

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ivan Perković

Metodologija pripreme modela za virtualno rastavljanje proizvoda

Zagreb, 2024.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za konstruiranje i razvoj proizvoda Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom dr.sc. Tomislava Martineca i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2023./2024.

POPIS KRATICA

- CAD – konstruiranje pomoću računala (engl. *Computer-Aided Design*)
- CMM - uređaji za mjerenje koordinata (engl. *Coordinate Measuring Machines*)
- ToF - vrijeme putovanja lasera (engl. *Time of Flight*)
- CT - kompjuterizirana tomografija (engl. *Computed Tomography*)
- DSR - digitalna rekonstrukcija oblika (engl. *Digital Shape Reconstruction*)
- B-Rep - prikaz graničnih površina (engl. *Boundary Representation*)
- ICP - iterativni algoritam traženja najbližih točaka (engl. *Iterative Closest Point*)

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Rastavljanje proizvoda.....	2
1.2. Motivacija za digitalizaciju procesa rastavljanja.....	3
1.3. Ciljevi rada.....	4
2. PREGLED DOSTUPNIH TEHNOLOGIJA.....	6
2.1. Uređaji za mjerenje koordinata.....	6
2.2. Laserska triangulacija i strukturirano svjetlo.....	7
2.3. Fotogrametrija.....	11
2.4. Kompjuterizirana tomografija.....	12
2.5. Obrada podataka.....	14
2.6. Evaluacija tehnologija.....	15
2.7. Uređaji korišteni u istraživanju.....	15
2.7.1. Scan Dimension SOL PRO.....	16
2.7.2. Creality CR-Scan 01.....	17
2.7.3. Revopoint POP 2.....	18
2.7.4. Tupel 3D Dental.....	18
3. STUDIJA SLUČAJA.....	20
3.1. Puhalica za lišće.....	20
3.1.1. Postupak izrade modela.....	21
3.1.2. Izrada modela puhalice.....	22
3.1.3. CAD modeliranje.....	24
3.1.4. Izbor uređaja.....	26
3.1.5. Priprema komponente.....	28
3.1.6. Način skeniranja i pozicije.....	31
3.1.7. Praćenje komponente.....	33
3.1.8. Obrada podataka dobivenih skeniranjem.....	35
3.1.9. Dodjela boje i teksture.....	39
3.1.10. Sklop i konstrukcijska geometrija.....	41
3.1.11. Primjeri skeniranja komponenti.....	43
3.1.12. Krajnji prikaz sklopa uređaja.....	47

3.2. Mikser	50
3.2.1. Modeliranje	51
3.2.2. Skeniranje	53
3.2.3. Usporedba potrebnih vremena	55
3.2.4. Usporedba kvalitete modela.....	59
4. PRIJEDLOG METODOLOGIJE	61
4.1. Dohvaćanje geometrije	61
4.1.1. Preuzimanje dostupnih modela	62
4.1.2. CAD modeliranje komponenti	62
4.1.3. 3D skeniranje	64
4.2. Dodavanje boje i/ili teksture	73
4.3. Izrada sklopa	75
5. VALIDACIJA METODOLOGIJE.....	79
5.1. Opis eksperimentalne procedure	79
5.2. Kvantitativna usporedba rezultata.....	83
5.3. Kvalitativna usporedba rezultata.....	86
5.3.1. Pregled modela i dodijeljenih ocjena	87
5.3.2. Deskriptivna statistička analiza dodijeljenih ocjena	99
6. ZAKLJUČAK.....	108
LITERATURA.....	111
MIŠLJENJE ETIČKOG POVJERENSTVA	114
ZAHVALE	115
SAŽETAK.....	116
SUMMARY	117

POPIS SLIKA

Slika 1.	Rastavljanje proizvoda s kvarom u svrhu analize [4].....	1
Slika 2.	Uređaj za precizno mjerenje koordinata površina [7]	7
Slika 3.	Laserska triangulacija [8]	8
Slika 4.	Ručno skeniranje laserskim 3D skenerom [9].....	8
Slika 5.	Projekcija strukturiranog svijetla na skenirani objekt [10]	9
Slika 6.	Skeniranje dubokih konkavnih značajki.....	10
Slika 7.	Triangulacija izdvojenih točaka sa različitih fotografija [15]	11
Slika 8.	Oblak točaka statora dobiven fotogrametrijom	12
Slika 9.	Princip rada CT skenera [16].....	13
Slika 10.	3D prikaz sklopa dobiven CT skenerom bez rastavljanja [17]	13
Slika 11.	Pretvorba mreža u B-Rep modele [19].....	14
Slika 12.	Scan Dimension SOL PRO	16
Slika 13.	Creality CR-Scan 01.....	17
Slika 14.	Revopoint POP 2.....	18
Slika 15.	Tupel 3D Dental	19
Slika 16.	Djelomično rastavljen proizvod i njegov računalni prikaz	20
Slika 17.	Proces poklapanja oblaka točaka za rekonstrukciju površine	21
Slika 18.	Sklop mreža s referentnom geometrijom	21
Slika 19.	povezanost komponenti vodičima	22
Slika 20.	Rastavljanje fizičkog uređaja	23
Slika 21.	Preuzeta standardna (lijevo) i modelirana jednostavna komponenta (desno)	24
Slika 22.	Fizička rasterećena komponenta i modelirana komponenta u kontekstu sklopa... ..	24
Slika 23.	Rastavljanjem uništena komponenta i njezin računalni prikaz	25
Slika 24.	Kalibracija fotografije prema poznatoj dimenziji	25
Slika 25.	Izrada skice prema kalibriranom platnu	26
Slika 26.	Dijagram toka izbora metode i uređaja	27
Slika 27.	Skeniranje više komponenti	28
Slika 28.	Projeciranje lasera (lijevo) i strukturiranog svijetla (desno).....	28
Slika 29.	Utjecaj površine na projicirano svjetlo.....	29
Slika 30.	Sprejom ne pripremljena (lijevo) i pripremljena komponenta (desno)	29

Slika 31.	Ekspozicija komponente.....	30
Slika 32.	Osiguravanje komponenti u crnoj masi.....	30
Slika 33.	Stabilne i uspravna orijentacija (lijevo) te uspravna komponenta na okretnom stoliću (desno)	31
Slika 34.	Komponente za uspravno skeniranje.....	32
Slika 35.	Komponenta podignuta s podloge za lakše uklanjanje pozadine	32
Slika 36.	Greška uslijed vidljive statične pozadine	33
Slika 37.	Komponente puhalice pogodne za praćenje značajki.....	33
Slika 38.	Krivo praćenje uslijed manjka značajki cijevi	34
Slika 39.	Dodani objekti za praćenje cijevi	34
Slika 40.	Praćenje markera na objektu (lijevo) i okretnom stoliću (desno)	35
Slika 41.	Označavanje plohe (gore) i označena ploha (dolje)	35
Slika 42.	Detektirane najdalje točke (buka).....	36
Slika 43.	Automatski poklopljeni oblaci točaka	36
Slika 44.	Površinski artefakti uslijed grešaka u oblaku točaka i visoke razine detalja mreže	37
Slika 45.	Razlika veličine trokuta za zapis malih zakrivljenih i velikih ravnih značajki	38
Slika 46.	Očuvanje originalne kvalitete mreže	39
Slika 47.	Naknadno modeliranje rupa na mrežnom modelu	39
Slika 48.	Jednoboje komponente kojima je dodijeljena boja	40
Slika 49.	Dvoboje komponenta	40
Slika 50.	Teksturirana komponenta	41
Slika 51.	Referentna os na temelju presjeka mreže	41
Slika 52.	Definiranje konstrukcijske ravnine	42
Slika 53.	Definiranje međuovisnosti u sklopu prema referentnoj geometriji.....	42
Slika 54.	Montažni sklopovi puhalice	47
Slika 55.	Izolacija prikaza komponente u mrežnom pregledniku	48
Slika 56.	Izrada presjeka prikaza sklopa u mrežnom pregledniku	48
Slika 57.	Izrada opaski tijekom analize	49
Slika 58.	Otvoreni prikaz cijelog uređaja	49
Slika 59.	Glavni sklopovi miksera.....	50
Slika 60.	Djelomični presjek modeliranog sklopa.....	51

Slika 61.	Komponente lagane za CAD modeliranje.....	52
Slika 62.	Modelirani namotaji	52
Slika 63.	Lijevano ležajno mjesto rotora	52
Slika 64.	Djelomični presjek skeniranog sklopa	54
Slika 65.	Zahtjevna komponenta za skeniranje	55
Slika 66.	Prikazi rotora i statora	55
Slika 67.	Komponente čiji je prikaz efikasnije izrađen 3D skeniranjem.....	57
Slika 68.	Komponente čiji je prikaz efikasnije izrađen 3D modeliranjem.....	57
Slika 69.	Presjek hibridnog modela na temelju vremena pripreme komponenti.....	58
Slika 70.	Stvarna (lijevo), CAD modelirana (sredina) i 3D skenirana (desno) komponenta	59
Slika 71.	Precizno došjedanje CAD modela (lijevo) i preklopi 3D skenova (desno)	60
Slika 72.	Presjek hibridnog modela.....	60
Slika 73.	Glavni koraci metodologije izrade digitalnih prikaza	61
Slika 74.	Dohvaćanje geometrije.....	61
Slika 75.	Preuzimanje modela s repozitorija [24].....	62
Slika 76.	Vrijeme izrade prikaza komponenti miksera u ovisnosti o broju značajki CAD modela	63
Slika 77.	Skenirana komponenta (lijevo) i modelirana komponenta (sredina i desno).....	63
Slika 78.	Primjer komponente s pravilnim izborom orijentacije skenera.....	64
Slika 79.	Plastelinom osigurana inače nestabilna orijentacija.....	65
Slika 80.	Običan (lijevo) i sublimirajući (desno) sprej za skeniranje.....	66
Slika 81.	Cijev puhalice pripremljena sprejom za skeniranje	66
Slika 82.	Pužnik osiguran kvačicom.....	67
Slika 83.	Efikasno označavanje objekta	67
Slika 84.	Uklanjanje šuma iz oblaka točaka	68
Slika 85.	Poravnanje oblaka točaka prema koordinatnom sustavu	68
Slika 86.	Proces poklapanja oblaka točaka.....	69
Slika 87.	Različite razine detalja površine: a) Izvorni oblak točaka, b) najniža razina detalja, c) srednja razina detalja, d) najviša razina detalja.....	70
Slika 88.	Pojava artefakata na višoj razini detalja (lijevo) i manjak artefakata na nižoj razini detalja (desno)	70

Slika 89.	a) Rekonstruirana mreža, b) Optimizirana mreža c) Prikaz rekonstruirane mreže, d) Prikaz optimizirane mreže.....	71
Slika 90.	Negativni elementi u programu Fusion 360	72
Slika 91.	Naknadno modeliranje rupa u mreži dobivenoj 3D skeniranjem.....	72
Slika 92.	Dodavanje boje ili teksture mrežama	73
Slika 93.	Jednobojna CAD modelirana (lijevo) i 3D skenirana komponenta (desno)	73
Slika 94.	Komponenta modelirana kao više tijela zbog dodjele materijala.....	74
Slika 95.	Primjeri komponenti kod kojih je moguće jednostavno razdijeliti mrežu	74
Slika 96.	Teksturiranje mreže pomoću fotografija	75
Slika 97.	Poravnanje skeniranih komponenti u sklopu.....	76
Slika 98.	Definiranje plohe trijema točkama (lijevo) i odmakom od ishodišne ravnine (desno)	76
Slika 99.	Modelirane CAD značajke (lijevo) i definirane značajke spoja (desno).....	76
Slika 100.	Definiranje osi kroz središnju točku presjeka okomito na ravninu presjeka.....	77
Slika 101.	Definiranje osi kroz središnje točke dvaju presjeka.....	77
Slika 102.	Potpuno definirana konstrukcijska geometrija na primjeru komponente kućišta .	77
Slika 103.	Krajnji sklop pjenjače.....	78
Slika 104.	Pogled na rastavljeni proizvod	78
Slika 105.	Eksperimentalni postav	80
Slika 106.	Komponente manjih dimenzija skeniranje na Tupelu.....	81
Slika 107.	Komponente većih dimenzija skeniranje na POP-u 2	81
Slika 108.	Pisane upute za 3D skeniranje i obradu podataka	81
Slika 109.	Skeniranje pokaznog objekta.....	82
Slika 110.	Procesiranje prolaza skeniranja pokaznog primjera u zasebnom softveru.....	82
Slika 111.	Vrijeme izrade prikaza u ovisnosti o broju značajki CAD modela (sudionici eksperimenta)	84
Slika 112.	Vrijeme izrade prikaza u ovisnosti o broju značajki CAD modela (prosječna vremena).....	85
Slika 113.	Poboljšanje shvaćanja funkcija i prikaza značajki komponente teksturom	93
Slika 114.	Komponenta s dodatnim modeliranim značajkama i dodijeljenom teksturom u CAD sustavu	96
Slika 115.	Dodatni prikaz funkcije moguć CAD modeliranjem	99

Slika 116. Raspodjela ocjena prema kriteriju mogućnosti prepoznavanja podfunkcija.....	99
Slika 117. Raspodjela ocjena prema kriteriju točnosti detalja (reprodukcije značajki)	100
Slika 118. Raspodjela ocjena prema kriteriju sličnosti površina i tekstura	100
Slika 119. Raspodjela ocjena prema kriteriju sličnosti proporcija značajki.....	101
Slika 120. Prosječne ocjene svih komponenti prema kriteriju mogućnosti prepoznavanja podfunkcija.....	102
Slika 121. Prosječne ocjene malih komponenti prema kriteriju mogućnosti prepoznavanja podfunkcija.....	102
Slika 122. Prosječne ocjene velikih komponenti prema kriteriju mogućnosti prepoznavanja podfunkcija.....	102
Slika 123. Prosječne ocjene svih komponenti prema kriteriju točnosti detalja (reprodukcije značajki)	103
Slika 124. Prosječne ocjene malih komponenti prema kriteriju točnosti detalja (reprodukcije značajki)	104
Slika 125. Prosječne ocjene velikih komponenti prema kriteriju točnosti detalja (reprodukcije značajki)	104
Slika 126. Prosječne ocjene svih komponenti prema kriteriju sličnosti površina i tekstura	105
Slika 127. Prosječne ocjene malih komponenti prema kriteriju sličnosti površina i tekstura	105
Slika 128. Prosječne ocjene velikih komponenti prema kriteriju sličnosti površina i tekstura	105
Slika 129. Prosječne ocjene svih komponenti prema kriteriju sličnosti proporcija značajki	106
Slika 130. Prosječne ocjene malih komponenti prema kriteriju sličnosti proporcija značajki	106
Slika 131. Prosječne ocjene velikih komponenti prema kriteriju sličnosti proporcija značajki	107

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Dimenzije komponenti koje je moguće skenirati.....	27
Tablica 2.	Optimizacija mreže	38
Tablica 3.	Primjeri pristupa izrade računalnih prikaza	43
Tablica 4.	Usporedba vremena potrebnih za pripremu prikaza	56
Tablica 5.	Podaci o vremenima skeniranja i modeliranja prikupljeni tijekom eksperimenta.	83
Tablica 6.	Prikazi komponente pužnog kola i pripadajuće ocjene.....	88
Tablica 7.	Prikazi komponente pužnika i pripadajuće ocjene.....	89
Tablica 8.	Prikazi komponente poklopca i pripadajuće ocjene.....	90
Tablica 9.	Prikazi komponente prekidača i pripadajuće ocjene.....	91
Tablica 10.	Prikazi komponente graničnika i pripadajuće ocjene	92
Tablica 11.	Prikazi komponente statora i pripadajuće ocjene.....	93
Tablica 12.	Prikazi komponente donjeg kućišta baze i pripadajuće ocjene.....	94
Tablica 13.	Prikazi komponente gornjeg kućišta pjenjače i pripadajuće ocjene	95
Tablica 14.	Prikazi komponente gornjeg kućišta baze i pripadajuće ocjene	96
Tablica 15.	Prikazi komponente gornjeg sklopa ležaja i pripadajuće ocjene	98

1. UVOD

Razvoj novih proizvoda zahtijeva razumijevanje primjene fizikalnih i radnih principa za ostvarivanje pojedinih funkcija proizvoda kroz fizičku formu. Shvaćanje takvih kompleksnih principa zahtijeva pregled dostupnog znanja o strukturi i načinu rada različitih tehničkih sustava, a koje je sadržano u postojećim, dostupnim proizvodima, čijim se rastavljanjem može mnogo naučiti. Stoga se u visokom obrazovanju razvojnih inženjera, uz prijenos potrebnih teoretskih znanja, često provodi i direktna analiza komponenti i sklopova postojećih proizvoda, kroz koju je moguće bolje razumjeti njihovo oblikovanje, funkcije i način ostvarivanja istih, korištene materijale, kao i tokove energije. Dodatno, mogu se pretpostaviti troškovi izrade ili kupovine pojedinih komponenti te se kroz rastavljanje može razmatrati optimalni tijek sastavljanja i rastavljanja. Rastavljanje fizičkih proizvoda ključan je dio obrazovanja inženjera, kako se uvidom u cijeli proizvod razvija svijest od međuovisnostima komponenti, promatrajući uređaj kao kompleksni sustav [1]. Analiziranje svih ovih aspekata mnogo je vrijednije ako se radi u kontekstu cijelog i stvarnog proizvoda, nego u izoliranim primjerima koje je često lakše prezentirati zbog perspektive na međuovisnosti funkcija i izvedbe u složenim sustavima. Kako bi stečeno razumijevanje principa bilo primjenljivo na rješavanje specifičnih problema, na osnovu rastavljenih proizvoda kreira se tehnički opis funkcija i podfunkcija koje komponente obavljaju kako bi se postigao krajnji cilj proizvoda [2], [3].



Slika 1. Rastavljanje proizvoda s kvarom u svrhu analize [4]

1.1. Rastavljanje proizvoda

Tradicionalni način izvedbe rastavljanja u svrhu analize u inženjerskoj edukaciji je fizičko rastavljanje proizvoda. Proizvodi koji se rastavljaju često su na kraju svojeg životnog ciklusa te potencijalno u kvaru, s obzirom da je nabava novih uređaja neisplativa. Stanje takvih proizvoda može utjecati na analizu kada se ne može procijeniti koje su teksture i detalji nastali dugogodišnjim korištenjem, a koje su originalno postojale na proizvodu. S druge strane, stanje takvih proizvoda može omogućiti razmatranje slabih točaka u konstrukciji u slučaju kvara ili mjesta trošenja promatranjem tekstura.

Proizvodi koji su najlakše dobavljivi, a time i najčešće upotrebljavani, jesu mali kućanski aparati, električni alati i ostala potrošačka elektronika. Takvi proizvodi su elektromehanički uređaji te daju koristan uvid u različite vrste statičkih i dinamičkih konstrukcija, generalno konstruiranih za masovnu proizvodnju prikladnim proizvodnim procesima. Takva vrsta uređaja generalno nije predviđena za rastavljanje od strane korisnika te je zaštićena posebnim mjerama. Lijepljenja, sigurnosni ili skriveni vijci uz ostale tehnike otežavaju nedestruktivno rastavljanje od strane osoba bez specijaliziranog alata ili specijalističkog znanja i vještina. Osiguravanje radnog prostora za rastavljanje fizičkih proizvoda uz samo njihovo nabavljanje te potreban alat i zaštitnu opremu za veću grupu studenata značajan je financijski i organizacijski pothvat.

Tijekom uvodnih kolegija prvog semestra na Penn State sveučilištu studenti rastavljaju, analiziraju te redizajniraju iste proizvode na temelju fizičkih proizvoda kao što su električne četkice, jednokratni fotoaparati te aparati za kavu [5]. Slične analize putem rastavljanja fizičkih proizvoda odvijaju se i na sveučilištu Teksasa u Austinu te Iowa State sveučilištu, gdje se izrađuju sklopni crteži fizičkih komponenti [5]. Ovisno o broju polaznika ovih i njima sličnih kolegija, za organizaciju potrebna je nabava vrlo velikog broja uređaja. Virginia Tech organizira kolegij sa 1200 polaznika, što zahtijeva 5000 \$ sredstava godišnje [5]. Razmatrajući opetovanu potrebu za ovakvim investicijama, uočava se značajna potencijalna ušteda korištenjem virtualnih proizvoda.

Fizičko je rastavljanje često predviđeno u grupnom radu unutar određenog termina ograničenog trajanja. Za kompleksnije sustave teško je omogućiti dovoljno vremena kako bi se proizvod u potpunosti analizirao iz više različitih aspekata. Izvan organiziranih termina teško je omogućiti

sve što je potrebno za kvalitetan rad, pogotovo ako je riječ o više studenata koji rade na istom fizičkom proizvodu. Fizički proizvodi također imaju ograničeni broj sastavljanja i rastavljanja prije nego se gotovo neizbježno oštete te je zbog toga potrebno kontinuirano nabavljanje novih proizvoda sa svim komponentama i odgovarajućom kompleksnosti na kraju svojih životnih ciklusa.

1.2. Motivacija za digitalizaciju procesa rastavljanja

Razmatranjem prethodno navedenih problema kod rastavljanja fizičkih proizvoda, ovaj rad predlaže novi način izvođenja vježbi analize proizvoda na temelju virtualnih modela. Rastavljanje digitalnih proizvoda omogućava korištenje već dostupnih računalnih resursa bez potrebe za obnavljanjem asortimana jednom izrađenih modela. Ovakav pristup eliminira troškove i većinu organizacijskih poteškoća koje postoje kod fizičkog rastavljanja u visokom obrazovanju. Digitalno rastavljanje omogućava studentima da promatraju proizvod, njegove podsklopove i komponente zajedno ili odvojeno te svaki pojedinačno neovisno jedni o drugima bez ograničenja mjesta i vremena u kojem se analize vrše. Ova metoda omogućava vizualizaciju dijelova kakva nije moguća fizičkim rastavljanjem, kao što su na primjer presjeci.

Fakultet strojarstva i brodogradnje od 2020. (vrijeme prisilne virtualne nastave uslijed pandemije) koristi ovaj način izvedbe rastavljanja proizvoda, tijekom čega se ukazao najveći problem virtualnog pristupa, a to je nedostatak modela odgovarajuće kvalitete, odnosno razine detalja. Na primjer, modeli koji se mogu preuzeti s Interneta najčešće ne predstavljaju stvarne proizvode, ne uključuju sve komponente (posebice one koje se nalaze u unutrašnjosti proizvoda), nemaju odgovarajuće detalje i nisu kompatibilni sa sustavima za konstruiranje pomoću računala, tzv. CAD (engl. *Computer Aided Design*) alatima koje studenti koriste. Štoviše, naizgled kvalitetni virtualni modeli ne mogu u potpunosti vjerno prikazati sve detalje, teksture i potencijalne nesavršenosti koje su vidljive na stvarnom proizvodu.

No čak i uz navedene nedostatke, predloženi pristup otvara mogućnosti održavanja praktične nastave u vidu vježbi rastavljanja za više obrazovnih organizacija i različite edukativne kontekste. Virtualno rastavljanje proizvoda ima značajne prednosti naspram fizičkog, uključujući jednostavnu primjenu u ranim fazama obrazovanja inženjera, omogućujući

studentima neometani pristup detaljnoj analizi proizvoda bez financijskih i organizacijskih zapreka. Iako fizikalni proizvodi za rastavljanje pružaju razinu detalja i taktilne informacije koje se ne mogu zamijeniti digitalni proizvodom, potrebno je težiti povećanju kvalitete digitalnog prikaza proizvoda.

S obzirom na to da virtualno rastavljanje proizvoda uvelike ovisi o kvaliteti korištenih modela, ključno razmotriti najbolji način za njihovu izradu. Nedostupnost odgovarajućih modela ukazuje da sveobuhvatne digitalne replike stvarnih proizvoda nije jednostavno izraditi te da postoji potreba za izradom metodologije za efikasnu i priuštivu pripremu modela prikladnih za virtualno rastavljanje proizvoda, ponajprije u svrhu analize njihove strukture i funkcionalnosti. Glavni cilj ovog rada je formulacija i validacija ovakve metodologije.

1.3. Ciljevi rada

Priprema kvalitetnih modela zahtjevan je proces te ovaj rad razmatra korištenje CAD modeliranja i 3D skeniranja te pravilan odabir između te dvije metode prema kompleksnosti i obliku geometrije pojedinih komponenti. Fokus predložene metodologije je izrada modela za virtualno rastavljanje proizvoda, primarno s ciljem funkcijske dekompozicije proizvoda. Za uspješnu reprodukciju fizičkog rastavljanja, modeli proizvoda moraju blisko prikazivati stvarne komponente u geometriji, prikazi komponenata mora biti dostupni u sklopljenom stanju te prilagođeni za pregledavanje u okruženju poznatom krajnjim korisnicima, odnosno studentima. Kao što je već navedeno, izlazni modeli moraju biti kvalitetni, no dodatno moraju biti brzi i jeftini za izradu. Vrijeme potrebno za izradu mora biti usporedivo s vremenom potrebnom za nabavu starih proizvoda te pripremu i nadzor njihovog rastavljanja. Uvjet troška izrade modela postavljen je iz početnog problema financijskog opterećenja nabavke modela i održavanja vježbi, gdje bi izrada modela skupim alatima samo zamijenila dosadašnji trošak. Trošak, kao i vrijeme za izradu modela može se promatrati i kroz rad ljudi koji će biti potreban.

Uzimajući u obzir sve navedeno, cilj rada je predložiti, testirati i validirati metodologiju koju nastavnici i studenti mogu pratiti uz osnovne upute te uz minimalno iskustva kako bi u optimalnom vremenu i uz minimalne troškove izradili modele zadovoljavajuće kvalitetne za

virtualno rastavljanje proizvoda. Kako bi se ovi ciljevi postigli, postavljena su sljedeća istraživačka pitanja:

- Koje su tehnologije za povratno inženjerstvo prikladne za upotrebu u edukacijskom okruženju?
- Mogu li se pristupačnim metodama povratnog inženjerstva izraditi visokokvalitetni modeli za virtualno rastavljanje proizvoda?
- Koje korake i odluke obuhvaća metodologija izrade modela komponenata i sklopova različitih geometrija, tekstura i funkcija?
- Mogu li ciljani korisnici efikasno reproducirati korake metodologije i izraditi modele prikladne za virtualno rastavljanje proizvoda?

Struktura rada prati ova četiri istraživačka pitanja. U drugom je poglavlju prikazan pregled dostupnih tehnologija povratnog inženjerstva, s naglaskom na priuštive uređaje i pripadajući softver koji se mogu koristiti u edukacijskom okruženju. U trećem je poglavlju prikazana studija slučaja koja prati digitalizaciju cjelokupnih sklopova dva elektromehanička proizvoda kako bi se dobio uvid u mogućnost reprodukcije rastavljanja proizvoda u virtualnom okruženju. Četvrto poglavlje razlaže metodologiju za izradu modela neovisno o dostupnoj opremi i detaljno opisuje korake dohvaćanja geometrije komponenti, dodavanja boja i tekstura te izrade modela sklopa. U petom poglavlju je opisana eksperimentalna studija u kojoj predstavnici ciljanih korisnika primjenjuju neke od koraka metodologije kako bi izradili računalne modele komponenti proizvoda, što je ujedno i preduvjet za validaciju efikasnosti i učinkovitosti predložene metodologije. U zadnjem su poglavlju izvučeni zaključci rada, uključujući refleksiju na istraživačka pitanja, doprinos i ograničenja prikazanog istraživanja te moguće smjerove budućih istraživanja.

2. PREGLED DOSTUPNIH TEHNOLOGIJA

U uvodnom je poglavlju opisana potreba za jeftinom i efikasnom izradom kvalitetnih virtualnih prikaza proizvoda, točnije detaljnih 3D računalnih modela proizvoda. Očiti izbor sredstva izrade 3D modela koje inženjeri, studenti i nastavnici koriste gotovo svakodnevno je CAD modeliranje, programima za modeliranje pomoću značajki. Ovaj pristup pogodan je za neke geometrije i vrste komponenti, no s povećanjem kompleksnosti značajki, kao i njihovog broja, dostiže se granica vremenske isplativosti takvog pristupa. Modeliranje kompleksnih značajki, kao što su prostorno zakrivljene površine koje se često javljaju u razmatranim proizvodima, ponekad prelazi sposobnosti ciljanih korisnika ove metode. Stoga su, kao dopuna 3D modeliranju, u ovom poglavlju razmotrene i ostale dostupne tehnologije za kreiranje virtualnih modela komponenti. Naime, s obzirom na to da potreba za dobivanjem trodimenzionalnih modela postoji i u drugim sferama inženjerstva, do danas su razvijeni različiti dodatni sustavi i metode za reverzibilno inženjerstvo fizičkih komponenti, a koji su ukratko upisani u sljedećim odjeljcima.

