij Strojарstva

Goran Huško

**Projektiranje 3D skenera
strukturiranim svjetlom**

Završni rad

Dr.sc. Medić Srđan

Karlovac, 2015. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovim putem zahvalio bih se mag. ing. stroj. Groš Josipu i mentoru dr.sc. Medić Srđanu na kritikama, pohvalama, stručnim savjetima i smjernicama u vezi ovog završnog rada.

Također zahvalio bih se svojim roditeljima na podršci tokom ovih godina studiranja, bez vas ovo ne bi bilo ostvarivo.

Goran Huško



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Strojarsva

Usmjerenje: Strojarske konstrukcije

Karlovac, 17.11.2015

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Goran Huško**

Matični broj: 0110611092

Naslov: **PROJEKTIRANJE 3D SKENERA STRUKTURIRANIM SVJETLOM**

Opis zadatka:

Današnji trend razvoja novih proizvoda zahtjeva novi pristup u mjerenju i kontroli geometrije oblika. Neprestani razvoj trodimenzionalnih beskontaknih metoda dovodi do ekspanzije različitih mjernih uređaja za brzu kontrolu geometrije oblika. Od današnjih uređaja se zahtjeva velika brzina i velika točnost mjerenja.

Student treba u radu objasniti:

Osnovne 3D skeniranja

Programski paketi za skeniranje

Konstrukcija 3D skenera sa standardnim elementima

Koristiti odgovarajuću dostupnu literaturu, priručnike i podatke.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

02.09.2015

12.11.2015

17.11.2015

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

dr.sc. Srđan Medić dipl.ing.

dipl.ing.Marijan Brozović

POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	5
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	6
BROJ CRTEŽA.....	7
POPIS OZNAKA	8
SAŽETAK.....	9
1. UVOD.....	10
2. 3D skeniranje	11
2.1. 3D skener	11
3. Podjela 3D skenera	12
3.1. Kontaktni 3D skeneri (CMM – coordinate measuring machine).....	12
3.2. Bez kontaktni 3D skeneri	13
3.2.1. Aktivni	13
3.2.1.1. Time of flight	13
3.2.1.2. Triangulacija	15
3.2.2. Pasivni.....	18
3.2.2.1. Stereoskopski sustavi	18
3.2.2.2. Fotometrijski sustavi.....	18
3.2.2.3. Siluetne tehnike.....	18
3.2.2.4. Fotogrametrija.....	19
3.2.2.5. Stereofotogrametrija	19
4. 3D skeniranje strukturiranim svjetlom	20
4.1. Princip rada	20
4.2. Faze i njihova uloga	21
5. Teorija svjetlosti	23
5.1. Svjetlost.....	23
6. Teorija boje.....	25
6.1. Ultraljubičasti spektar - UV	25
6.2. Vidljivi spektar – spektar duginih boja	26
6.3. Infracrveni spektar	26
6.4. Komplementarne boje	26
7. Senzori, okidači i povezivanje kamera	29
7.1. Senzori	29
7.2. CCD	30
7.3. CMOS	30
7.4. Okidači - Global Shutter vs. Rolling Shutter	31
8. Fotoaparat	32
8.1. Kvaliteta leće.....	32
8.2. Nesigurnost (točnost) i rezolucija	32
8.3. Ograničenja 3D skenera svjetlom	34
8.3.1. Svijetlo ambijenta	34
8.3.2. Linija pogleda	34

8.3.3. Prozirnost, sjajnost i prozračnost	34
9. Ispitivanja	35
9.1. Scena A	35
9.2. Scena B	36
10. Obrada na računalu	38
10.1. ATOS CORE 300.....	38
10.2. Kalibracija ili umjeravanje.....	40
10.3. Digitalizacija uzorka	42
10.4. Iz točkastog oblaka u poligone.....	47
11.1. Kamera	49
11.1.1. Basler ace acA2500-14uc.....	49
11.2. Projektor.....	50
11.2.1. ASUS S1	51
12. Konstrukcija.....	53
12.1. Kamera	53
12.2. Kućište	54
12.2.1. Ventilatori	54
12.2.2. Elektronička pločica.....	55
12.2.3. Otvori za kamere i leću projektora.....	56
12.2.4. Provrti	57
LITERATURA.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1.	Specifikacije komponenata kod sistema za procesuiranje fotografije.....	10
Slika 2.	Područja efikasnosti 3D skenera	12
Slika 3.	Revo kontaktni 3D skener	13
Slika 4.	Primjer LIDAR skena iz zraka	15
Slika 5.	Trokut triangulacije	16
Slika 6.	Primjer portabilnog 3D laserskog skenera sa rotacionim stolom.....	17
Slika 7.	Ručni stereoskopski 3D skener	18
Slika 8.	Primjer profesionalnog sustava fotogrametrije	19
Slika 9.	3D skeniranje strukturiranim svjetlom	20
Slika 10.	Tri faze, jedna za drugom pomaknute za 1/3	21
Slika 11.	Produkt osvjetljenja i refleksije jest stimulans boje	23
Slika 12.	Apsolutna kvantna efikasnost senzora Kodak KAI 4022 za kamere u boji (lijevo) i za monokromatske kamere (desno).....	24
Slika 13.	Valne duljine svjetla od gama zraka do radio frekvencije	25
Slika 14.	Oswaldov krug boja.....	27
Slika 15.	Prikaz utjecaja monokromatskog osvjetljenja na boje	27
Slika 16.	CCD i CMOS senzor	29
Slika 17.	Standardni tipovi senzora sa lijeva prema desno: RGB, Super CCD, Foveon.....	29
Slika 18.	Pojačanje signala kod CCD (lijevo) i CMOS (desno) senzora	31
Slika 19.	Odnos točnosti i rezolucije	33
Slika 20.	Odnos gustoće točaka i raspodjele točaka	33
Slika 21.	ATOS CORE 500 i ATOS CORE 300.....	38
Slika 22.	Vrste postave ATOS CORE 3D skenera.....	39
Slika 23.	ATOS CORE 300 na Studio Stand Kit	40
Slika 24.	Kalibracijski objekti za optičke mjerne sustave	41
Slika 25.	Mjerenje temperature kalibracijske ploče (lijevo) i postupak kalibriranja (desno)	41
Slika 26.	ATOS softver uživo.....	43
Slika 27.	Prikaz mjernih točaka (lijevo) i vizualizacija prvog skena (desno)	44
Slika 28.	ATOS softver: spojeni sken	44
Slika 29.	ATOS softver: brisanje podloge.....	45
Slika 30.	ATOS softver: skeniranje druge strane	45
Slika 31.	ATOS softver: spajanje referentnih točaka	46
Slika 32.	ATOS softver: konačni 3D model uzorka.....	46
Slika 33.	ATOS softver: poligonizacija.....	47
Slika 34.	ATOS softver: detalji poligona i jasno vidljiva razlika gustoće poligona kod zakrivljene površine i ravne površine.....	48
Slika 35.	acA2500-14uc	50
Slika 36.	Karakteristike acA2500-14uc kamere	50
Slika 37.	ASUS S1 piko projektor.....	51
Slika 38.	ASUS S1 karakteristike.....	51
Slika 39.	3D model acA2500-14uc.....	53
Slika 40.	Provrti acA2500-14uc	54
Slika 41.	3D model kućišta.....	54
Slika 42.	3D model ventilatora 40mm x 40mm i anti-vibracijskih gumica	55

Slika 43.	3D model elektroničke pločice	56
Slika 44.	Razmaknice se nalaze u crvenom okviru	56
Slika 45.	2D prikaz prednje strane kućišta	57
Slika 46.	3D model leće projektora ASUS S1	57
Slika 47.	2D prikaz provrta na kućištu 3D skenera	58
Slika 48.	2D prikaz bazne i radne udaljenosti	60

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati ispitivanja scene A	35
Tablica 2. Rezultati ispitivanja scene B	36
Tablica 3. Komponente i cijena projekta.....	60

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA

Basler Ace acA2500-14uc (#1)

Baza kućišta (#2)

Sklop (#3)

Sklop hidden lines (#3.1)

Sklop exploded view (#3.2)

3D scanner (#3.3)

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
KB	KiloBajt	količina memorije
MB	MegaBajt	količina memorije
GB	GigaBajt	količina memorije
TB	TeraBajt	količina memorije
Hz	Herz	frekvencija
kHz	kiloHerz	frekvencija
ps	pikosekunda	vrijeme
nm	nanometar	duljina
λ	nm	valna duljina
$I(\lambda)$	nm	spektar osvjjetljenja
$R(\lambda)$	nm	relativna refleksija
$C(\lambda)$	nm	stimulans boje
$S(\lambda)$	nm	spektralna osjetljivost fotoaparata
IR	nm	Infra Red (750nm-3mm)
UV	nm	Ultra Violet (400-100nm)
UVA	nm	UVA (400-315nm)
UVB	nm	UVB (315-280nm)
UVC	nm	UVC (<280nm)
MPx	Mega Pixel	veličina rezolucije
α_1	K^{-1}	koeficijent toplinskog rastezanja
Oznaka	Jedinica	Opis
Oznaka 1	Jedinica	Opis oznake
Oznaka 2	Jedinica	Opis oznake
Oznaka 3	Jedinica	Opis oznake
Oznaka 4	Jedinica	Opis oznake

SAŽETAK

U završnom radu raspravljati ćemo o 3D skeniranju i korištenju 3D skenera za razne potrebe. Započeti ćemo sa opisom 3D skeniranja te podjelom u grupe s obzirom na vrstu tehnologije koju koriste.

Prvi dio završnog rada će se baviti primjenom trodimenzionalnih optičkih uređaja u različitim granama industrije. Nabrojati ćemo u kojim se granama industrije koristi koja tehnologija i zašto, te koja su ograničenja iste.

Drugi dio završnog rada bavi se problematikom programskih paketa koji su nužni za dobivanje trodimenzionalnih oblika. Razmotriti će se neki od programskih paketa dostupnih na tržištima te će se objasniti princip rada istih.

Završni dio biti će izrada konstrukcijskog rješenja tj. hardverskog dijela trodimenzionalnog optičkog uređaja. Cilj je sa standardnim dijelovima dostupnim na tržištu izrada 3d skenera po znatno pristupačnijoj cijeni.

1. UVOD

Iako moderno 3D skeniranje izgleda kao nešto što je preuzeto sa filmskih platna, tehnologija triangulacije koja se koristi kod 3D skeniranja seže duboko u povijest.

Prije 5000 godina Babilonci i Egipćani su već koristili tehnike triangulacije, Euklid¹ i Arhimed² postavili su osnove trigonometrije prije nekih 2500 godina, dok je Snell von Rojen³ proučavao zakone triangulacije još u 17. stoljeću (Breuckmann, 2014).

Praktični 3D skeneri koji mogu prenijeti trodimenzionalnu sliku modela sa dovoljnom rezolucijom napravljeni su prije tek 25 godina, nakon desetljeća teoretskog pristupa i prototipa baziranih na najnovijim razvojem u procesuiranju digitalne fotografije. Da bismo razumjeli razliku između skenera koji su bili pioniri ove tehnologije i današnjih mogućnosti 3D skenera, moramo pregledati razvoj i napredak tehnologije procesuiranja fotografije Slika 1.

Year	CPU / RAM	Image memory	HD capacity	Camera resolution
1980	64 KB	512 KB (*)	5 MB	(**)
1985	512 KB	2 MB (*)	20 MB	256 KB
1990	2 MB	16 MB (*)	100 MB	1 MB
2000	200 MB	100 MB	GB	4 MB
2010	4 GB	2 GB	TB	8 MB
2014	64 GB	32 GB	10 TB	16 MB

Slika 1. Specifikacije komponenata kod sistema za procesuiranje fotografije

U 25 godina od pojave prvih praktičnih 3D skenera, komponente sistema za procesuiranje digitalne fotografije su se znatno promijenile. Kapacitet koji je direktno povezan sa rezolucijom i točnosti 3D skenera je doživio vrhunac, te je daljnji napredak gotovo nepotreban za potrebe 3D skenera pošto se već sada točnost skeniranih modela mjeri u mikrometrima.

¹ Euklid (grč. Εὐκλείδης, oko 330. pr. Kr. - oko 275. pr. Kr.), starogrčki matematičar

² Arhimed (grč. Ἀρχιμήδης, *Arkhimédēs*, oko 287.-212. pr. Kr.) bio je grčki fizičar, astronom i jedan od najvećih matematičara starog vijeka

³ Snellius ([sne'lius], Willebrord (pravo prezime Snell van Royen), nizozemski astronom i matematičar koji je razradio metodu triangulacije

2. 3D skeniranje

Već smo svi upoznati sa fotografijom koja bi laički rečeno predstavljala 2D skeniranje. Sve što se nalazi na fotografiji možemo opisati sa 2 dimenzije, visinom i duljinom, ma koliko god puta okinuli fotografiju.

3D skeniranje dodaje još jednu dimenziju, dubinu, koja bi na računalu sa visinom i duljinom predstavljala virtualni 3D model onoga što skeniramo.

Postoje razni načini tj. tehnologije 3D skeniranja te ćemo neke od njih i opisati, dok ćemo druge samo nabrojati. Kao što je najavljeno u uvodu ovoga rada, većina komercijalnih 3D skenera koji se danas nalaze na tržištu rade na principu triangulacije.

2.1. 3D skener

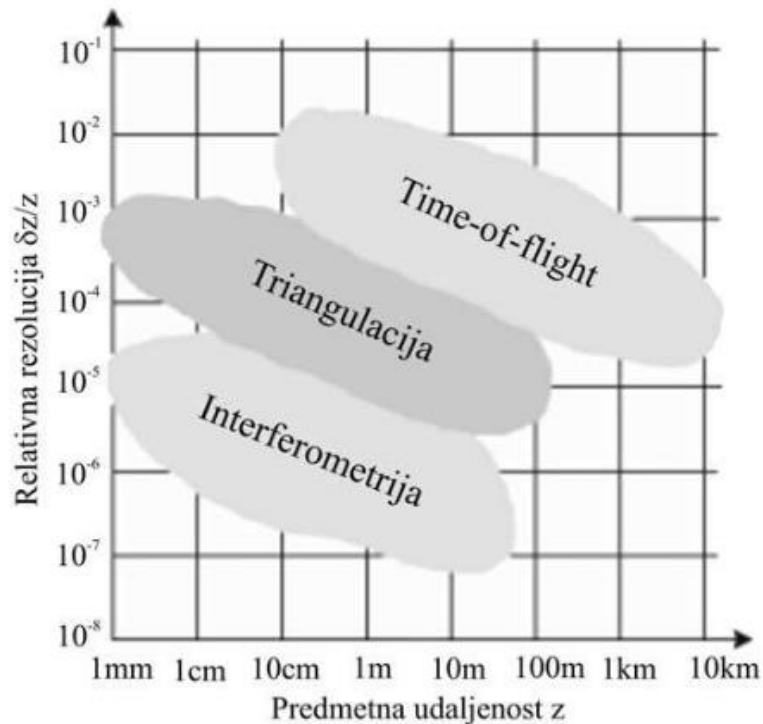
3D skener je uređaj koji analizira prostor i pri tom prikuplja podatke o obliku i strukturi predmeta kojeg skenira. Dobiveni podaci se tada mogu iskoristiti za izradu trodimenzionalnih modela. Osim za filmsku industriju i računalne igre, druga bitna primjena 3D skeniranja i izrade modela je industrijski dizajn i dokumentacija arheoloških nalaza.

Dakle, 3D skener nije moguće iskoristiti bez računalne potpore, a samim time i računalnog paketa koji će kontrolirati prihvata i obradu podataka na računalu.

3. Podjela 3D skenera

Vrste 3D skenera se mogu podijeliti na kontaktne i bez kontaktne, dok se bez kontaktne još mogu podijeliti na aktivne i pasivne.

Svaki od ovih načina skeniranja ima svoje prednosti i mane, nabrojati ćemo neke od njih. Slika 2 prikazuje izbor 3D skenera za određene udaljenosti i veličinu uzorka skeniranja.



Slika 2. Područja efikasnosti 3D skenera

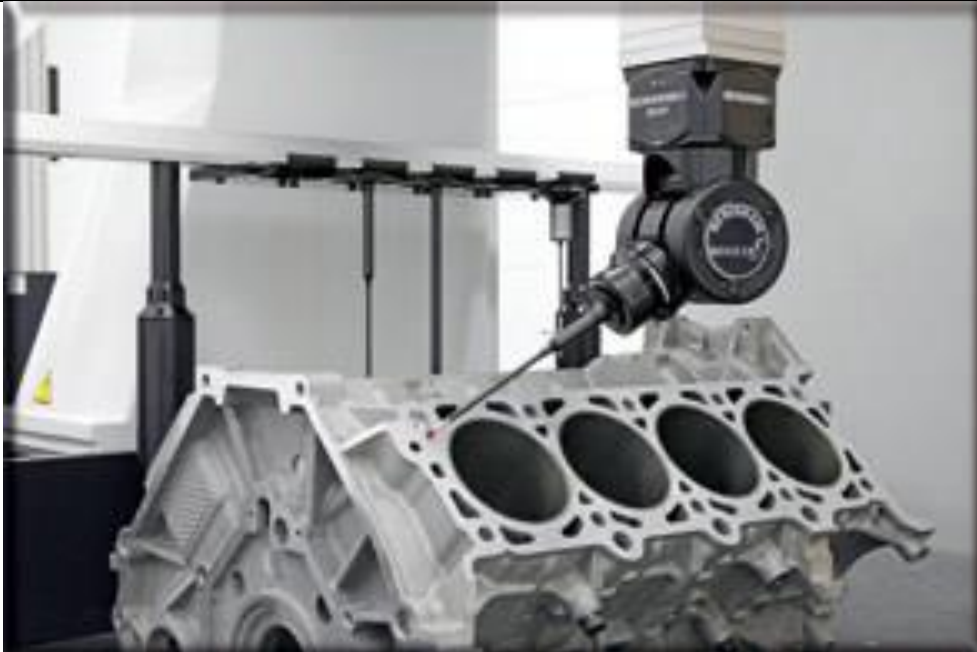
3.1. Kontaktne 3D skeneri (CMM – coordinate measuring machine)

Kontaktne 3D skeneri su uređaji koji dodirnom sondom dohvaćaju podatke o obliku modela koji se skenira.

Prednost ovog načina skeniranja je njegova preciznost koja se mjeri u mikrometrima, dok je glavna mana upravo kontakt.

Kontakt sam po sebi možda ne zvuči kao mana, ali kada je u pitanju skeniranje nekih vrijednih ili osjetljivih predmeta, kao što su arheološki artefakti, onda taj kontakt može izmijeniti ili oštetiti predmet.

Drugi nedostatak kontaktnog 3D skenera je njegova brzina. Najbrži kontaktni 3D skener može raditi na frekvenciji od nekoliko stotina Hz, dok optički skeneri mogu raditi i do 500kHz.