2.1. Uređaji za mjerenje koordinata

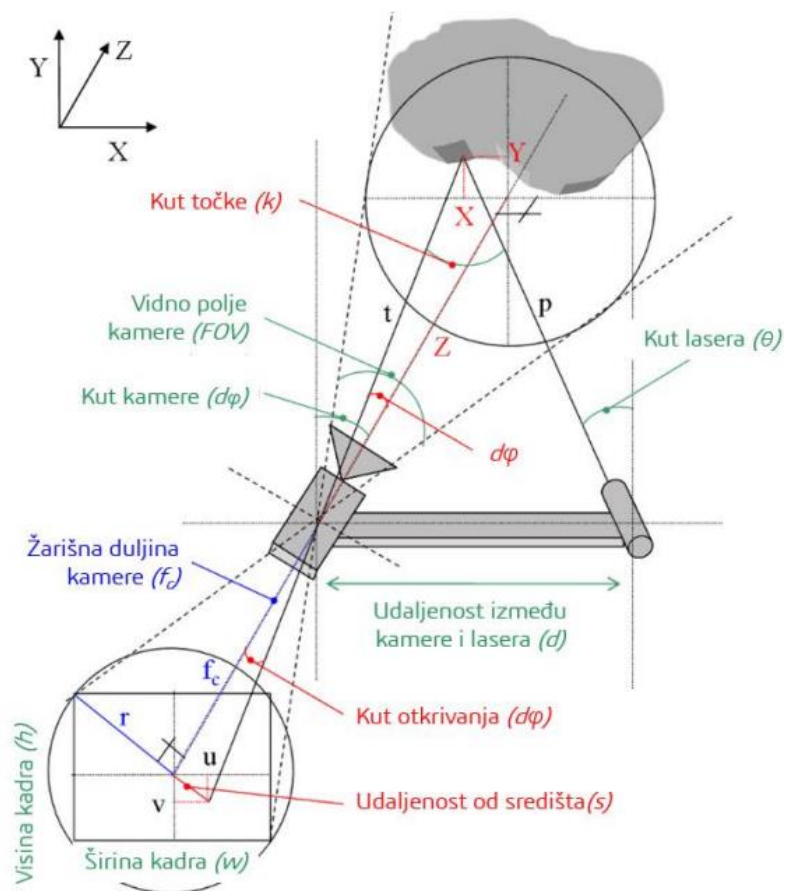
Kontrola kvalitete i potreba za preciznim mjerenjem rezultirali su mnoštvom srodnih kontaktnih metoda mjerenja i pripadajućih alata, tzv. CMM uređaja (engl. *Coordinate measuring machines*) [6]. Ovakve metode bilježe točke u prostoru optičkim ili mehaničkim praćenjem taktilne sonde. Prikazano optičko praćenje sonde omogućava veću fleksibilnost prilikom bilježenja pozicije točaka na površini. Te se metode koriste kada je s fizičke komponente potrebno precizno zabilježiti mjere toleriranih površina. Samim time, postupci mjerenja koordinata nisu podobni za direktnu izradu računalnih prikaza cjelokupne geometrije komponenti i svih njihovih značajki. No metode se ipak pokazuju efikasne u bilježenju karakteristika površina i kontura, a te se informacije mogu koristiti kao osnova za CAD modeliranje komponenti, koristeći površine i konture kao osnovu konstrukcijske geometrije. Takvi uređaji visoko su specijalizirani te je za njihovo korištenje potrebna edukacija. Zbog vrlo visoke preciznosti ovakvih uređaja te često masivne konstrukcije, njihova cijena nerijetko prelazi 50,000€.



Slika 2. Uređaj za precizno mjerenje koordinata površina [7]

2.2. Laserska triangulacija i strukturirano svjetlo

Za dobivanje potpune informacije o vidljivim površinama moguće je koristiti i postupke 3D skeniranja. Takvim se postupcima nedestruktivno i beskontaktno dobivaju podaci o geometriji te ponekad o boji fizičkih objekata. Dvije glavne vrste optičkih skenera jesu oni koji koriste strukturirano svjetlo (engl. *structured light*) i lasersku triangulaciju (engl. *laser triangulation*). Uređaji na principu laserske triangulacije iz poznatih relativnih kutova laserskog izvora i kamere te udaljenosti između njih, prema zabilježenom položaju lasera na senzoru kamere izračunavaju položaj točke na skeniranom objektu [Slika 3]. Postupak laserske triangulacije prikazan na slici opisuje dobivanje informacije o poziciji jedne točke na objektu. U svakom položaju u praksi se izračunava pozicija jedne ili više linija lasera. Kako bi se zabilježila cijela površina komponente potrebno je ili ručno u više prolaza pomicati uređaj relativno na komponentu (kao što je to prikazano na donjoj slici) ili uz stacionaran uređaj pomičnim postoljem rotirati komponentu. Uz rotirajući stolić moguća je kombinacija i sa zakretnim laserskim izvorom kako bi se dobile informacije o poziciji cijelog vidnog polja kamere za određenu rotaciju stolića.

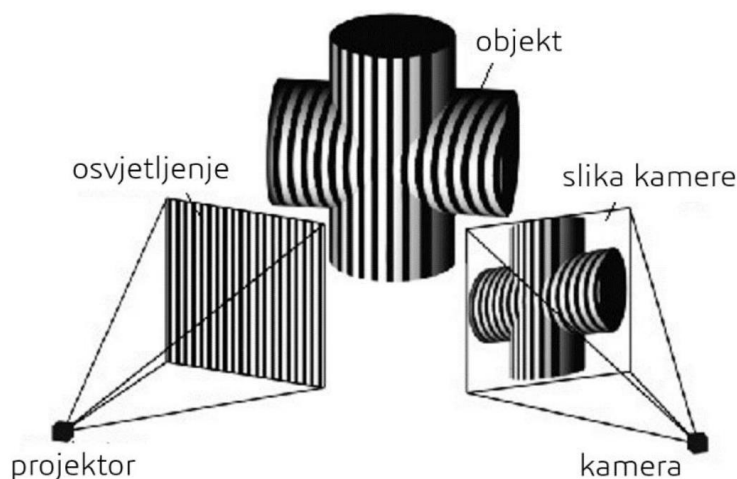


Slika 3. Laserska triangulacija [8]



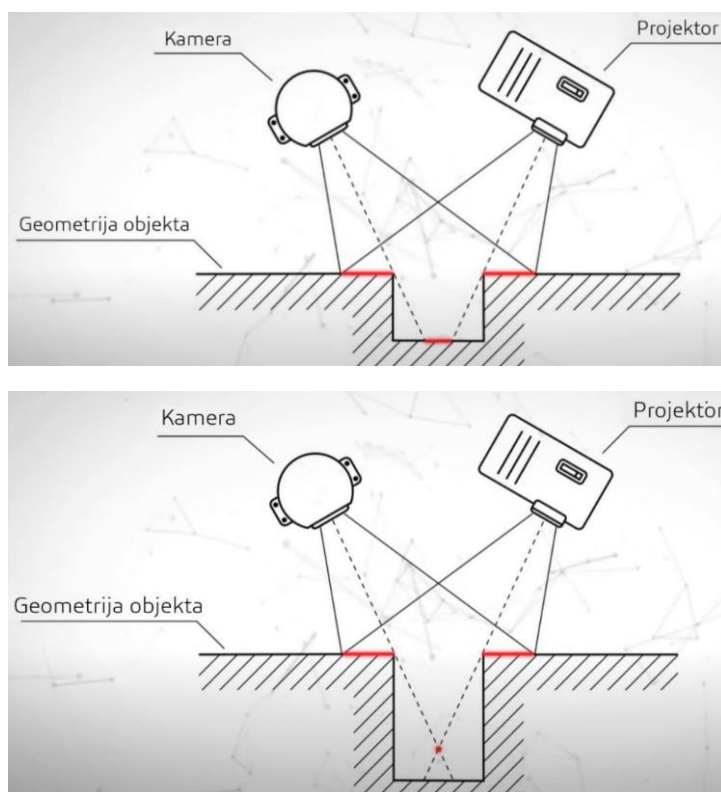
Slika 4. Ručno skeniranje laserskim 3D skenerom [9]

Dobivanje informacija o dubini moguće je ostvariti i strukturiranim svjetlom. Takvi uređaji koriste zadani uzorak vidljivog ili infracrvenog svjetla koje se projicira na površinu komponente. Prethodno opisanim procesom triangulacije se iz vidljivog dijela projicirane svjetlosne matrice dobiva podatak o poziciji točaka na komponenti kao što je to prikazano u donjoj slici. Skupni zapis koordinata točaka na površini naziva se oblak točaka (engl. *point cloud*).



Slika 5. Projekcija strukturiranog svjetla na skenirani objekt [10]

Skeniranje strukturiranim svjetlom može biti brže od laserske alternative jer je moguće analizirati prepoznatljive značajke cijele vidljive matrice svjetla odjednom, dok se laser mora micati po objektu. Uređaji s više laserskih zraka povećavaju brzinu skeniranja kod laserske triangulacije. Zbog većeg same širine laserske zrake te kontrasta sa površinom objekta, takav pristup generalno rezultira preciznijim oblacima točaka sa manje buke. Oba opisana procesa 3D skeniranja kroz više prolaza u mogućnosti su zabilježiti cijelu vanjsku površinu komponente. Zbog relativnog kuta između laserskog ili svjetlosnog izvora i kamere, iznimka u bilježenju točaka površine su duboke konkavne značajke. Za bilježenje pozicije točke na površine svjetlosni izvor mora biti u mogućnosti projicirati svjetlost na nju, dok je u isto vrijeme vidljiva iz perspektive kamere. Industrijski, profesionalni uređaji koji koriste ove tehnologije dostižu cijene do oko 60,000€. Razvitkom tehnologije i predstavljanjem pristupačnijih uređaja, moguće je nabaviti 3D skener cijene u rasponu od 500€ do 2000€. Kako uređaji u ovom cjenovnom rasponu nisu namijenjeni profesionalcima, često je njihova uporaba vrlo automatizirana. Prateći softveri i dostupne upute zamjenjuju potrebu za dodatnu edukaciju.



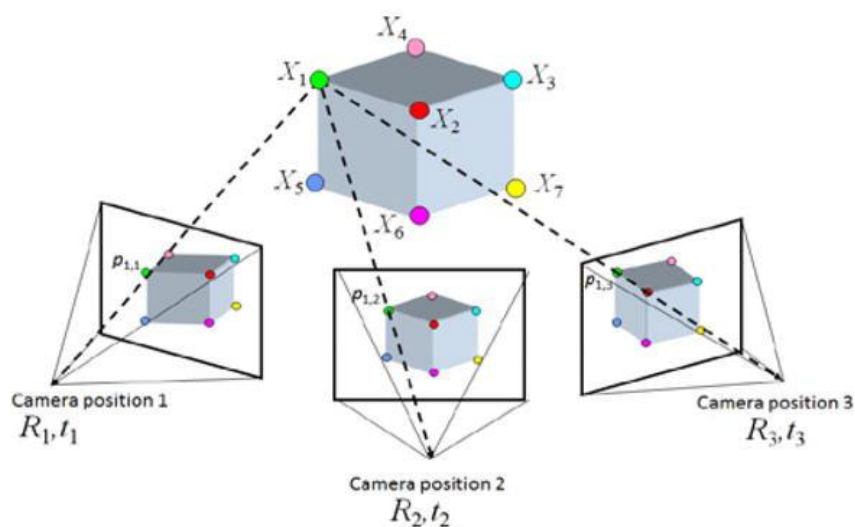
Slika 6. Skeniranje dubokih konkavnih značajki

Na gornjoj slici samo crveno označene površine je moguće zabilježiti opisanim procesima. Opisani problem može se umanjiti aktivnim pristupom laserskog 3D skeniranja u kojem se mjeri vrijeme putovanja laserskog svjetla, ToF (engl. *Time of flight*) [11]. Takav pristup smanjio bi zahtjeve za oblik površine tako da bi ista samo morala biti vidljiva iz perspektive izvora svjetla. Ovakav pristup ima nedostatke u pogledu točnosti, stoga komercijalni uređaji s takvim sensorima nisu zastupljeni. Iz potrebe za jasnim projiciranim uzorcima sama površina objekta mora biti kompatibilna, odnosno ne smije biti prozirna, crna niti reflektivna. Iz zabilježenih točaka ovim metodama za prikaz objekata potrebno je rekonstruirati površinu. Rekonstrukcija površine uspješnija je ako postoji manje šuma kod zapisa pozicija točaka te ako postoji dovoljna gustoća točaka. Ove vrste skeniranja uspješno su korištene u razne svrhe edukativnog i industrijskog karaktera. Lasersko skeniranje krhkog povijesnog oružja za daljnju digitalnu analizu [12] pokazuje vrijednost skeniranja u očuvanju fizikalnih artefakata, kao i dostupnost i lakoću pregledavanja geometrije koja se ovom metodologijom pokušava postići kod analize funkcija. Fizički artefakti koji se koriste za kreiranje kompleksnih površina kao što su to glineni modeli karoserija također se efikasno mogu koristiti za daljnje modeliranje i

konstruiranje. Proces digitalizacije takvih kompleksnih površina pokazao se kao optimalan u edukativnom okruženju [13].

2.3. Fotogrametrija

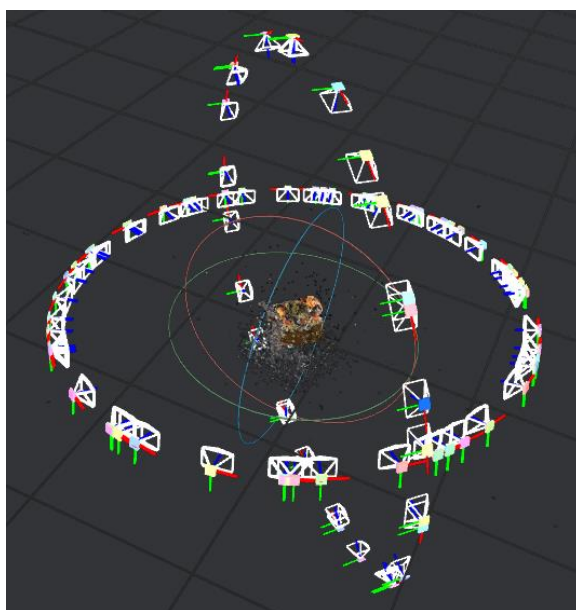
Dobivanje trodimenzionalne geometrije moguće je rekonstrukcijom dobiti i bez projiciranja svjetla iz samog uređaja. Prikupljanjem dovoljnog broja fotografija fizičkog objekta iz različitih pogleda moguće je izraditi njegovu digitalnu vizualizaciju. Takav proces zove se fotogrametrija i temelji se na triangulaciji prepoznatih istaknutih značajki s različitih fotografija. Istaknute značajke mogu biti rubovi objekta ili nekih njegovih značajki, kutovi te istaknute mrlje koje se dalje klasificiraju kao točke i područja interesa [14]. Takvi prepoznati diskontinuiteti uspoređuju se na fotografijama raznih pogleda i perspektiva te ih pomoću poznatih parametara fotografija (žarišna duljina, distorzija leće) postavljaju u prostor kao što je prikazano na donjoj fotografiji.



Slika 7. Triangulacija izdvojenih točaka sa različitih fotografija [15]

Skup točaka dobiven ovom metodom analogan je onima dobivenim laserskom triangulacijom i strukturiranim svjetlom te se digitalna vizualizacija postiže rekonstrukcijom površine iz točaka. Ključan aspekt ove metode je mnoštvo diskontinuiteta, odnosno teksture na skeniranom objektu, jer ona pruža mnogo potencijalnih značajki za registraciju. Fotografije također moraju biti jednoličnog osvjetljenja iz svih kutova, kako bi se one međusobno mogle uspoređivati. Velika prednost ove metode je ta što u teoriji ne zahtjeva specijalizirani uređaj, samo kameru i

računalo za kasniju rekonstrukciju objekta. Kako se povećava potreba za razinom detalja prikaza (modela), povećava se i potreban broj fotografija, što može rezultirati drastičnim povećanjem zahtjeva za računalnim vremenom obrade. Donja slika jasno prikazuje orijentacije snimanja slika statora u dva prolaza. Također je vidljivo kako se točke registriraju iz slika, lagano je dodijeliti im boju. Moguće je tako iz točaka koje imaju informacije o bojama rekonstruirati površinu koja bolje predstavlja stvarnu komponentu.



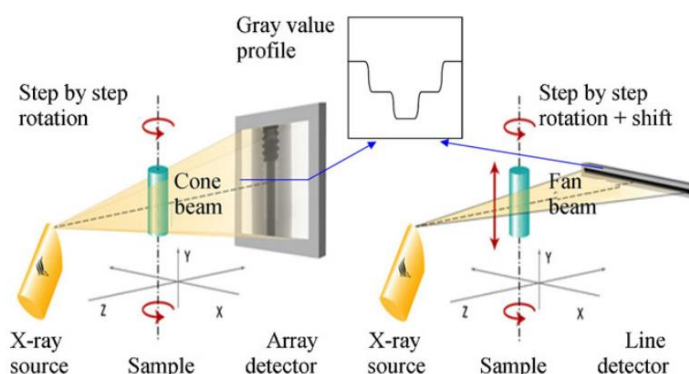
Slika 8. Oblak točaka statora dobiven fotogrametrijom

Korištenje ove metode vrlo je cjenovno dostupno zbog korištenja uređaja koje većina korisnika već posjeduje, kao što su računalo i neki oblik kamere (najčešće u obliku pametnog telefona). Iako je korištenjem pojedinih softvera proces relativno jednostavan i automatiziran, za najbolje rezultate potrebno je vrlo dobro poznavati teoriju te dostupne opcije tijekom obrade fotografija.

2.4. Kompjuterizirana tomografija

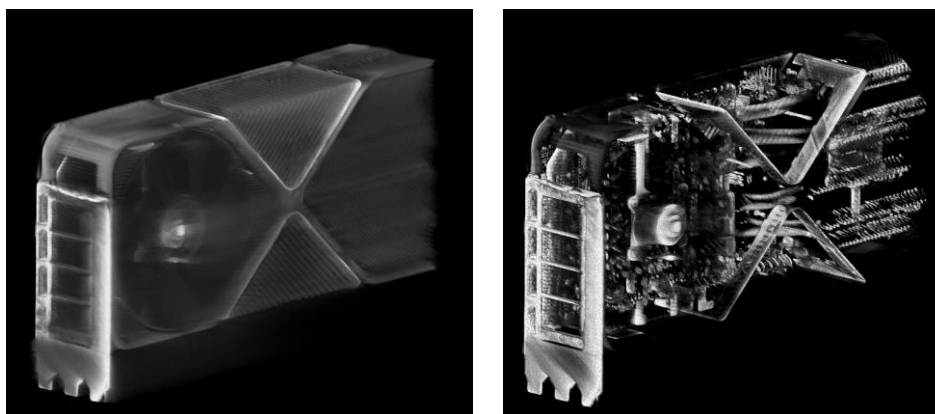
Dosadašnje opisane metode koriste se za dobivanje informacija isključivo o površini objekata. Korištenjem kompjuterizirane tomografije, poznatije kao CT (engl. *computed tomography*) moguće je dobiti uvid u unutarnju geometriju objekata. Emitiranjem rendgenskih zraka, odnosno visokofrekventnog elektromagnetskog zračenja, te njihovom detekcijom moguće je

dobiti informacije o prisutnosti materije objekta kroz kojeg su bile emitirane. Rotacijom skenera ili samog skeniranog objekta dobivaju se informacije iz različitih kutova.



Slika 9. Princip rada CT skenera [16]

Na gornjoj slici prikazana je mogućnost bilježenja jednodimenzionalnog presjeka objekta, kao i dvodimenzionalne matrice. Rekonstrukcijom zabilježenih podataka moguće je proizvesti digitalni prikaz fizičkog objekta koji sadrži i unutarnje značajke [16]. Ranije opisani problemi bilježenja točaka na konkavnim značajkama nisu zapreka ovakvom pristupu. Nedostatak ove metode su troškovi povezani s takvim uređajima, kao i opasnost od izlaganja korištenom zračenju. Jedna od primjena ove metoda za 3D vizualizaciju je u svrhu provjere defekata i dimenzija plastičnih i metalnih dijelova dobivenih procesom lijevanja. Dodatna svrha je mogućnost analize kompleksnih sklopova bez njihovog rastavljanja, kao što je prikazano na primjeru grafičke kartice na donjoj slici. Naknadnim mijenjanjem prikaza intervala snimljene apsorbirane energije moguće je lagano odvojiti različite materijale. Tako je na primjeru prikazano uklanjanje intervala koji odgovara plastičnom kućištu.

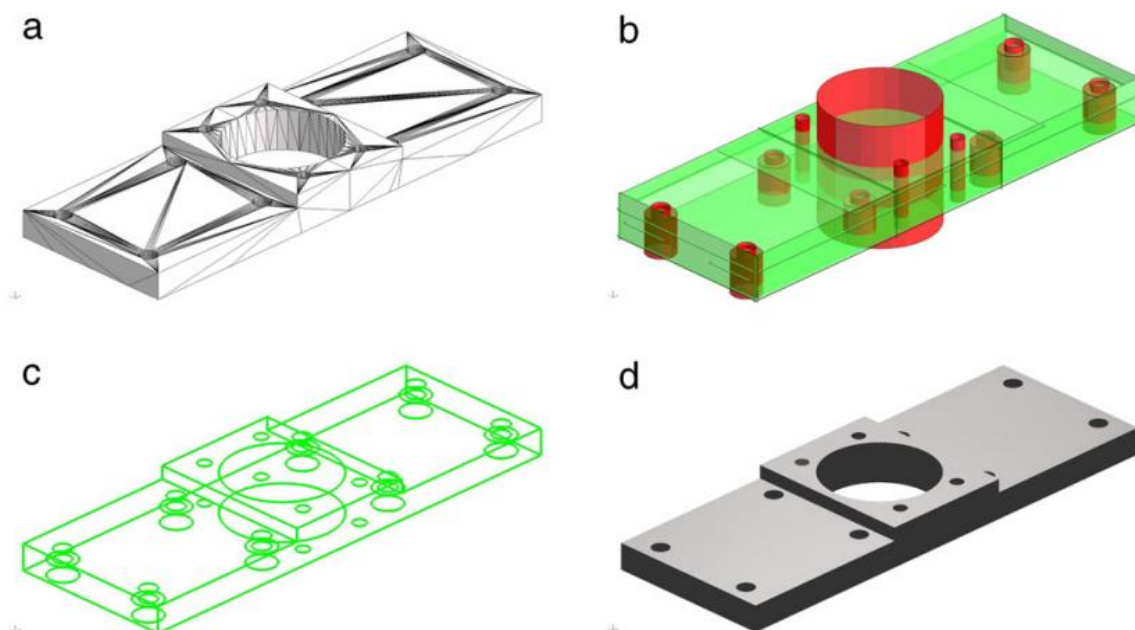


Slika 10. 3D prikaz sklopa dobiven CT skenerom bez rastavljanja [17]

2.5. Obrada podataka

U prethodnim je odljecima vidljivo kako postoji mnoštvo različitih načina i vrsta uređaja za pomoć u izradi modela za virtualno rastavljanje proizvoda. 3D skeniranjem dobivaju se pojedine točke s površine objekta, ili u slučaju CT skeniranja iz cijelog volumena tijela, a naknadno je za prikaz potrebno rekonstruirati objekt, najčešće kao površinsku mrežu.

Kompleksnim naknadnim analizama, moguće je mrežu objekta pretvoriti u parametrizirani model (nekim značajkama) metodama digitalne rekonstrukcije oblika, DSR (engl. *digital shape reconstruction*) [18]. Procesom pripasivanja geometrijskih primitivnih oblika kao što su sfere, konusi i cilindri površinskoj diskretiziranoj mreži moguće je izraditi i B-Rep (engl. *Boundary Representation*) tijelo [19].



Slika 11. Pretvorba mreža u B-Rep modele [19]

Prikazani proces od nedavno je dostupan i u komercijalnom paketu za kombinirani rad s mrežama i B-Rep tijelima Autodesk Fusion 360. Iako je proces pun potencijala za primjenu vizualizacije kroz 3D skeniranje, trenutne implementacije dobro rade gotovo isključivo na modelima koji su originalno bili izrađeni i zapisani kao B-Rep tijela. Na primjeru skeniranja tokarilice kamerom namijenjenom za igraču konzolu pokazano je kako proces izrade virtualnih modela ne mora biti izrađen skupom opremom [20].

2.6. Evaluacija tehnologija

Izbor optimalnih uređaja svodi se na postavljene ciljeve kvalitete i cijene samog postupka. Iako bi izuzetak potrebe za prvobitnim rastavljanjem uređaja olakšao izradu virtualnih prikaza kompleksnih sklopova, sama cijena CT uređaja onemogućuje njihovu primjenu za ovakvu primjenu. Cijena kao i nemogućnost laganog zapisa cijele površine modela isključuju i CMM uređaje. Kao jasan izbor nameće se laserska triangulacija [21] uz srodnu metodu skeniranja projiciranjem strukturiranog svijetla. Uređaji za ručno skeniranje, kao i oni korišteni sa okretnim stolićem, koji koriste metodu laserske triangulacije navode se kao pogodni za priuštivu izradu edukacijskih 3D skeniranih prikaza objekata [22]. Fotogrametrija također ispunjava uvijete cijene i efikasnosti, no osjetljivost na potrebnu teksturu komponente i kvalitetno snimljene fotografije pokazala se kao nekonzistentnom u preliminarnom testiranju. Iako su u ovoj metodologiji predložene prve dvije metode, direktni zapis boja procesom fotogrametrije uz niske troškove ukazuju na njen potencijal za primjenu, odnosno mogući dodatak metodologiji uz dodatno istraživanje.

2.7. Uređaji korišteni u istraživanju

Ne zadovoljavaju svi uređaji koji koriste tehnologiju laserske triangulacije ili strukturiranog svijetla uvjet cjenovne dostupnosti. Za industrijske primjene u kontroli kvalitete i reverzibilnom inženjerstvu skeneri postižu cijene do oko 60 000 eura. Nedavnim naprecima tehnologije 3D skeniranja, na tržištu su se pojavili povoljniji uređaji koji proizvode zadovoljavajuću kvalitetu krajnjih modela. Time je omogućena i računalna rekonstrukcija geometrije proizvoda pomoću uređaja čija cijena ne prelazi 2000 eura, što je samo djelić cijene profesionalnih rješenja. Stoga se upravo ovakvi povoljniji uređaji za 3D skeniranje sve prisutniji u različitim akademskim i edukacijskim okruženjima, kao što je i Laboratorij za konstruiranje (CADLab) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (FSB).

Neki od uređaja za 3D skeniranje dostupnih u Laboratoriju za konstruiranje FSB-a korišteni su u okviru ovog istraživanja te su detaljnije opisani u nastavku ovog odjeljka. Skener SOL PRO koristi tehnologiju laserske triangulacije, dok skeneri CR-Scan 01, POP2 i Dental rade na principu strukturiranog svijetla, vidljivog i infracrvenog. Korišteni uređaji predstavljaju različite uređaje koji su dostupni na tržištu, od kojih svaki nudi različite mogućnosti. Opisi su

temeljeni na preliminarnom testiranju svakog od uređaja u realnim uvjetima, skenirajući različite vrste objekata i kombiniranjem s različitim softverskim rješenjima za naknadnu obradu zabilježenih oblaka točaka, te njihovo poklapanje, rekonstrukciju površine te njezino oblikovanje.

Važno je naglasiti da za višu cijenu profesionalnih skenera korisnik dobiva kvalitetan prateći softver, veće vidno polje, veću deklariranu točnost te integraciju u CAD alate. No s obzirom na cilj ovog istraživanja, postavljeno je ograničenje u vidu korištenja samo lako dostupnih i priuštivih tehnologija 3D skeniranja.

2.7.1. *Scan Dimension SOL PRO*

Scan Dimension SOL PRO koristi tehnologiju laserske triangulacije, kojom je uređaj sposoban proizvesti detaljne i precizne modele. Primarni nedostatak ovog uređaja je vrijeme potrebno za skeniranje i naknadnu obradu podataka (do 20 min po prolazu na srednjoj postavki razlučivosti u testiranim uvjetima). Dodatno, proces skeniranja odvija se isključivo na automatiziranom rotirajućem stoliću, volumena od $\text{Ø}25 \times 25 \text{ mm}$ do $\text{Ø}100 \times 100 \text{ mm}$ u bliskoj poziciji skeniranja te od $\text{Ø}70 \times 80 \text{ mm}$ do $\text{Ø}170 \times 170 \text{ mm}$ u daljoj.



Slika 12. Scan Dimension SOL PRO

Bliža pozicija glave skenera daje veću razinu detalja, no smanjuje iskoristivi volumen. I dok je značajna prednost korištenja ovog uređaja automatiziranost cijelog procesa, veliki je nedostatak upravo manjak opcije za ručni popravak ili korištenje sirovih podataka, što ga čini beskorisnim kod objekata gdje je potrebna takva naknadna obrada.

U procesu izrade modela gdje je dostupan uređaj sličnih karakteristika, zbog malo pažnje koju zahtjeva i dugih vremena skeniranja, ovakav uređaj moguće je koristiti u pozadini kada se na nekom od drugih skenera skeniraju ostale komponente.

2.7.2. *Creality CR-Scan 01*

Creality CR-Scan 01 3D skener koristi tehnologiju vidljivog strukturiranog svjetla. Moguće je skeniranje manjih komponenti na okretnom stoliću, kao i ručno skeniranje većih komponenti. Skeniranje na okretnom stoliću poluautomatizirani je proces u kojem je potrebno prilagoditi samo ekspoziciju i orijentaciju modela na stoliću. Prilikom skeniranja velikih komponenti potrebno je mirno i jednolično pomicati skener u ovisnosti na statični objekt. Vidno polje jednog kadra prilikom ručnog skeniranja iznosi do 536 x 378 mm na optimalnoj udaljenosti između 400 i 900 mm. CR-Scan 01 ovom spektru uređaja doprinosi mogućnošću skeniranja velikih objekata uz smanjenu razinu detalja. Tako dobiveni podaci mogu se koristiti kao svojevrsni kostur za dodavanje detaljnijih prolaza skeniranja gdje je to potrebno.



Slika 13. Creality CR-Scan 01

2.7.3. Revopoint POP 2

Revopoint POP 2 koristi tehnologiju strukturiranog infracrvenog svjetla s dvije kamere. Infracrveno svjetlo olakšava korištenje eliminacijom neugodnih bljeskova. Vidno polje kadra na optimalnoj udaljenosti iznosi 210 x 130 mm, a razina zabilježenih detalja većine modela je zadovoljavajuća u kontekstu cilja ovog istraživanja. Kao i prethodno opisani skener, POP 2 može se koristiti s okretnim stolićem, ali i ručno za veće komponente. Dobiveni podaci mogu se relativno automatizirano procesirati pratećim softverom, no ako on ne uspije poklopiti prolaze, oblaci točaka su dostupni za ručnu rekonstrukciju modela.



Slika 14. Revopoint POP 2

POP 2 predstavlja uređaj koji nije izniman, ali njime je moguće zabilježiti geometriju većine komponenti srednje veličine. Zbog relativno jednostavnog i brzog korištenja često je prvi izbor pri manje zahtjevnim komponentama.

2.7.4. Tupel 3D Dental

Tupel 3D Dental skener [Slika 9] koristi tehnologiju vidljivog strukturiranog svjetla s dvije kamere. Skener je moguće koristiti za komponente dimenzija do Ø120 x 75 mm. Dostupno je

više dimenzija bilježenja skenova, gdje se potrebni računalni resursi povisuju s povećanjem analiziranog volumena. Skeniranje se obavlja na automatiziranom postolju na kojeg je komponente potrebno zalijepiti ili osigurati kvačicom. Potpuno automatizirana platforma motorizirana je, no potrebno je paziti na masu komponente kako zbog konstrukcije platforme, tako i zbog osiguravanja komponente od ispadanja i neželjenog pomaka relativnog na bazu. Nakon programa pred definiranih prolaza moguće je dodavati poglede na sken. Takva kontrola i lagano popravljajnja postojećih prolaza u praksi znači kako je često potrebno manje odvojenih prolaza. Skener je namijenjen za male i lagane komponente, no njih vrlo detaljno bilježi. Tupel skener pogodan je za male komponente koje zahtijevaju veliku razinu zabilježenih detalja.



Slika 15. Tupel 3D Dental

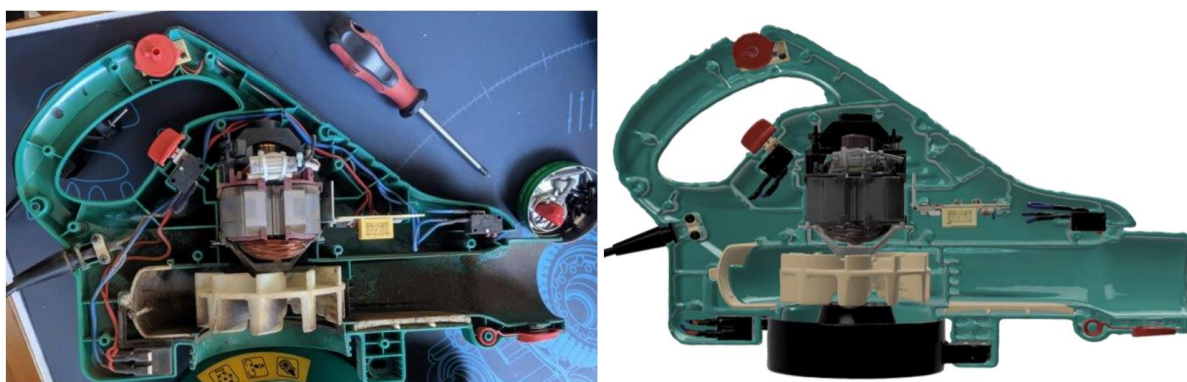
Pokazani uređaji, kao i ostali uređaji koriste drugačije tehnologije, bilježe različite razine detalja te se mogu zabilježiti različite veličine komponenti. Pravilan izbor uređaja uvelike olakšava daljnji proces izrade, a taj postupak na primjeru korištenih uređaja detaljnije će biti opisan u slijedećem poglavlju, odnosno studijom slučaja izrade prikaza realnih uređaja.

3. STUDIJA SLUČAJA

S ciljem boljeg razumijevanja prikladnosti pojedinih metoda reverzibilnog inženjerstva za izradu računalnih modela različitih vrsta komponenti koje se mogu pojaviti u sklopovima proizvoda provedena je studija slučaja u okviru koje su izrađena dva potpuna prikaza elektromehaničkih uređaja. Prvo je izrađen prikaz puhalice za lišće. Na tom primjeru provjerena je primjenjivost pristupačnih metoda reverzibilnog inženjerstva za izradu prikaza. Nakon puhalice izrađen je model starinskog električnog miksera. Na drugom primjeru uspoređivana su vremena potrebna za 3D modeliranje i skeniranje pojedinih komponenti kako bi se dobio bolji uvid u efikasnost i učinkovitost ova dva pristupa. Oba proizvoda odabrana su jer se sastoje od srednjeg broja komponenti koje su sve međusobno veoma različite te zahtijevaju drugačiji pristup.

3.1. Puhalice za lišće

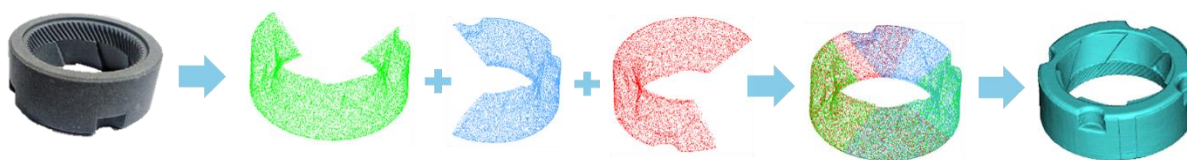
Puhalice za lišće sastoji se od četiri glavna funkcionalna i montažna podsklopa: sklop kućišta, prekidača za uključivanje, filtera te pogonskog sklopa. Uređaj se stoga sastoji od velikog broja raznolikih komponenata. Komponente različitih veličina, oblika, materijala i tekstura svaka za sebe predstavljaju posebne prepreke i zahtijevaju različite pristupe prilikom izrade prikaza. Također, slične je vrste komponenata moguće pronaći u velikom broju ostalih elektromehaničkih proizvodima koji su relevantni za virtualno rastavljanje proizvoda te je cilj ovog primjera predstaviti optimalan proces prema karakteristikama komponenti.



Slika 16. Djelomično rastavljen proizvod i njegov računalni prikaz

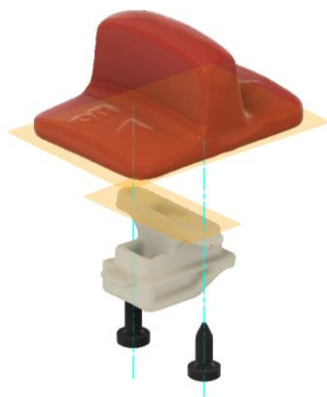
3.1.1. Postupak izrade modela

U nastavku je u najkraćim crtama opisan postupak izrade virtualnog modela proizvoda. Više detalja o pojedinim koracima moguće je pronaći u završnom radu [23] i različitim drugim izvorima. Jednostavne i komponente za koje je dostupan 3D model nije potrebno skenirati, već se modeliraju ili je potrebno preuzeti gotov model (razni web katalogi i knjižnice modela). Za komponente koje su skenirane odabran je odgovarajući uređaj te je zabilježen oblak točaka. Oblak točaka je popis koordinata točaka koje su zabilježene s površine fizičkog objekta. Kako često nije moguće zabilježiti objekt iz samo jednog prolaza skeniranja potrebno je različite oblake točaka poklopiti te prema potpunom zapisu točaka rekonstruirati površinu [Slika 17].



Slika 17. Proces poklapanja oblaka točaka za rekonstrukciju površine

Na izrađen geometrijski prikaz potrebno je primijeniti boju. Ako je komponenta jednoboja ili se sastoji od lako odvojivih segmenata, boja se primjenjuje na model u CAD sustavu. U suprotnom je površinu diskretiziranu mrežom potrebno teksturizirati snimljenim fotografijama. Za manipulaciju oblaka točaka i rekonstrukciju površine korišten je softver CloudCompare, a za teksturiziranje Meshlab. Daljnja manipulacija modela rađena je u CAD programu Fusion 360, gdje je potrebno optimizirati mrežu te uz pomoć referentne geometrije postaviti međuovisnosti realnih sklopova.

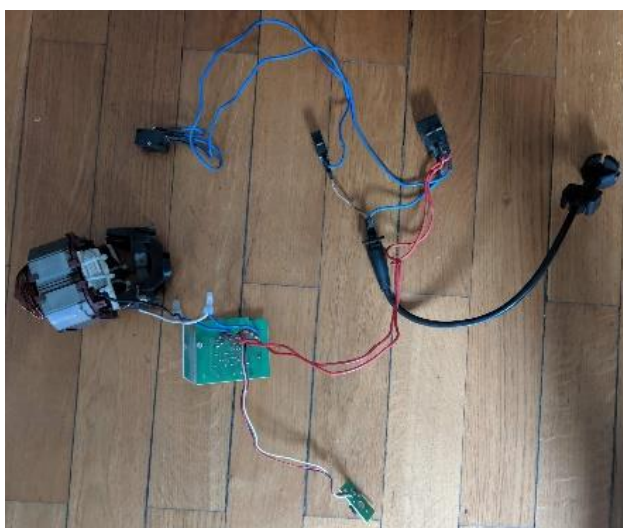


Slika 18. Sklop mreža s referentnom geometrijom

Za razliku od parametarskih B-Rep modela kod kojih je moguće koristiti jasno definirane osi i površine, referentnu geometriju na mrežnim modelima potrebno je posebno definirati [Slika 51].

3.1.2. Izrada modela puhalice

Postupku izrade virtualnog modela puhalice počeo je pristupom isprobavanja svih načina izrade digitalnih modela koji su se činili smisleni. Prvi korak nakon nabave fizičkog uređaja bilo je njegovo rastavljanje i dokumentiranje pojedinih komponenti popisima i slikama [Slika 20]. Komponente su godinama provele u sklopu bez rastavljanja te su bile vanjskim naslagama i korozijom spojene jedne za druge. Obraćena je posebna pažnja odvajanju tih komponenti bez njihova oštećivanja, no naposljetku jedna matica morala je biti odrezana zbog korozije. Zbog skeniranja na okretnom stoliću zalemljene žice koje omogućuju tok energije i signala morale su biti odrezane, no prije toga njihova točna povezanost je zabilježena [Slika 19].



Slika 19. povezanost komponenti vodičima

Prilikom vrlo vjernog modela te veze modelirale bi se u sklopu. Nakon izolacije svake individualne komponente one su skenirane na više dostupnih 3D skenera. U tom procesu proučen je rad svakog dostupnog skenera uz uočavanje njihovih prednosti i mana. Prvobitno su se komponente pokušavale skenirati bez spreja zbog bilježenja teksture objekta u procesu

skeniranja. Taj pristup proizvodio je mnogo grešaka u izrađenim modelima te je generalno otežao zapis podataka. Boje koje su dobivene na POP 2 skeneru vezane su za točke te je kasnije manipuliranje tim mrežama vrlo ograničeno. Uz različitu kvalitetu, odnosno točnost zabilježenih točaka, promatralo se i vrijeme potrebno za skeniranje pojedinim skenerom. Tako je skeniranje SOLPRO skenerom u srednjoj postavci trajalo oko 25 minuta uz korištenu radnu stanicu, dok se u to vrijeme POP 2 skenerom mogao izraditi cijeli prikaz komponente. Mreže dobivene prvim skenerom su dakako bile mnogo detaljnije, tako da je prilikom odabira optimalnog skenera potrebno razmotriti komponentu, odnosno procijeniti isplati li se uložiti dodatno vrijeme. Svaki skener dolazi sa vlastitim pratećim (ili dva) softvera, no za neke procese izrade modela ni oni nisu bili dovoljni. Prilikom izrade ovog prikaza korišteno je mnoštvo dodatnih softvera za manipulaciju i obradu oblaka točaka, mreža i njihovih tekstura. Za olakšano praćenje metodologije broj različitih potrebnih softvera sveden je na minimum koristeći one najsvestranije.

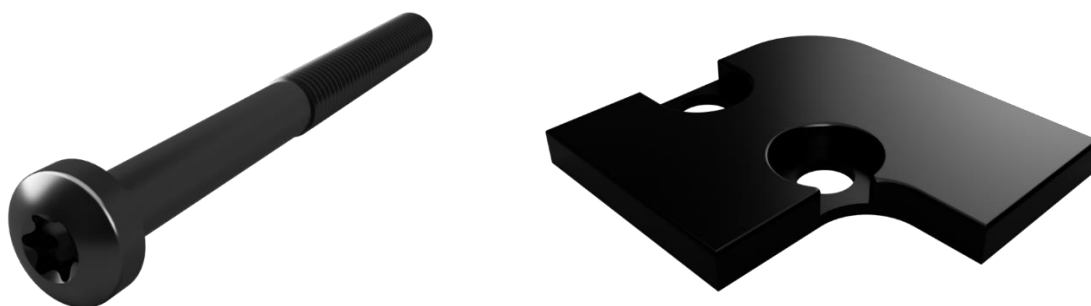


Slika 20. Rastavljanje fizičkog uređaja

Na temelju ove studije, odnosno izrade prikaza uređaja puhalice na mnoštvo različitih načina, uočeno je nekoliko važnih aspekata rekonstrukcije objekta te su oni opisani u slijedećim odjeljcima.

3.1.3. CAD modeliranje

Prije samog skeniranja, potrebno je analizirati sve komponente te odlučiti koji je najbolji način za izradu njihovih virtualnih prikaza. Česte komponente poput vijaka, matica i ostalih standardnih komponenti potrebno je preuzeti s odgovarajućeg izbora, često i u samom CAD programu. Nestandardne, ali jednostavne komponente poželjno je modelirati na temelju fizičkih mjerenja.



Slika 21. Preuzeta standardna (lijevo) i modelirana jednostavna komponenta (desno)

Kod modeliranja komponenti koje nisu krute, kao što su opruge, kablovi i prednapregnute komponente, potrebno je obratiti pažnju na montiranu formu. Komponente je potrebno modelirati u kontekstu sklopljenog uređaja, jer će takav biti krajnji prikaz. Na donjoj slici prikazan je najčešći primjer, a to je opruga koja se montira u napregnutom stanju.



Slika 22. Fizička rasterećena komponenta i modelirana komponenta u kontekstu sklopa

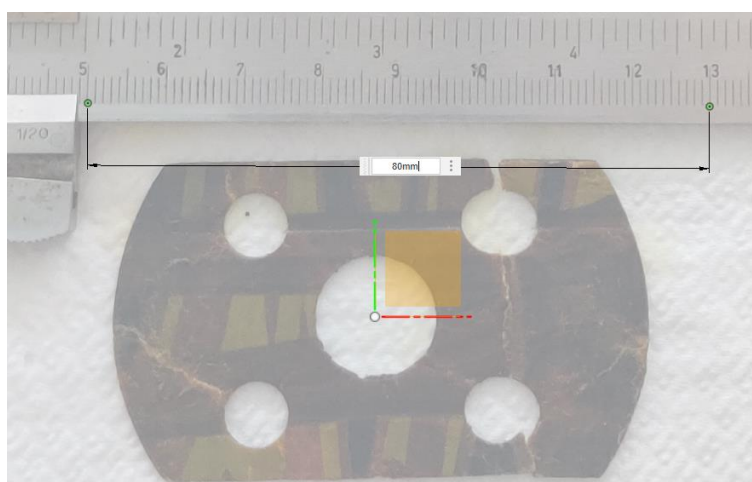
Prilikom rastavljanja ovog tipa proizvoda, pogotovo onih na kraju životnog ciklusa, česta je potreba za destruktivnim rastavljanjem. Razlog može biti način montiranja komponenti ljepljivima, ali i hrđanje komponenti kroz godine rada. Komponente koje se planirano oštećuju

potrebno je prije tog postupka izmjeriti koliko je to moguće. Skeniranje pokazuje oštećenja površine komponenti, pa je u tom slučaju modeliranje bolja opcija. Donja slika prikazuje primjer odrezanog vrha matice te njezin modelirani virtualni prikaz.



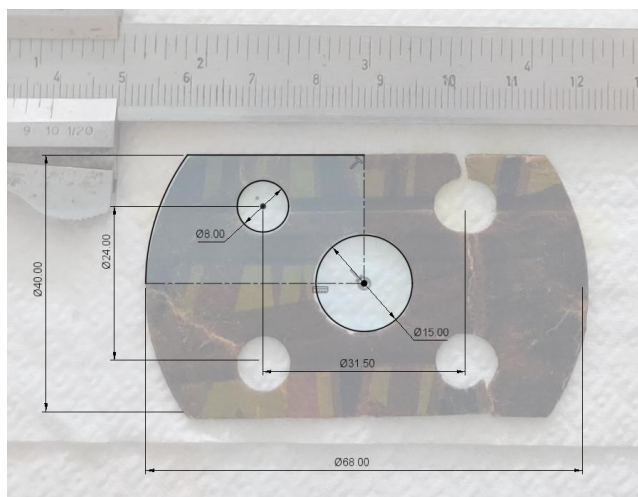
Slika 23. Rastavljanjem uništena komponenta i njezin računalni prikaz

Kako ova primjena vizualizacije u svrhu analize funkcija ne zahtijeva preciznost modela na razini onih za proizvodnju, proces mjerenja može se olakšati korištenjem platna (engl. *canvas*). Primarno plosnate komponente, kao i kompleksni obrisi lako se mogu aproksimirati modeliranjem preko slike. Ako je dostupna kamera s objektivom podesive fokalne duljine potrebno je fotografirati komponentu s većom fokalnom duljinom. Naime, veće uvećanje i udaljeno fotografiranje daju sliku manje distorzije zbog vidnog polja. Na slici je potrebno uključiti objekt poznate dimenzije, poželjno u istoj ravnini s objektom od interesa [Slika 24].



Slika 24. Kalibracija fotografije prema poznatoj dimenziji

Alternativno, moguće je izmjeriti očitu dimenziju objekta te kalibrirati veličinu slike prema njoj. Fotografija mora biti snimljena direktno iznad objekta, što okomitije. Nakon kalibracije i centriranja platna, potrebno je izraditi skicu kao osnovu CAD modeliranja. Za kompleksne modele moguće je iskoristiti više platna iz različitih pogleda.



Slika 25. Izrada skice prema kalibriranom platnu

Ovakav pristup najviše odgovara kompleksnim dvodimenzionalnim obrisima ili objektima koji se teško mjere osnovnim alatima.

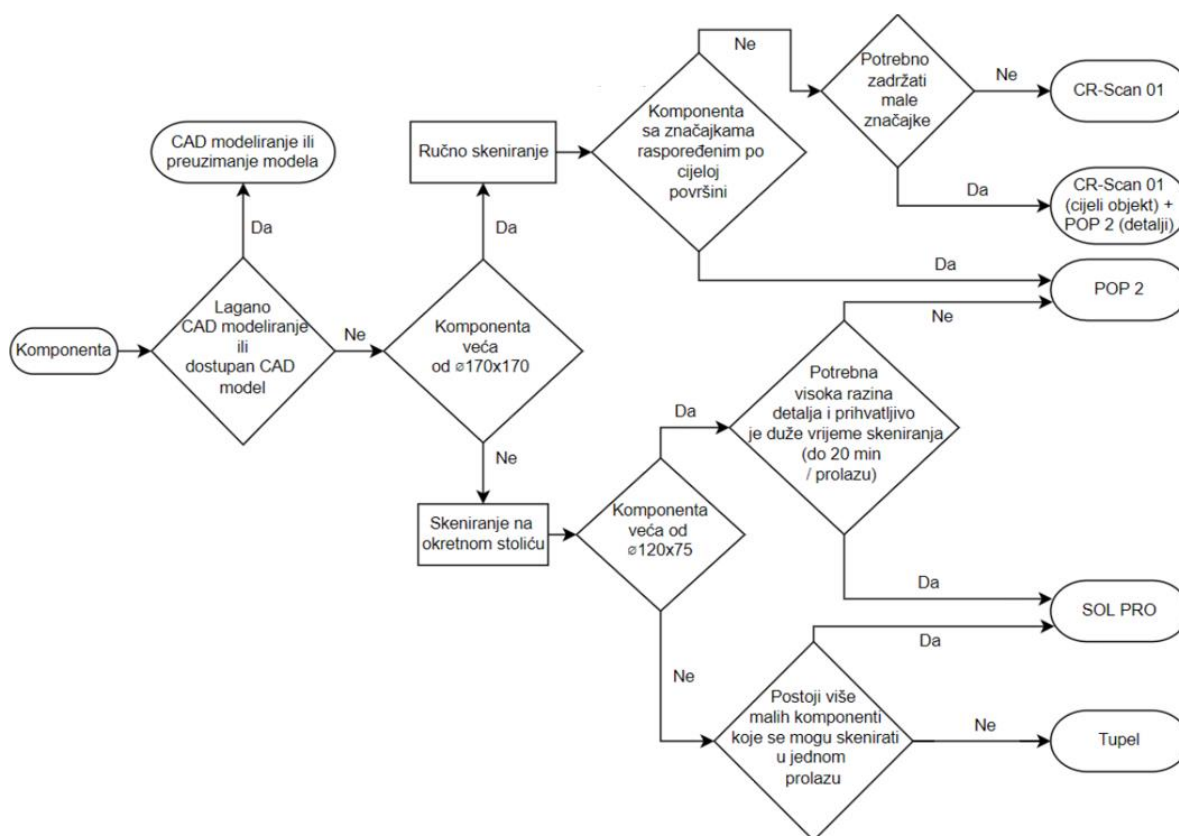
3.1.4. Izbor uređaja

Nakon modeliranja jednostavnih komponenti potrebno je odrediti kojim uređajem će biti skenirane pojedine komponente. Prema dimenzijama, zahtjevima za razinu zabilježenih detalja, odnosno postojanju istih, odabire se odgovarajući uređaj za skeniranje. Tijekom provođenja studije slučaja bila su dostupna četiri skenera različitih karakteristika te je izbor između njih prikazan dijagramom toka [Slika 26]. Kod promatranja dimenzija moraju se razmotriti sve orijentacije u koje će objekt morati biti postavljen tijekom različitih prolaza skeniranja. Uska komponenta postavljena uspravno koja je visinom na rubu cilindričnog volumena Ø120 x 75 mm (Tupel Dental) postavljena na stranu izlazi iz istog volumena. Maksimalne dimenzije komponente koje je moguće skenirati dane su u tablici [Tablica 1].

Tablica 1. Dimenzije komponenti koje je moguće skenirati

CR-Scan 01	Okretni stol	Ručno skeniranje
	Ø100x100 – Ø300x300* mm	Ø300x300 – Ø2000x2000 mm
POP 2	Okretni stol	Ručno skeniranje
	Ø20x20 – Ø170x170* mm	Ø20x20 – Ø2000x2000* mm
SOL PRO	Bliska pozicija	Daleka pozicija
	Ø25x25 - Ø100x100 mm	Ø70x80 - Ø170x170 mm
Dental	Visoka razlučivost	Standardno
	do Ø40x40 mm	do Ø120x75 mm

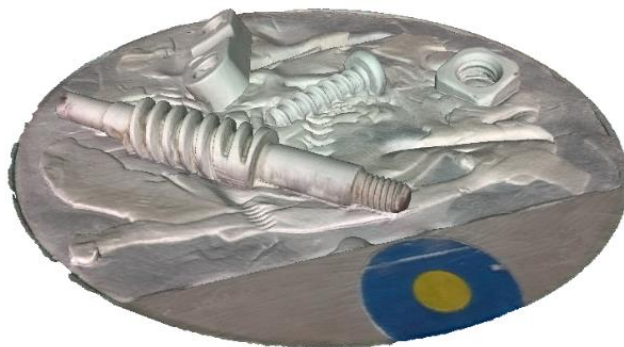
* pretpostavljene dimenzije na temelju korištenja (nisu navedene od proizvođača)



Slika 26. Dijagram toka izbora metode i uređaja

Skeneri tijekom bilježenja podataka u jednoj orijentaciji ne bilježe podatke samo za jednu komponentu, nego i za ostale objekte u vidnom polju. U svrhu uštede vremena moguće je na okretni stolić ili stol prilikom ručnog skeniranja postaviti više komponenti odjednom. Obrada tako dobivenih podataka ne razlikuje se znatno od pojedinačnih, no ovisno o broju komponenata

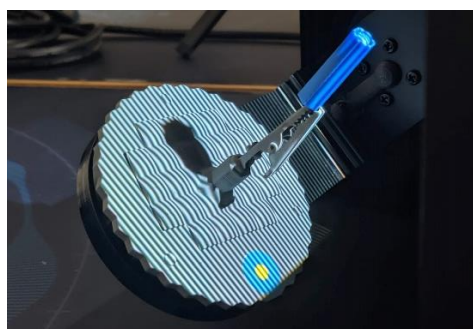
značajno se može uštediti vrijeme prilikom skeniranja. Više komponenti predstavlja veći broj potencijalnih pogrešaka (npr. zaboravljanje okretanja pojedine komponente). Manjkom koncentracije ovakva ušteda vremena lako se izgubi potrebom za dodatnim prolazima.



Slika 27. Skeniranje više komponenti

3.1.5. Priprema komponente

Korištene tehnologije baziraju se na analizi projiciranog svjetla na objekt. Kako bi se ono moglo analizirati, mora biti vidljivo te dovoljnog kontrasta od samog objekta. Uređaji imaju različitu razinu osjetljivosti na površinu objekta, no generalno je pogodnije kada su komponente svijetle, neprozirne i nereflektivne.



Slika 28. Projiciranje lasera (lijevo) i strukturiranog svjetla (desno)

Naime, crne komponente apsorbiraju veći dio svjetla umjesto da ga reflektiraju do senzora, što otežava prikupljanje podataka. Prozirni materijali propuštaju svjetlo te se ne može dobiti informacija o položaju površine. Slično, reflektivne površine odbijaju svjetlost u nepredvidivim smjerovima te često zbog toga daju krive podatke, odnosno uzrokuju stvaranje raznih

artefakata. Oni se mogu pojavljivati u obliku raznih grešaka u površini, kao i zapisom podataka koji u stvarnosti ne postoje. Kada se takvi krivo zapisani podaci ne otklone prije rekonstrukcije površine, često rezultiraju u malim zasebnim tijelima koja okružuju glavnu komponentu.