Slika 3. Revo kontaktni 3D skener

3.2. Bez kontaktni 3D skeneri

Kao što smo u uvodu ovog poglavlja napomenuli, bez kontaktni 3D skeneri se još dijele na dvije skupine, aktivni i pasivni. Glavna razlika u odnosu na kontaktne 3D skenere jest da tokom rada u niti jednom trenutku ne dotiču predmet skeniranja.

3.2.1. Aktivni

Aktivni skeneri imitiraju neku vrstu radijacije ili svjetlosti te detektiraju njeno odbijanje kako bi ispitali objekt ili okolinu. Mogući tipovi emisija uključuju svjetlost, ultrazvuk ili rendgenske zrake.

3.2.1.1. Time of flight⁴

Aktivni 3D skener koji koristi lasersku svjetlost kako bi ispitaio objekt ili okolinu. Radi na principu mjerenja vremena povratnog signala prilikom emitiranja lasera. Pošto je brzina svjetlosti „c“ poznata vrijednost, iz jednadžbe brzine

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

pri čemu je „v“ brzina svjetlosti, „s“ udaljenost, a „t“ vrijeme potrebno da se povratni signal očita, možemo izračunati udaljenost kao

$$s = v * t \quad (2)$$

⁴ Vrijeme leta – detektiranje vremena od pulsa lasera do povratnog signala

Zbog toga što laser prvo putuje do objekta, a zatim se vraća do detektora povratnog signala, udaljenost moramo podijeliti sa 2, pa je konačna udaljenost točke

$$s = \frac{v * t}{2} \quad (3)$$

Korištenjem podataka o udaljenosti i kutovima, tj. razmaku između izmjerenih točaka, svaka od točaka može biti prezentirana u prostoru sa svojim prostornim 3D koordinatama. Ovisno o uređaju i njegovoj namjeni, kontinuirano i brzo mjerenje takvih točaka predstavlja prostorno 3D skeniranje (Teutsch, 2007).

Princip rada može se opisati u četiri koraka:

1. Laser emitira optički puls
2. Puls (zraka) se odbija od objekta i vraća u prijamnik uređaja
3. Precizan mjerač vremena mjeri vrijeme između trenutka odašiljanja i primitka signala
4. Iz izmjerenog vremena izračunava se udaljenost korištenjem gore navedene formule

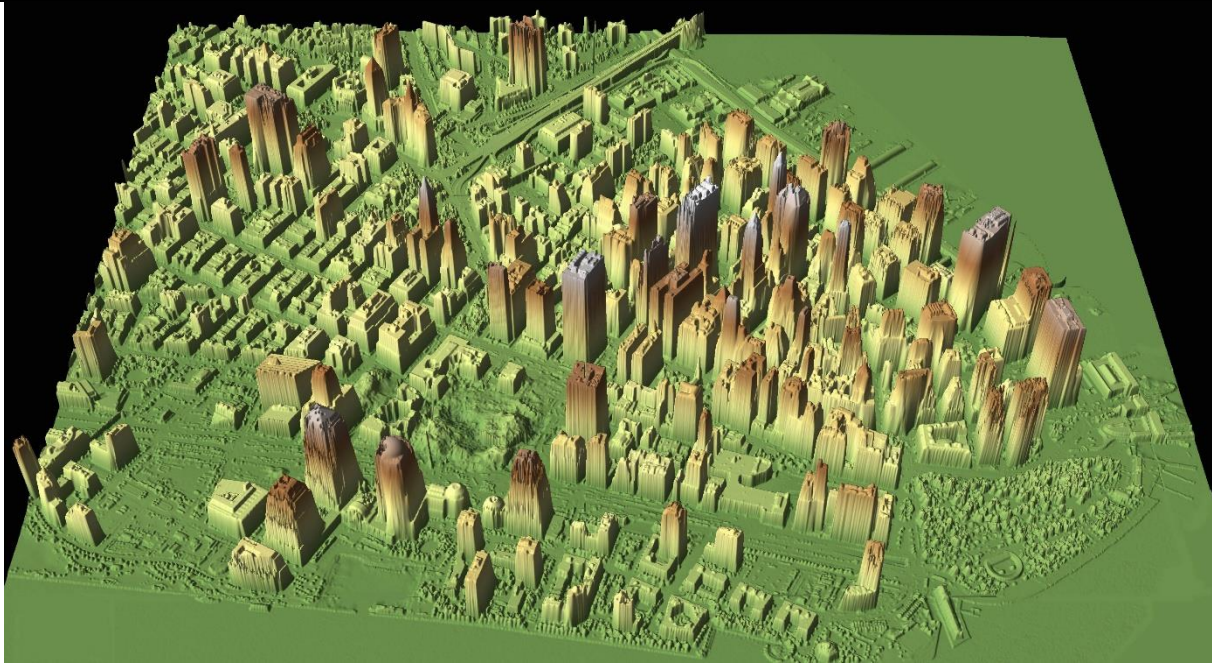
Tipični time of flight 3D skener može izmjeriti od 10 000 – 100 000 točaka svake sekunde, dok domet varira od 3m do čak 1500m. Preciznost time of flight 3D skenera ovisi o tome koliko precizno možemo izmjeriti vrijeme „t“ (3.3 pikosekunde⁵ su potrebne da svjetlost pređe 1 milimetar).

Mana time of flight 3D skenera je preciznost. Zbog velike brzine svjetlosti točno vrijeme povratnog signala je teško uhvatiti, te je točnost mjerenja udaljenosti relativno niska. Preciznost varira od 3-6mm i zato je pogodan za skeniranje arheoloških nalazišta i građevinskih tvorevina.

Najpoznatija vrsta takvog skenera je LIDAR – LIght Detection And Ranging⁶ Slika 4.

⁵ 1 ps = 10⁻¹² s

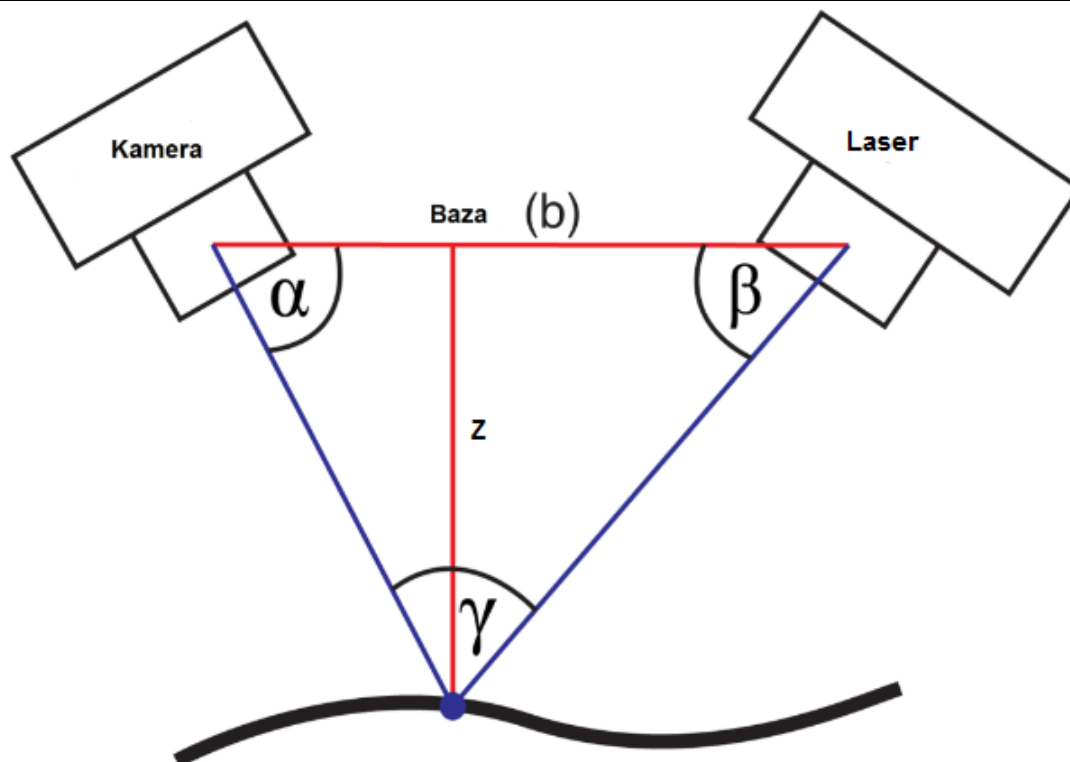
⁶ LIDAR – LIght Detection And Ranging - Detekcija svjetla i određivanje udaljenosti



Slika 4. Primjer LIDAR skena iz zraka

3.2.1.2. Triangulacija

Triangulacijski 3D skener koristi laser ili svjetlo kojim osvjetli predmet skeniranja, a pritom koristi kameru kojom locira lasersku točku. S obzirom na kut kamere naprema izvoru lasera, točka je bliže ili dalje na slici kamere te se izračunava koordinata točke. Triangulacija proizlazi iz odnosa kamere, lasera i točke koji zajedno formiraju trokut Slika 5.



Slika 5. Trokut triangulacije

Jedina poznata duljina u trokutu je udaljenost između kamere i izvora lasera, a poznati kutovi su kut pada lasera na predmet (β) skeniranja i kut kamere (α). Te tri veličine dovoljne su za potpuno definiran trokut te se preko toga dobiva koordinata točke. Kako bi se ubrzao proces skeniranja, koristi se laserska linija umjesto pojedinačne točke.

Istom tehnikom se koriste ručni 3D skeneri. Njihova prednost je mobilnost i male dimenzije pa se njima skeniraju uski prostori gdje ne bi stali klasični skeneri na stalku, npr. unutrašnjost auta.

Jednadžba računanja duljine z dobiva se iz:

$$z = \frac{b * \sin \alpha * \sin \beta}{\sin \gamma} \quad (4)$$

$$\gamma = \pi - \alpha - \beta \quad (5)$$

Triangulacijski skeneri su sve ono suprotno od Time-of-flight skenera. Imaju ograničen domet od nekoliko metara, ali njihova je preciznost relativno visoka.

Princip rada može se opisati u 4 koraka:

1. Laserska linija osvjetli predmet

2. Kamera slika lasersku liniju
3. Programski paket izračuna udaljenost točaka uzduž linije
4. Model se pomiče kružno na okretnom stolu



Slika 6. Primjer portabilnog 3D laserskog skenera sa rotacionim stolom

3.2.2. Pasivni

Pasivni skeneri ne emitiraju nikakvu vrstu radijacije, već se oslanjaju na detektiranje reflektirajuće radijacije ambijenta. Pasivne metode veoma su jeftine, jer u većini slučajeva nema potrebe za posebnim hardverom, nego samo za običnom digitalnom kamerom.

Naravno, mana im je točnost i domet koje su vrlo niski, pa čak i za kućnu uporabu.

3.2.2.1. Stereoskopski sustavi

Obično koriste dvije kamere koje su blago razmaknute i gledaju istu scenu.

Analiziranjem sitnih pomaka u slici između kamera, moguće je odrediti udaljenost točaka na slikama. Ova tehnika se bazira na istim principima funkcioniranja ljudskog stereoskopskog vida, a koristi se i kod snimanja 3D filmova zbog relativno jednostavne i jeftine izvedbe.



Slika 7. Ručni stereoskopski 3D skener

3.2.2.2. Fotometrijski sustavi

Uglavnom koriste jednu kameru, ali se uzima više fotografija pod različitim uvjetima rasvjete. To je ujedno i mana, jer model mora ostati nepomičan tokom okidanja fotografija pod raznim uvjetima rasvjete. Radi na principu očitavanja sjene na površini modela, te se preko intenziteta piksela sjene može odrediti lokalna orijentacija površine modela. Ovakav način skeniranja se još zove i 2.5D skeniranje.

3.2.2.3. Siluetne tehnike

Koriste obrise dobivene od serije fotografija oko trodimenzionalnog predmeta postavljenog pred jako kontrastnu pozadinu. Ti obrisi se tada spajaju u trodimenzionalni model, ali takvim pristupom se unutarnji dijelovi predmeta ne očitava ju.

3.2.2.4. Fotogrametrija

Vještina određivanja geometrijskih karakteristika predmeta koji se nalaze na fotografijama. Počinje se koristiti sredinom 19. st. Iako direktno ne spada pod 3D skeniranje već u fotografiranje i obradu fotografija u posebnim programima, konačan rezultat je 3D model.

Prednost ove tehnike je da je jeftina i jednostavna za koristiti. Microsoftov Kinect je već dulje vrijeme jeftina solucija za 3D skeniranje fotogrametrijom, a prihvata podataka je trenutna, što znači da je idealna solucija za skeniranje tijela i pokreta.

3D skeniranje fotogrametrijom se može obaviti sa samo jednom kamerom i obradom fotografija, pa čak i mobitelom. Profesionalni sustavi koriste više kamera kontroliranih računalskim okidačima i direktnom vezom sa računalskim paketom za obradu Slika 8.



Slika 8. Primjer profesionalnog sustava fotogrametrije

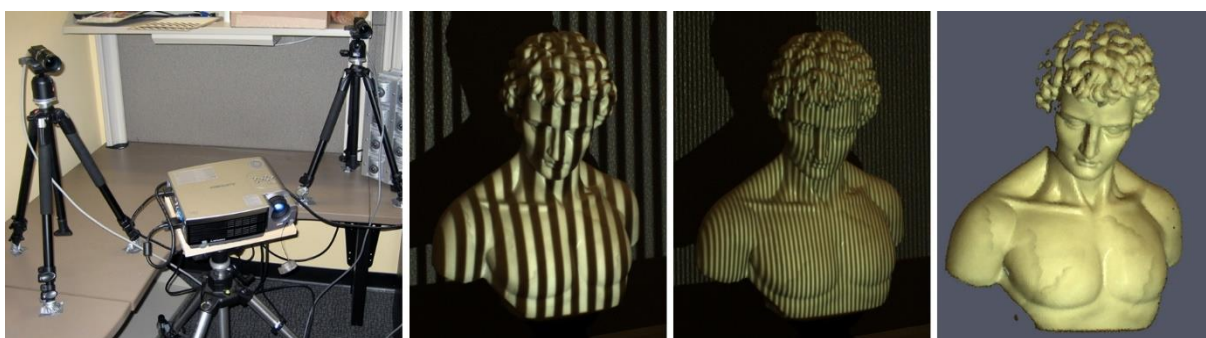
3.2.2.5. Stereofotogrametrija

Napredniji oblik fotogrametrije jer uključuje određivanje trodimenzionalnih koordinata na predmetu. One se određuju mjerenjem dvaju ili više fotografija napravljenih s različitih položaja. Određuju se zajedničke točke na fotografijama i tako triangulira položaj određene točke u prostoru.

4. 3D skeniranje strukturiranim svjetlom

Vjerojatno najpoznatiji i najrasprostranjeniji način 3D skeniranja poznat i pod nazivom „3D skeniranje bijelim svjetlom“, iako mogu koristiti svjetlo drugih boja.

Radi na principu triangulacije gdje projektor projicira svjetlo poznatog uzorka na predmet skeniranja, fotoaparat okida fotografije poznatog uzorka dok programski paket očitava njegovu deformaciju na predmetu skeniranja.



Slika 9. 3D skeniranje strukturiranim svjetlom

Kao što se iz Slika 9 vidi, poznati uzorak u ovome slučaju su linije raznih debljina. Osim što se taj uzorak projicira na predmet skeniranja on ima i faze pomaka koje ćemo pojasniti u daljnjem tekstu.

4.1. Princip rada

Kao što smo u uvodu ovog poglavlja napomenuli, 3D skeniranje strukturiranim svjetlom radi na principu triangulacije. Već smo opisali način određivanja koordinate tražene točke kod triangulacije s laserom u poglavlju Triangulacija 3.2.1.2.

Za razliku od laserske linije ili laserske točke, strukturirano svjetlo projicira projektor. Svjetlo može biti raznih boja i te boje imaju utjecaj na dobivene rezultate. Zbog toga što to svjetlo osvjetli kompletan model, proces je ubrzan s obzirom na triangulaciju laserskom linijom. Druga prednost jest ta da se osim oblika skeniranom modela može prenijeti i boja, uzorak, izgled.

Princip rada može se opisati u 5 koraka:

1. Projektor projicira faze na model
2. Fotoaparat okida fotografiju svake faze

3. Model se okreće za određen broj stupnjeva na rotacionom stolu (veći broj stupnjeva rezultira višom razinom detalja ali i većim brojem podataka za procesuiranje)
4. Ponavlja se korak 1., 2. i 3. sve dok se model ne vrati u početno stanje (okrene za 360°)
5. Obrada fotografija na računalu

4.2. Faze i njihova uloga

U ovom slučaju objasniti ćemo obradu u tri faze (Three Phase Processing), koja se sastoji od tri slike odnosno tri faze. Faza znači da ćemo projektirati prvu seriju crnih i bijelih linija i fotografirati objekt skeniranja. Nakon toga projektiramo drugu fazu koje su sada međusobno pomaknute za $1/3$ prema dolje.



Slika 10. Tri faze, jedna za drugom pomaknute za $1/3$

Sa lijeva prema desno vidi se pomak linija prema dolje. Treba paziti kako se fotografije šalju dekeru, jer moraju biti slikane tj. poslane pravim redoslijedom da bi se dobio 3D model na računalu.

Uloga ovih faza je jednaka laserskoj liniji kod triangulacije, samo što je ovdje umjesto jedne linije na modelu prikazano mnogo linija koje osvjetljaju cijeli model. Tim postupkom ubrzava se proces skeniranja u odnosu na triangulaciju laserskom linijom.

Najveći problem kod ovog načina skeniranja je dešifriranje položaja svake linije. Programski paket prati svaku pojedinu liniju zasebno, dakle svaka linija je u osnovi kao jedna laserska linija. Problem označavanja tj. praćenja svake linije obavlja se pomakom faze za $1/3$. Postoji još načina na koji se može pratiti pojedina linija, jedan od njih je i zakret linija, pa tako možemo alternativno mijenjati horizontalne i vertikalne linije pa samim time dobiti kod za svaku liniju.

Točnost ove tehnike skeniranja ovisi o nekoliko stvari:

1. Projektor – što je viša jakost svjetlosti to su bolji rezultati. Kontrast između bijelih i crnih linija jedan je od ključnih parametar skeniranja

2. Fotoaparat – što je veća rezolucija to bolji rezultati. Fotoaparat mora biti u fiksnom položaju, jer prilikom fotografiranja iz više kutova horizontalna i vertikalna udaljenost, tj. razlika udaljenosti učinila bi objekt većim ili manjim u virtualnom svijetu.
3. Zamračena soba – ne treba biti ekstremitet (totalni mrak), malo svjetla neće uništiti sken. Neke boje svjetla gotovo potpuno zanemaruju utjecaj okolnog svjetla na sken.
4. Objekt skeniranja – ovisno o veličini objekta koji se skenira možda je bolja neka druga metoda skeniranja. Kod objekta sa reflektirajućom površinom sken ispada izobličen. Isto vrijedi i za crne objekte. Objekti živih boja ispadaju jako dobro.