Slika 29. Utjecaj površine na projicirano svjetlo

Savršena je površina objekta, dakle, mat, neprozirna i svijetla. Kako bi se površine koje ne zadovoljavaju te uvjete prilagodile tehnologiji, koristi se sprej za skeniranje. Sprej je najčešće bijele boje te ga je moguće nabaviti u raznim specifikacijama debljine sloja kao i u sublimirajućoj varijanti. Ako je površina samo reflektivna, dostupna je varijanta spreja koja matira površinu na način da i nakon nanošenja omogućava zapis informacija o boji.



Slika 30. Sprejom ne pripremljena (lijevo) i pripremljena komponenta (desno)

Druga strana dobre pripreme je pravilno podešavanje ekspozicije uređaja. Vrijeme u kojem se dopusti snimanje podataka određuje količinu svjetla koje se promatra na senzoru. Kraće

vrijeme daje tamnije slike, dok dulje vrijeme daje svjetlije. Premalom ekspozicijom dobiva se tamna slika bez mnogo informacija, dok prevelika ekspozicija daje sliku na kojoj detalji postaju bijeli te nerazpoznatljivi. Korišteni skeneri podešavaju ovaj parametar automatski, no smanjivanjem može se dobiti slika s manje grešaka, ali i zabilježene geometrije, dok se povećanjem dobiva suprotno.



Slika 31. Ekspozicija komponente

Iako je gore opisani slučaj često problem pri bilježenju informacija o dubini, može se iskoristiti za olakšavanje obrade podataka. Osiguravanjem komponenti tamnim predmetima može se izbjeći kasnija potreba za segmentacijom tih točaka, kako se one neće pojaviti u krajnjem zapisu.



Slika 32. Osiguravanje komponenti u crnoj masi

3.1.6. Način skeniranja i pozicije

Zbog jednostavnijeg postupka poželjno je komponente skenirati na okretnom stoliću. Izbor se svodi na dimenzije vidnog polja i stolića, koje su karakteristike pojedinog uređaja. U ovom skupu skenera granica za skeniranje na okretnom stoliću je $\varnothing 170 \times 170$ mm [Slika 26]. Prilikom skeniranja na okretnom stoliću potrebno je dodatno voditi pažnju o masi komponente s obzirom na konstrukciju pomičnog stolića, odnosno držača. Za podobni način skeniranja potrebno je odabrati orijentacije skeniranja. Cilj u odabiru pozicija postavljanja komponenti je izabrati najmanji broj potrebnih orijentacija kako bi se potpuno obuhvatila vanjska geometrija komponente. Između navedenih orijentacija mora biti predviđeno preklapanje na istaknutim značajkama, odnosno na dovoljnom postotku modela. Iako je primamljivo komponentu skenirati u najstabilnijem položaju, to često nije najbolja opcija. Primjer čestih komponenti su poklopci i ostale komponente u obliku plosnatog diska, koji imaju dvije stabilne orijentacije.



**Slika 33. Stabilne i uspravna orijentacija (lijevo)
te uspravna komponenta na okretnom stoliću (desno)**

Iako se u dva prolaza dobivaju informacije o cijelom objektu, za njihovo poklapanje predviđena je cilindrična površina bez drugih značajki. Postupak poklapanja takva dva skena često je težak ili nemoguć. Promatranjem plastelinom ili kvačicom poduprti poklopac uočava se kako je zabilježena cijela geometrija objekta osim poduprtog dijela. Za simetrične komponente moguće je izraditi model samo iz jednog takvog prolaza. Za nesimetrične komponente svejedno je mnogo lakše poklopiti različite prolaze skeniranja u uspravnoj orijentaciji. Na primjeru puhalice komponente koje su podložne opisanom problemu jesu filter i okretni gumb potencijometra [Slika 34].



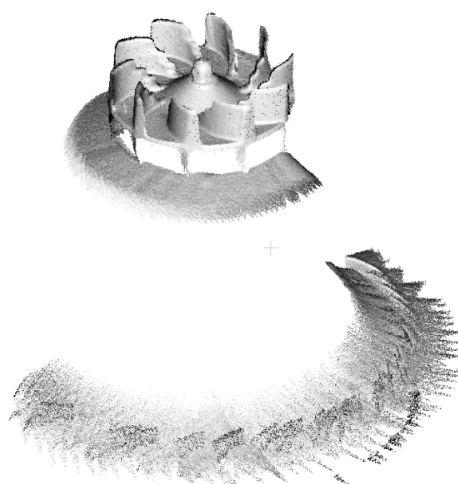
Slika 34. Komponente za uspravno skeniranje

Za lakšu naknadnu obradu podataka podizanje ručno skenirane komponente sa stola ili druge podloge na kojoj se skenira olakšava uklanjanje neželjenih točaka. Poželjno je da sve što dodiruje komponentu ima crnu boju ili je na mjestu koje nije od interesa u dotičnom prolazu skeniranja.



Slika 35. Komponenta podignuta s podloge za lakše uklanjanje pozadine

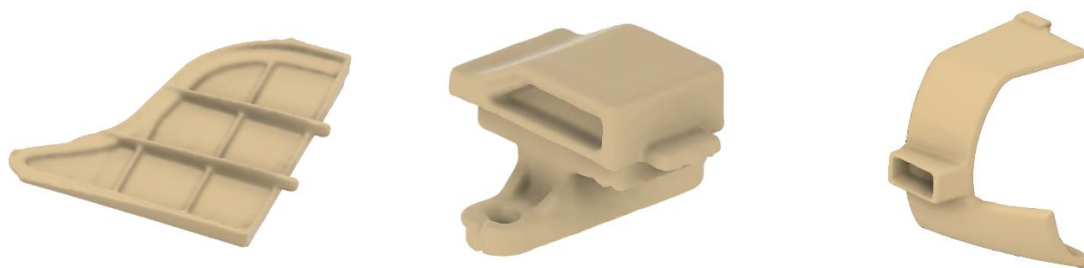
Dodatno, poželjno je da pozadina koju skener vidi uz objekt od interesa također ima crnu boju, odnosno da je udaljena (s obzirom da se intenzitet svjetla smanjuje s kvadratom udaljenosti). Prema tom načelu zaključuje se kako će udaljeni objekti biti nedovoljno eksponirani te se neće zabilježiti na senzoru. Donja fotografija prikazuje primjer prolaza skeniranja na okretnom stoliću kada je vidljiva pozadina. Komponenta u pokretu se prati, dok stacionarni zapis stvara kružnu grešku oko modela. Iako se može naknadno ukloniti, može i unijeti grešku u samom praćenju komponente.



Slika 36. Greška uslijed vidljive statične pozadine

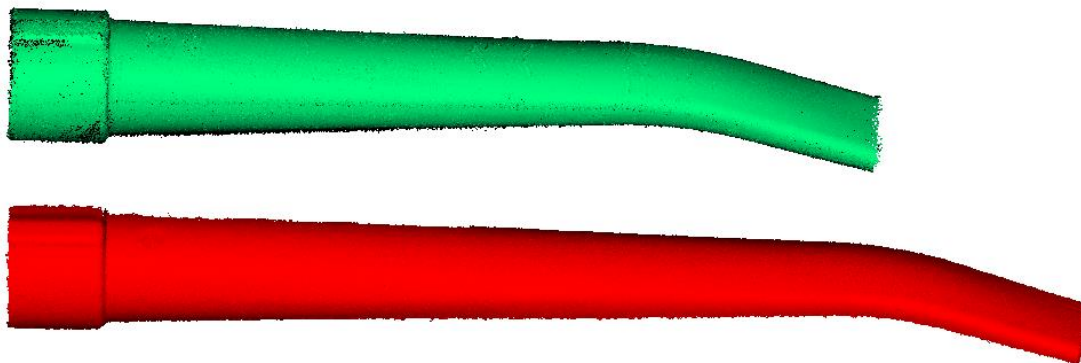
3.1.7. Praćenje komponente

Tijekom samog skeniranja mora biti moguće pratiti poziciju komponente. Poziciju objekta uređajima dostupnim u okviru ove studije slučaja moguće je pratiti oblikom, posebnim markerima te teksturom objekta. Tupel Dental i Sol Pro imaju automatizirane okretne baze, pa tijekom njihovog korištenja nije potrebno razmatrati način praćenja. Kako oni prate objekt pozicijom svoje baze, potrebno je osigurati da objekt nije pomičan s obzirom na bazu. Praćenje oblika poželjno je rješenje, jer ne zahtijeva dodatnu pripremu komponente. Prilikom snimanja svakog novog kadra prilikom ručnog ili skeniranja na rotacijskom stoliću već zabilježene točke uspoređuju se s onima iz novog kadra i tako postavljaju u prostor. Nesimetrične komponente s puno različitih oblika [Slika 37] idealne su za praćenje objekta putem značajki (engl. *feature tracking*).



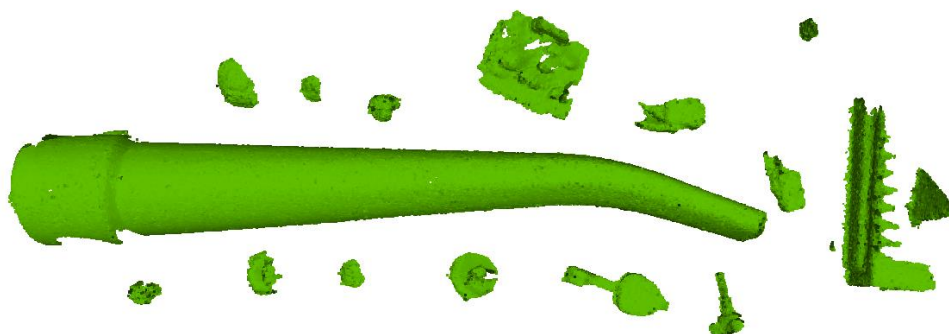
Slika 37. Komponente puhalice pogodne za praćenje značajki

Manjak prepoznatljivih značajki može unijeti greške prilikom ovakvog načina praćenja, kao što je to prikazano na donjoj slici. Glatke kontinuirane površine daju greške koje se teže vizualno i računalno primjećuju zbog naizgled točnog oblika.



Slika 38. Krivo praćenje uslijed manjka značajki cijevi

Ovakve greške prilikom ručnog skeniranja [Slika 38], kao i prilikom skeniranja na okretnom stoliću mogu se izbjeći dodavanjem priručnih objekata iz okoline u kadar. Poželjno je postaviti objekte tako da ne zaklanjaju objekt od interesa, a da su uvijek barem dva u kadru.



Slika 39. Dodani objekti za praćenje cijevi

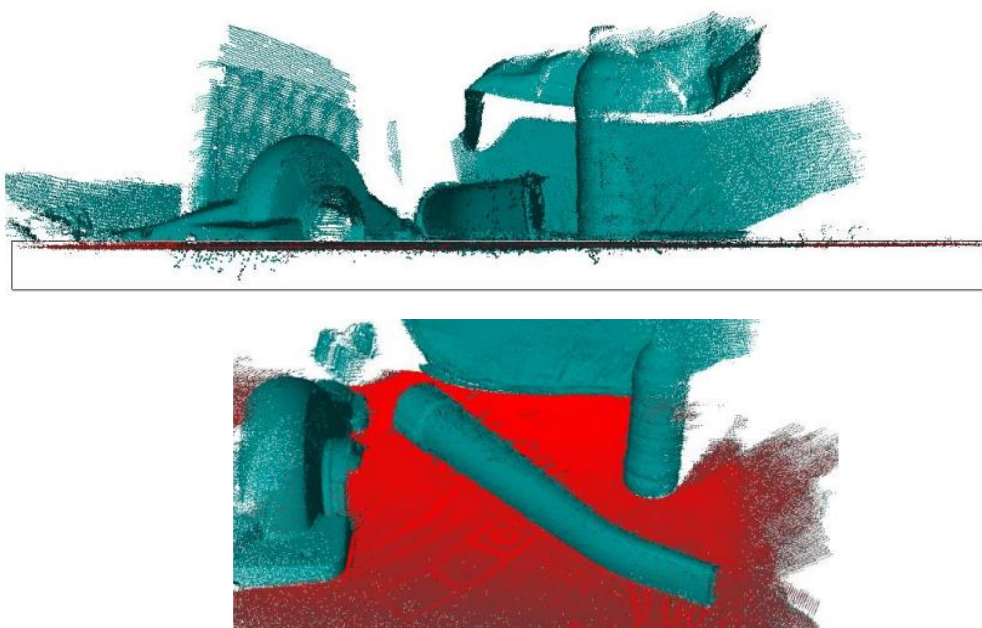
Praćenje objekata moguće je i markerima. Točke visokog kontrasta lako se računalno prepoznaju te se iz tog razloga koriste i za praćenje okretnih stolova [Slika 40, desno]. Kod ručnog skeniranja potrebno je zalijepiti velik broj markera na objekt [Slika 40, lijevo]. Praćenje pozicije ostvaruje se s 4 do 6 (poželjno i više) markera u vidnom polju uzastopnih kadrova.



Slika 40. Praćenje markera na objektu (lijevo) i okretnom stoliću (desno)

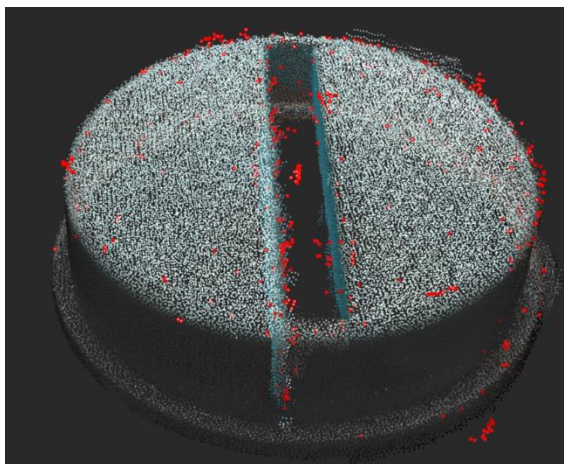
3.1.8. Obrada podataka dobivenih skeniranjem

Opisanim postupkom skeniranja dobivaju se oblaci točaka različitih prolaza. Iz svakog prolaza potrebno je izolirati objekt interesa od pozadine i ukloniti buku ako ista postoji. Takve obrađene oblake točaka potrebno je poklopiti prema preklapanjima različitih prolaza te iz ukupnog oblaka rekonstruirati površinu objekta u obliku mreže. Prilikom segmentacije (odvajanja pozadine od objekta) moguće je pravilnim pozicioniranjem olakšati odabir neželjenih točaka. Česta je potreba za odabirom cijelih ploha te je za to potrebno pozicionirati se pogledom u njihovu ravninu.



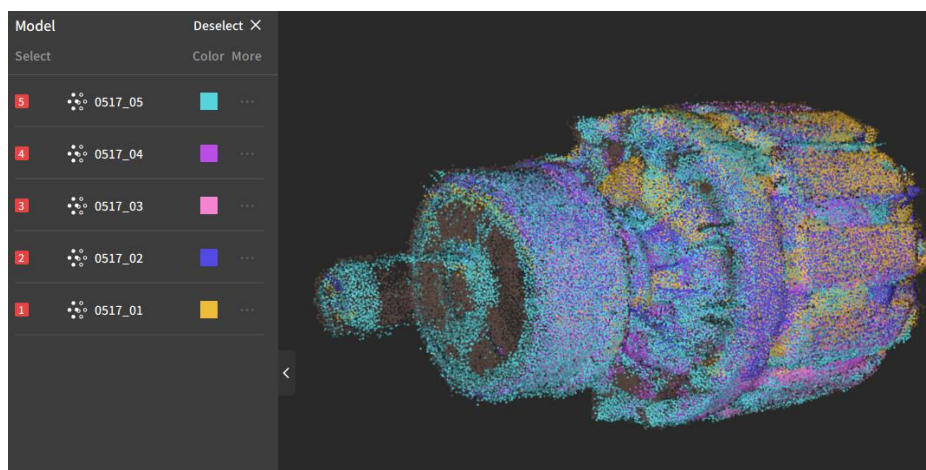
Slika 41. Označavanje plohe (gore) i označena ploha (dolje)

Analogno, objekt se može najlakše označiti iz pogleda okomitog na najmanji presjek. Oblaci točaka dobiveni jeftinim skenerima često sadrže krivo zabilježene koordinate. Korištenjem različitih algoritama za detektiranje najdaljih točaka moguće je ukloniti većinu buke.



Slika 42. Detektirane najdalje točke (buka)

Čiste oblake točaka pojedinih prolaza potrebno je poklopiti. Mnogi prateći programi nude mogućnosti automatskog poklapanja prolaza. Ako model nema prepoznatljive značajke potrebno je oblake točaka grubo poklopiti ručno, a zatim se ICP (engl. *iterative closest point*) algoritmom pronalazi precizno poklapanje mreža. Skenove simetričnih objekata moguće je duplicirati te poklopiti same sa sobom kako bi se dobio cijeli prikaz objekta.



Slika 43. Automatski poklopljeni oblaci točaka

Iz cjelokupnog oblaka točaka moguće je rekonstruirati mrežu. Razina detalja rekonstrukcije određuje (osim same razine detalja) potrebno računalno vrijeme, kao i podložnost greškama. Kako oblaci točaka ovih skenera često uslijed buke i same preciznosti nisu savršeni, potrebno je pronaći zadovoljavajuću razinu detalja na kojoj se ne pojavljuju artefakti.



Slika 44. Površinski artefakti uslijed grešaka u oblaku točaka i visoke razine detalja mreže

Rekonstruirane mreže vrlo su detaljne. Kako je velik broj takvih mreža potrebno moći pregledavati u isto vrijeme prilikom analize proizvoda, svaki model treba imati što je moguće manje trokutnih segmenata. Koristeći program Fusion 360 mreže se mogu optimizirati proporcionalno originalnom broju faceta te prema toleranciji odstupanja od originalne mreže. Tablica 2. prikazuje moguću optimizaciju mreže uz originalnu mrežu dobivenu procesom 3D skeniranja. Uz metodu, naveden je broj faceta svakog mrežnog prikaza. Manji broj površina rezultira manjim zahtjevima na računalne resurse i memoriju za zapis. Cilj optimizacije mreže je smanjiti broj faceta potreban za njezin zapis uz minimalan gubitak detalja.

Tablica 2. Optimizacija mreže



Originalna mreža - 556796

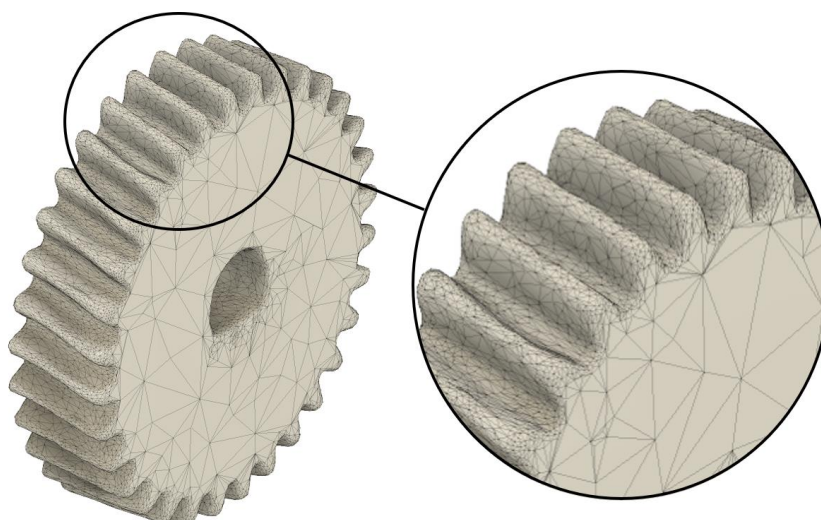


Proporcija 20 % - 111388



Tolerancija 0,05 mm - 78520

Oba načina su adaptivna, što znači da su nove facete različitih veličina u ovisnosti o ravnosti mreže. Dijelovi mreže s puno detalja zahtijevaju manje facete za odgovarajuću rekonstrukciju, dok se ravne stranice mogu zadovoljavajuće opisati većim facetama [Slika 45].



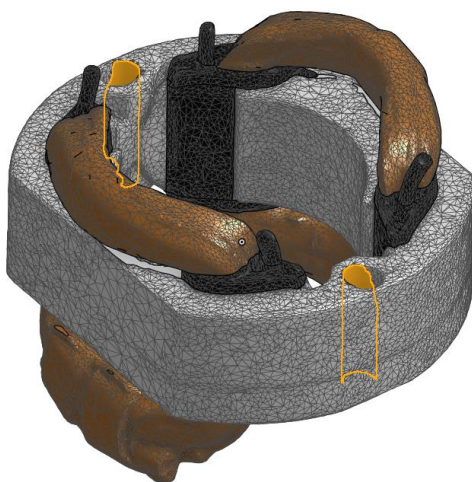
Slika 45. Razlika veličine trokuta za zapis malih zakrivljenih i velikih ravnih značajki

Definiranjem tolerancije moguće je zadati krajnju kvalitetu modela, dok je uz zadavanje krajnjeg broja faceta potrebno pratiti ishod te broj podešavati prema njemu. Moguće je zadržati originalnu razinu detalja na pojedinim regijama, kao što je to prikazano na primjeru ispupčenih oznaka prekidača [Slika 46].



Slika 46. Očuvanje originalne kvalitete mreže

Značajke koje se teško skeniraju moguće je dodatno modelirati u CAD sustavu. U programu Fusion 360 naknadno modeliranje zahtijeva logičke (tzv. Booleanove) operacije između mreža koje su vrlo računalno zahtjevne, odnosno zahtijevaju mnogo vremena. Sustav OnShape pruža mogućnosti spajanja modeliranih površina s mrežama [Slika 47] te taj postupak uzima puno manje vremena.

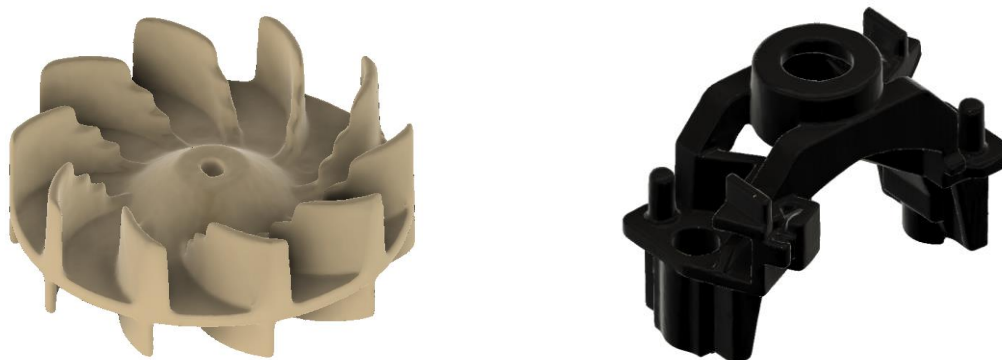


Slika 47. Naknadno modeliranje rupa na mrežnom modelu

3.1.9. Dodjela boje i teksture

Za shvaćanje funkcija i generalnu prepoznatljivost komponenti vrlo je bitno dodjeljivanje adekvatne teksture, odnosno boje. Kako bi se ovaj proces efikasno proveo potrebno je početi

od najlakšeg načina, a to je dodjeljivanje boje jednobojnim komponentama unutar CAD sustava [Slika 48]. Dodatna prednost odabira izgleda iz knjižnice CAD sustava je ta što su različitim materijalima pripisane različite vrijednosti reflektivnosti, pa komponente izgledaju još realističnije.



Slika 48. Jednobojne komponente kojima je dodijeljena boja

Višebojnim komponentama, koje su često izrađene od više materijala gdje je lako odvojiti granicu materijala, moguće je razdijeliti mrežu te dodijeliti izgled svakom djelu posebno [Slika 49].



Slika 49. Dvobojna komponenta

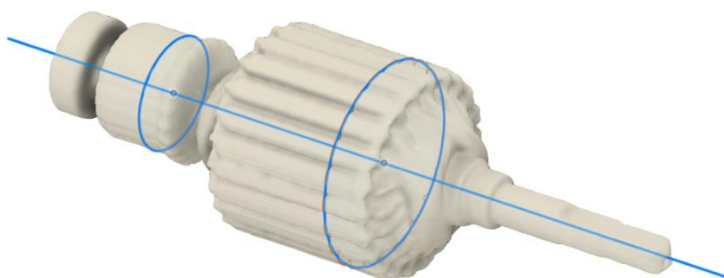
Izrada realističnih tekstura kompleksnih komponenti sastoji se od snimanja jednoličnih fotografija te njihovom primjenom na mrežu. Opisanim postupkom dobiva se vjerna tekstura [Slika 50].



Slika 50. Teksturirana komponenta

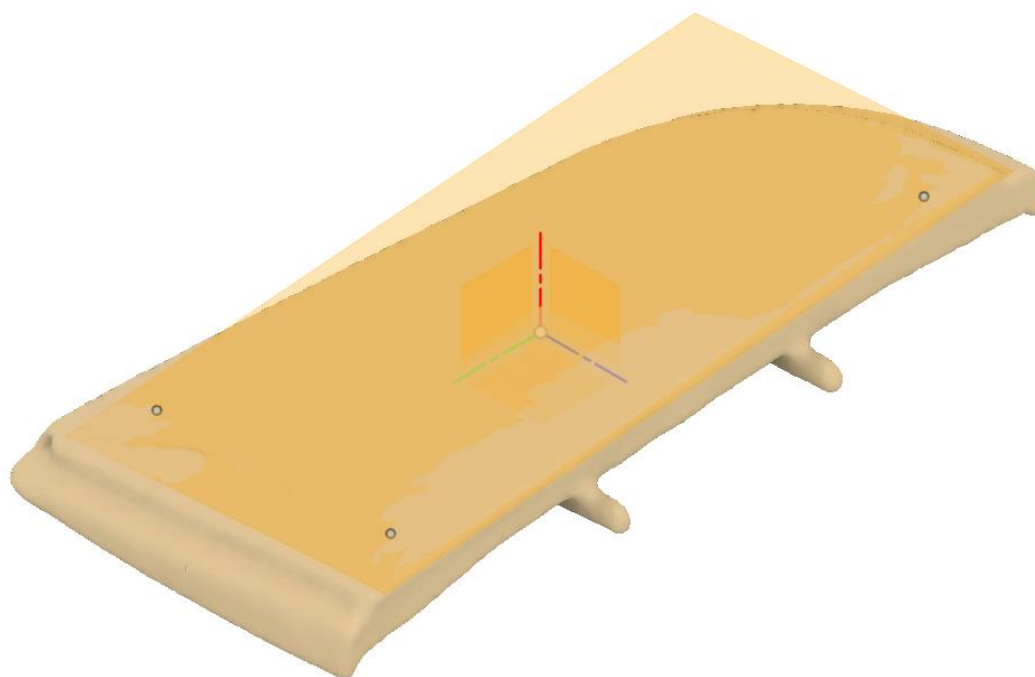
3.1.10. Sklop i konstrukcijska geometrija

Mreže, za razliku od CAD modela, nemaju definirane topološke značajke, poput bridova i ploha koje bi moguće bilo koristiti za pozicioniranje komponenti u sklopu. Takvim je modelima prije definiranja veza u sklopu potrebno dodati konstrukcijsku geometriju. Za definiranje osi cilindričnih tijela potrebno je mrežu presjeći na dva mjesta čim pravilnijeg kružnog presjeka. Os se zatim definira kroz dvije središnje točke kružnica pripasanih krivulji presjeka [Slika 51].