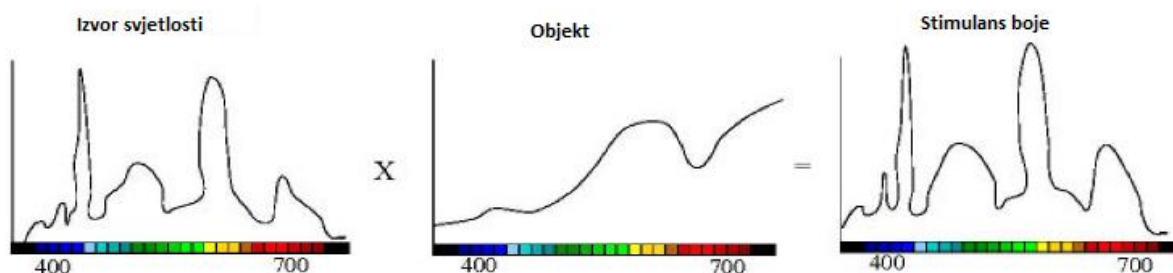
5. Teorija svjetlosti

5.1. Svjetlost

Prema (Klaas, 2014) da bi se fotografirala neka scena, ona mora biti osvijetljena. Uzmimo u obzir da je to bijela svjetlost koja se sastoji od svjetla bilo koje boje u spektru od 400nm (plava) do 750nm (crvena) Slika 11. Tu funkciju označavamo sa $I(\lambda)$, a predstavlja spektar osvijetljenja.

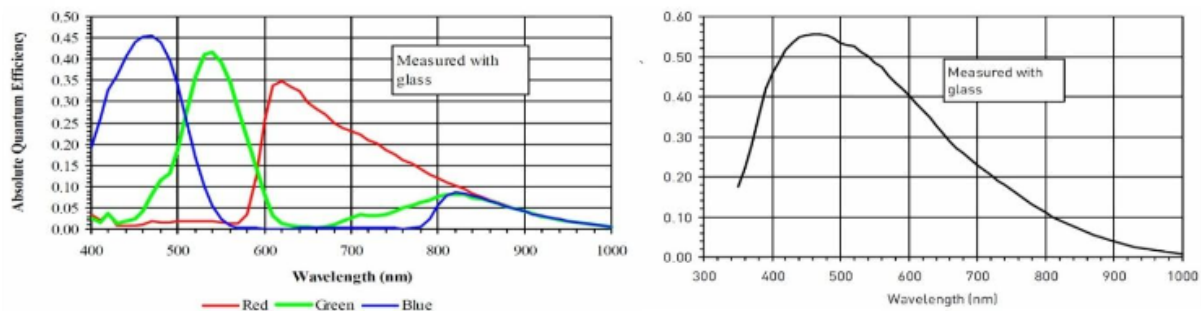
To svjetlo osvijetli scenu i dio te svjetlosti se reflektira prema leći fotoaparata. Dakle, slično kao i za izvor svjetlosti, relativna refleksija objekta po različitim valnim duljinama definira njegovu relativnu refleksiju $R(\lambda)$.

Količina svjetlosti koja se reflektira od objekta po različitim valnim duljinama dana je produktom $I(\lambda)$ i $R(\lambda)$. Budući da taj rezultat stimulira vid, nazvan je stimulans boje, a označen je sa $C(\lambda)$.



Slika 11. Produkt osvijetljenja i refleksije jest stimulans boje

Taj stimulans boje prolazi leću (zanemarujemo mogućnost da leća također promjeni stimulans) i dolazi do senzora gdje se još jednom množi, ovaj puta sa funkcijom spektralne osjetljivosti fotoaparata $S(\lambda)$. To u konačnici rezultira signalom koji se očitava na računaru za daljnje procesuiranje.



Slika 12. Apsolutna kvantna efikasnost senzora Kodak KAI 4022 za kamere u boji (lijevo) i za monokromatske kamere (desno)

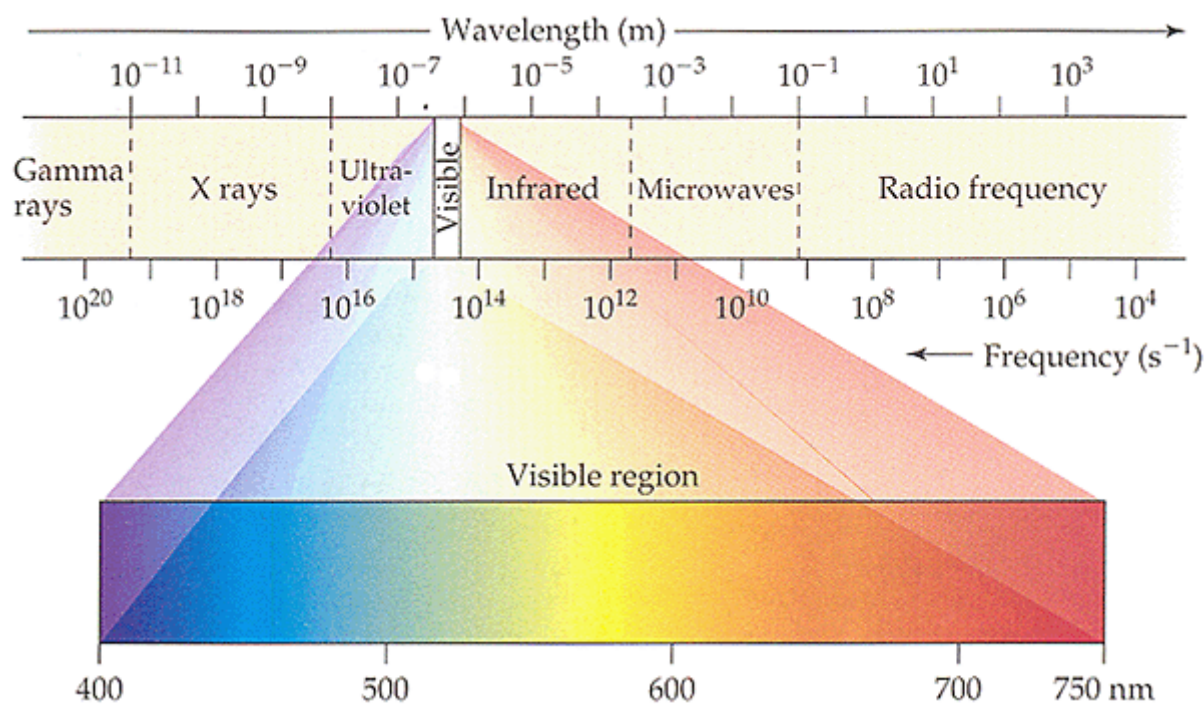
Iz jednostavne matematike koju smo opisali, vidimo da nam je potreban rezultat veći od nule duž svih valnih duljina. Dakle, želimo li koristiti plavo svjetlo trebamo plavo svjetlo u spektru projektoru kao i osjetljivost senzora fotoaparata u plavom spektru.

6. Teorija boje

U proteklom desetljeću skeniranje objekta bijelim svjetlom je postao standard kod pretvaranja stvarnih predmeta u 3D modele, 3D ispitivanjima, te mjerenju u usporedbi skeniranih podataka i CAD modela. Koristi se u autoindustriji, aero industriji, arheologiji, znanosti i medicini.

Da bismo razumjeli utjecaj boje koja osvjetljava predmet skeniranja, moramo razumjeti ograničenja rada 3D skenera strukturiranim svjetlom u slučaju prozračnih, prozirnih i blještavih predmeta. Opisati ćemo dobre i loše strane bijelog svjetla (cijeli spektar), te ih usporediti sa alternativama tj. plavim i zelenim svjetlom.

Izbor svjetla (valnih duljina) proteže se od infracrvene (IR) do ultraljubičaste (UV), uključujući i spektar duginih boja Slika 13.



Slika 13. Valne duljine svjetla od gama zraka do radio frekvencije

Različite valne duljine su zbog svojih svojstava orijentirane na različite aplikacijske kategorije, npr. kod kulturnih nasljedstava i biometričkom skeniranju koristi se UV. Kod skeniranja ljudske kože koristi se IR.

6.1. Ultraljubičasti spektar - UV

UV tj. ultraljubičasti spektar valnih je duljina od 100nm⁷ do 400nm. Kada se promatra njegovo djelovanje na ljudsko zdravlje i okolinu, ultraljubičasto zračenje se obično dijeli na UVA (400–315 nm) ili dugovalno (crno svjetlo), UVB (315–280 nm) ili srednjevalno i UVC (< 280 nm) ili kratkovalno (antimikrobno). Zanimljiva činjenica jest da pod određenim uvjetima djeca mogu vidjeti ultraljubičasti spektar do 310nm, iako je inače nevidljiv (Lynch & Livingston, 2001).

6.2. Vidljivi spektar – spektar duginih boja

Spektar duginih boja je ono što ljudi vide kao boje, a naziv je dobio po dugi koja se javlja zbog loma bijele svjetlosti kod prolaska kroz staklenu prizmu. Vidljivi spektar boja predstavljen je valnim duljinama od 400nm do 750nm (Starr, 2005).

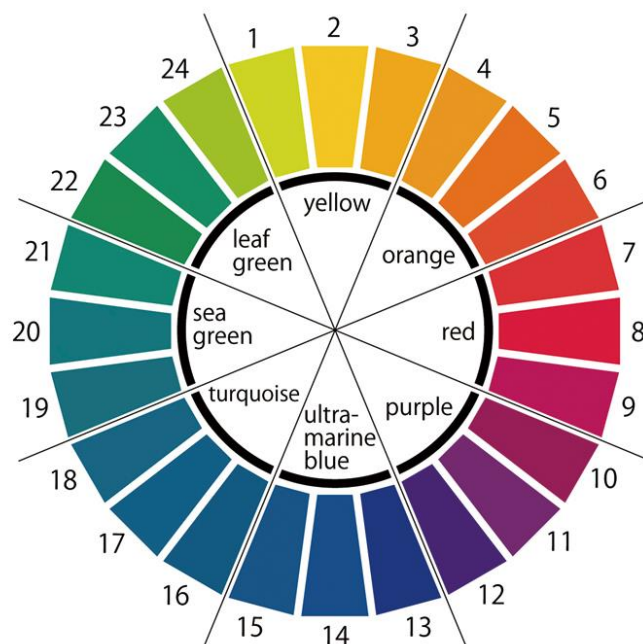
6.3. Infracrveni spektar

Infracrveni spektar obuhvaća raspon od približno 750 nm do 3 mm i naziv je dobio prema latinskoj riječi „infra“ koja u prijevodu znači „ispod“, odnosno obuhvaća valne duljine ispod crvenog svjetla (Liew, 2006).

6.4. Komplementarne boje

Komplementarne boje su dvije boje od koje jedne nema ni malo u drugoj boji. One se nalaze na suprotnim stranama Ostwaldovog kruga boja Slika 14. To su: narančasta i plava (zato što narančasta nastaje miješanjem crvene i žute, tj. u sebi nema nimalo plave boje), ljubičasta i žuta, crvena i zelena (Briggs, 2007).

⁷ nanometar, 1 nm = 1 · 10⁻⁹ m (milijarditi dio jednog metra)

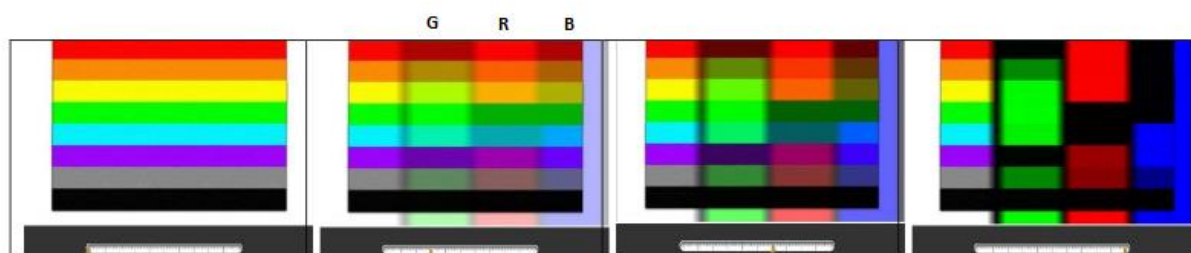


Slika 14. Oswaldov krug boja

Boja objekta obično nije imala utjecaja na rezultate skeniranja u prošlosti, uglavnom zato što su se koristili projektori sa bijelom svjetlosti. Bilo je jednostavno namjestiti brzinu okidača kako bi se svjetlina fotografije bila ispravna. Sada, sa korištenjem obojane svjetlosti na projektorima, čest je problem kada je boja objekta suprotna boji svjetlosti projektor.

Kao primjer možemo navesti slučaj kada skener osvjetljava crvenu scenu s plavim svjetlom, tada dvije krivulje za produkt imaju loš signal iako fotoaparat ima dobru osjetljivost na plavu i crvenu boju.

Taj efekt vizualiziran je na Slika 15 gdje se jasno vidi da su plava i nijanse crvene (narančasta) poništavaju, odnosno nastaje crnilo.



Slika 15. Prikaz utjecaja monokromatskog osvjetljenja na boje

Slika 15 sa lijeva prema desno predstavlja, prvo sekvencu 8 boja postavljenih u horizontalne trake, a zatim postepeno sve jače osvjetljenje monokromatskim bojama u vertikalnim trakama i to redom zelenom (G), crvenom (R) i plavom (B). Posljednja slika prikazuje samo one

redove koji reflektiraju barem malo monokromatskog svjetla, dok se ostale prikazuju kao crna boja.

7. Senzori, okidači i povezivanje kamera

U nastavku poglavlja objasniti ćemo razlike u sensorima i povezivanjima.

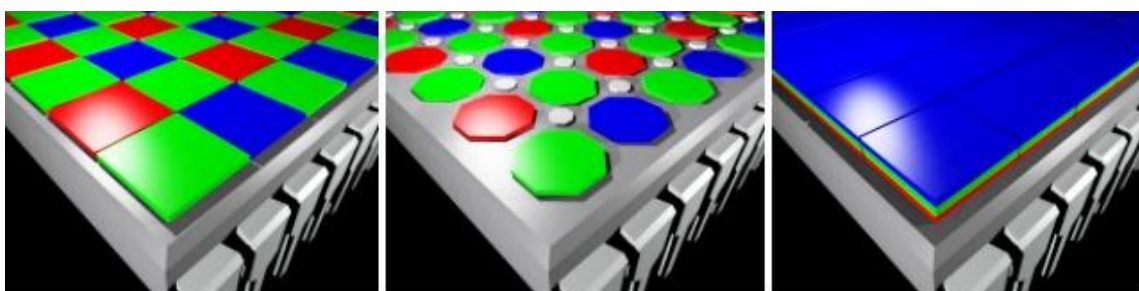
7.1. Senzori

CCD i CMOS kratice Slika 16, koje određuju tip senzora digitalnog fotoaparata, mnoge od nas navode na pitanje koji je senzor bolji.



Slika 16. CCD i CMOS senzor

Ako k tome dodamo i različite dimenzije (površine) senzora koje mogu biti od nekoliko kvadratnih milimetara do nekoliko tisuća kvadratnih milimetara, broj mogućnosti koje su nam proizvođači ponudili postaje zbunjujući. Glavna razlika je u načinu na koji senzori foto signale pretvaraju u elektroničke, pa samim time i digitalnu fotografiju.



Slika 17. Standardni tipovi senzora sa lijeva prema desno: RGB, Super CCD, Foveon

Na Slika 17. vidimo različite tipove rasporeda filtera za boje i svjetlinu.

Lijevo je Bayer mozaik, koji zapravo predstavlja standardni RGB senzor sa crvenim, zelenim i plavim filterima (zelenih ima duplo više).

U sredini je superCCD senzor sa dvije veličine osjetljivih filtera. Manji R-filter za svjetlinu (sive boje na slici) i veći S-filter sa Bayer mozaikom.

Desno se nalazi Foveon senzor koji oponaša film sa sva tri RGB filtera, svaka boja je zaseban film a rezultat su izraženije boje.

7.2. CCD⁸

Od samog izuma kamere, u 19. st, leća objektiva fokusirala je zrake svjetlosti na foto-osjetljive soli srebro-halida na samom filmu, bilo da se bilježila pokretna slika ili fotografija. Kod današnje kamere leća fokusira svjetlo na elektronički senzor zvan CCD. CCD senzor sastavljen je od stotina tisuća foto-osjetljivih dioda koje bilježe jakost svjetla koje prime i tu vrijednost pretvaraju u električni naboj. Jakost tog naboja proporcionalna je jakosti svjetla koje ta dioda primi.

Naboj koji se očita s pojedine fotodiode na kraju se pretvara u piksel, kao dio ukupne video slike, no ne bez jednog važnog međukoraka. CCD senzor ne bilježi boje, samo jakost svjetla koje pada na njega, u nijansama sive. Tako nastala slika šalje se u zasebne filtere za boju, koji bilježe zelenu, crvenu i plavu boju (RGB⁹ standard).

Broj (i veličina) CCD senzora ujedno je i jedan od razloga zašto su ti modeli osjetno skuplji od amaterskih CMOS kamera.

7.3. CMOS¹⁰

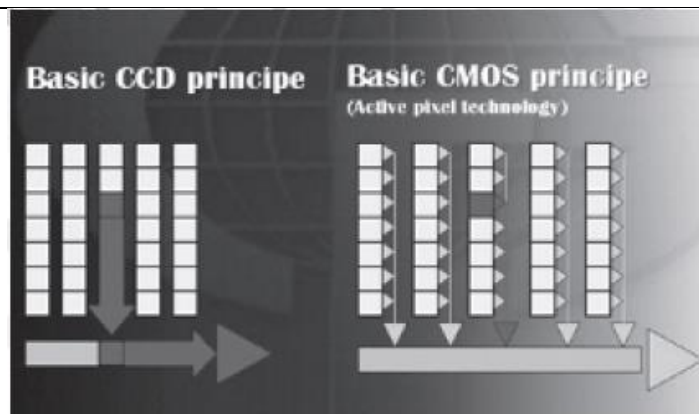
CMOS senzori su bili cijenjeni zbog praktičnosti proizvodnje i primjene. Troše i do 100 puta manje energije za svoj rad i jeftiniji su za proizvodnju (može ih proizvesti bilo koja standardna proizvodna linija koja proizvodi čipove za elektronsku industriju). Prema nekim naznakama kamera sa istim karakteristikama bazirana kao CCD kamera na CMOS senzoru, mogla bi biti čak i do 3-4 puta jeftinija. I to je njegova najveća prednost.

Glavna razlika je što se kod CMOS senzora pojačanje signala odvija na samom fotodetektoru, dok kod CCD imamo poseban sklop za pojačanje na izlazu iz senzora Slika 18.

⁸ CCD - charge-coupled device

⁹ RGB – Red Green Blue

¹⁰ CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor



Slika 18. Pojačanje signala kod CCD (lijevo) i CMOS (desno) senzora

7.4. Okidači - Global Shutter vs. Rolling Shutter

Osim načina na koji pretvaraju signale fotona u elektroničke signale, druga razlika između CCD i CMOS senzora jest način na koji hvataju svaku sličicu. CCD senzor koristi Global Shutter (globalni okidač) dok CMOS senzor koristi Rolling Shutter (okretni okidač).

Global Shutter znači da se cijela sličica okinula u jednom trenu. Najlakše je to predočiti kao kockica filma koji se koristio u starijim fotoaparatom. Kada svjetlo prođe kroz film, ono prođe kroz cijelu kockicu u istom trenutku. Kod kamera sa 3 CCD senzora svjetlo prvo prolazi kroz prizmu koja ju rastavlja i tada prolazi kroz tri filtera crvene, zelene i plave boje.

Rolling Shutter okida fotografiju od gore prema dolje. Zamislite to kao što se piše ovaj rad, red po red od gore prema dolje. Dakle CMOS senzor hvata svjetlost piksel po piksel.

U većini slučajeva razlike su nevidljive, pogotovo kad su fotografije uhvaćene u dobro osvijetljenoj sobi ili vani tokom sunčanog dana. No kod Rolling Shuttera u sobi osvijetljenoj fluorescentnim lampama rezultira tamnijim redom na fotografiji. To se događa zbog načina rada fluorescentnih lampa koje se konstanto pale i gase a CMOS senzor okida fotografiju piksel po piksel. Isti slučaj se događa kod korištenja bljeskalice kada fotografija može biti prepolovljena sa jednom polovicom znatno tamnijom od druge.

Kod CCD senzora, postoji problem kod okidanja fotografija pokretnih elemenata ili dok se krećemo. Rezultat zna biti mutna fotografija, dok se kod CMOS senzora zna rastegnuti.

8. Fotoaparat

Fotoaparat je jedna od glavnih komponenata skenera pa je njegova kvaliteta jako važna. Broj piksela odnosno rezolucija, je povezana sa brojem točaka koje skener uhvati u jednom skenu. Loša strana mnogobrojnih piksela je da se obično veličina piksela na senzoru smanjuje kako bi stali na senzor, a time se smanjuje i njihova efikasnost hvatanja fotona svjetlosti, pa se na svakom skenu dodaje šum.

Zaključak je da treba naći balans između broja piksela i šuma. U mnogobrojnim slučajevima, manja rezolucija će rezultirati boljom fotografijom jer sadrži manje šuma.

8.1. Kvaliteta leće

Dobra kvaliteta leće također utječe na točnost. Lakše će se sustav kalibrirati ako su distorzije na fotografiji manje izražene. Postoje razne tehnike kalibriranja koje će mapirati i smanjiti čak i velike distorzije, ali su komplicirane za korištenje i zahtijevaju vrijeme.

8.2. Nesigurnost (točnost) i rezolucija

U svijetu 3D skenera, često se susrećemo sa terminologijom „točnost“ ili „preciznost“ i „rezolucija“. U ovom poglavlju objasniti ćemo što točno koji termin opisuje, ali možemo reći da se oba termina koriste za opisivanje kvalitete mjerenja.

Točnost kao termin se izbjegava, a zamjenjuje ga nesigurnost, pošto se nesigurnost može izmjeriti standardnom devijacijom i odstupanjem.

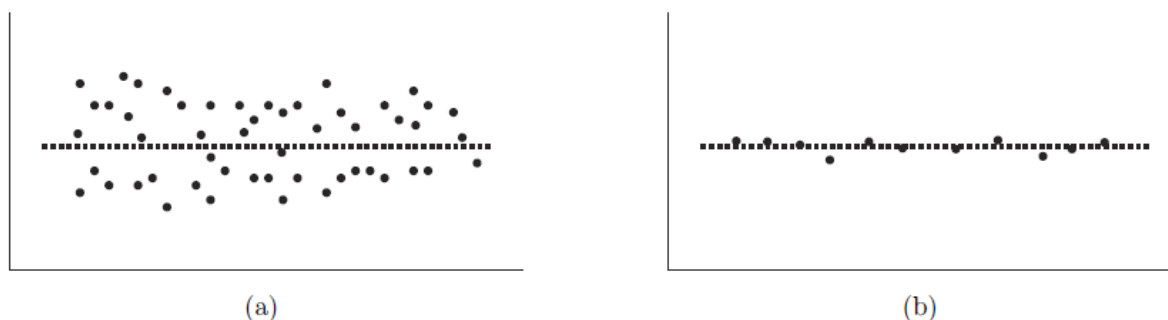
Termin rezolucija se povezuje sa gustoćom mjernih točaka na području mjerenja. Teorem uzoraka ima veliku ulogu kod rezolucije, a on kaže:

- frekvencija uzoraka neke funkcije mora biti dvostruko veća od originalne frekvencije kako bi rekonstrukcija bila precizna (Teutsch, 2007)

Što bi značilo da se za svaku točku modela uzimaju barem dva uzorka, kako bi se položaj točke što preciznije odredio.

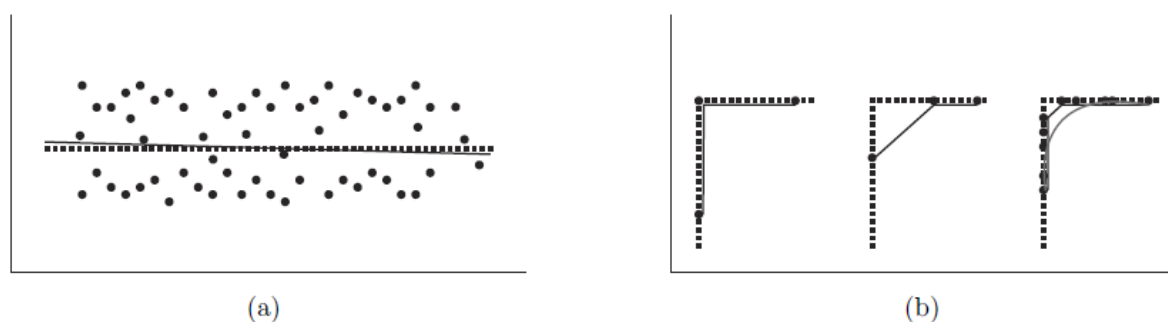
Slika 19 pokazuje vezu između točnosti i rezolucije:

- a) pokazuje visoku nesigurnost (nisku točnost pojedinačne točke) i visoku rezoluciju
- b) pokazuje nisku nesigurnost (visoku točnost pojedinačne točke), ali nisku rezoluciju



Slika 19. Odnos točnosti i rezolucije

Zapravo, prema istraživanjima (Teutsch, 2007), što niža nesigurnost to je viša točnost pojedinačne točke. No, pojedinačne točke se ne uzimaju kao mjere zbog toga što mogu predstavljati iznimke ili šum. Zato se radi aproksimacija geometrije ukupnog uzorka točaka (linija, ravnina itd.). Aproksimacija smanjuje utjecaj pojedine točke ukoliko je ona predstavnik iznimke ili šuma. Zbog toga mora postojati „dovoljna rezolucija“ uzorka kako bi se aproksimirala odgovarajuća geometrija, gdje „dovoljna rezolucija“ ovisi o geometriji i proceduri aproksimacije (obično 200-300 μm). Slika 20 pokazuje vezu između gustoće točaka i raspodjeli točaka.



Slika 20. Odnos gustoće točaka i raspodjele točaka

Slika 20 prikazuje odnos gustoće točaka i raspodjele točaka:

- a) Visoka gustoća točaka i niska točnost pojedine točke, ali rezultat ima dobru aproksimaciju zbog povoljnog raspodjela točaka
- b) Niska gustoća točaka i nepovoljna raspodjela rezultiraju lošom aproksimacijom, iako je točnost pojedine točke visoka

Raspodjela točaka ima važnu ulogu u kvaliteti mjerenja jer, iako je nesigurnost niska a gustoća visoka, nepovoljna raspodjela točaka mogla bi rezultirati krivom aproksimacijom Slika 20 (b). Za sve mjerne uređaje, oštri rub predstavlja problem, kao i prozračni, sjajni i prozirni objekti. O tome više u sljedećem poglavlju.

8.3. Ograničenja 3D skenera svjetlom

Kao što smo naveli, skeniranje bijelim svjetlom se koristi u različite svrhe i na raznim površinama, ali za razliku od instrumenata koje koriste taktilne sonde, postoje ograničenja zbog optički svojstava površina.

8.3.1. Svijetlo ambijenta

Prilikom projiciranja svjetla na površinu, kako bi se prikupile informacije, bilo kakvo svjetlo ambijenta (npr. sunčeva svjetlost) djeluje kao izvor šuma na fotografiji. Ako je takvo svjetlo prejako, npr. ako je svjetlost projektora gotovo nevidljiva, skeniranje može biti nemoguće.

8.3.2. Linija pogleda

Da se informacija tj. točka na objektu prikupi ona mora biti vidljiva sa barem dvije perspektive – fotoaparata i projektora, pošto sistem radi na principu triangulacije. To je ograničenje koje onemogućava skeniranje dubljih rupa na objektu.

8.3.3. Prozirnost, sjajnost i prozračnost

Princip skeniranja zahtjeva da se barem mala količina raspršene svjetlosti reflektira u smjeru fotoaparata. To je gotovo nemoguće na zrcalnim (sjajnim) površinama, prozirnima površinama i prozračnim površinama.

Prozirni predmeti reflektiraju nikakvu ili vrlo malu količinu svjetlosti, pa samim time onemogućuju procesuiranje 3D točkastog oblaka modela.

Sjajnost ili zrcalnost je svojstvo materijala da reflektira svjetlost u samo jednom smjeru, umjesto da se rasprši.

Prozračni predmeti reflektiraju svjetlost ne samo sa površine već i sa dubljih slojeva, pa dolazi do miješanja točaka objekta. Tipičan primjer prozračnog materijala bio bi vosak i neke plastike.

9. Ispitivanja

Prikazati ćemo ispitivanja koja je obavio (Klaas, 2014) u svojem radu. Rezultate ćemo podijeliti u dva dijela.


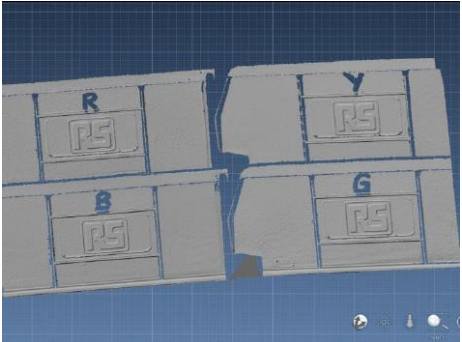

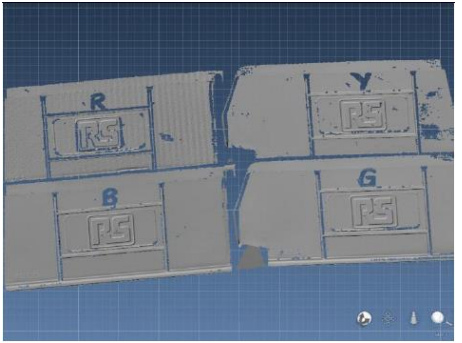
Prvi dio (scena A) biti će ispitivanje utjecaja boje na sken. Postaviti ćemo scenu koju čine kutije crvene (R), plave (B), zelene (G) i žute (Y) boje, te će biti skenirane bijelim, zelenim i plavim svjetlom.



Drugi dio (scena B) ispitivanja biti će orijentiran na utjecaj okolnog svjetla na 3D sken, prilikom skeniranja zdjele, cipele i lopatice turbine.

9.1. Scena A

Napomena, u ovim rezultatima izostavili smo rezultate sa okolnim svjetlom, jer su rezultati imali male ili gotovo nikakve razlike.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja scene A

Boja projektora	Crno-bijela fotografija prilikom osvjetljenja	Slika 3D skena
Bijela: Sve kutije prikazuju se u gotovo istoj kvaliteti. Zelena kutija ima nešto više šuma	 Zelena kutija je najtamnija prilikom crno bijelog filtera	
Zelena: Zelena kutija ima najbolju kvalitetu skena, slijede plava i žuta, dok crvena ima loš sken i	 Žuta i zelena kutija su najsvjetlije,	

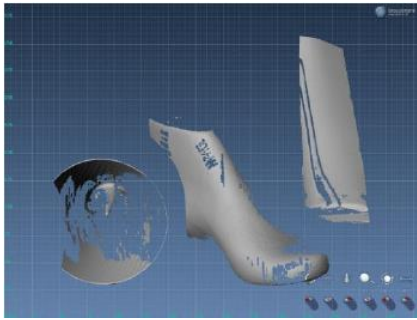
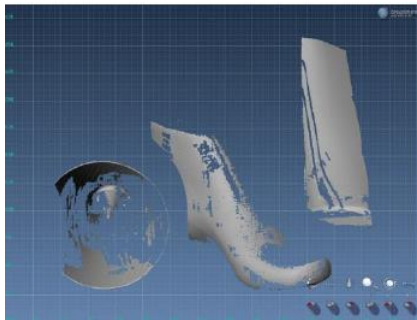
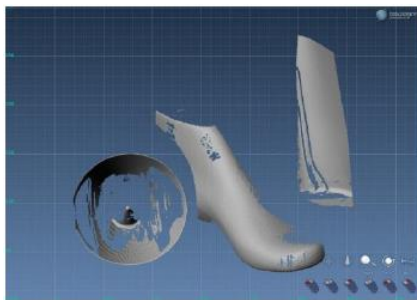
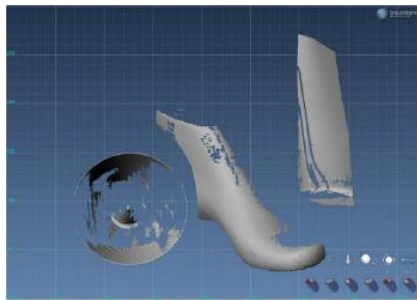
puno šuma	crvena je jako tamna	
Plava: Plava i zelena kutija imaju sken dobre kvalitete, žuta ima šuma i prikazuju se valovi, crvena se gotovo ne vidi	 <p>Plava kutija izgleda najsvjetlije, crvena kutija je gotovo crna</p>	

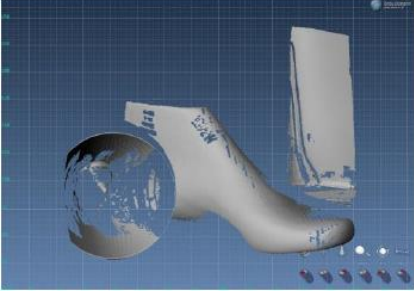
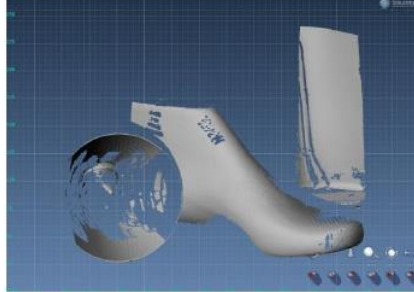
9.2. Scena B

Sljedeća tablica prikazuje rezultate 3D skeniranje scene B.

Svaki od predmeta pomno su izabrani zbog svojih problematičnih površina. Zdjela ima dubinu i predstavlja konveksnu površinu gdje skener teško dopire, cipela ima prozračnu površinu, dok lopatica ima sjajnu površinu i oštre bridove.

Tablica 2. Rezultati ispitivanja scene B

Boja projektora:	Bez okolnog svjetla	Sa okolnim svjetlom
Bijela: Jasno vidljiva razlika skena sa i bez okolnog svjetla, pogotovo na prozračnoj površini cipele		
Zelena: Manji utjecaj okolnog svjetla na kvalitetu skena, filteri ispred leće		

fotoaparata blokiraju većinu okolnog svjetla		
<p>Plava:</p> <p>Razlike gotovo da su nevidljive, kao što je bio slučaj kod zelenog svjetla, osim lopatice turbine koja je ispala malo bolje, rezultati su isti kao i kod ostalih</p>		

10. Obrada na računalu

Mnogi kompleksni objekti ne mogu se jednostavno rekonstruirati kao kombinacija primitivnih 3D oblika ili parametriziranih površina. Za svrhu rekonstrukcije takvih kompleksnih objekata koristi se točkasti oblik. Tehnike za automatsku obradu tih podataka imaju važnu ulogu, nažalost, rezultat je često popraćen artefaktima i šumom.

Prije samog postupka mjerenja potrebno je pripremiti mjerni uzorak. Kao prvu stvar potrebno je sa mjernog uzorka ukloniti sve nečistoće i strana tijela koja nisu sastavni dio mjernog uzorka kako ne bi utjecala na rezultate mjerenja. Taj korak je zajednički za sva mjerenja bez obzira o kojem se postupku mjerenja radilo.

10.1. ATOS CORE 300

Postupak kalibracije sustava 3D skenera strukturiranim svjetlom opisati ćemo pomoću uređaja ATOS CORE 300 Slika 21. Radi se o prenosivom 3D skeneru koji koristi strukturirano svjetlo plave boje, te dva fotoaparata, po jedan sa svake strane projektor. Iako je digitalizacija površine moguća i sa jednom kamerom i projektorom, prednosti sustava s dvije kamere su višestruke. Najvažnija od njih je mogućnost samokontrole senzora tijekom digitalizacije. Budući da je sustav sa projektorom i dvije kamere predefiniran za određivanje točke u prostoru, postoji mogućnost kontrole procesa digitalizacije, odnosno njegova rezultata.

Naravno, osim ATOS CORE 300 moramo koristiti i računalo kojim ćemo obaviti kalibraciju sustava, te prihvat i obradu podataka 3D skena. Uređaj je računalom povezan Ethernet preko mrežnih kartica koje omogućavaju brz prijenos podataka.



System Configurations	ATOS Core 500	ATOS Core 300
Measuring area	500 x 380 mm	300 x 230 mm
Working distance	440 mm	440 mm
Point spacing	0.19 mm (0.31 mm)*	0.12 mm (0.18 mm)*

Slika 21. ATOS CORE 500 i ATOS CORE 300

Iz naziva uređaja također se vidi i odnos mjernog područja, ATOS CORE 500 ima mjerno područje od 500x380 mm, dok ATOS CORE 300 ima mjerno područje od 300x230 mm.

Pošto je ATOS CORE prenosivi mjerni uređaj koji je pogodan, kako za mjerenje u laboratoriju tako i za mjerenje na terenu, potrebno ga je prije procesa mjerenja postaviti na mjerno mjesto. ATOS CORE senzor dolazi u kompaktnom, zaštićenom i termostabilnom koferu te ga je prije procesa mjerenja potrebno postaviti na mjerno mjesto. Postoji više mogućnosti postave ATOS senzora.



Slika 22. Vrste postave ATOS CORE 3D skenera

Za mjerenje opisano u ovom radu korišten je Studio Stand Kit koji je vrlo pogodan za mjerenje ovakvih vrsta uzoraka zbog svojih mogućnosti Slika 23.