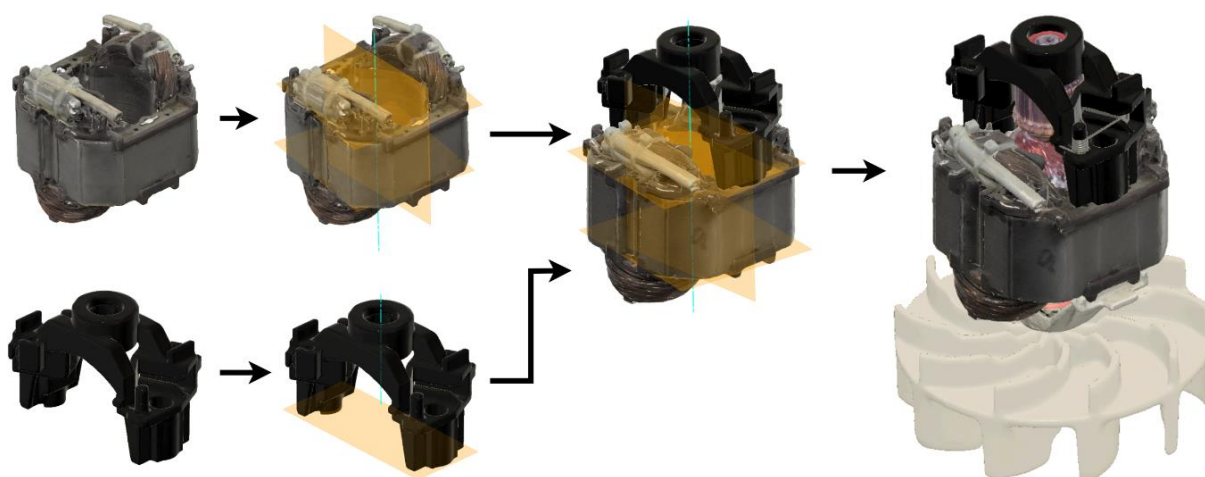
Slika 51. Referentna os na temelju presjeka mreže

Kontaktne površine se definiraju plohama određenim trijema točkama na mreži. Potrebno je odabrati mjesto na mreži bez artefakata. Koliko je to moguće, ostala konstrukcijska geometrija treba biti derivirana iz osnovne. Na taj način se zadržavaju okomitost ili paralelnost konstrukcijske geometrije.



Slika 52. Definiranje konstrukcijske ravnine

Koristeći jasno definiranu konstrukcijsku geometriju sklop se izrađuje njezinim poklapanjem, kao što je to prikazano na donjoj slici. Uz samu poziciju, konstrukcijska geometrija koristi se za definiranje stupnjeva slobode sklopova.




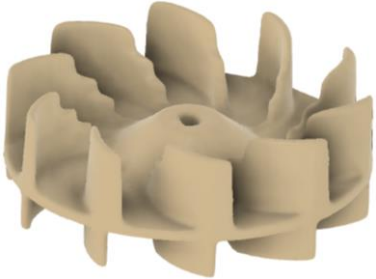


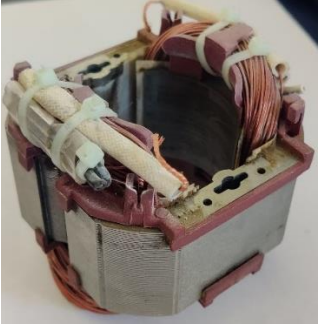





Slika 53. Definiranje međuovisnosti u sklopu prema referentnoj geometriji



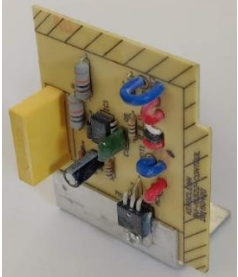



3.1.11. Primjeri skeniranja komponenti

U donjoj tablici prikazani su primjeri različitih komponenti te izrade njihovih računalnih prikaza.

Tablica 3. Primjeri pristupa izrade računalnih prikaza

Naziv i fotografija komponente	Dimenzije i specifičnosti	Priprema i skeniranje	Računalni prikaz
<p>Kućište</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 460 x 110 x 300 mm • Duboki utori između rebra • Tanke stijenke • Reflektivna površina 	<ul style="list-style-type: none"> • Tanki sloj spreja za skeniranje za uklanjanje odsjaja • Ručnim skeniranjem CR-Scan-om 01 cijela komponenta i POP-om 2 na mjestima malih značajki • Ručno teksturirano 	
<p>Rotor kompresora</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ø120 x 45 mm • Utori između lopatica 	<ul style="list-style-type: none"> • Skeniranje na okretnom stoliću POP-om 2 • Za dobivanje podataka između lopatica skener se mora zarotirati • Središnji provrt modeliran naknadno 	

<p>Stator elektromotora</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 80 x 80 x 85 mm • Reflektivne površine • Više različitih materijala 	<ul style="list-style-type: none"> • Pripremljeno sprejom za skeniranje • Skeniranje na okretnom stoliću POP-om 2 • Ručno teksturirano • Provrti modelirani naknadno 	
<p>Metalno ležajno mjesto</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 90 x 30 x 35 mm • Reflektivne površine • Više različitih materijala • Simetrična komponenta 	<ul style="list-style-type: none"> • Pripremljeno sprejom za skeniranje • Skeniranje na okretnom stoliću POP-om 2 • Navoji modelirani naknadno • Model dobiven iz jednog prolaza skeniranja • Ručno teksturirano 	
<p>Prekidač za uključivanje</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 40 x 30 x 25 mm • Reflektivna površina 	<ul style="list-style-type: none"> • Pripremljeno sprejom za skeniranje • Skeniranje na okretnom stoliću SOL PRO-om • Originalna gustoća mreže zadržana na mjestu detalja 	

<p>Vijak za ručno zavrtnanje</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ø30 x 45 mm • Reflektivna površina • Više različitih materijala 	<ul style="list-style-type: none"> • Pripremljeno sprejom za skeniranje • Skeniranje na okretnom stoliću SOL PRO-om • Mreža podijeljena za dodjelu boje 	
<p>Tiskana pločica</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 45 x 65 x 75 mm • Više različitih materijala • Dio površine reflektivan 	<ul style="list-style-type: none"> • Samo reflektivne površine pripremljene olovkom za skeniranje • Skeniranje na okretnom stoliću SOL PRO-om • Tekstura generirana tijekom skeniranja 	
<p>Prekidači</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Do 20 x 25 x 65 mm • Crna površina • Više različitih materijala • Ravno dno 	<ul style="list-style-type: none"> • Pripremljeno sprejom za skeniranje • Skeniranje na okretnom stoliću SOL PRO-om • Skenirani zajedno u jednom prolazu • Mreža podijeljena za dodjelu boje 	

<p>Vijci kućišta</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ø10 x 20 mm • Crna površina 	<ul style="list-style-type: none"> • Pripremljeno sprejom za skeniranje • Skeniranje na okretnom stoliću Dentalom kao primjer, bolji pristup je preuzimanje CAD modela 	
<p>Cijev za usmjeravanje zraka</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 475 x 70 x 75 mm • Cijevna komponenta • Crna i zaobljena površina 	<ul style="list-style-type: none"> • Pripremljeno sprejom za skeniranje • Ručno skeniranje CR-Scanom 01 uz okolne komponente za praćenje 	
<p>Utikač</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • 90 x 35 x 35 mm • Fleksibilna komponenta • Crna i reflektivna površina 	<ul style="list-style-type: none"> • Pripremljeno sprejom za skeniranje • Skeniranje na okretnom stoliću POPom 2 • Kabel modeliran 	

3.1.12. Krajnji prikaz sklopa uređaja

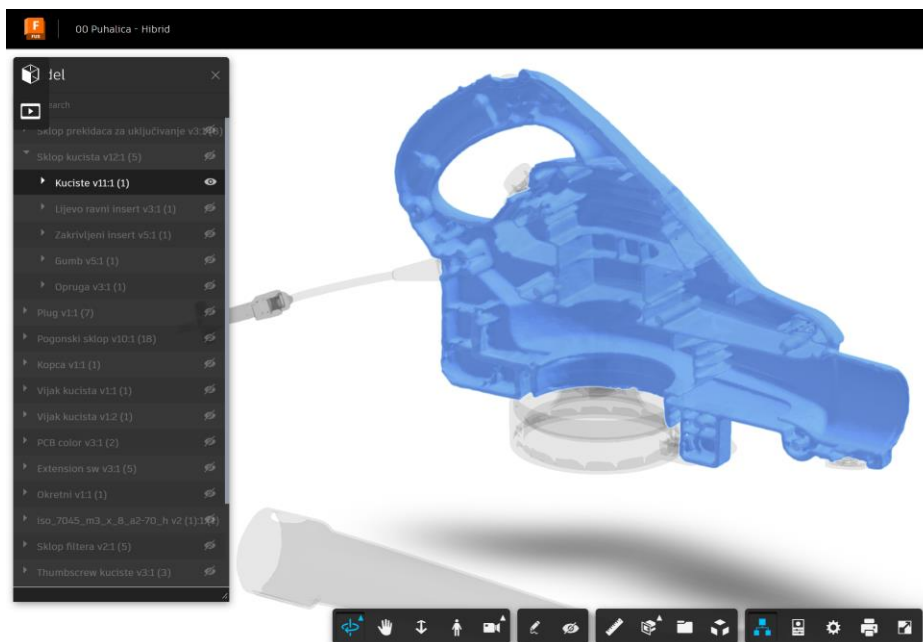
Konačni sklop uređaja strukturiran je u četiri montažna sklopa: sklop kućišta, sklop prekidača za uključivanje, sklop filtera te sklop pogona [Slika 54]. Na taj način prikazani su stvarni sklopovi koji bi se identificirali rastavljanjem uređaja.



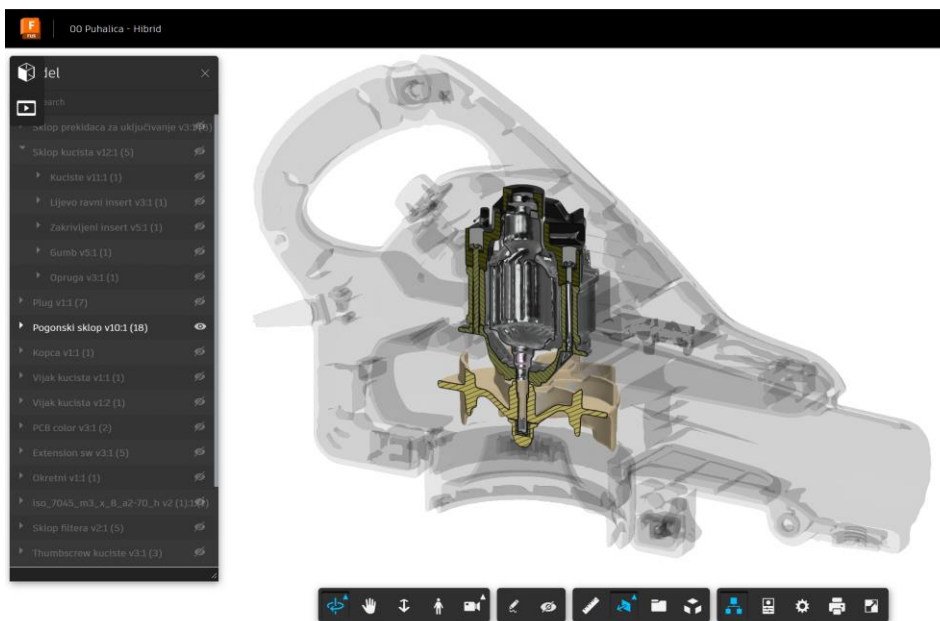
Slika 54. Montažni sklopovi puhalice

Slika 58. prikazuje cijeli sklop puhalice za lišće bez polovice kućišta zbog pregleda unutrašnjih komponenti. Analiza pojedinih sklopova ili komponenti može se izvršiti njihovom izolacijom unutar CAD sustava. Proces rastavljanja može se analizirati pomicanjem komponenti u prostoru. Dodatna mogućnost koju nudi virtualno rastavljanje proizvoda je izrada presjeka [Slika 56]. Za dijeljenje prikaza nije potrebno koristiti CAD sustav, već program Fusion 360

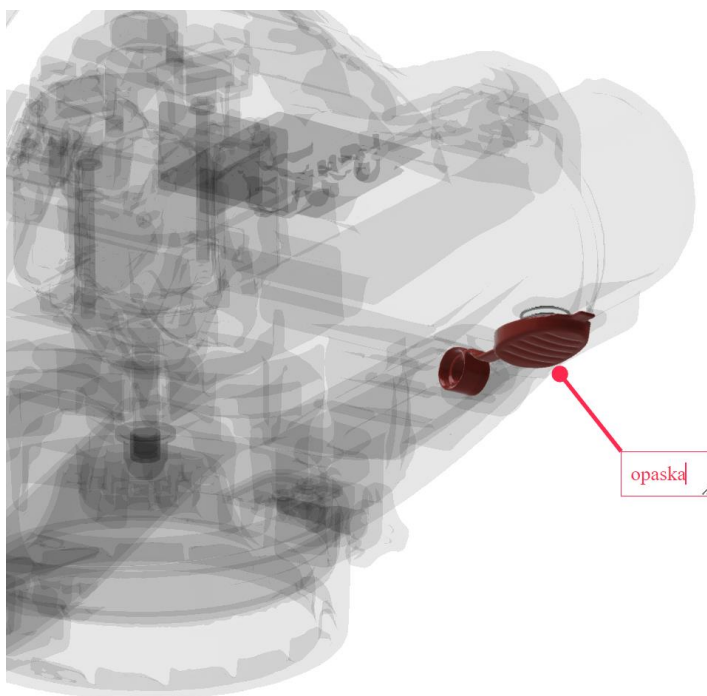
pruža mogućnost pregleda izrađenih sklopova u mrežnom pregledniku [Slika 55]. Mrežni prikaz koji je razvijen za pregled konstrukcije omogućava i lagano bilježenje opaski uz integrirane alate za obilježavanje [Slika 57].



Slika 55. Izolacija prikaza komponente u mrežnom pregledniku



Slika 56. Izrada presjeka prikaza sklopa u mrežnom pregledniku



Slika 57. Izrada opaski tijekom analize



Slika 58. Otvoreni prikaz cijelog uređaja

3.2. Mikser

Ciljevi rekonstrukcije drugog proizvoda u okviru studije slučaja bili su razmatranje i usporedba efikasnosti postupaka 3D skeniranja i CAD modeliranja u izradi virtualnih prikaza. Naime, s obzirom da su ciljani korisnici predložene metodologije, za razliku od skeniranja, upoznati s CAD modeliranjem, postavlja se pitanje isplati li se uopće uvođenje skeniranja u pogledu vremena te za kakvu vrstu komponenti. Kao i puhalica, mikser se sastoji od skupa elektromehaničkih komponenti koje dobro predstavljaju komponente koje se mogu naći u drugim uređajima tog tipa. Odabrani uređaj sastoji se od dva glavna sklopa, pogonske baze te nastavka za pjenjenje.



Slika 59. Glavni sklopovi miksera

Za uspješnost metode, ciljano vrijeme postavlja se kao jednako ili kraće, za modele jednake ili bolje kvalitete od onih modeliranih. Pretpostavlja se kako izbor boljeg pristupa ponajviše ovisi o geometrijskim karakteristikama pojedinih komponenata. No, kako bi se mogla usporediti vremena potrebna za rekonstrukciju komponenata različitih geometrija, svaka komponenta proizvoda je u potpunosti i skenirana i modelirana.

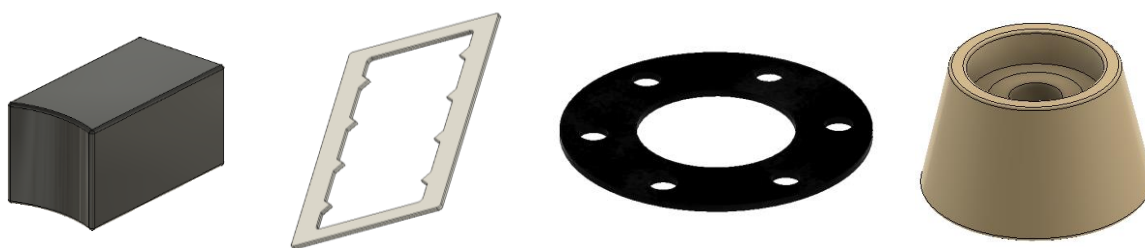
3.2.1. Modeliranje

Mikser je modeliran u programskom paketu Fusion 360, u kojem su također izrađeni i sklopovi CAD modela i mrežnih prikaza. Komponente su modelirane isključivo na temelju mjera prikupljenih pomičnim mjerilom. Kako nije moguće izmjeriti sve mjere komponenti, neke značajke modelirane su prema izgledu. Uz izradu sklopa, ukupno potrebno vrijeme za modeliranje proizvoda iznosi 656 minuta (10 h 56 min).



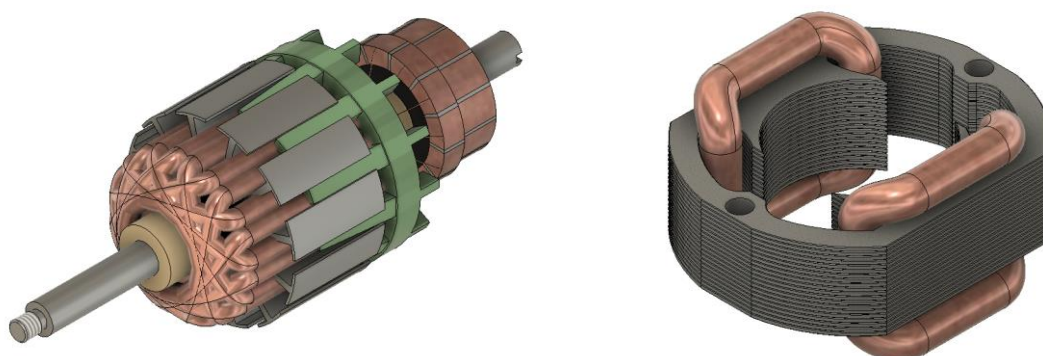
Slika 60. Djelomični presjek modeliranog sklopa

Precizno CAD modeliranje na temelju osnovnih mjerenja zamoran je proces koji zahtijeva visoku razinu koncentracije. Težina postupka modeliranja puno varira između komponenata, gdje je prikaze jednostavnih komponenti moguće izraditi u par minuta na temelju dvije ili tri izmjerene dimenzije [Slika 61]. Ovakve komponente odlikuju vrlo jednostavne značajke te pravilni oblici koji se često opisuju samo jednom značajkom. Pravilne oblike takvih komponenti lakše je i izmjeriti, stoga su modeli točniji.

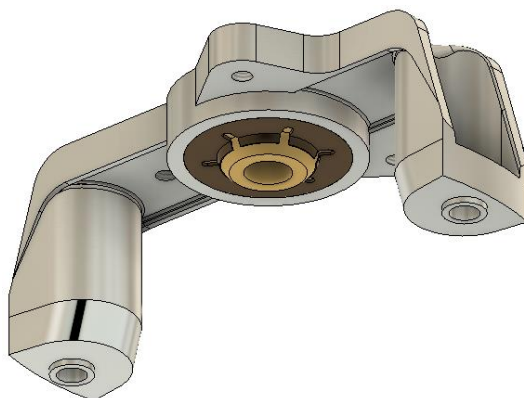


Slika 61. Komponente lagane za CAD modeliranje

Neke od ostalih komponenti izrađene su procesima poput lijevanja ili sadrže mnoštvo žica. Tako je namotaje statora i rotora te nagibe i zaobljenja lijevane komponente kućišta kliznog ležaja [Slika 63] teško vjerno modelirati. Namotaji tako postaju samo karikatura stvarne geometrije [Slika 62] te se u potpunosti potrebno osloniti na mogućnost promatrača da iz iskustva i konteksta zaključi o čemu se radi. Mjerenje zaobljenih komponenta koje su nakošene u više smjerova teže je i mjeriti nego mjere osnovnih pravilnih oblika.



Slika 62. Modelirani namotaji



Slika 63. Lijevano ležajno mjesto rotora

Vrijeme potrebno za modeliranje [Tablica 4] produljuje se brojem značajki, ali i njezinom kompleksnosti. Tako je vrijeme potrebno za izradu modela donjeg kućišta baze koji se sastoji od 19 značajki 27 minuta, dok je potrebno vrijeme za izradu modela metlice pjenjače koristeći 21 značajku (samo dvije više) bilo 47 minuta. Iako broj značajki doprinosi vremenu potrebnom za skeniranje, kao što će to biti opisano u odlomku 5.2, vidljivo je kako je u danom slučaju zbog nepravilno zaobljenih metlica, kompleksnosti položaja koje su posljedica metoda izrade, kao i malih značajki koje je teže mjeriti, vrijeme značajno povišeno. Nepravilan početni pristup modeliranja kompleksne značajke često može uzrokovati najveći dodatak potrebnog vremena za modeliranje.

3.2.2. Skeniranje

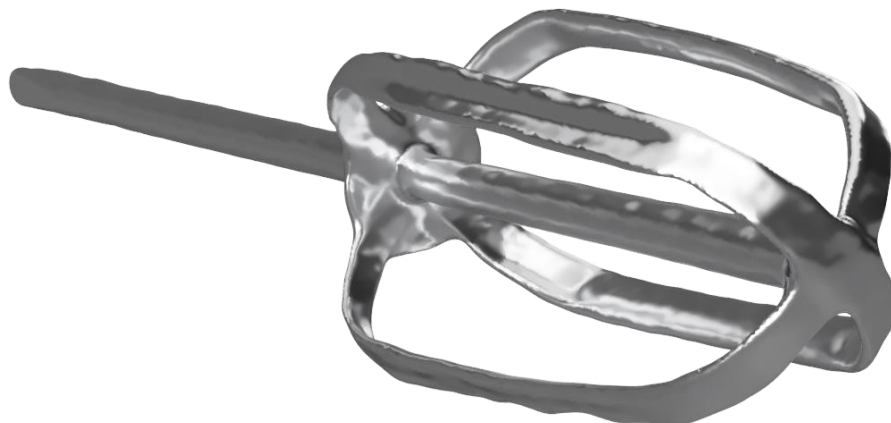
Komponente uređaja skenirane su na način opisan u prošlom primjeru. Zbog veličine komponenti, kao i održavanja eksperimenta, za skeniranje primarno su korištena dva skenera. Tupel je korišten za male komponente, dok je POP 2 korišten za sve ostale uz iznimku pjenjači za koje je korišten SOL PRO. Uz izradu sklopa, potrebno vrijeme za skeniranje iznosi 482 minuta (8h 2min). Samim korištenjem skeniranja prilikom izrade prikaza ovog uređaja uštedeno je skoro tri sata. Kao što je opisano, izbor skenera ograničen je na dva zbog provedbe eksperimenta na ovom uređaju u istom postavu. Izbor između uređaja sveden je na dimenzije komponente, gdje su se one koje su dimenzijama i masom bile pogodne za osiguravanje na motoriziranoj bazi bile skenirane Tupel-om, dok su ostale skenirane na okretnom stoliću koristeći skener POP 2. Proces skeniranja je repetitivan u smislu da su koraci uvijek jednaki te da ne postoje značajna odstupanja. To je vidljivo i u pregledu potrebnih vremena za skeniranje [Tablica 4] gdje je nakon zanemarivanja najveće i najmanje vrijednosti prosječno potrebno vrijeme 17,6 minuta uz medijan 17 te standardnu devijaciju 4,3 min. Najveće odstupanje, čak 55 minuta, zabilježeno je u izradi prikaza pužnog kola gdje su uske značajke prostora između zubi teško bile zabilježene.



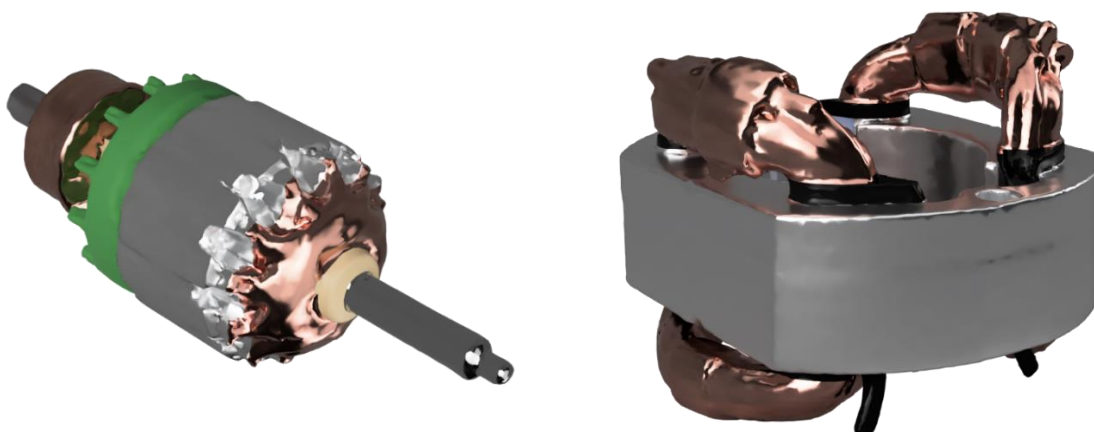
Slika 64. Djelomični presjek skeniranog sklopa

Tijekom izrade ovih prikaza rano je prepoznato kako plastične komponente naizgled pogodne za skeniranje stvaraju probleme ako se skeniraju bez pripreme sprejom za skeniranje. Proces izrade prikaza olakšan je na način da se skoro svaka komponenta pripremi, što je i lakše odraditi za veći broj komponenti odjednom. Jedinke komponente za koje je bilo potrebno korištenje laserskog 3D skenera koji može sa višom razinom detalja zabilježiti i veće komponente su metlice pjenjače. Vrlo reflektivna metalna površina zahtijevala je posebnu pažnju u pripremi te kasnijem pomicanju. I sa kvalitetnom pripremom, uske značajke savijenih limenih traka teško su bile registrirane uređajem POP 2. Težina postupka skeniranja te potrebno vrijeme ne ovisi na isti način o broju značajki kao modeliranje. Štoviše, prepoznatljive značajke uvelike olakšavaju poklapanje različitih oblaka točaka. Nakon izrade geometrijskih modela, potrebno im je dodijeliti boju. Većina komponenti je jednobojna ili dvobojna, pa se proces svodi na odabir odgovarajuće teksture u CAD sustavu. Najkompleksnije komponente u pogledu tekstura

bile su stator i rotor, gdje je odabran pristup podijele mreža i zasebno dodjeljivanje boja [Slika 66]. Rezultati tog pristupa prihvatljivi su, no nisu idealni. Bolji pristup je ručno teksturiranje, kao što je to učinjeno sa rotorom i statorom puhalice [Slika 96, Slika 113]



Slika 65. Zahtjevna komponenta za skeniranje



Slika 66. Prikazi rotora i statora

3.2.3. Usporedba potrebnih vremena

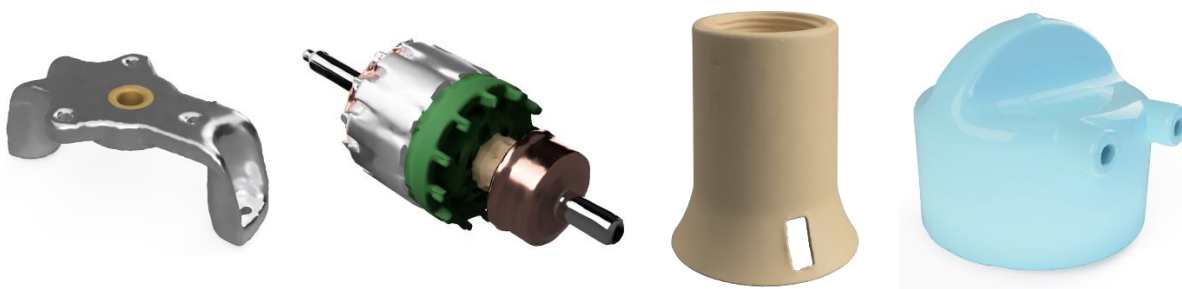
Tablica 4. prikazuje vremena potrebna za skeniranje i modeliranje pojedinih komponenti. Desni stupac bojom i postotkom prikazuje razliku potrebnih vremena. POP 2 3D skener korišten je za veće komponente (dimenzija preko $\text{Ø}120 \times 75$), dok je za manje korišten Tupel. Pozitivna vrijednost razlike vremena indicira uštedu vremena CAD modeliranjem nad onim potrebnim za 3D skeniranje.