Slika 23. ATOS CORE 300 na Studio Stand Kit

Tehničke specifikacije ATOS CORE 300 sustava:

- Rezolucija kamere 5MPx
- Mjerno područje 300 x 230 x 230 mm
- Razmak između mjernih točaka 0,115 mm
- Radna udaljenost 440 mm
- Dimenzije 361 x 205 x 64 mm.

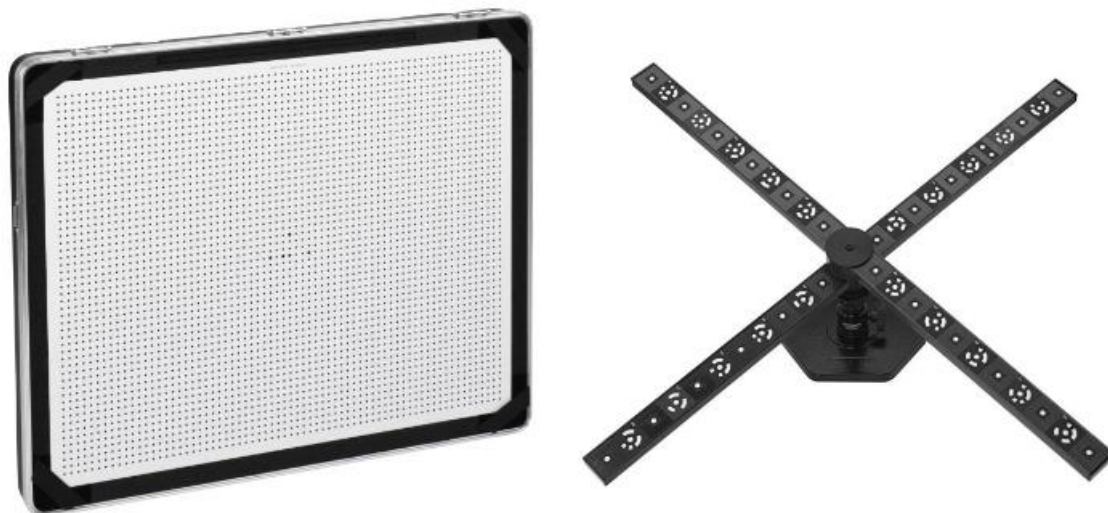
10.2. Kalibracija ili umjeravanje

Prije nego što se točke mogu generirati triangulacijom, optički senzor se mora kalibrirati. To uključuje svojstva mapiranja fotoaparata kao i prostornu poziciju i orijentaciju fotoaparata i ravnine projektora.

Prije početka mjerenja sustav je potrebno umjeriti. Postupkom kalibracije povezuju se unutarnji i vanjski parametri sustava. Kalibracija mjernog senzora provodi se pomoću kalibracijskih objekata unaprijed poznatih karakteristika te se na taj način određuju pogonski parametri matematičkih modela koji su nužni za provođenje mjerenja uz mjernu nesigurnost procijenjenu na temelju kalibracije. Koriste se kalibracijski objekti koji su po svojim geometrijskim ili optičkim karakteristikama zapravo prilagođeni promatranom mjernom senzoru, pretpostavljajući pritom da na zadovoljavajući način omogućavaju definiciju potrebnih pogonskih parametara u nekom zadanom mjernom volumenu promatranog senzora.

Nakon pokretanja sustava potrebno je određeno vrijeme (cca. 15 min.) da se sustav zagrije odnosno postigne radnu temperaturu, kako se ona ne bi mijenjala u tijeku procesa mjerenja. Softver sam daje informaciju o stanju senzora i pokazuje kada je senzor zagrijan.

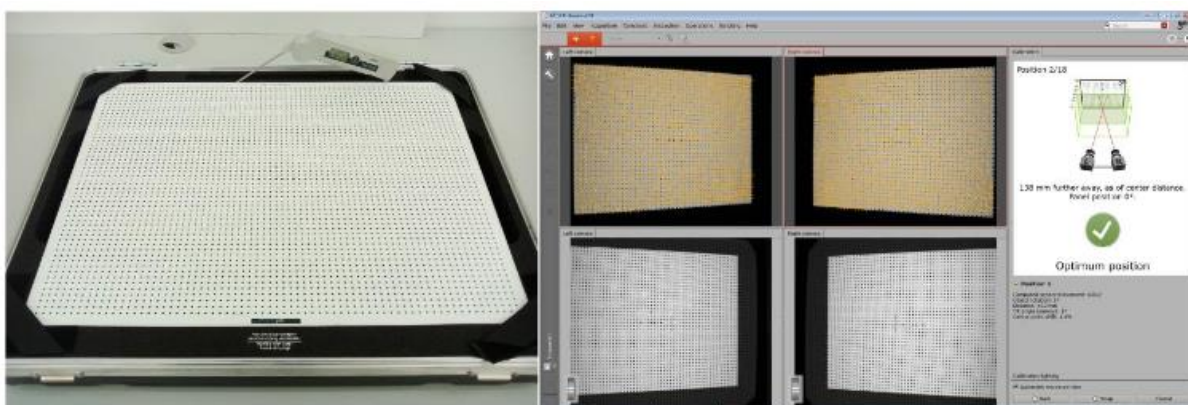
Kao primjer kalibracijskog sustava možemo staviti postupak kalibracije mjernog senzora ATOS CORE, koji se provodi pomoću kalibracijske ploče (lijevo) ili kalibracijskog križa (desno) Slika 24.



Slika 24. Kalibracijski objekti za optičke mjerne sustave

Kalibracijski objekti imaju poznatu geometriju i materijal izrade s koeficijentom toplinskog istezanja te su certificirani od proizvođača. Potrebno je izmjeriti temperaturu kalibracijskog objekta kako bi se u postupku kalibracije mogla napraviti temperaturna kompenzacija Slika 25 (lijevo).

Postupak kalibracije, koji se sastoji od snimanja 18 pozicija, vodi softver te je zbog toga sam proces vrlo jednostavan Slika 25 (desno).



Slika 25. Mjerenje temperature kalibracijske ploče (lijevo) i postupak kalibriranja (desno)

Na završetku kalibracijskog postupka softver prikazuje rezultate kalibracije. Jednostavnim grafičkim prikazom u obliku kontrolnih kvačica daje brzu informaciju da li je postupak kalibracije protekao u redu i da li rezultati kalibracije zadovoljavaju standarde. Proširenjem mogućnosti vide se parametri koji su podešeni postupkom kalibracije.

Važno je napomenuti da se postupkom kalibracije ne kompenzira promjena dimenzija na mjernom uzorku uslijed promjene temperature. Dakle, kalibracija nam osigurava da je mjerna jedinica kojom mjerimo uvijek jednako definirana, tj. da milimetar koji izmjerimo odgovara stvarnom milimetru u okolišu u trenutku mjerenja.

Npr., uzmimo za primjer da mjerimo razmak između dva provrta na uzorku od nehrđajućeg čelika koji ima koeficijent linijskog toplinskog istezanja $17,3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Ako je stvarna udaljenost između dva provrta na temperaturi od 20°C jednaka $30,000 \text{ mm}$, tada znači da će ta udaljenost na temperaturi od 25°C biti prema formuli

$$L = L_0(1 + \alpha_l(\Delta T)) \quad (6)$$

gdje je L_0 početna mjera na 20°C , α_l je koeficijent toplinskog rastezanja, a ΔT razlika temperatura.

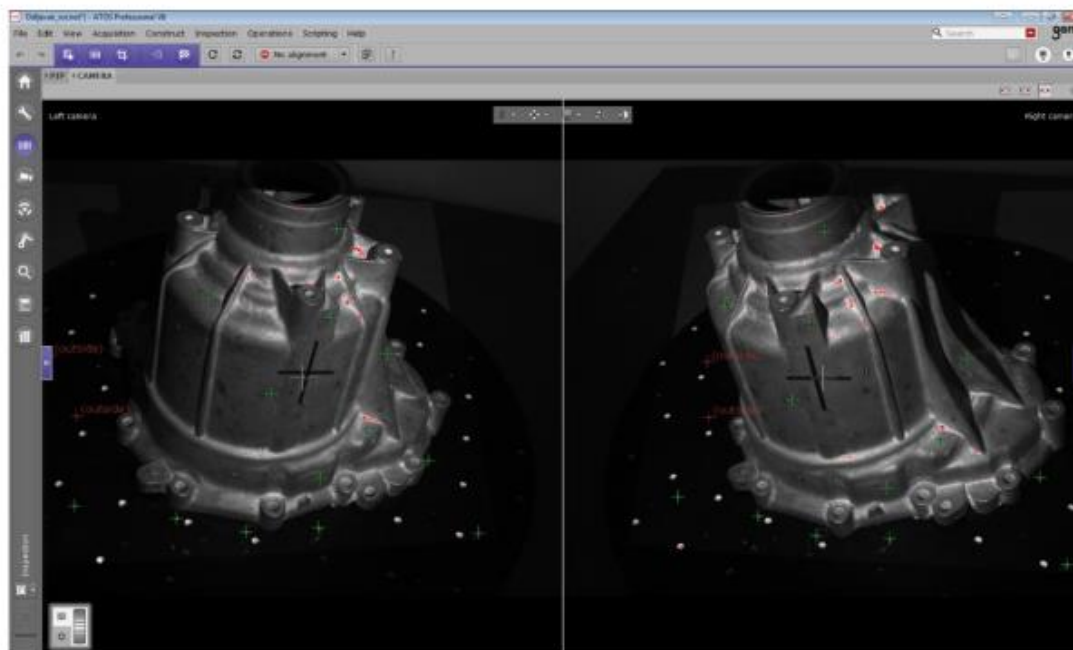
Kada uvrstimo podatke slijedi

$$L = 30,000(1 + 17,3(5)) \quad (7)$$

Što daje rezultat $30,002595 \text{ mm}$. Ukoliko je sustav kalibriran na temperaturi od 25°C tada bi trebao i izmjeriti dimenziju $30,002595 \text{ mm}$. Dakle, dobit ćemo stvarnu dimenziju na temperaturi 25°C te bi to trebalo uzeti u obzir pri analizi rezultata ako uzorak nije mjereno pri standardnim mjeriteljskim uvjetima.

10.3. Digitalizacija uzorka

Kada se mjerni uzorak nalazi u mjernom volumenu senzora, softver automatski prepoznaje referentne točke zalijepljene po uzorku. One su označene zelenim križićima Slika 26.



Slika 26. ATOS softver uživo

Tada se također prikaže virtualni prikaz skenera sa mjernim volumenom te referentnim točkama koje su trenutno vidljive koji nam pomaže pri namještanju uzorka i pokazuje gdje se uzorak trenutno nalazi u odnosu na 3D skener.

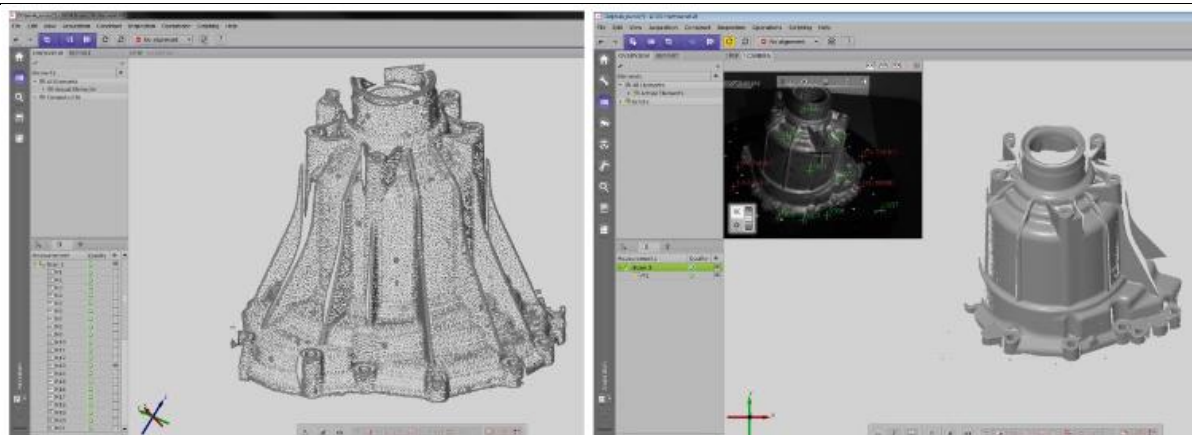
Kada je mjerni uzorak postavljen na poziciju za mjernje, potrebno je podesiti ekspoziciju kamera, odnosno razinu svjetlosti u kamerama. To se radi jednostavno lijevim klikom miša i povlačenjem miša prema gore ili dolje, ovisno da li želimo povećati ili smanjiti ekspoziciju.

Sam proces digitalizacije može se pokrenuti na više načina:

- klikom miša u softveru na ikonu za skeniranje,
- pritiskom na tipku razmaknice na tipkovnici ili
- pomoću daljinskog upravljača.

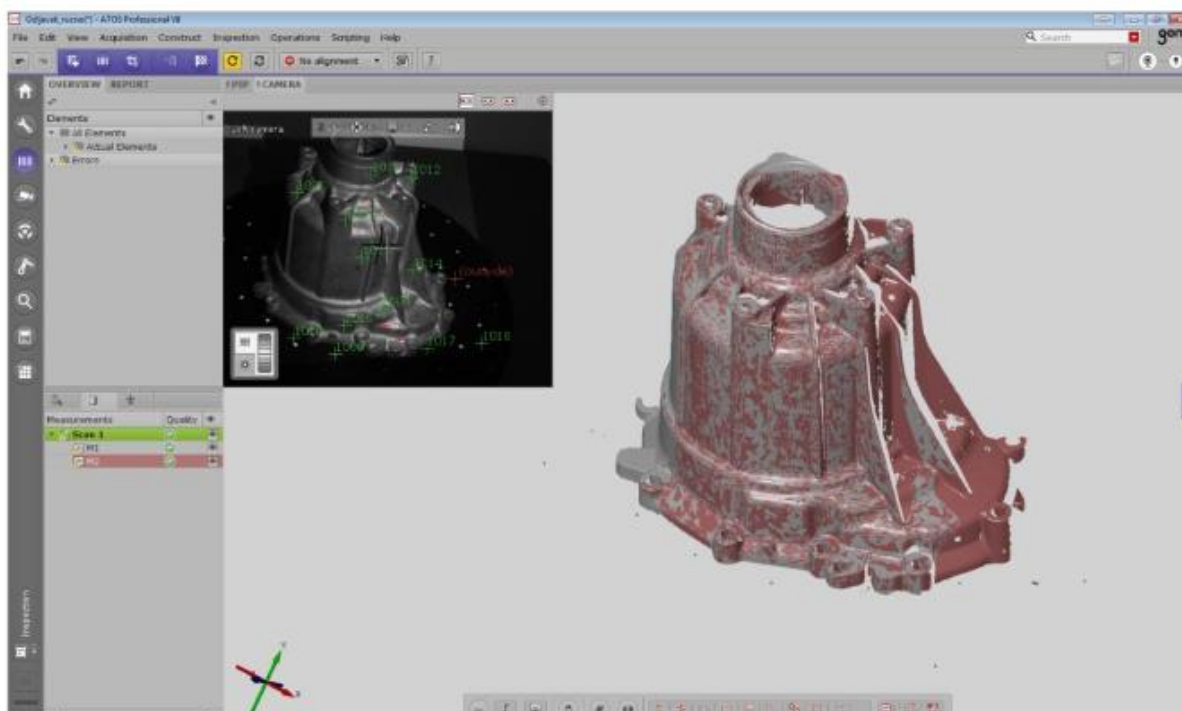
Naravno da je upotreba daljinskog upravljača daleko najjednostavnija i najbrža jer nije potrebno biti u blizini računala svaki puta kada se pokreće postupak skeniranja.

Prilikom postupka skeniranja senzor pomoću projektora projicira kodirano svjetlo na objekt, a kamere snimaju uzorak. Za svaki piksel u kameri dobijemo jednu mjernu točku na površini objekta skeniranja koja je ekvivalentna jednom doticaju mjernog ticala kod CCM. Ukoliko imamo potpuno ispunjen mjerni volumen senzora, to znači da u jednom skenu sa 5MP kamerama dobijemo pet milijuna točaka na površini objekta. Zbog količine podataka softver prikazuje samo 10% točaka na površini objekta.



Slika 27. Prikaz mjernih točaka (lijevo) i vizualizacija prvog skena (desno)

Tijekom postupka skeniranja prve pozicije, referentne točke koje su bile vidljive u obje kamere i osvijetljene projektorom dobile su svoj kod te su zapisane njihove prostorne koordinate. Tako da pomicanjem mjernog objekta u novu poziciju te referentne točke ostaju poznate, a dodaju se nove koje nisu bile vidljive u prvom opažaju. Za uspješno skeniranje i spajanje pojedinih skenova potrebne su nam minimalno 4 poznate referentne točke iz prethodnih skenova Slika 28.

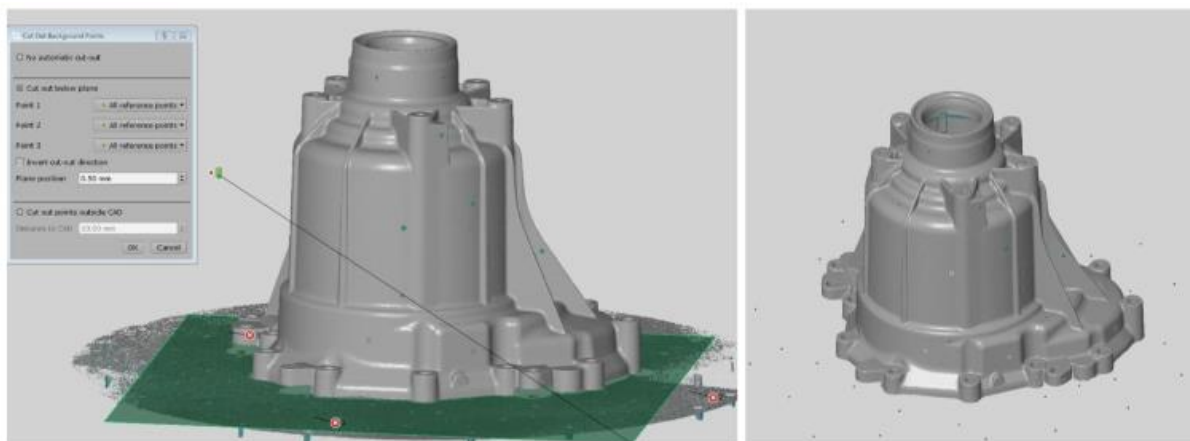


Slika 28. ATOS softver: spojeni sken

Na taj način skeniramo kompletan mjerni uzorak, odnosno toliko pozicija dok ne dobijemo dijelove površine uzorka koje su nam potrebne za postupak mjerenja. Pojedinačni,

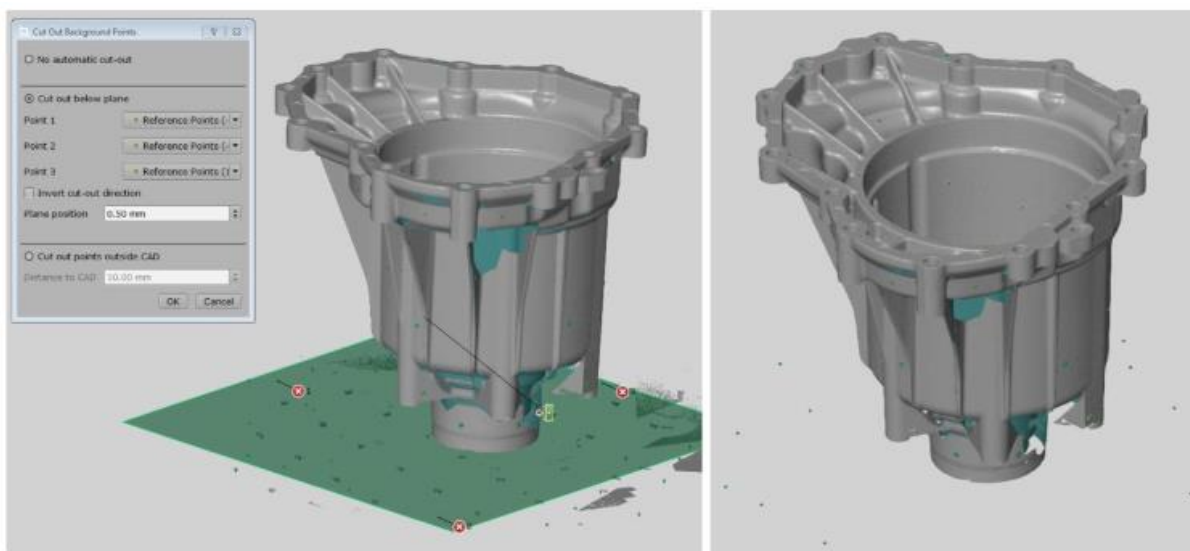
međusobno spojeni skenovi, zajedno čine mjernu seriju. Nema potrebe skenirati i gubiti vrijeme na skeniranje dijelova površine koja nam neće koristiti u mjernom izvješću.

U postupku digitalizacije, skener osim geometrije uzorka, također skenira i njegovu pozadinu koja se nalazila u mjernom volumenu. U ovom slučaju to je rotacijski stol na kojem je uzorak bio postavljen. Za brisanje pozadinskih podataka koji nisu dio mjernog objekta u softveru postoji funkcija Cut out backgrounds points. Radi na jednostavnom principu da se izaberu 3 točke u prostoru koje čine ravninu iza koje se brišu svi rezultati skeniranja Slika 29.



Slika 29. ATOS softver: brisanje podloge

Kada smo skenirali sve potrebno na mjernom uzorku s jedne strane, jednostavno ga okrenemo i ponovimo postupak s donje (u ovom slučaju unutarnje strane) uzorka Slika 30. Drugu stranu uzorka skeniramo u zasebnoj mjernoj seriji neovisno o prvoj seriji.

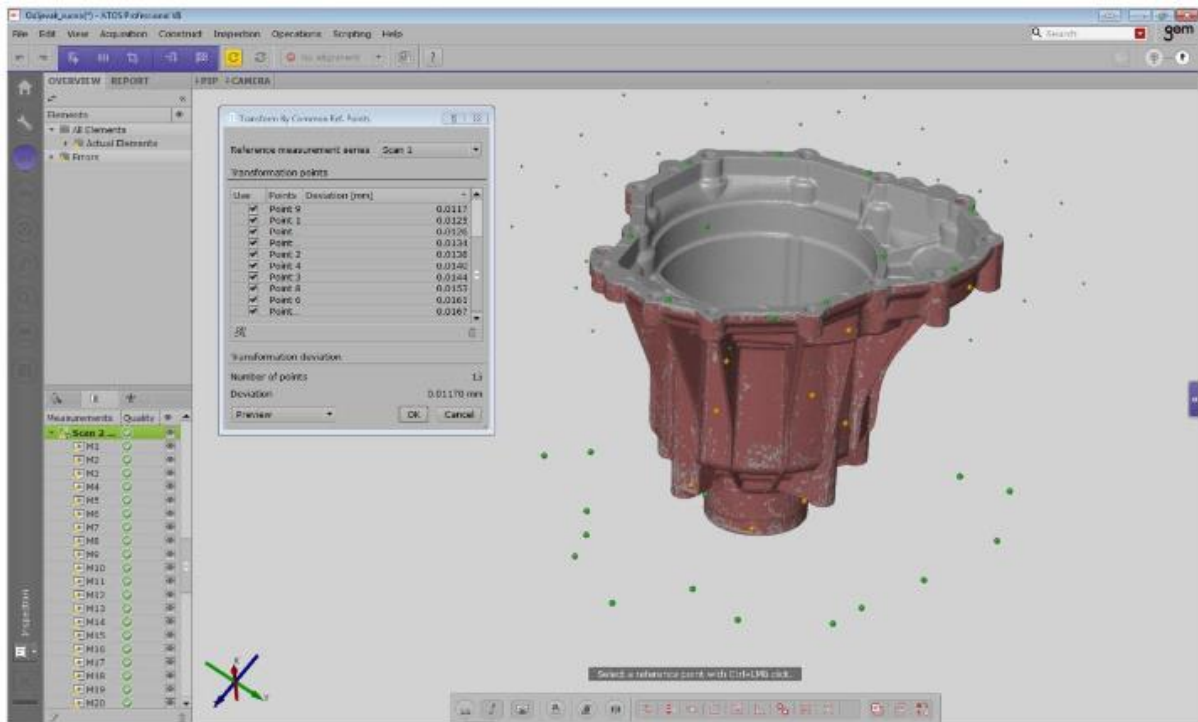


Slika 30. ATOS softver: skeniranje druge strane

Kada imamo rezultate digitalizacije obje strane mjernog uzorka, potrebno ih je međusobno spojiti Slika 31. To se radi pomoću funkcije u softveru Transform By Common Ref. Points.

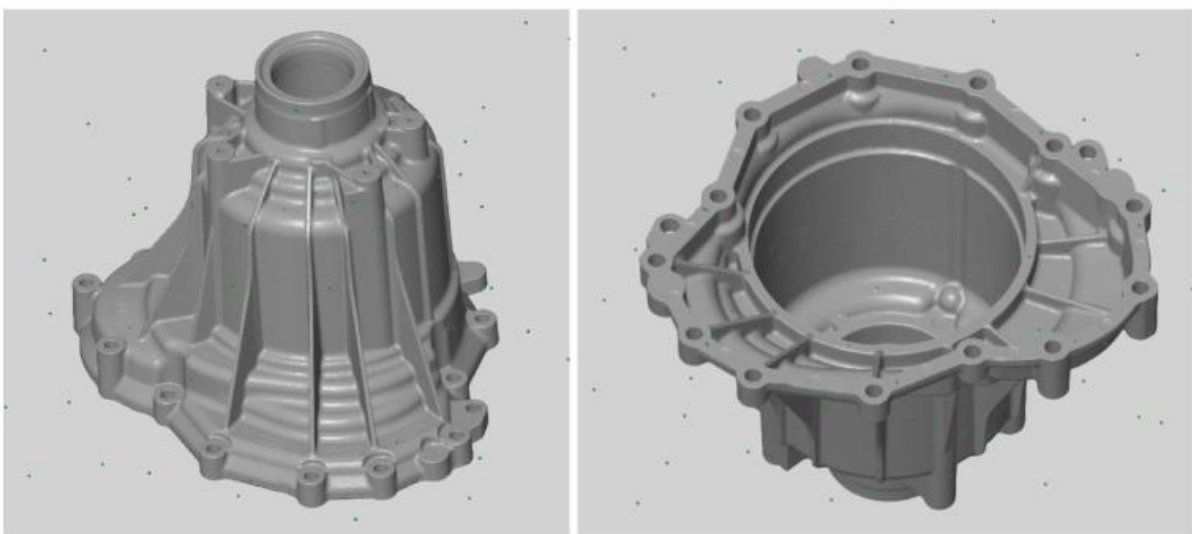
Naime, da bi mogli spojiti dvije mjerne serije, potrebne su nam minimalno četiri referentne točke koje su zajedničke prvoj i drugoj mjernoj seriji. Obično su to referentne točke zalijepljene po bočnim stranama mjernog uzorka.

Potrebno je ručno odabrati tri referentne točke koje su zajedničke, a ostale točke softver pronalazi sam. Ukoliko je uslijed manipulacije predmetom došlo do pomicanja neke referentne točke, softver to prikaže u polju Deviation te se ta točka može isključiti.



Slika 31. ATOS softver: spajanje referentnih točaka

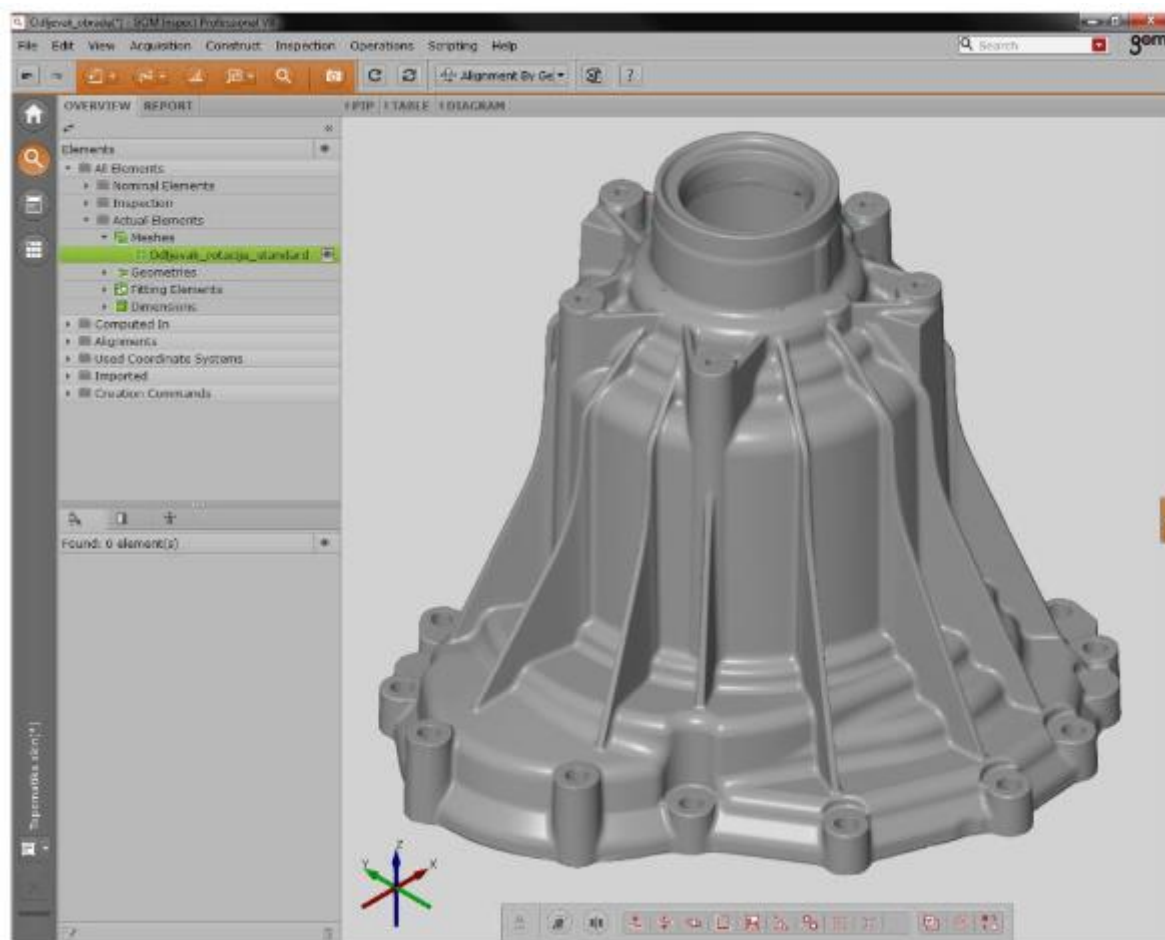
A konačni 3D model izgleda kao na Slika 32.



Slika 32. ATOS softver: konačni 3D model uzorka

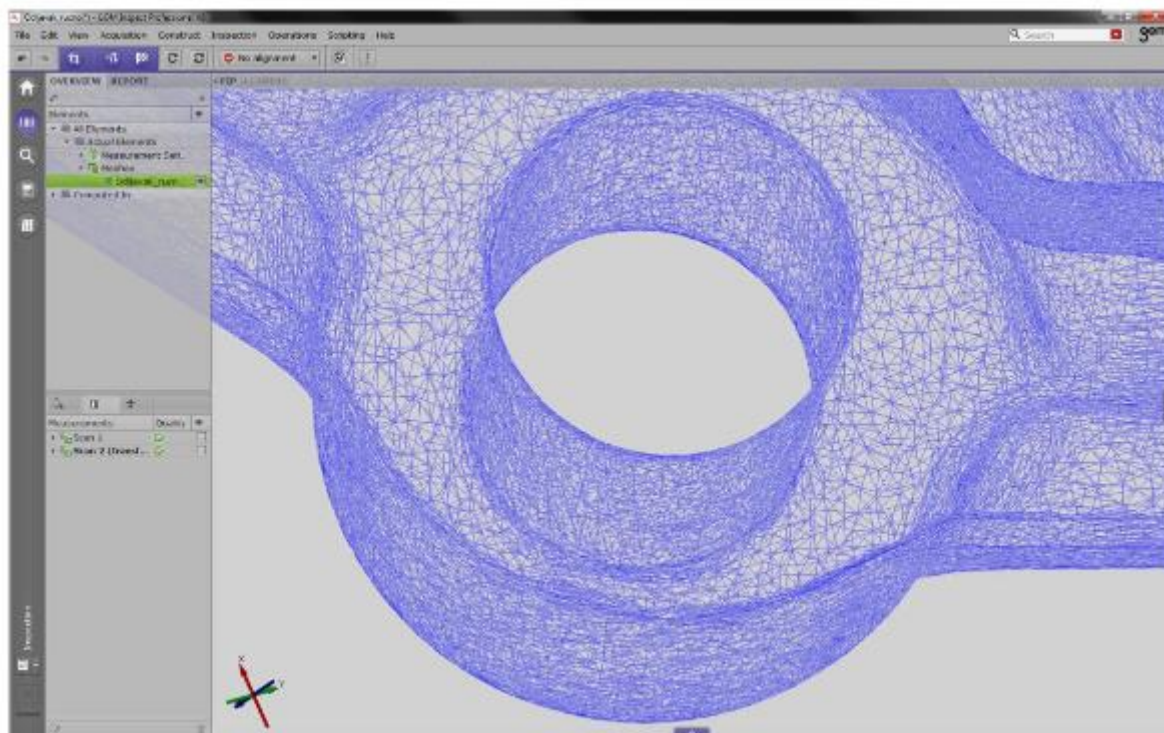
10.4. Iz točkastog oblaka u poligone

Na kraju svakog postupka digitalizacije slijedi poligonizacija. Poligonizacija je postupak u kojem se iz pojedinačnih oblaka točaka (tzv. skenova) izrađuje poligonalna mreža trokuta u STL formatu. Kako se pojedinačni skenovi na mjestima preklapaju, potrebno je napraviti uniformni oblak točaka na temelju kojeg se dolazi do STL datoteke koja je rezultat 3D skeniranja. Treba napomenuti da je STL format idealan i za 3D printanje, pošto velika većina CAD i CAM softvera imaju mogućnost čitanja i obrade tog formata.



Slika 33. ATOS softver: poligonizacija

Poligonalna mreža trokuta vrlo vjerno opisuje stvarnu geometriju mjernog uzorka. Također u postupku poligonizacije automatski se optimizira STL datoteka. To znači da se na ravnijim površinama gdje nema izraženih detalja poligonalna mreža sastoji od većih trokuta, dok su na za krivljenim površinama ti trokut i manji kako bi što vjernije opisali geometriju uzorka.



Slika 34. ATOS softver: detalji poligona i jasno vidljiva razlika gustoće poligona kod zakrivljene površine i ravne površine

11. Odabir komponenti

11.1. Kamera

Za kameru izabrali smo Basler Ace. Radi se o industrijskoj kameri raznih karakteristika, od malih rezolucija i visokih FPS¹¹-a do velikih rezolucija i niskih FPS-a. Kao što smo i pisali u prijašnjim poglavljima, visoka rezolucija ne mora značiti i bolje rezultate, no isto tako jako niska rezolucija često ima loše rezultate, tako da treba uzeti u obzir i osjetljivost.

Basler Ace serija kamera ima jednu odliku koja bi ovom sustavu dala mogućnost nadogradnje zbog svojih dimenzija. Naime, sve Basler Ace kamere imaju iste dimenzije i provrte na istim mjestima. Ukoliko nismo zadovoljni kvalitetom rezultata možemo nadograditi sustav tako da zamijenimo kameru boljom iz iste serije.

Odlike Basler Ace kamera:

- rezolucija se kreće od VGA¹² kvalitete do 14Mp
- do 750 FPS-a
- senzori: CCD, CMOS, NIR¹³
- dimenzije: 29 mm x 29 mm
- povezivanje: Gigabit Ethernet with PoE, Camera Link with PoCL, USB 3.0
- I/O za preciznu kontrolu
- odličan omjer cijene i performansi

11.1.1. Basler ace acA2500-14uc

¹¹ FPS – Frames Per Second – broj sličica u sekundi. Zbog tromosti ljudskog oka sve iznad 25 sličica u sekundi izgleda kao film odnosno kontinuirana sekvenca bez trzaja

¹² VGA – Video Graphics Array – rezolucija od 640x480 piksela

¹³ NIR – near infra red



Slika 35. acA2500-14uc

acA2500-14uc kamera povezana je USB 3.0 sučeljem a karakteristike su napisane na Slika 36.

Model Number	acA2500-14uc
Camera Sensor Format	1/2.5"
Imaging Device	ON Semi MT9P031
Type of Sensor	Progressive Scan CCD
Type of Shutter	Rolling
Pixels (H x V)	2592 x 1944
Pixel Size, H x V (µm)	2.2 x 2.2
Frame Rate (fps)	14
Video Output	USB 3.0
Synchronization	Via External Trigger, or Free-Run
Exposure Control	Freely Programmable
Power Requirement	Via USB 3.0 interface
Mount	C-Mount
Dimensions (mm)	41 x 29 x 29
Input/Output Options	1 Opto-isolated Input/Output, 2 Fast-GPIO Ports
Operating System	Software Driver: Windows 32 and 64 bit
Conformity	USB3 Vision, GenICam
Operating Temperature (°C)	0 to +50
Type	Color Camera
Camera Family	ace
Manufacturer	Basler
Resolution (MegaPixels)	5.0

Slika 36. Karakteristike acA2500-14uc kamere

11.2. Projektor

Kod odabira projektor moramo prije svega misliti na dimenzije. Nije praktično da projektor ima dimenzije prosječnog projektor jer bi cijeli sustav 3D skenera trebao biti prijenosan.