Tablica 4. Usporedba vremena potrebnih za pripremu prikaza

Ime komponente	Vrijeme pripreme u minutama		Razlika vremena skeniranja i modeliranja
	3D skeniranje	CAD modeliranje	
Donje kućište baze	21 (Pop2)	35	-67 %
Gornje kućište baze	16 (Pop2)	61	-281 %
Rotor	14 (Pop2)	63	-350 %
Stator	15 (Pop2)	24	-60 %
Donji sklop ležaja	14 (Pop2)	111	-693 %
Gornji sklop ležaja	9 (Pop2)	70	-678 %
Brtva	14 (Tupel)	2	86 %
Imbus spojka	8 (Tupel)	5	38 %
Gumena nožica	20 (Tupel)	6	70 %
Poklopac	22 (Tupel)	16	27 %
Četkica	10 (Tupel)	2	80 %
Prekidač	25 (Tupel)	12	52 %
Kopča prekidača	17 (Tupel)	4	76 %
Kopča kabla napajanja	22 (Tupel)	13	41 %
Sklop baze	50	37	26 %
Gornje kućište pjenjače	21 (Pop2)	52	-148 %
Donje kućište pjenjače	17 (Pop2)	27	-59 %
Metlica pjenjače	25 (SolPro)	47	-88 %
Pužno kolo	55 (Tupel)	18	67 %
Pužnik	18 (Tupel)	33	-83 %
Graničnik	18 (Tupel)	5	72 %
Gumena spojka	17 (Tupel)	4	76 %
Sklop pjenjače	20	9	55 %
Ukupno	468	656	-40 %

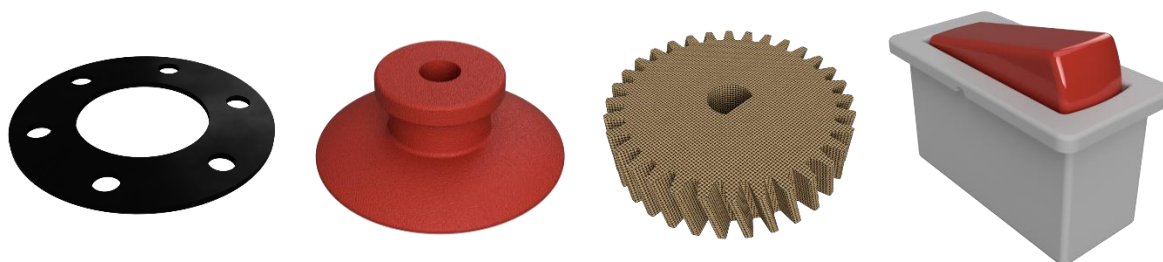
Može se uočiti kako su vremena skeniranja kompleksnih komponenti mnogo kraća od vremena modeliranja. Povećano vrijeme modeliranja može se povezati s njihovom veličinom te brojem značajki. Takve komponente su skenirane uređajem POP 2, dok su one jednostavnije i manje primarno skenirane Tupelom. Ušteda vremena skeniranjem kod kompleksnih komponenti veća je nego ona modeliranjem jednostavnijih komponenti, pa je tako ukupno vrijeme skeniranja

(413 minuta) kraće nego ono modeliranja (643 minute) za 56 %. Više vremena potrebno je za izradu sklopova mrežnih prikaza, jer oni, za razliku od CAD modela, nemaju značajke koje je moguće poklapati. Najznačajnije uštede javljaju se kod komponenti sa zakrivljenim površinama izrađene tehnologijom lijevanja kao što su ležajna mjesta, gdje najveća vremenska ušteda iznosi 693 %, odnosno 14 minuta skeniranja umjesto 111 minuta CAD modeliranja. Slične uštede vremena vidljive su i kod injekcijski prešanih komponenti kao što su plastična kućišta.



Slika 67. Komponente čiji je prikaz efikasnije izrađen 3D skeniranjem

Brojevi značajki CAD modela komponenti na slici iznose redom 24, 25, 25 i 24. Iako su ovi iznenađujuće slični brojevi značajki podložni promjeni drugačijim načinom modeliranja, služe samo kao indikacija kompleksnosti za usporedbu s modelima koje je bilo brže modelirati. Vrlo jednostavne komponente prikazane dolje sastoje se redom od 1, 4, 6 i 11 značajki.



Slika 68. Komponente čiji je prikaz efikasnije izrađen 3D modeliranjem

Vremena skeniranja vrlo jednostavnih komponenti ukazuje na postojanje minimalnog vremena 3D skeniranja. Prilikom postupka akvizicije i obrade podataka kompleksnost samog objekta, osim u broju prolaza ne utječe značajno na vrijeme skeniranja te je i za jednostavnu komponentu potrebno proći sve korake kao i za kompleksnu. Kako su oba vremena za tu vrstu komponenti kratka, najveće postotno produljenje postupka modeliranja iznosa čak 600 % produljuje

postupak za 12 minuta, dok najveće produljenje postupka korištenjem 3D modeliranja sličnog postotka od 693 % iznosi čak 97 minuta, odnosno 1 sat i 37 minuta.

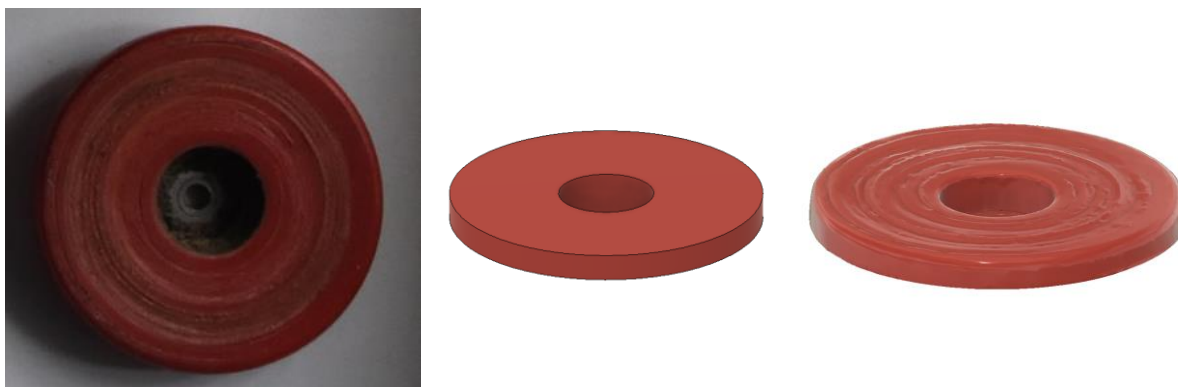


Slika 69. Presjek hibridnog modela na temelju vremena pripreme komponenti

Slika 69 prikazuje model koji spaja komponente izrađene na način koji je za specifičnu komponentu bio brži. Vrijeme pripreme komponenti takvog hibridnog modela iznosi 303 minute (5 sati i 3 minute), što je 27 % brže od skeniranja te čak 53 % brže od CAD modeliranja. Prikazana vremena izrade hibridnog modela najbolji su slučaj jer se poznaju vremena skeniranja i modeliranja, no procjenom kompleksnosti svake komponente moguće je postići značajno povećanje efikasnosti.

3.2.4. Usporedba kvalitete modela

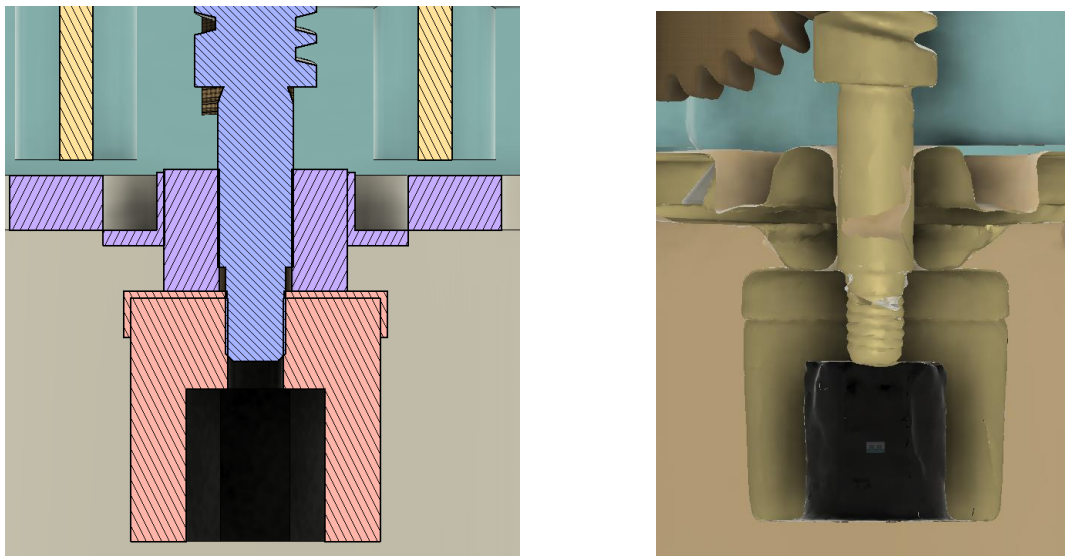
Vrijeme potrebno za izradu željenih prikaza samo je jedan faktor uspješnosti metode. Drugi faktor je kvaliteta izrađenih prikaza. Brzo izrađen nekvalitetan model nikako nije podoban za korištenje za krajnji cilj koji je analiza funkcija. Kako je prilikom izrade CAD modela potrebno jasno definirati sve značajke, izgled tih modela (kada su detaljno i točno izrađeni) je uredan. Površine su glatke i nemaju neželjene artefakte. S druge strane skenirani modeli izrađeni cjenovno pristupačnijim uređajima ponekad zbog buke sadrže krajnje površine koje, ako se dodatno ne obrade filterima ili modeliranjem, sadrže neravnu teksturu. S druge strane, kada komponente imaju nasumične detalje u površini, oni se često teško modeliraju. Takve stvarne teksture onda su sadržane samo u skeniranim prikazima [Slika 70].



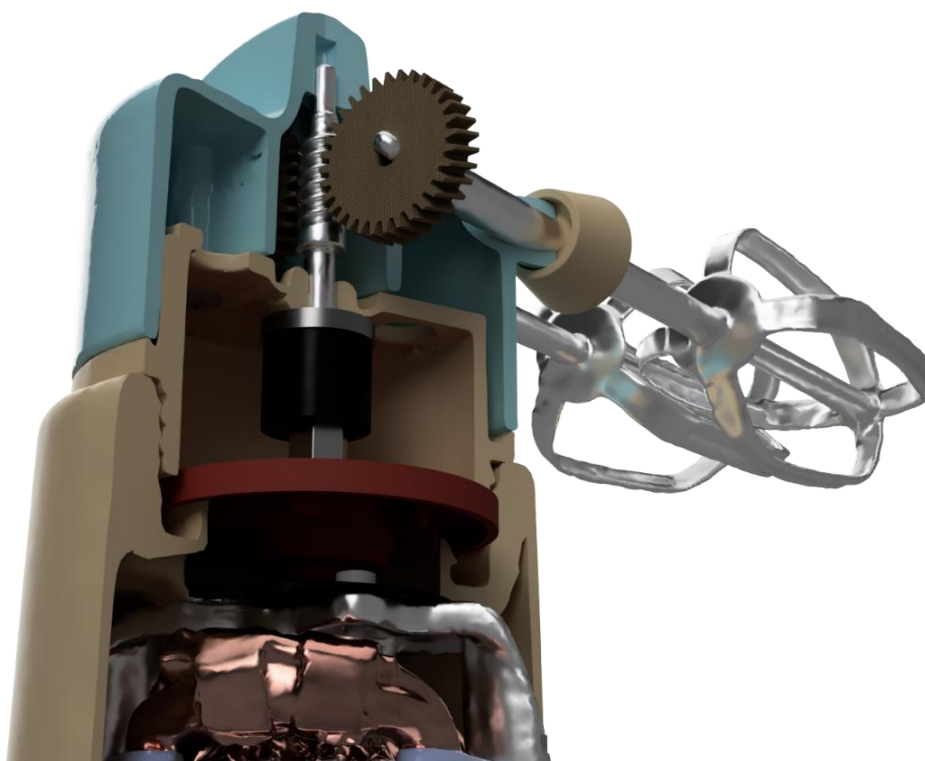
Slika 70. Stvarna (lijevo), CAD modelirana (sredina) i 3D skenirana (desno) komponenta

Definiranost CAD modela u sklopu znači kako su veze komponenti jasno određene. Kod 3D skeniranih komponenti, zbog nesavršenosti u preklapanju te grešaka u površini modela, površine koje u stvarnosti precizno dosjedaju imaju blage preklope [Slika 71]. Ideja hibridnog modela je dopunjavanje točnu reprodukciju geometrije dobivene 3D skeniranjem sa CAD modeliranjem značajki koje se ne mogu na taj način zabilježiti, kao što su rupe [Slika 91, Slika 99 lijevo]. Jednostavne komponente koje se lako mjere, modeliraju te nemaju kompleksne značajke koriste se u obliku CAD modela te pružaju točan prikaz komponente (pužno kolo, spojka, graničnik). Komponente koje sadrže kompleksne značajke vjernije su prikazane mrežnim modelima (stator, ležajna mjesta). Slika 72 prikazuje detalj hibridnog modela koji koristi kombinaciju 3D skeniranih komponenti kojima su naknadno dodane CAD značajke na mjestu rupa i ostalih dosjednih površina i CAD modeliranih jednostavno definiranih

komponenti. Kvaliteta prikaza modela, kao i vrijeme potrebno za njihovu izradu dodatno su istraženi u validacijskoj studiji (5.2 i 5.3).



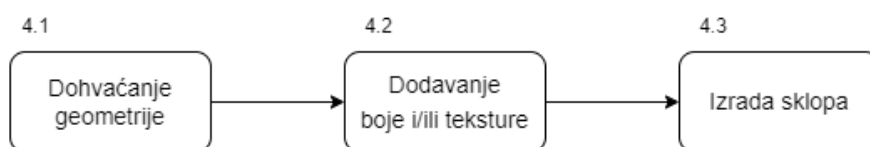
Slika 71. Precizno dosjedanje CAD modela (lijevo) i preklopi 3D skenova (desno)



Slika 72. Presjek hibridnog modela

4. PRIJEDLOG METODOLOGIJE

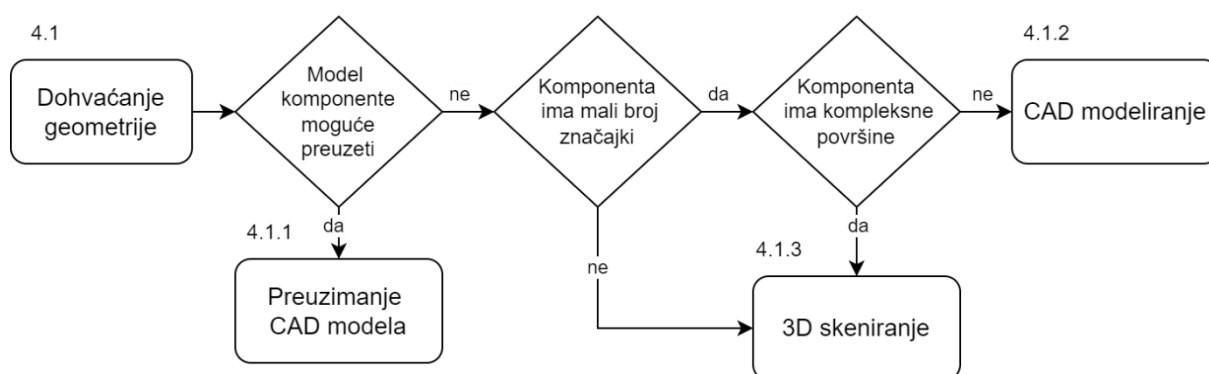
U ovom poglavlju opisana je metodologija za priuštivu, efikasnu i učinkovitu izradu kvalitetnih 3D modela proizvoda u svrhu digitalnog rastavljanja proizvoda za analizu funkcija. Specifičnost predložene metodologije je korištenje relativno jeftinih uređaja za izradu modela koji prenose informacije o funkcijama samih komponenti i sklopova proizvoda. Naime, procesi izrade modela koji su istraženi kroz prethodno opisane studije slučaja su generalizirani u obliku metodologije koja je uporabljiva u različitim okruženjima, a svaki je korak popraćen primjerima koji su neovisni od specifičnih karakteristika korištene opreme. Metodologija se sastoji od tri glavna koraka: dohvaćanje geometrije, dodavanje boje i/ili teksture te izrada sklopa.



Slika 73. Glavni koraci metodologije izrade digitalnih prikaza

4.1. Dohvaćanje geometrije

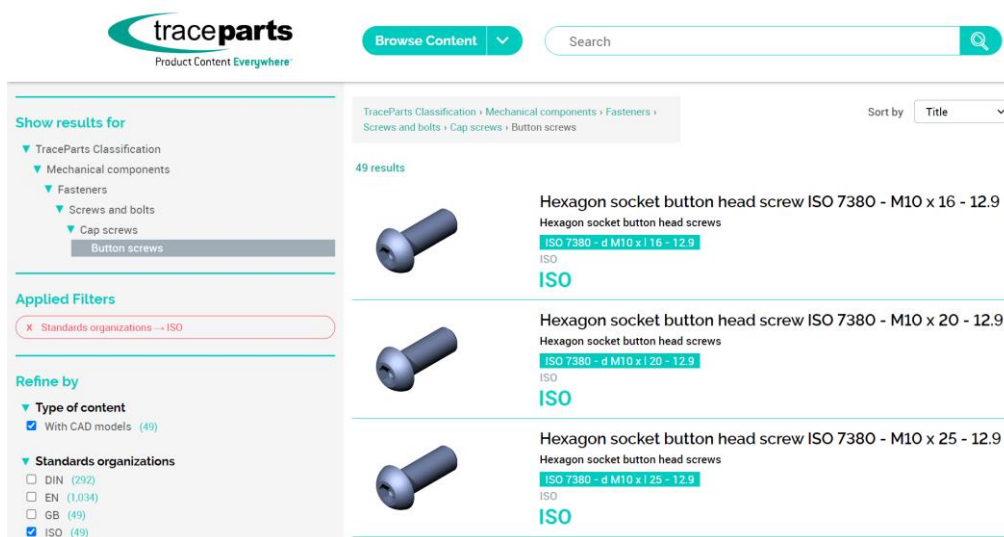
Same geometrijske informacije o pojedinoj komponenti najvažnija su stavka u krajnjem prikazu. Iako je ukupna kvaliteta modela vrlo važna za krajnju upotrebu, jedan od ključnih aspekata predložene metodologije je vrijeme izrade samih modela. Geometriju modela potrebno je dobiti na najlakši, odnosno najbrži način uz zadovoljavajuće rezultate. Koraci dohvaćanja geometrije modela prikazani su na slici [Slika 58] i opisani u sljedećim odjeljcima.



Slika 74. Dohvaćanje geometrije

4.1.1. Preuzimanje dostupnih modela

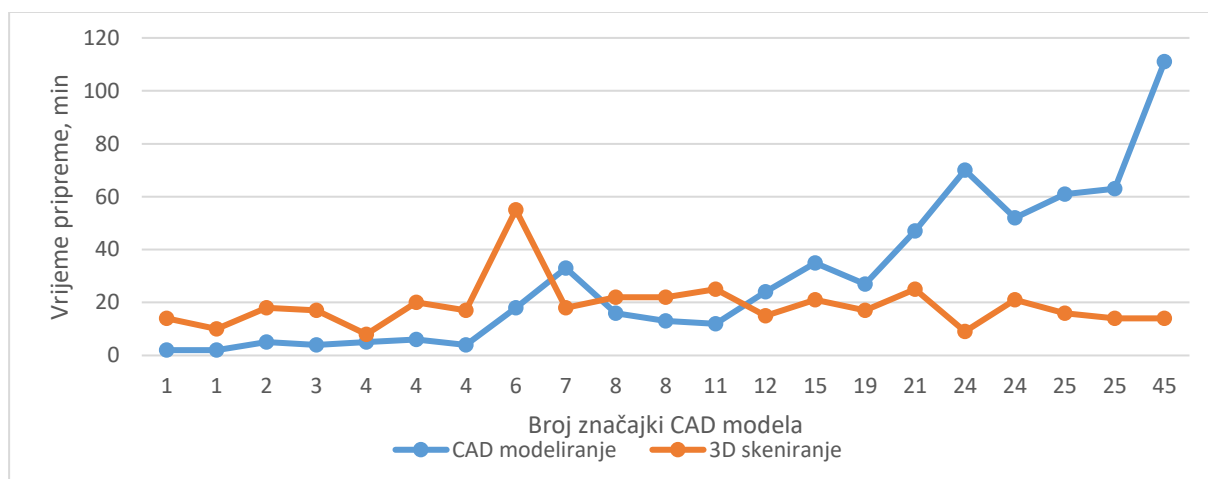
Primarna opcija je preuzimanje postojećih modela s repozitorija otvorenih dostupnih modela, kao što su GrabCAD, TraceParts [Slika 75] i 3Dfindit. Uz to, modeli standardnih i kupovnih komponenti često su dostupni na mrežnim stranicama proizvođača. Mnogi CAD sustavi u sučelje integriraju vlastite repozitorije standardnih komponenti, primarno vijaka, matica i drugih spojnih elemenata. Prilikom rastavljanja potrebno je obratiti pozornost na oznake na komponentama, s obzirom na to da je pretraživanjem oznaka često je moguće naći identičan ili sličan model komponenti. Modele koji ne odgovaraju u potpunosti ugrađenoj komponenti moguće je koristiti, ako se predstavlja odgovarajuća funkcija te model pristaje dimenzijama.



Slika 75. Preuzimanje modela s repozitorija [24]

4.1.2. CAD modeliranje komponenti

U odjeljku 3.2.3 prikazana je analiza vremena potrebnih za skeniranje i modeliranje prema specifičnom slučaju uz primjere komponenti. Promatranjem broja značajki CAD modela [Slika 76] pojedinih komponenti moguće je zaključiti kako postoji korelacija između vremena modeliranja modela s njihovim brojem značajki. S druge strane, može se uočiti kako vremena skeniranja, uz određena odstupanja, u pravilu iznose oko 20 minuta, bez obzira na broj značajki.



Slika 76. Vrijeme izrade prikaza komponenti miksera u ovisnosti o broju značajki CAD modela

Prema tome, pristup modeliranja pokazuje se efikasniji kada je za izradu modela potreban manji broj značajki. Prema izvedenim mjerenjima na primjeru miksera, granica bi se mogla postaviti na jednoznačen broj potrebnih značajki, no to uvelike ovisi o načinu modeliranja te kompleksnosti samih značajki. I s malim brojem značajki potrebno je razmotriti proces skeniranja kada komponenta ima kompleksne površine, za koje korisnik nije odmah siguran kako ih je potrebno modelirati. Naime, već se tijekom kasnije validacije metodologije (sljedeće poglavlje) pokazalo kako je korištenjem osnovnih načina mjerenja bilo teško u pravim proporcijama modelirati i naizgled ne toliko kompleksne značajke [Slika 77]. Pristup 3D skeniranja eliminira takve greške.



Slika 77. Skenirana komponenta (lijevo) i modelirana komponenta (sredina i desno)

Kako je to opisano u odlomku 3.1.2, komponente je potrebno modelirati u obliku kakav poprimaju kad su montirane u sklopu. To se primarno odnosi na vrlo deformabilne komponente kao što su to na primjer komponente izrađene od gume te opruge.

4.1.3. 3D skeniranje

Proces dohvaćanja geometrije sastoji se od nekoliko koraka. Prije samog skeniranja potrebno je odabrati koji od dostupnih uređaja najbolje odgovara komponenti koju je potrebno skenirati. Specifičnosti odabira ponajprije ovise o skupu dostupnih uređaja (npr. u odlomku 3.1.4 opisan je izbor između uređaja dostupnih tijekom provedene studije slučaja). Izbor se vrši prema razini detalja koji je potrebno zabilježiti te njihovoj veličini te prema dimenzijama objekta. Glavni izbor načina skeniranja (koji može utjecati na odabir korištenog uređaja) između ručnog skeniranja i skeniranja na okretnom stoliću vrši se prema dimenzijama i težini objekta. Proizvođači u pravilu deklariraju najveće dimenzije objekta koje je moguće skenirati na okretnom stoliću. Takvo skeniranje je preferirano zbog jednostavnosti te manjeg napora.

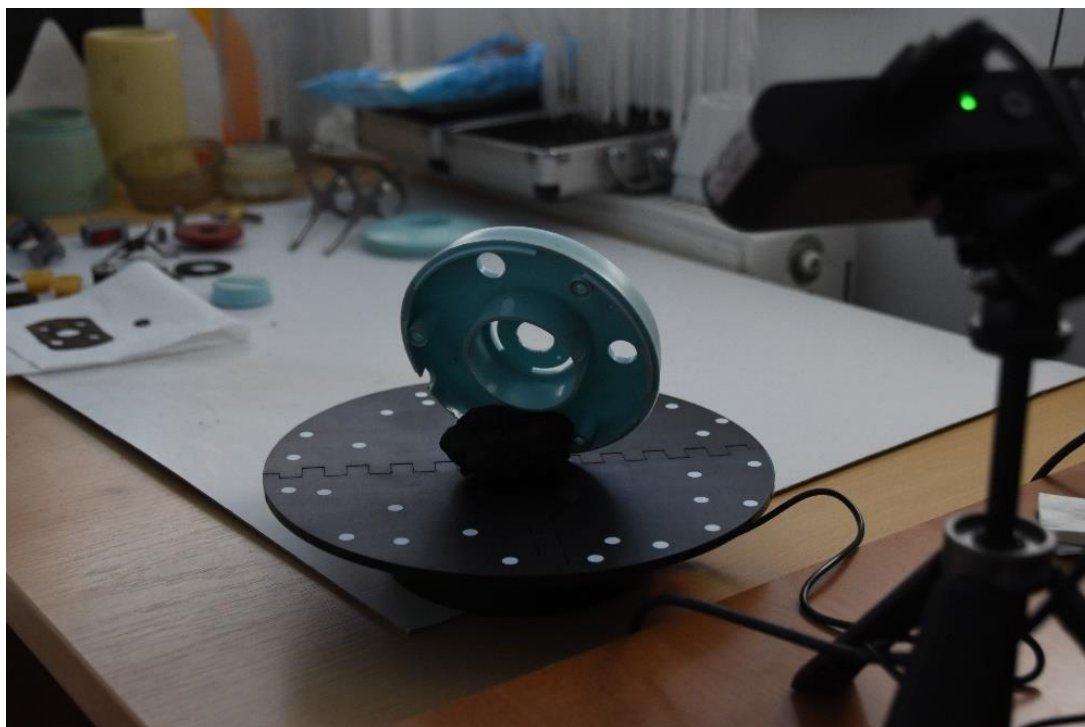
4.1.3.1. Orijentacija skeniranja i priprema objekta

Tijekom oba načina skeniranja potrebno je izabrati orijentaciju ili češće skup orijentacija komponente kako bi se geometrija u potpunosti zabilježila. Uz zapis cjelokupne površine objekta, potrebno je obratiti pažnju na dovoljan preklop komponenti za kasnije poklapanje oblaka točaka (4.1.3.2). 3D skeneri rade na principu triangulacije, stoga se uske udubljene značajke često mogu vidjeti tek nakon rotiranja skenera ili komponente. Tijekom izbora orijentacije skenera i objekta, potrebno je razmotriti poziciju izvora svjetla te kamere. Horizontalna orijentacija kamere i svjetlosnog izvora tijekom skeniranja prikazane komponente [Slika 78] blokirala bi pogled u prostor između lopatica (crveno), dok bi ga vertikalna orijentacija omogućila (zeleno).



Slika 78. Primjer komponente s pravilnim izborom orijentacije skenera

Izabrane orijentacije također moraju biti stabilne. Uz prirodno stabilne orijentacije moguće je skenirati objekt i poduprijeti u nekim drugim orijentacijama. U tom je slučaju poželjno da pomoćni elementi ne dodiruju komponentu u zoni interesa pojedinog prolaza skeniranja ili da budu crne boje (nezapisani u oblaku točaka) zbog lakše naknadne obrade. Pomoćni elementi mogu biti ostale skenirane komponente, ali i kvačice te crni plastelin.



Slika 79. Plastelinom osigurana inače nestabilna orijentacija

Površina podobna za skeniranje je svijetla, neprozirna i ne-reflektivna. Kada to nije slučaj, poželjno je komponentu pripremiti sprejom za skeniranje. Takvi sprejevi koriste se kako bi se na površini komponente stvorio sloj koji odgovara tehnologiji 3D skeniranja, svijetle boje i ne-reflektivan. Tijekom izrade prikaza korišteni su sprejevi tvrtke AESUB [Slika 80]. Sprej je potrebno nanijeti u tankom sloju kroz više prolaza. Debeli sloj spreja može dovesti do gubitka pojedinih detalja, posebno u kutovima i uskim utorima.



Slika 80. Običan (lijevo) i sublimirajući (desno) sprej za skeniranje

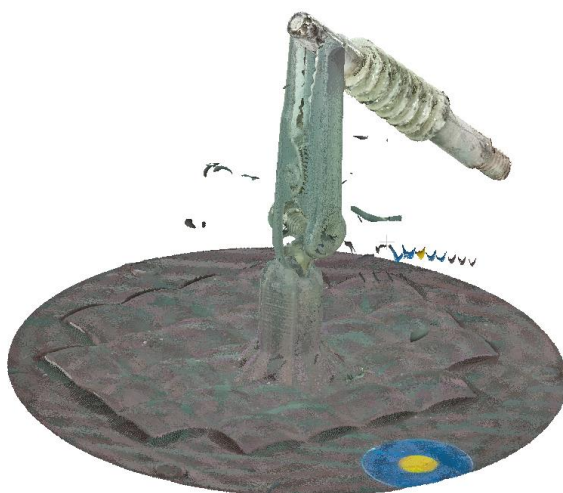
Pripremu komponenti potrebno je vršiti u dobro ventiliranom prostoru. Prikazana cijev [Slika 81] pripremljena je sublimacijskim sprejom te je u kratkom vremenu vidljiv gubitak bijelog sloja na površini.