Piko projektori su projektori koji su se pojavili na tržištu prije nekih 10-tak godina. Kao i kod svakog pokušaja smanjivanja dimenzija kod tehnologije u početku uvelike su bili inferiorni u odnosu na prosječne projektore namijenjenim širokoj masi ljudi. Zaostajali su po kontrastu i jačine emitirane svjetlosti, što je rezultiralo slabom vidljivošću u dobro osvijetljenoj sobi.

Texas Instruments je u 2011. godini napravio veliki korak naprijed kada je predstavio novi DLP¹⁴ čipset koji je povećavao jačinu emitirane svjetlosti u kombinaciji sa Osram Ostar LED¹⁵ diodama bez povišene upotrebe energije.

11.2.1. ASUS S1

ASUS S1 (Slika 37.) je prijenosni projektor dimenzija koji koristi kombinaciju DLP čipseta i LED dioda za projekciju slike.



Slika 37. ASUS S1 piko projektor

Karakteristike ASUS S1 projektor prikazane su na Slika 38.

Brightness:	200 Lumens	Lamp Life (Full Power):	30,000 hours
Color Light Output:	**	Lamp Type:	LED
Contrast (Full On/Off):	1,000:1	Display Type:	1 cm DLP (1)
	<i>Auto Iris: No</i>	<i>Color Wheel Segs:</i>	**
Native Resolution:	854x480	<i>Color Wheel Speed:</i>	**
Aspect Ratio:	16:9 (WVGA)		

Slika 38. ASUS S1 karakteristike

- 200 lumena¹⁶ je sasvim dovoljno za osvjetljenje i u dobro osvijetljenoj sobi

¹⁴ DLP – Digital Light Processing – vrsta čipseta koji koristi sićušna zrcala kako bi procesiralo sliku

¹⁵ LED – Light Emitting Diode – posebna vrsta poluvodičke diode koja emitira svjetlost kada je propusno polarizirana

- kontrast¹⁷ od 1000:1 znači da će projektirani uzorak biti dobro razlikovan
- nativna rezolucija 854x480 znači da će ukupan broj emitiranih piksela, koji formiraju sliku, biti 409 920
- žarulja će trajati 30 000 sati

Dimenzije ASUS S1 projektora su 110.5 mm x 30.7 mm x 102 mm, no moramo imati u vidu da veliki volumen toga zauzima baterija koja bi se izuzela prilikom stavljanja u kućište 3D skenera, zbog toga što će svu potrebnu energiju dobivati od napajanja preko računala.

S obzirom da je cijelo kućište ovog projektora manje od dimenzija kućišta 3D skenera raspored komponenti piko projektora nije potrebno mijenjati, no zbog boljih termalnih svojstava biti će rašireni po kućištu 3D skenera. Dva ventilatora 40 mm x 40 mm izvlačiti će emitiranu toplinu.

¹⁶ Lumen – Jedinica za svjetlosni tok je lumen (lm). Svjetlosni tok je ukupna količina svjetlosne energije koju izvor svjetla emitira u okolni prostor u jednoj sekundi.

¹⁷ Kontrast – razlika između najsvjetlije i najtamnije emitirane točke

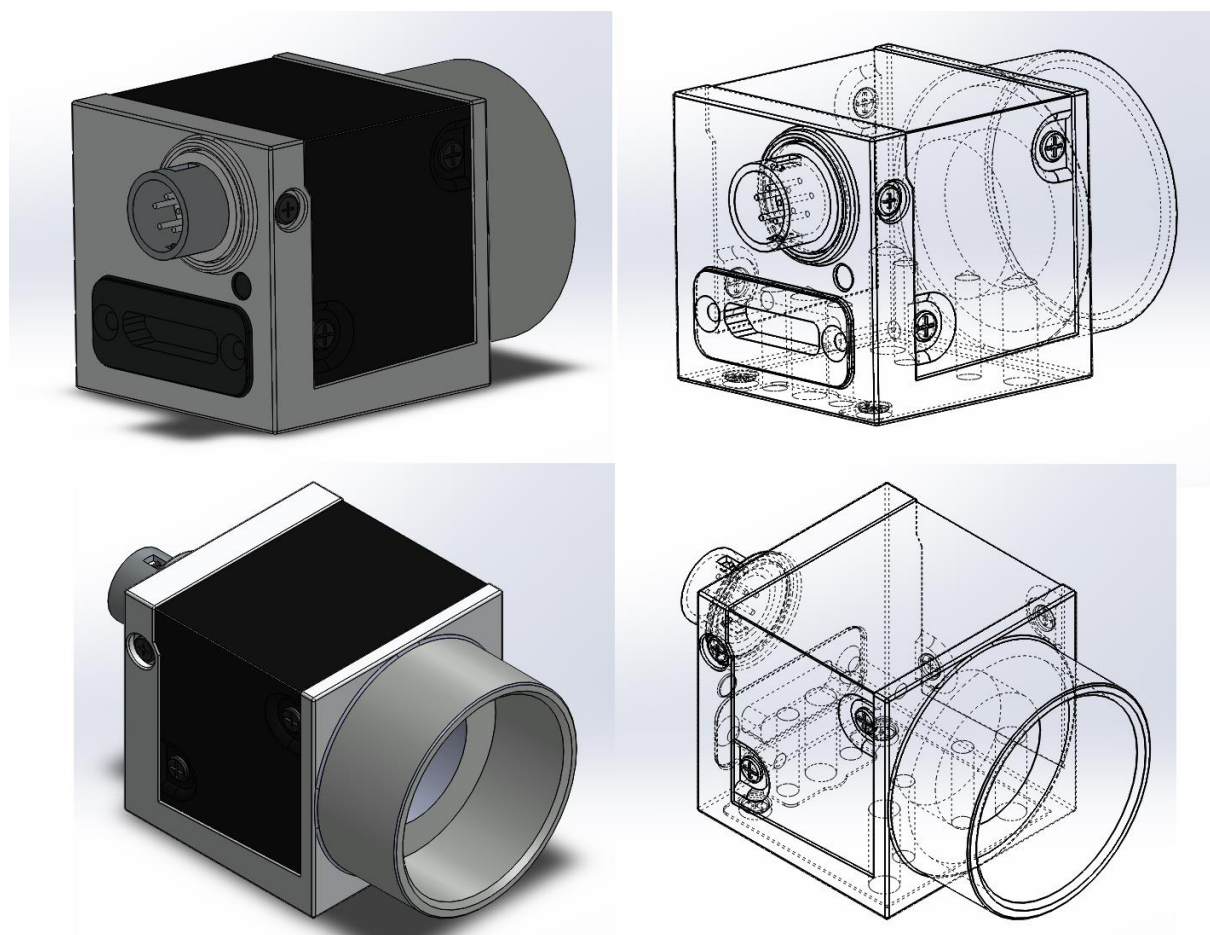
12. Konstrukcija

Nakon odabira komponenti slijedi izrada 3D modela konstrukcije. Svi modeli rađeni su u SolidWorks-u i napravljeni po mjeri.

12.1. Kamera

Prvo slijedi izrada kamere acA2500-14uc (Slika 39.) kako bismo mogli planirati izgled i značajke kućišta.

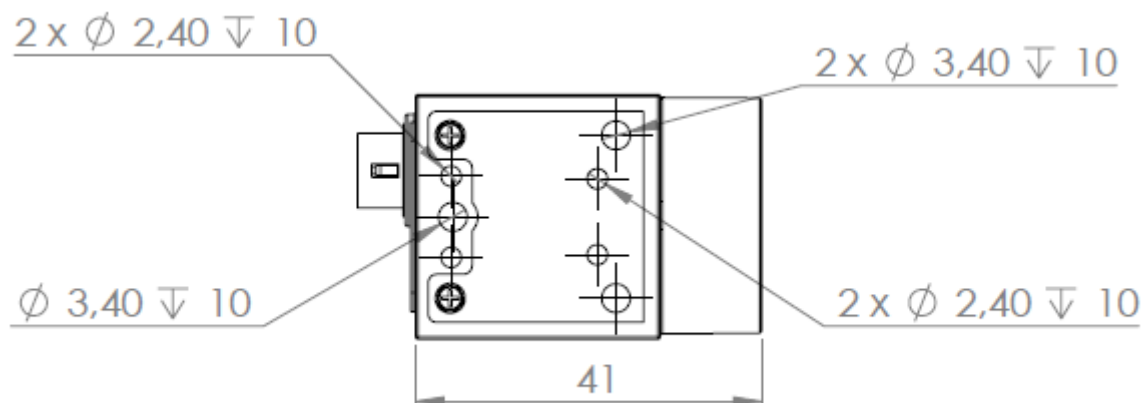
U prilogu nalazi se tehnički crtež acA2500-14uc (prilog crtež 1) na kojem je su prikazane glavne mjere kamere.



Slika 39. 3D model acA2500-14uc

Osnovne mjere smo već opisali u poglavlju „Odabir komponenti“ no valjda napomenuti jednu važnu stvar, a to su provrta za pričvršćivanje kamere, koji se nalaze na donjoj strani kamere (Slika 40). Preko tih provrta učvrstiti ćemo kamere za plohu kućišta našeg 3D skenera i osigurati kamere od micanja i utjecaja toga na kvalitetu rezultata.

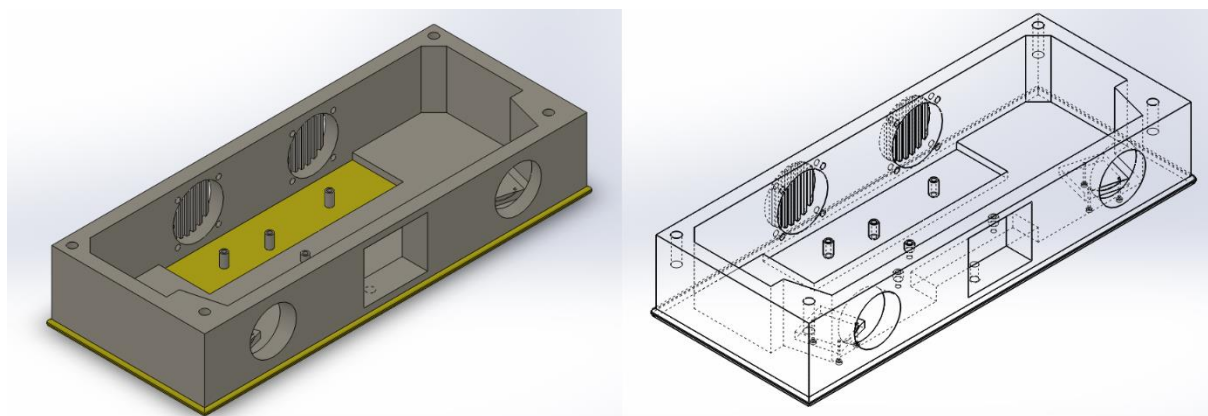
Kako su sve Basler Ace kamere istih dimenzija i istog dizajna, mogućnost zamjene kamera boljim je vrlo jednostavna i upravo je to jedna od kvaliteta ovog 3D skenera.



Slika 40. Provrti acA2500-14uc

12.2. Kućište

Kućište (prilog crtež 2) je najveći izazov za napraviti, pošto je to jedina komponenta ovog projekta koju moramo zapravo sami napraviti i smisliti unaprijed. Upravo iz tog razloga se sve komponente prvo nacrtaju i izmjere kako bismo imali uvid u projektiranje kućišta.



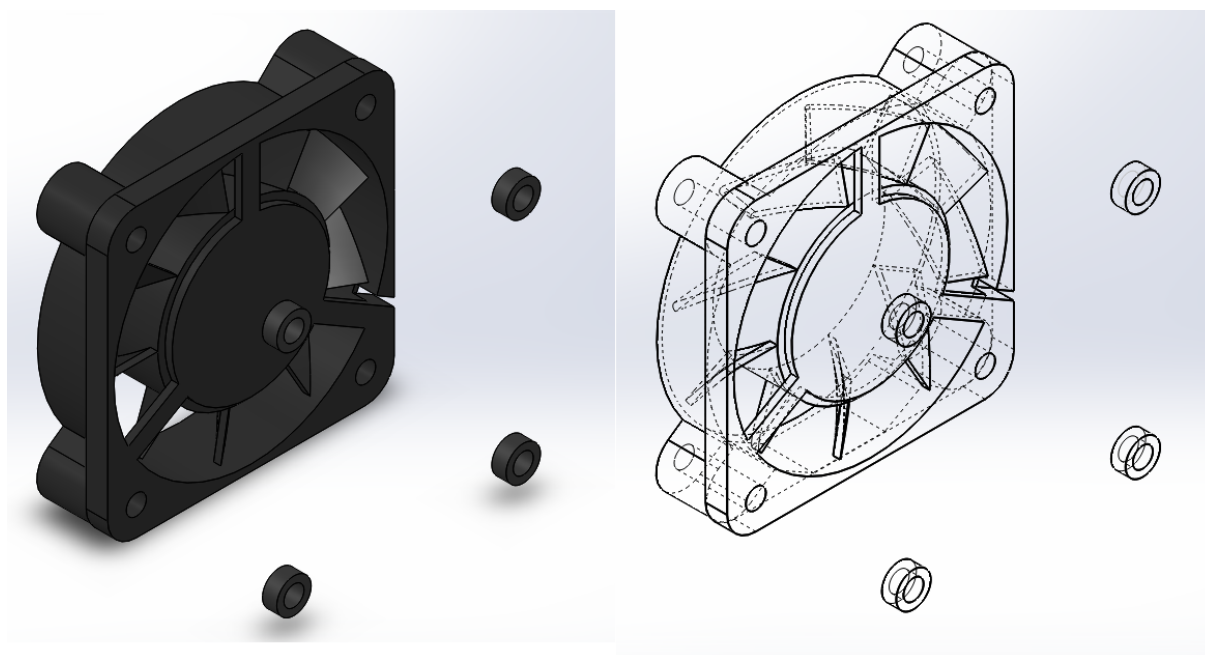
Slika 41. 3D model kućišta

Ovo kućište (Slika 41.) biti će napravljeno od kombinacije kompozita i aluminija. Predlažem da se donja i gornja ploha naprave od aluminija dok je okvir kućišta kompozit. Aluminij je odabran primarno radi svojih termalnih svojstava. Kao što smo napomenuli u poglavlju „10.2 Kalibracija i umjeravanje“ temperaturne razlike mogu utjecati na rezultate, a aluminij će smanjiti temperaturne fluktuacije.

12.2.1. Ventilatori

Osim aluminijske gornje i donje plohe, u svrhu termalnog poboljšanja, stavili smo i otvore za dva ventilatora 40 mm x 40mm (Slika 42., prilog crtež 3). Oba ventilatora će ispuhivati zrak

iz kućišta prema van, no može se ispitati i kombinacija push-pull, gdje bi jedan ventilator ispuhivao zrak dok bi ga drugi upuhivao. Takva kombinacija često se radi na hladnjacima za procesore u računalima te ima odlične rezultate.



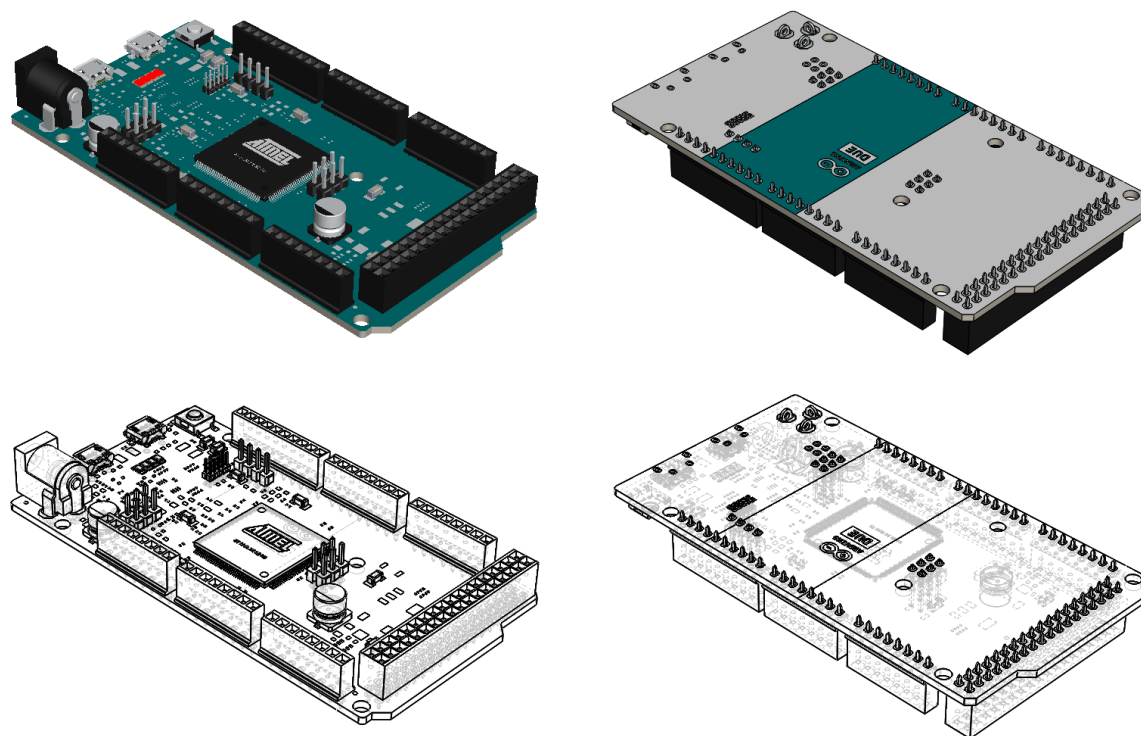
Slika 42. 3D model ventilatora 40mm x 40mm i anti-vibracijskih gumica

Moramo imati u vidu i negativno djelovanje ventilatora, a to su vibracije. Kao što temperaturno linearno rastezanje loše utječe na točnost isto tako djeluju i vibracije. Čak i male vibracije, koje čovjek niti ne osjeti, mogu utjecati na pogrešku rezultata od nekoliko mikrometara.

Zbog tih vibracija predlaže se ugradnja ventilatora 40 mm x 40 mm sa industrijskim ležajevima koji uvelike smanjuju vibracije, a između ventilatora i plohe kućišta da se stavi anti-vibracijska gumica. Danas se kod nekih ventilatora u tu svrhu stavljaju gumeni štapići koji imaju ulogu vijaka, no nisu toliko efikasni kao anti-vibracijske gumice.