Slika 81. Cijev puhalice pripremljena sprejom za skeniranje

4.1.3.2. Oblaci točaka

Prolazom skeniranja objekta dobiva se skup točaka u prostoru zvan oblak točaka. Oblak točaka svakog pojedinačnog prolaza potrebno je očistiti od točaka koje pripadaju okolnim objektima. Kao što je spomenuto u prethodnom odjeljku, suvišne točke mogu biti dodani objekti za praćenje ili sredstva osiguravanja objekta [Slika 82].



Slika 82. Pužnik osiguran kvačicom

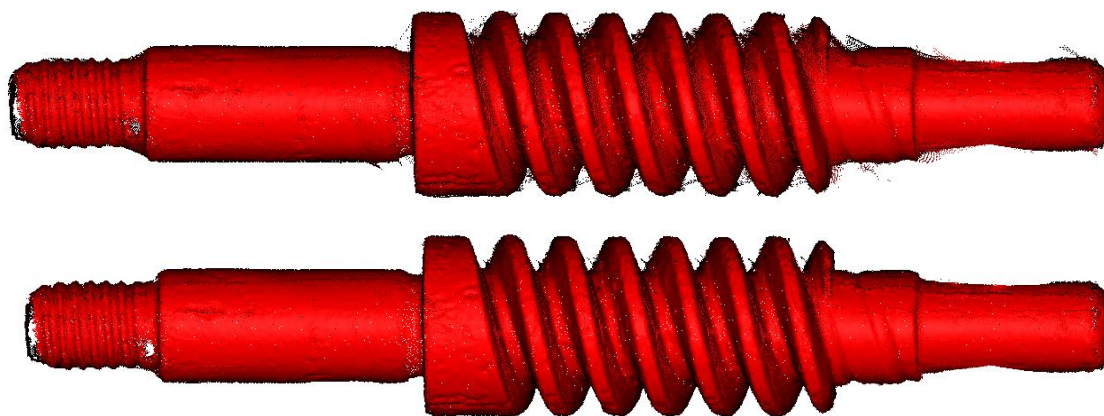
Pojedini prateći softveri imaju opcije automatskog prepoznavanja skupova udaljenih točaka, no generalno se one moraju ukloniti ručnim odabirom. Efikasan način za označavanje suvišnih točaka je pozicioniranje pogleda okomito na poprečni presjek minimalne površine [Slika 83].



Slika 83. Efikasno označavanje objekta

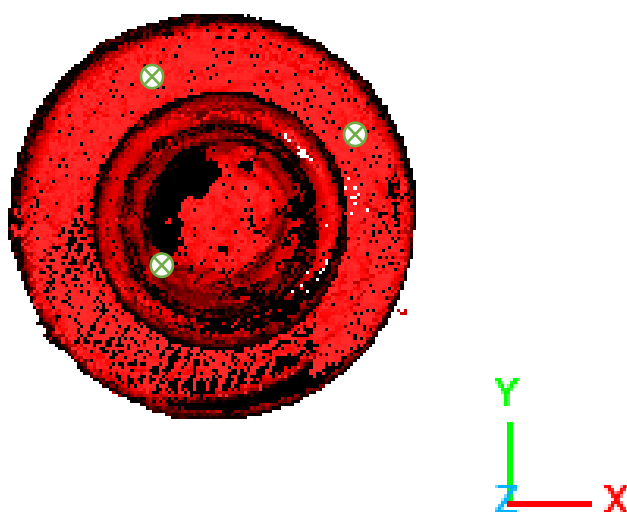
Izolirani oblaci točaka objekta uslijed šumova tijekom skeniranja mogu sadržavati buku. Razina buke ovisi o kvaliteti pripreme modela, postavci ekspozicije te samom skeneru. Statističkim algoritmom za uklanjanje udaljenih točaka (SOR – engl. *Statistical Outlier Removal*) moguće je u velikoj mjeri ukloniti takav šum [Slika 84]. Postavke filtera su broj točaka na temelju kojeg se izračunava prosječna udaljenost skupa na pojedinoj lokaciji te standardna devijacija

maksimalne dozvoljene udaljenosti. Postavke standardne devijacije koje su tijekom studije slučaja korištene za uklanjanje većine buke, bez pretjeranog uklanjanja točaka objekta, su u intervalu od 1.5 do 2.



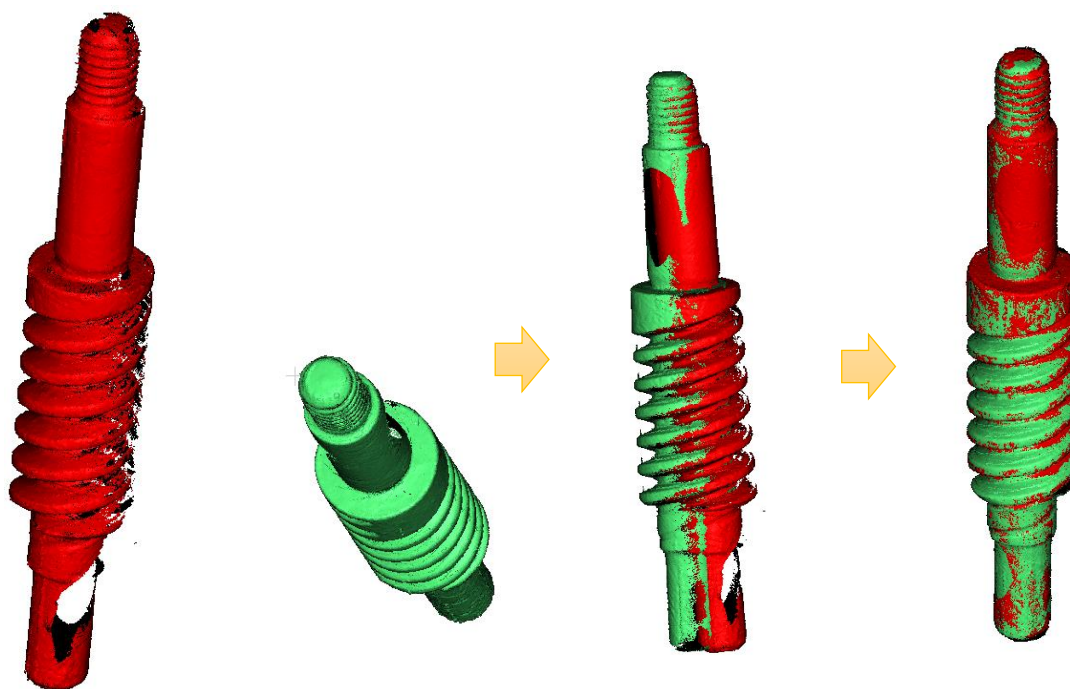
Slika 84. Uklanjanje šuma iz oblaka točaka

Oblak točaka koji se sastoji od točaka površine objekta bez okoline i buke potrebno je poklopiti s koordinatnim sustavom. Ovaj korak nije neophodan, no olakšava daljnje korištenje prikaza. Poklapanje koordinatnog sustava vrši se definiranjem plohe odabirom tri točke na ravnoj površini objekta [Slika 85]. Poželjno je odabrati što udaljenije točke na segmentu bez buke zbog smanjenja greške.



Slika 85. Poravnanje oblaka točaka prema koordinatnom sustavu

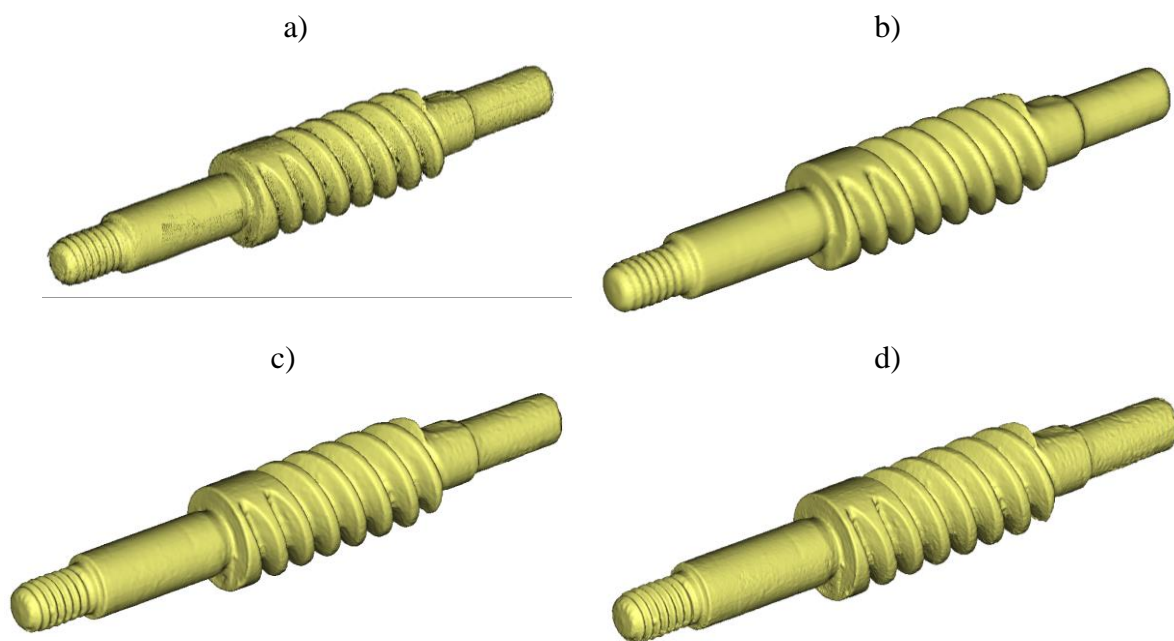
Prema poravnatom oblaku točaka potrebno je grubo poravnati [Slika 86, sredina] drugi oblak točaka. Poravnati služi kao referenca, te se ICP algoritmom pronalazi precizno poklapanje [Slika 86, desno]. Poklapanje normala potrebno je postaviti na istu stranu, a poklapanje oblaka postotno procijeniti.



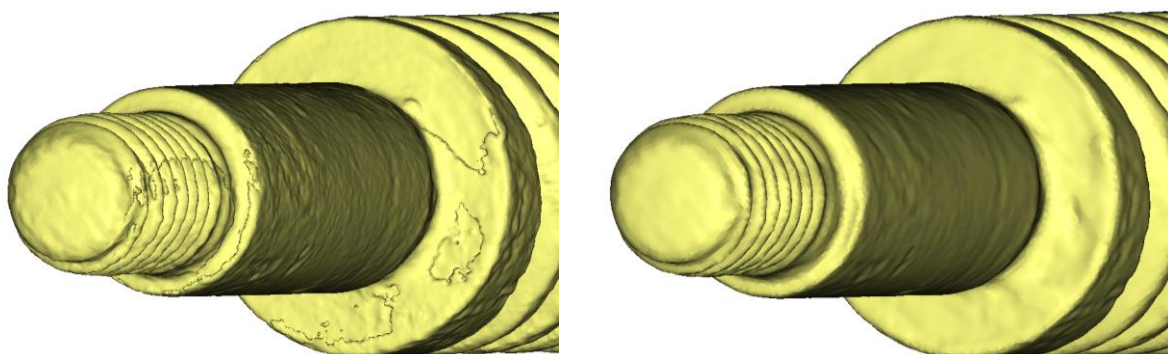
Slika 86. Proces poklapanja oblaka točaka

4.1.3.3. Rekonstrukcija i optimizacija mreža

Iz poklopljenog i spojenog oblaka točaka moguće je rekonstruirati površinu. Koristeći parametar podjele oblaka točaka ili dimenzija trokuta željene mreže moguće je podesiti željenu razinu zabilježenih detalja. Zahtijevanjem više razine detalja vrijeme potrebno za rekonstrukciju drastično se povećava, kao i količina računalne memorije potrebne za zapis mreže. Uz navedeno, moguća je i pojava artefakata uslijed minimalne greške u poklapanju oblaka točaka ili zaostale buke. Iz kvalitetnije pripremljenog oblaka točaka može se rekonstruirati površina više razine detalja prije pojave artefakata. Prikazana je rekonstrukcija iz istog oblaka točaka na više različitih razina detalja površine [Slika 87]. Poželjno je rekonstruirati mrežu s najvišom razinom detalja na kojoj se ne pojavljuju artefakti, jer će gusto rekonstruirana mreža naknadno biti optimizirana.



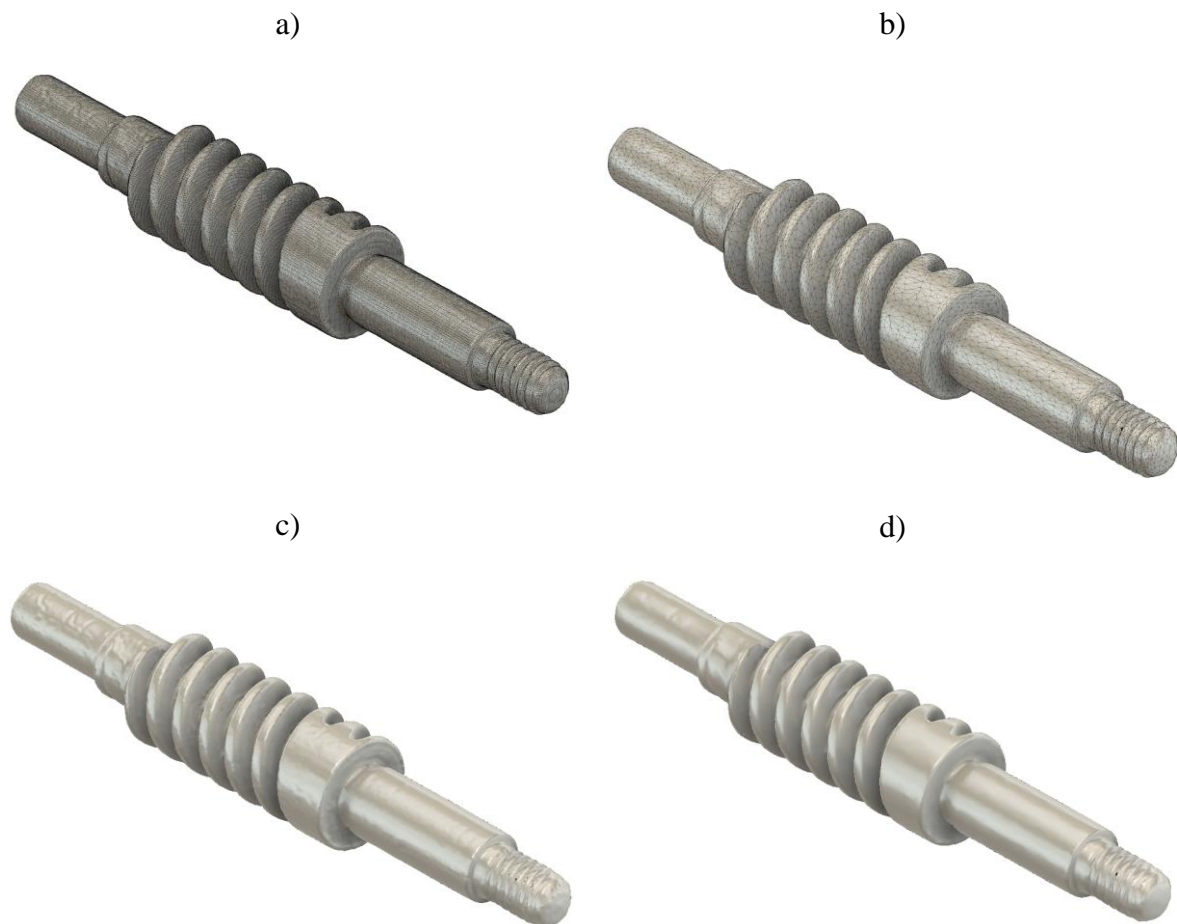
Slika 87. Različite razine detalja površine: a) Izvorni oblak točaka, b) najniža razina detalja, c) srednja razina detalja, d) najviša razina detalja



Slika 88. Pojava artefakata na višoj razini detalja (lijevo) i manjak artefakata na nižoj razini detalja (desno)

Rekonstruirana površina često je vrlo gusta i uniformna. Uniformna mreža mora biti gusta kako bi bila u mogućnosti opisati visoku razinu detalja, no zapis ravnih površina velikim brojem trokuta vrlo je neefikasan. Gustoj rekonstruiranoj mreži potrebno je adaptivno smanjiti broj faceta (trokuta). Način na koji će detalji garantirano ostati na specificiranoj vrijednosti je zadavanje maksimalnog odstupanja od originalne mreže. To se odstupanje u studiji slučaja pokazalo optimalno u intervalu od 0,01 do 0,1 mm, ovisno o veličini komponente i značajki.

Naizgled mala tolerancija može drastično smanjiti broj faceta mreže, bez značajnog gubitka detalja ili čak uz poboljšanje kvalitete prikaza [Slika 89, d)].



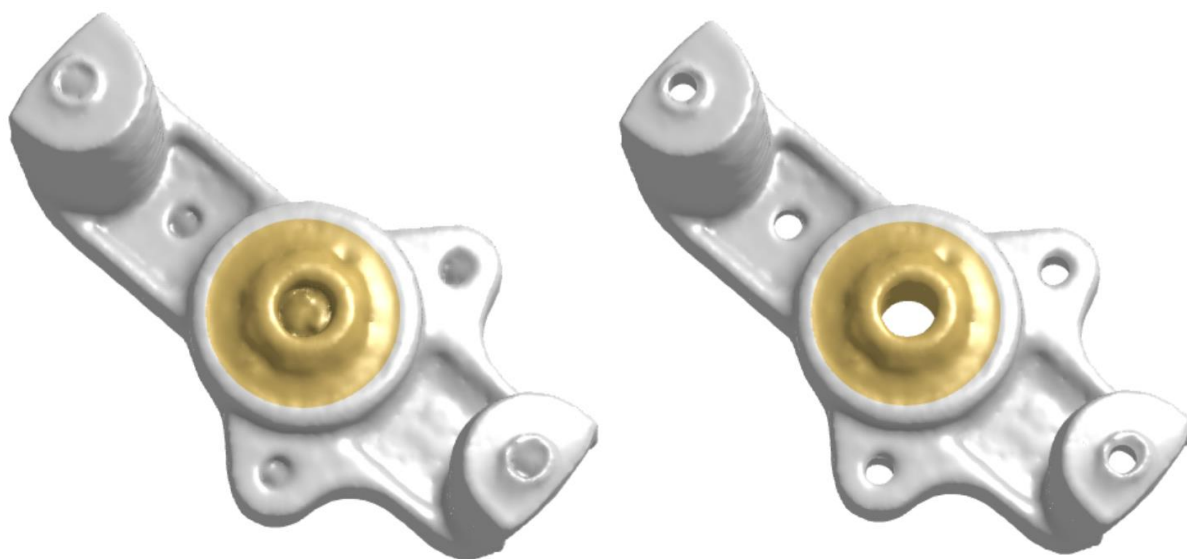
**Slika 89. a) Rekonstruirana mreža, b) Optimizirana mreža
c) Prikaz rekonstruirane mreže, d) Prikaz optimizirane mreže**

4.1.3.4. Dodavanje CAD značajki mrežama skeniranih objekata

Duboke konkavne značajke, poput dubljih rupa ili utora, teško se 3D skeniraju kako je to opisano u odjeljku 2.2. Kako bi se mrežni prikazi skeniranih komponenti koje sadrže takve značajke upotrijebili, moguće je na njih direktno dodati CAD značajke. Za to je moguće koristiti različite pristupe. Na primjer, programi kao Fusion 360 zahtijevaju izradu negativnih tijela te naknadne Boolean operacije između mreža. S druge strane, sustav OnShape pruža mogućnost direktnog izrezivanja CAD značajki iz mreže, odnosno kombinaciju klasičnih površina i mreža.



Slika 90. Negativni elementi u programu Fusion 360

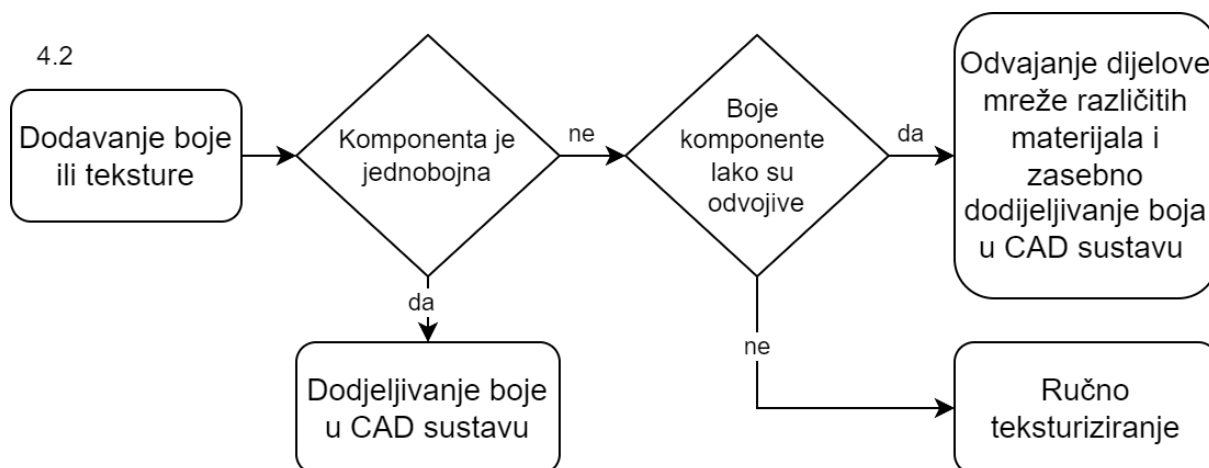


Slika 91. Naknadno modeliranje rupa u mreži dobivenoj 3D skeniranjem

Ovakvim dodanim načinom modeliranja je, uz definiranja rupa, moguće dodati i ravne ili cilindrične površine, kao i sitne izbočene ili udubljene oznake.

4.2. Dodavanje boje i/ili teksture

Boja, odnosno tekstura komponente doprinosi realističnom izgledu i definiranju materijala komponente. Studija slučaja pokazala je da je većinu komponenti potrebno pripremiti sprejom za skeniranje, što sakriva njihovu originalnu boju.

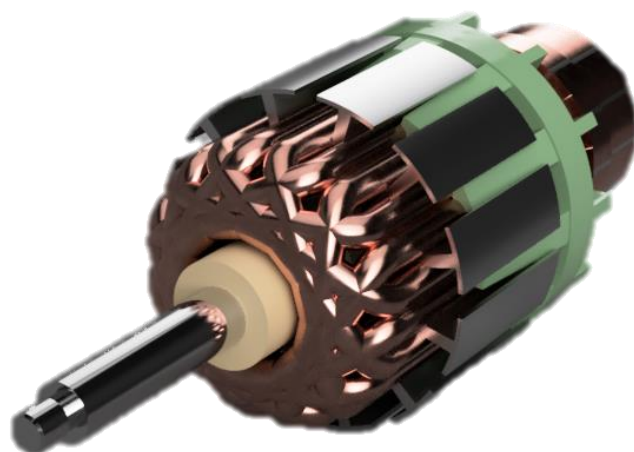


Slika 92. Dodavanje boje ili teksture mrežama

Prikazima jednobojnih, odnosno prikazima komponenata od jednog materijala moguće je dodijeliti materijal u CAD sustavu u kojem se izrađuje sklop virtualnog proizvoda [Slika 93]. Boju, odnosno teksturirani materijal moguće je primijeniti na mreže, kao i na CAD modele. CAD modele komponenti koje sadrže više materijala poželjno je modelirati kao više tijela, po tijelo za svaki odvojeni materijal [Slika 94]. Takvim modeliranjem olakšava se naknadna dodjela materijala.

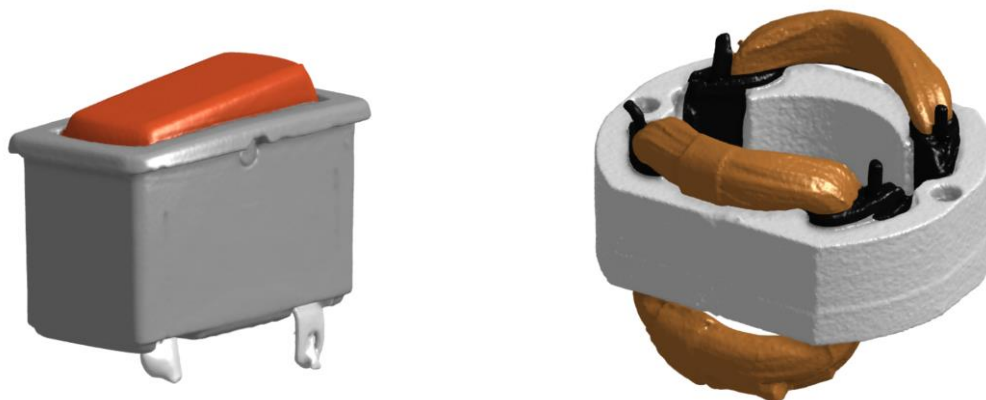


Slika 93. Jednobojna CAD modelirana (lijevo) i 3D skenirana komponenta (desno)



Slika 94. Komponenta modelirana kao više tijela zbog dodjele materijala

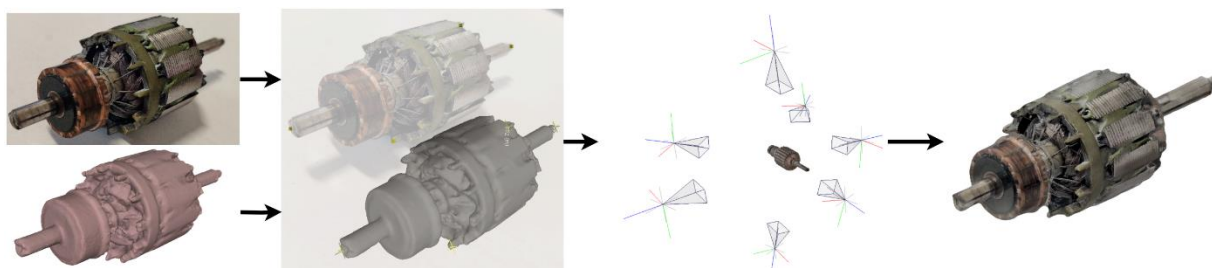
Prikaz teksture i/ili boje na višebojnim komponentama koje su skenirane moguće je ostvariti na dva načina: podjelom mreže i ručnim teksturiranjem. Boolean operacijama na mrežama opisanim u prethodnom odjeljku moguće je jednu rekonstruiranu mrežu podijeliti na više manjih. Na taj način moguće je svakoj mreži posebno dodijeliti materijal. Ovakav pristup moguć je kod komponenti na kojima je jednostavno razdijeliti mrežu [Slika 95].



Slika 95. Primjeri komponenti kod kojih je moguće jednostavno razdijeliti mrežu

Za kompleksne teksture i/ili komponente potrebno je koristiti pristup ručnog teksturiranja. Za teksturiranje je potrebno pripremiti skup fotografija koje pokrivaju cijelu vidljivu površinu komponente. Fotografije će se preklapati u teksturi objekta tako da je vrlo važno fotografirati komponentu u uvjetima jednolikog osvjetljenja. Program Meshlab omogućava teksturiranje mreža registracijom slika u prostoru. Registracija slike predstavlja kombinirani proces ručnog

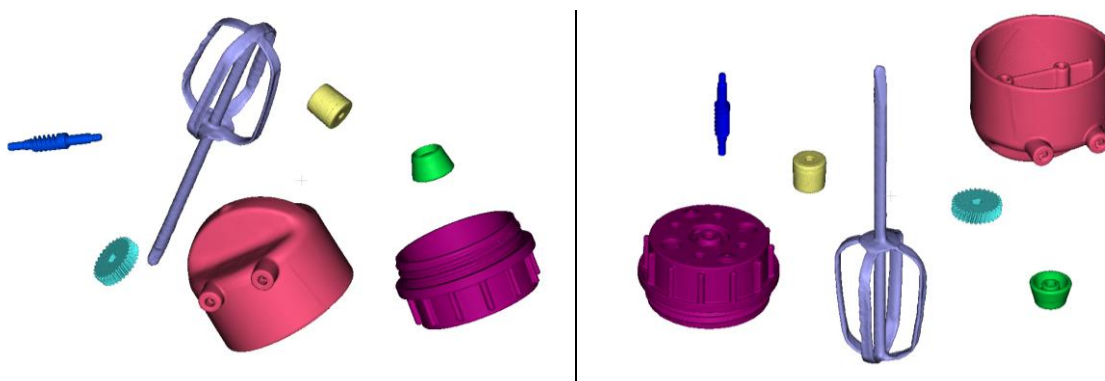
i automatiziranog nalaženja rubova slike i modela u svrhu nalaženja pozicije snimanja pojedine fotografije. Krajnja tekstura „šiva“ se od svih registriranih fotografija prema vidljivosti i kvaliteti slike. Kvaliteta slike na površini određena je kutom pod kojim je površina fotografirana (okomita slika predstavlja maksimalnu kvalitetu).