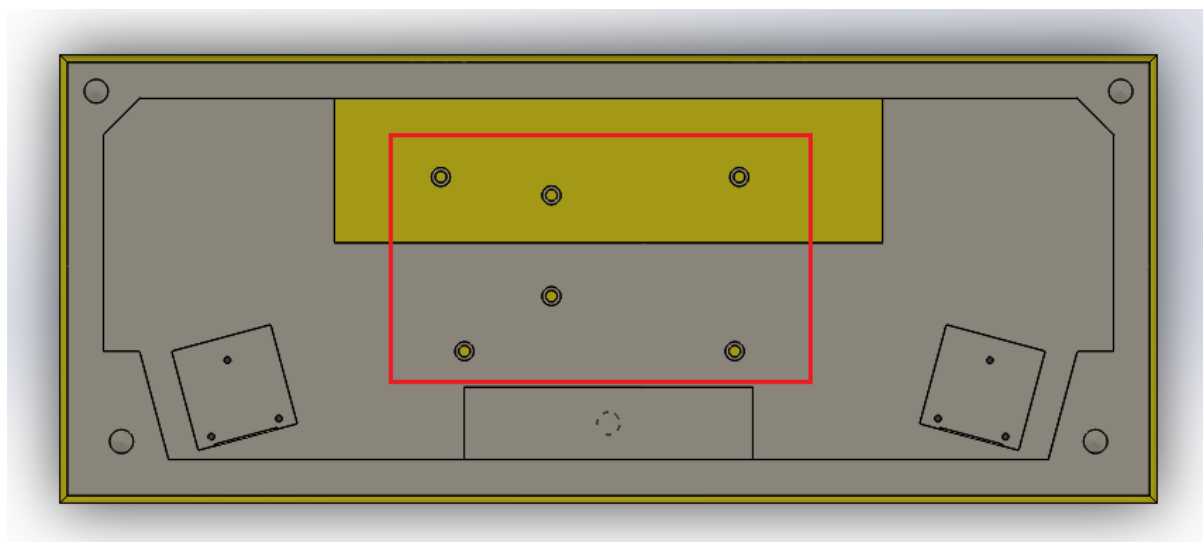
12.2.2. Elektronička pločica

Pod elektroničkom pločicom smatra se matična ploča (Slika 43.), kontroleri i svi ostali dijelovi koji se nalaze na PBC pločici rastavljenog ASUS S1 projektora. Ta pločica biti će pričvršćena na povišenoj poziciji (na razmaknicama), zbog toga što ima ispupčene dijelove sa gornje i donje strane. Ti dijelovi ne smiju biti u doticaju sa metalom ili bilo čime kako ne bi došlo do kratkog spoja i neželjenih posljedica.



Slika 43. 3D model elektroničke pločice

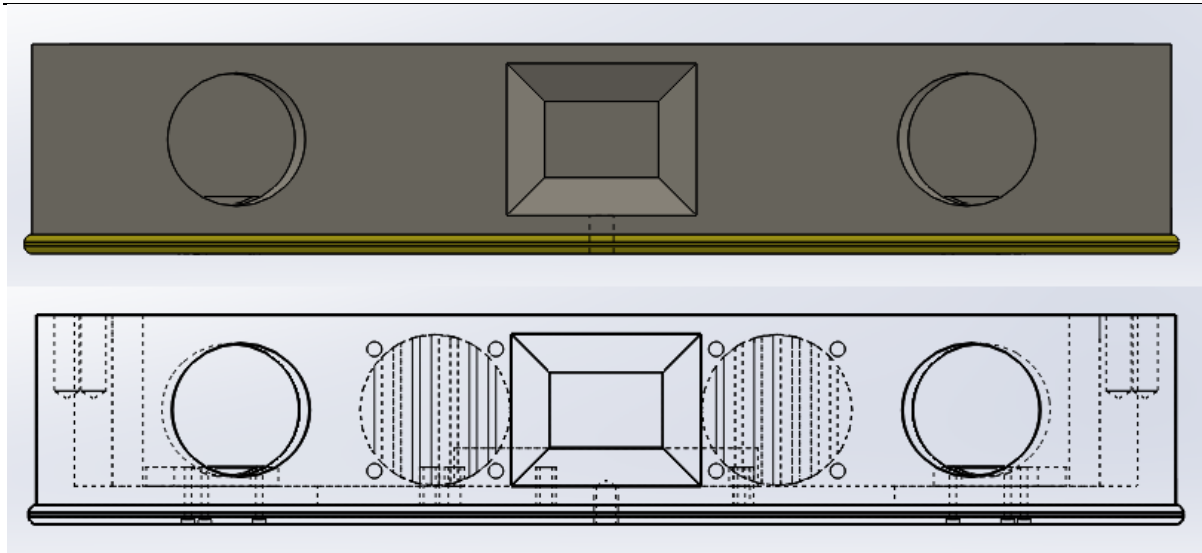
Na Sliku 44., u crvenom okviru, vide se spomenute razmaknice na kojima će biti pričvršćena elektronička pločica.



Slika 44. Razmaknice se nalaze u crvenom okviru

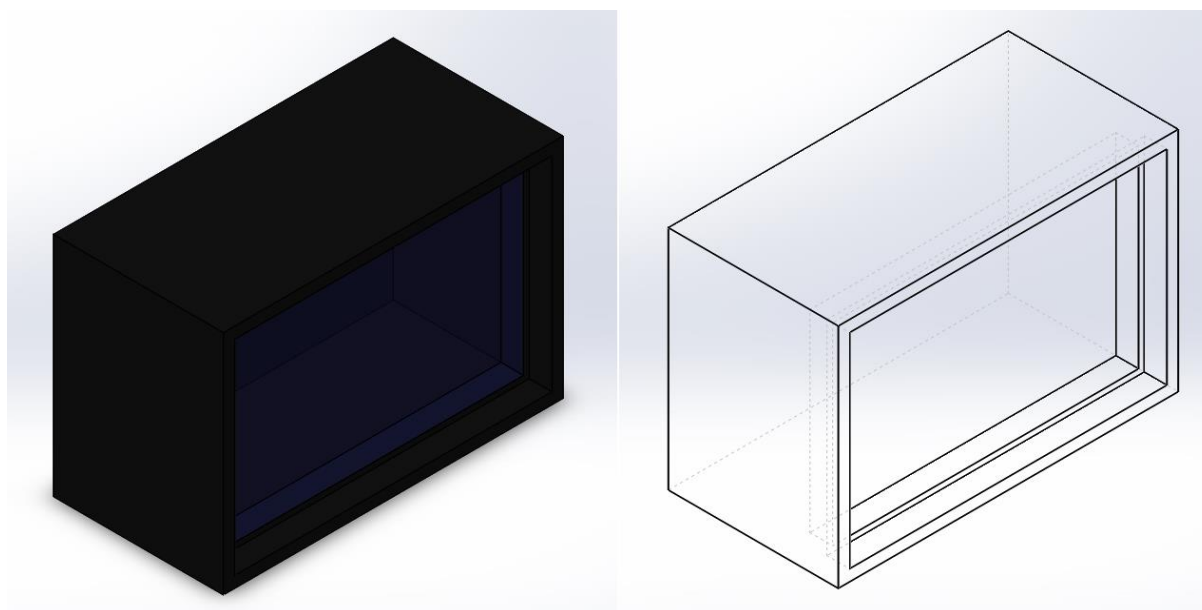
12.2.3. Otvori za kamere i leću projektor

Na prednjoj strani okvira kućišta nalaze se otvori za projektor i kamere, po jedan sa svake strane (Slika 45.).



Slika 45. 2D prikaz prednje strane kućišta

Otvor za leću projektora je četvrtastog oblika i dimenzija leće projektora ASUS S1 (Slika 46.). Nalazi se točno na sredini prednje strane kućišta, te je od svake kamere udaljen za 100 mm, što rezultira baznom udaljenošću od 200 mm.



Slika 46. 3D model leće projektora ASUS S1

Otvori za kamere kružnog su oblika, zbog toga što je na Asler Ace kamere moguće montirati razne leće, zbog montiranja tih leća potreban im je prostor. Kružni otvor je dimenzija $\Phi 35$ mm što je za 5 mm više od stvarne mjere leće kamere.

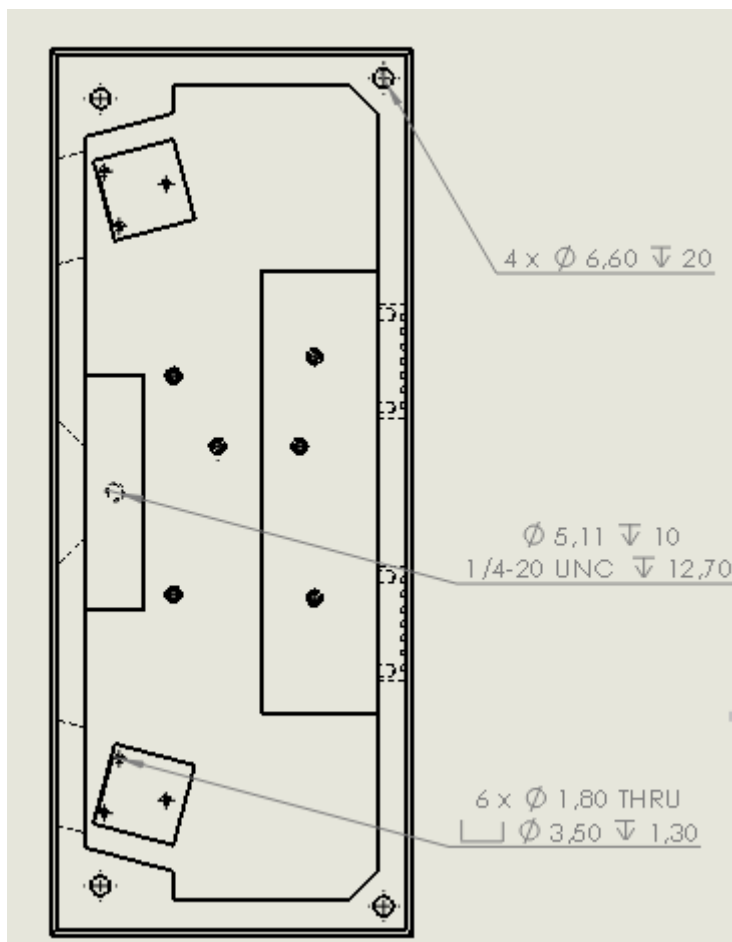
12.2.4. Provrti

Od ostalih značajki koje se nalaze na kućištu projektora su provrti (Slika 47.).

Na gornjoj strani okvira kućišta nalazi se 4 provrta M6 x 20 mm za gornju plohu projektora (poklopac).

Također, na istoj slici se nalaze provrti M1.6 x 15mm za potrebe pričvršćivanja kamera.

Sa donje strane kućišta nalazi se standardni provrt $\frac{1}{4}$ -20 UNC koji služi za pričvršćivanje 3D skenera na tronožac. Taj provrt stavljen je na najčvršćem dijelu 3D skenera te će uvelike olakšati usmjeravanje i postavljanje prilikom kalibracije i skeniranja.



Slika 47. 2D prikaz provrta na kućištu 3D skenera

13. ZAKLJUČAK

S obzirom na dosadašnja ispitivanja možemo zaključiti da pri odabiru svjetla kojim ćemo osvjetljavati scenu moramo misliti na nedostatke istih.

Obojano svjetlo jednako je dobro kao i bijelo svjetlo na neobojenim (crnim, sivim, bijelim) ili mat površinama. Također jednako dobro radi kao i bijelo svjetlo na objektima koji su jednake boje kao i projektirano svjetlo.

Pri projiciranju obojenog svjetla, okolno svjetlo nema toliki utjecaj kao što je to slučaj pri korištenju bijelog svjetla zbog toga što se ispred leća mogu koristiti filteri sa malom propusnošću. Projektirano obojeno svjetlo može proći kroz taj filter, ali okolno svjetlo je u velikom razmjeru potisnuto.

Pri skeniranju problematičnih površina, kao što su sjajne i prozračne površine, obojeno svjetlo nema velike beneficije. Isto vrijedi i za problem refleksija kod sjajnih površina.

Skeniranje konkavnih oblika za sada nije moguće postići skeniranjem strukturiranim svjetlom.

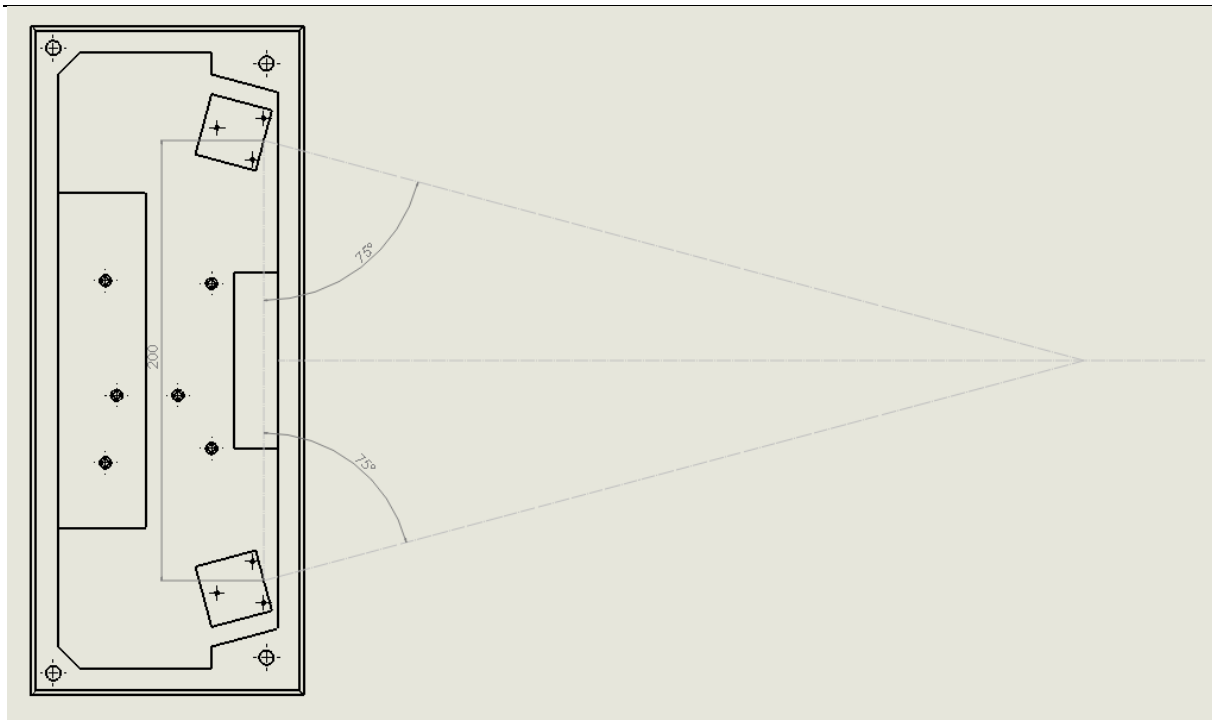
Prilikom korištenja obojenog svjetla kvaliteta skeniranih podataka ovisi o boji objekta, što nije bio slučaj kod bijelog svjetla.

Pošto bijelo, plavo i zeleno svjetlo imaju problema sa skeniranjem objekata komplementarnih boja, najbolje rješenje je (osim nanošenja spreja na površinu objekta) mogućnost zamjene izvora svjetlosti.

Pri odabiru fotoaparata moramo naći balans između broja piksela i osjetljivosti senzora na boje. Svakim danom tehnologija napreduje i dolaze nove tehnologije, pa je tako Canon nedavno na tržište izbacio CMOS senzor sa nevjerovatnih 250 MP. To zvuči primamljivo za korištenje u 3D skeniranju, no ne mora nužno rezultirati boljim rezultatima zbog balansa šuma i rezolucije, gdje manja rezolucija često daje i bolje rezultate.

Prema složenoj konstrukciji možemo odrediti karakteristike 3D skenera kao konačnog proizvoda. Ovdje nećemo ponovno nabrajati sve karakteristike pojedinih komponenti ovog projekta već samo one koje određuju 3D skener kao takav.

Rezolucija kamere i projektora su određene komponentama, no bazna udaljenost koja je važna za triangulaciju i radna udaljenost važne su karakteristike koje ćemo prikazati crtežima.



Slika 48. 2D prikaz bazne i radne udaljenosti

Iz Slika 48. vidimo da su kamere usmjerene prema točki skeniranja pod kutom od 75%. Bazna udaljenost se mjeri od sredine leća kamere i iznosi 200 mm. Iz trokuta triangulacije dobivamo da je radna udaljenost otprilike 370 mm što je zadovoljavajuće. Promatranjem karakteristika sličnih proizvoda na tržištu možemo pretpostaviti mjerno područje od 280 mm x 210 mm.

Dobivene karakteristike konačnog proizvoda su:

- rezolucija kamere: 5 Mp
- rezolucija projektora: 854 x 480
- mjerno područje: 280 mm x 210 mm
- radna udaljenost: 370 mm
- bazna udaljenost: 200 mm
- dimenzije 3D skenera: 204 x 124 x 54 mm.
- Računajući da slična kućišta već postoje na tržištu po cijenama od 30\$ isto neće predstavljati veliki trošak, makar i da je duplo skuplja za izradu. Ako zbrojimo sve cijene komponenata dobivamo sljedeću računnicu:

Tablica 3. Komponente i cijena projekta

Komponenta	Količina	Cijena (pojedinačno)
------------	----------	----------------------

Kamera	2	695\$
Projektor		320\$
Kućište		30\$
Ventilator	2	8\$
Programski paket (GNOM)		400\$
UKUPNO		2156\$

-
- Programski paket koji je ovdje upisan kao trošarina jest upravo onaj koji je opisan u ovom radu a to je GNOM za ATOS 3D skeneru. Pošto je ovaj projekt raden prema ATOS 3D skeneru vjerojatno je lakše napraviti kompatibilnost sa njegovim programskim paketom.
- S obzirom da slični proizvodi na tržištu koštaju i više desetaka tisuća dolara sa ovom cijenom proizvod bi bio veoma povoljan, pogotovo za osobne potrebe pa čak i edukaciju u srednjim i osnovnim školama koje si ne mogu priuštiti profesionalnu opremu.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

LITERATURA

Breuckmann, B. (2014). 25 years of high definition 3D scanning. Njemačka: Breuckamnn GmbH.

Briggs, D. (2007). The Dimensions of Color.

Klaas, E. (2014). What light color should a White scanner use? Daisendorf, Njemačka: Breuckmann GmbH.

Liew, D. S. (2006). Electromagnetic Waves. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing.

Lynch, D. K., & Livingston, W. C. (2001). Limits of the eye's overall range of sensitivity extends from about 310 to 1050 nanometers. Cambridge, UK: (2nd ed.). , Cambridge University Press. p. 231. ISBN 978-0-521-77504-5. Retrieved 12 October 2013.

Starr, C. (2005). Biology: Concepts and Applications. Thomson Brooks/Cole.

Teutsch, C. (2007). Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from Optical 3D Laser Scanners. Shaker Verlag.