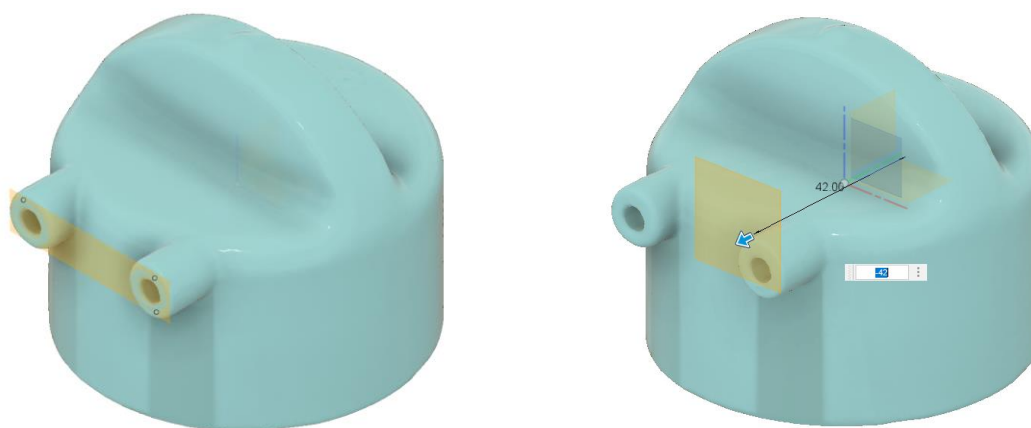
Slika 96. Teksturiranje mreže pomoću fotografija

4.3. Izrada sklopa

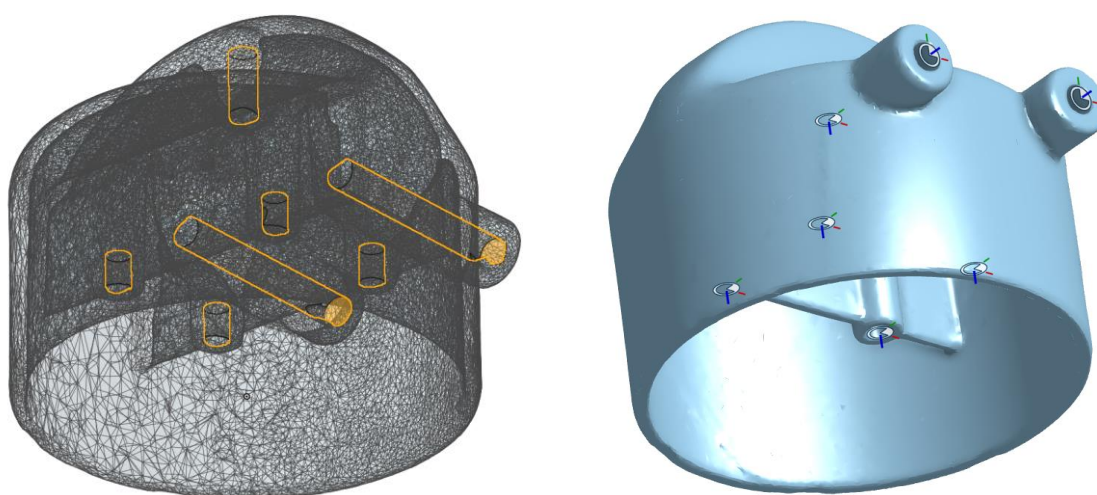
S obzirom da je konačni cilj predložene metodologije izrada prikaza za digitalno rastavljanje proizvoda, pojedinačno izrađene prikaze komponenti potrebno je sklopiti u smislenu cjelinu. Za potpuno realističnu digitalnu repliku proizvoda, uz same pozicije komponenti u sklopu potrebno je modelirati i dozvoljene stupnjeve slobode. Na taj način sklop opisuje realistično gibanje te pomaže u identifikaciji funkcija. CAD modeli sadrže značajke koje se mogu koristiti za definiranje veza, dok je na mrežnim prikazima potrebno dodatno modelirati konstrukcijsku geometriju. Kako bi se minimizirala potreba za definiranjem takve geometrije, potrebno je mrežu postaviti smisleno prema ishodištu komponente u CAD sustavu. Smisleno postavljanje podrazumijeva centriranje ishodišta prema središnjoj osi modela te poravnavanje jedne od dodirnih površina s jednom od ravnina ishodišta. Prije uvoženja mreža u CAD sustav potrebno ih je prethodno poravnati s koordinatnim osima odabirom tri točke na ravnoj plohi bez grešaka, ako takva postoji [Slika 97]. Dodatne konstrukcijske ravnine moguće je modelirati odabirom triju točaka te kao odmak od ravnina ishodišta. Uz uvjet prvobitnog preciznog poklapanja objekta s ishodištem, gdje je to moguće poželjno je koristiti drugu metodu, jer ona osigurava zadržavanje okomitosti i paralelnosti između komponenti. Korištenjem CAD sustava OnShape moguće je definirati značajku za definiranje veza (engl. *Mate connector*) na naknadno modeliranim CAD značajkama [Slika 99].



Slika 97. Poravnanje skeniranih komponenti u sklopu

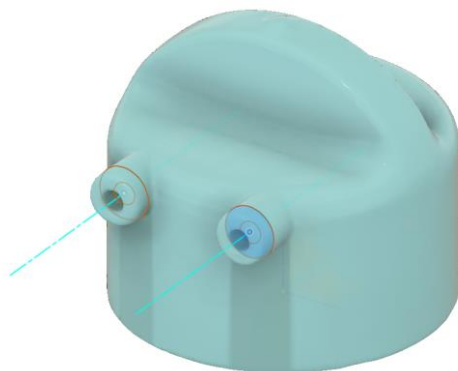


Slika 98. Definiranje plohe trijema točkama (lijevo) i odmakom od ishodišne ravnine (desno)



Slika 99. Modelirane CAD značajke (lijevo) i definirane značajke spoja (desno)

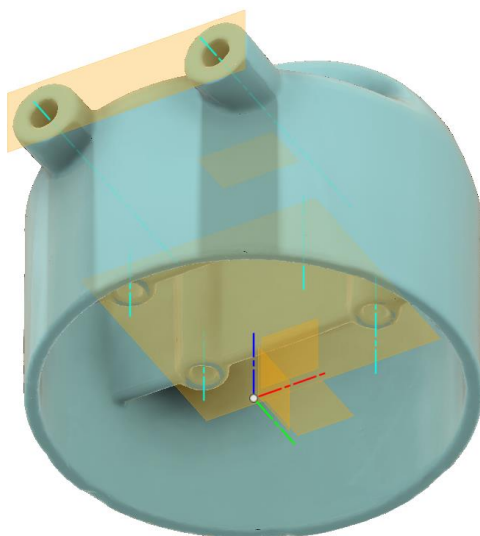
Definiranje rotacijskih osi osim poravnavanjem koordinatnog sustava moguće je definirati kroz dvije točke ili kao os okomitu na ravninu kroz točku. Točke potrebne za definiranje osi moguće je derivirati iz središta kružnice koja je pripasana kružnom presjeku mreže.



Slika 100. Definiranje osi kroz središnju točku presjeka okomito na ravninu presjeka

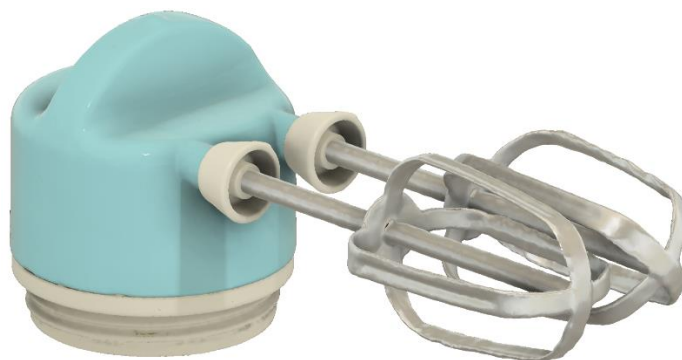


Slika 101. Definiranje osi kroz središnje točke dvaju presjeka

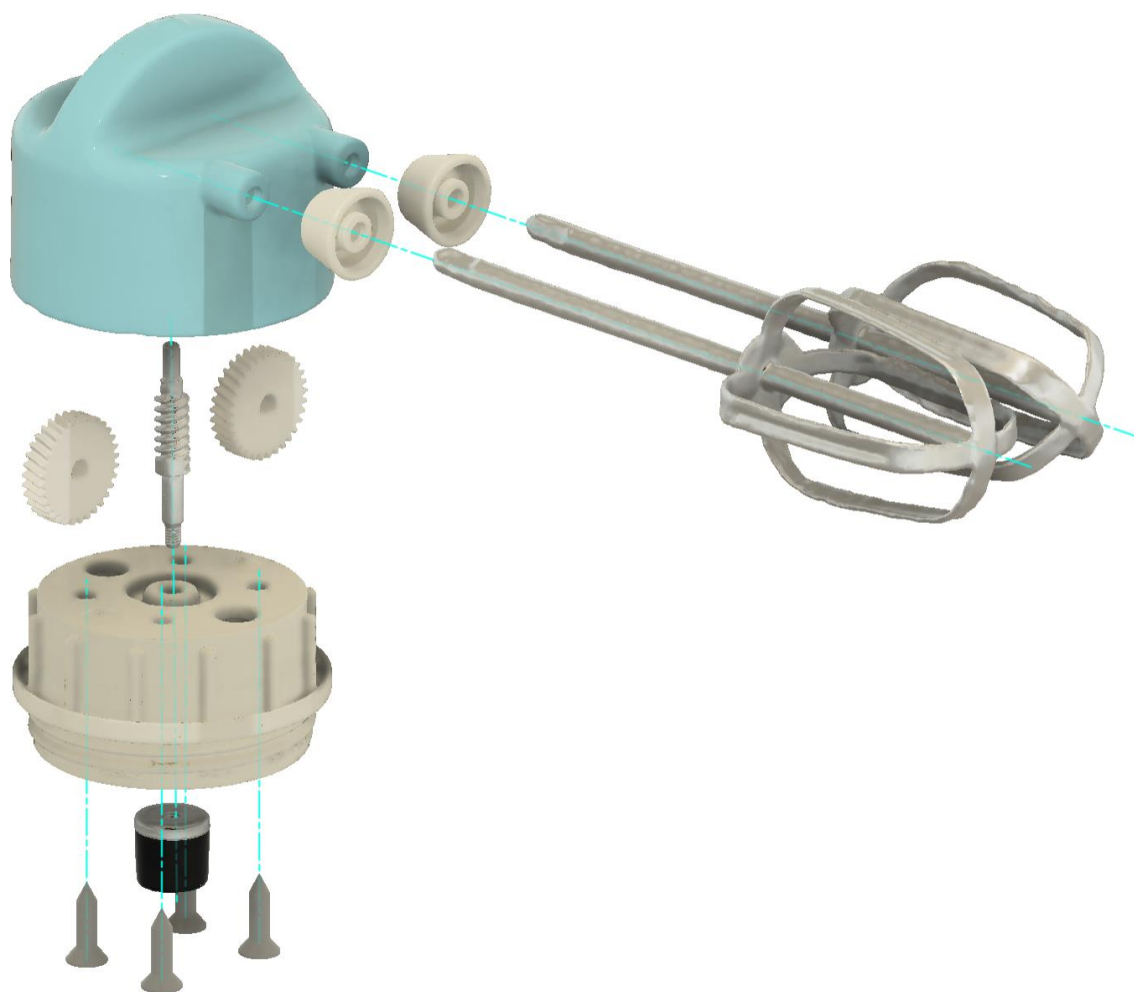


Slika 102. Potpuno definirana konstrukcijska geometrija na primjeru komponente kućišta

Nakon definiranja konstrukcijske geometrije pojedinih komponenti, postupak izrade sklopa analogan je sklapanju komponenti koje su modelirane u CAD sustavu.



Slika 103. Krajnji sklop pjenjače



Slika 104. Pogled na rastavljeni proizvod

5. VALIDACIJA METODOLOGIJE

Metodologija predložena u prethodnom poglavlju temelji se prvenstveno na saznanjima iz studije slučaja koje, zbog ograničenja same studije, nije moguće u potpunosti generalizirati. Na primjer, analiza vremena prikazana u odjeljcima 3.2.3 i 4.1.2 oslanja se na jedan set podataka koji se temelji na individualnoj razini sposobnostima modeliranja i skeniranja, a takvi bi se podaci mogli značajno razlikovati promjenom konteksta (tko izrađuje modele, koju opremu koristi, koje komponente reproducira i dr.). Stoga je predloženu metodologiju bilo potrebno dodatno ispitati i validirati provođenjem eksperimenta s različitim pripadnicima ciljane skupine, koji na raspolaganju imaju različitu opremu za izradu mrežnih i CAD modela komponenti. Također, eksperimentom se uz validaciju prvobitnih podataka pokušalo utvrditi i je li moguće efikasno koristiti 3D skenere uz minimalno vođenje, kako se većina ciljane skupine korisnika metodologije nije ranije susrela s 3D skenerima. Pintilie i Stuerzlinger pokazali su kako proces skeniranja nije težak iz korisničke perspektive, kada se koriste softveri sa intuitivnim korisničkim sučeljem [25], kakva su ona pratećih softvera korištenih skenera.

5.1. Opis eksperimentalne procedure

Kako bi se prikupili podaci vezani uz vremena i kvalitetu izrade računalnih modela komponenti, provedena je dodatna eksperimentalna studija na većem uzorku različitih korisnika i komponenti. U okviru eksperimenta je deset predstavnika ciljane skupine (sedam studenata i troje asistenata) skeniralo i modeliralo deset izabranih komponenti.

Eksperiment je održan u prostorima Laboratorija za konstruiranje uz eksperimentalni postav prikazan na slici [Slika 105]. Prikazani su korišteni uređaji Tupel i POP 2, a svakom od njih prema dimenzijama odgovara polovica komponenti. Same komponente također su grupirane na crnoj podlozi koja se koristi za sprečavanje zapisa točaka radne površine. Dodatak POP 2 skeneru je okretni stolić na kojem je postavljena pokazna komponenta za skeniranje. Uz Tupel 3D skener postavljena su dva korištena dodatka za osiguravanje komponenti na motoriziranu bazu, ljepljiva podloga i kvačica. Za obradu podataka osigurana je radna stanica dostatnih performansi za tražene zadatke te je na računalu vidljiv prateći softver POP 2 skenera. Pisane upute sa hodogramima i sažetim napomenama postavljene su da sudionicima budu lako dostupne za korištenje tijekom izrade prikaza. Kako su u eksperimentu sudjelovali ljudski

subjekti, ishodena je dozvola Etičkog povjerenstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Sudionici su se tijekom eksperimenta zadržali oko tri sata uz varijacije, a to vrijeme je uključivalo objašnjenje cilja, prezentiranje tehnologije i uputa kroz pokazne primjere te izradu skeniranih i CAD modela.



Slika 105. Eksperimentalni postav

Svaki sudionik eksperimenta morao je skenirati dvije komponente te zatim te iste dvije komponente modelirati. Rezultirajući broj izrađenih modela dao je mogućnost promatranja dva para modeliranih, kao i skeniranih modela, uz pripadajuća vremena i ocjene kvalitete reprodukcije stvarnih komponenti. Komponente su izabrane tako da predstavljaju različite razine kompleksnosti komponenata koje se mogu pojaviti uređaja.

Zbog varirajuće kompleksnosti korištenih komponenti, za svakog od deset sudionika pripremljeni su parovi komponenti koji su prema originalnom zabilježenom vremenu pokazivali najmanju razliku vremena skeniranja, modeliranja te ukupnog vremena. Svakom sudioniku individualno je predstavljen kratki uvod u proces skeniranja, a zatim je 3D skeniran

pokazni primjer biste te obrada dobivenog oblaka točaka unutar pratećeg softvera [Slika 109], kao i u zasebnom softveru (CloudCompare) koji ima više mogućnosti [Slika 110].

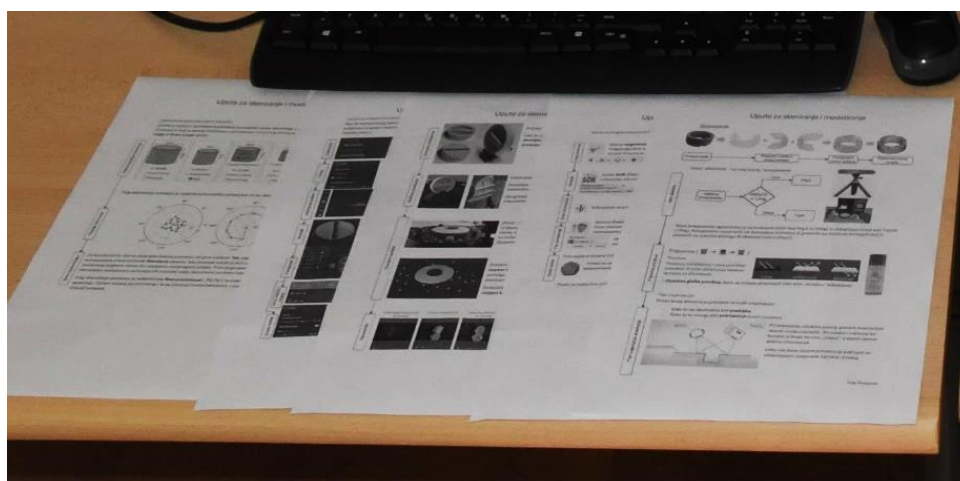


Slika 106. Komponente manjih dimenzija skeniranje na Tupelu



Slika 107. Komponente većih dimenzija skeniranje na POP-u 2

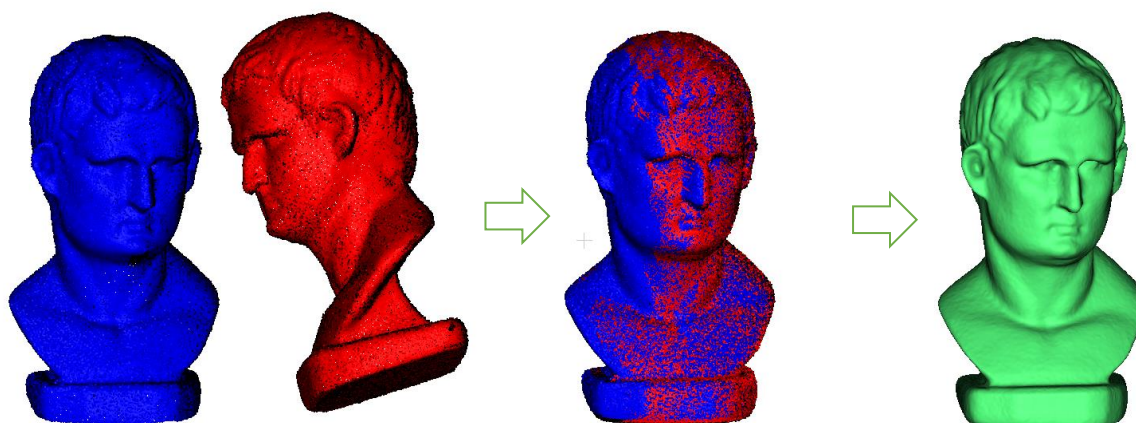
Proces samog skeniranja na Tupel skeneru pokazan je na priručnoj maloj komponenti, a koja nije bila ta koju sudionik treba skenirati. Uz pokazne primjere pripremljene su i pojednostavljene pisane upute kao neka vrsta priručnika na koji su se sudionici mogli referirati tijekom skeniranja [Slika 108].



Slika 108. Pisane upute za 3D skeniranje i obradu podataka



Slika 109. Skeniranje pokaznog objekta



Slika 110. Procesiranje prolaza skeniranja pokaznog primjera u zasebnom softveru

Svaki sudionik je nakon pokaznih primjera skenirao po jedan slučajno odabrani par komponenti koristeći svaki skener za komponentu odgovarajuće dimenzije te je zatim te iste dvije komponente modelirao u preferiranom CAD sustavu. Ponuda CAD alata je uključivala standardne alate s kojima se studenti mogu susresti tijekom studiranja, poput SolidWorksa, Autodesk Fusiona, Onshapea, CATIA-e, PTC Creoa, itd.

Za modeliranje dane su upute da se pokuša reproducirati razina detalja koja je ostvarena 3D skeniranjem, kako bi komponente bile odgovarajuće razine detalja, a vremena izrade usporediva. Modeliranjem komponenti na istu vidljivu razinu detalja uz samo vrijeme pripreme moguće je usporediti i kvalitetu modela uzimajući u obzir razliku korištene metode izrade.

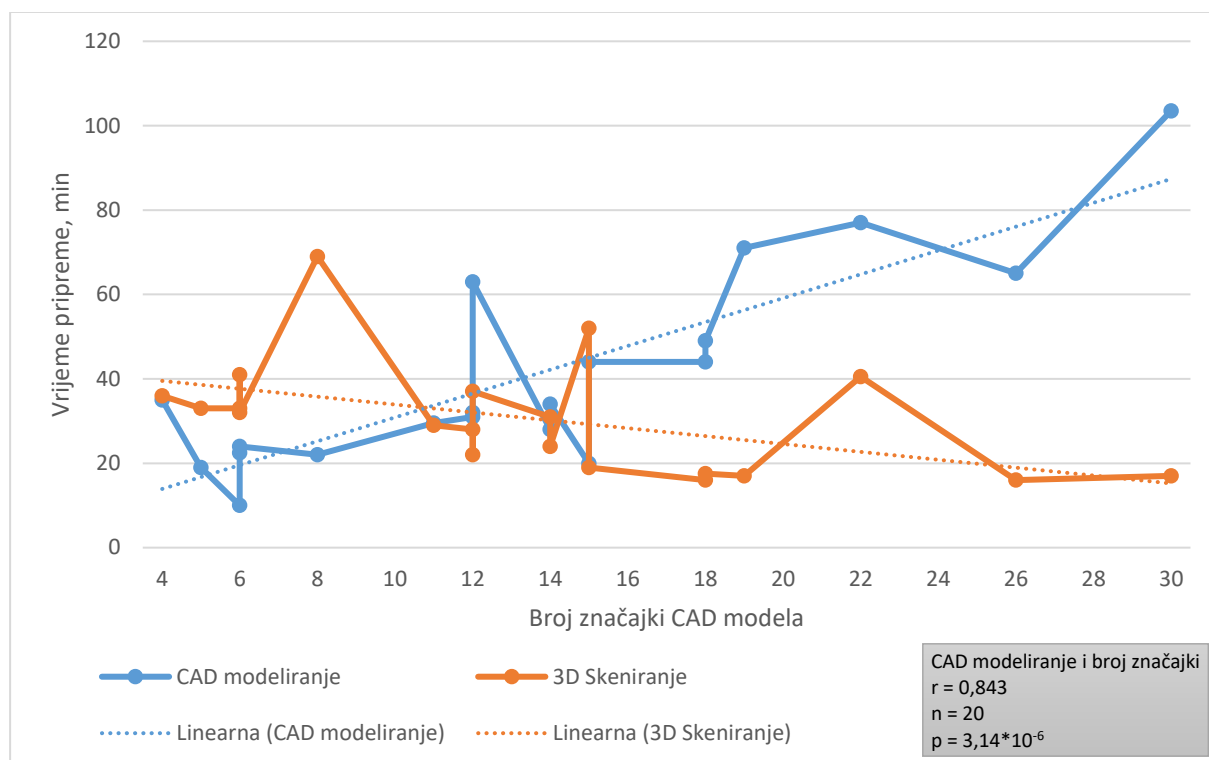
Vremena su bilježena samo za akviziciju i obradu podataka, dok je vrijeme potrebno za pripremu komponente sprejom za skeniranje izostavljeno. Većina sudionika koristila je alat SolidWorks za CAD modeliranje (uz jednog sudionika koji je modelirao u Onshape-u), a za mjerenje osigurani su tradicionalno analogno i digitalno pomično mjerilo.

5.2. Kvantitativna usporedba rezultata

Prikupljeni podaci o vremenima (trajanju) skeniranja i modeliranja svih komponenti prikazani su u donjoj tablici. Uz manja odstupanja vremena od početnih, jasno je vidljiv trend uštede vremena skeniranjem većih komponenata. Prema vremenima skeniranja koja generalno nisu puno viša od onih zabilježenih tijekom studije slučaja (od strane korisnika koji je upoznat sa tehnologijom), moguće je zaključiti kako su sudionici u eksperimentu bili u mogućnosti proizvesti prikaze u očekivanom vremenu uz minimalnu pomoć nakon početnog upoznavanja s metodologijom.

Tablica 5. Podaci o vremenima skeniranja i modeliranja prikupljeni tijekom eksperimenta

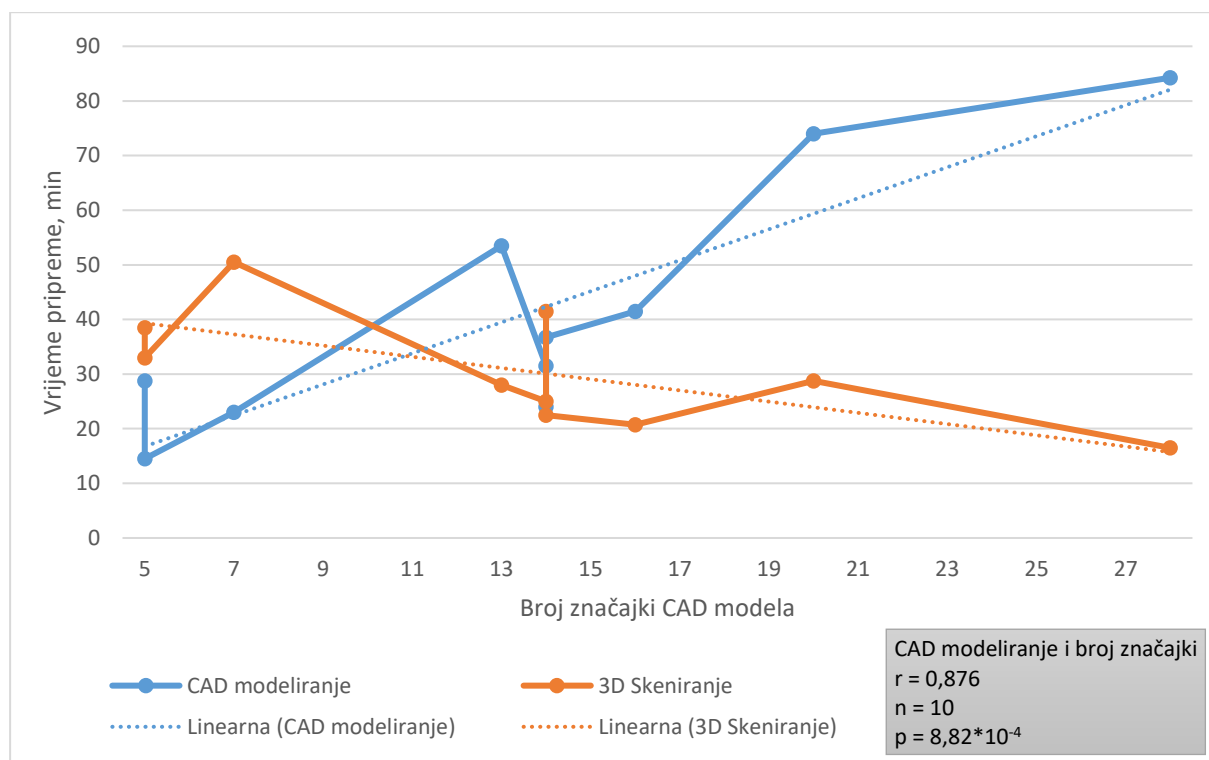
Ime komponente	Vrijeme potrebno sudionicima eksperimenta u minutama				Prosječna vremena u minutama		Razlika vremena skeniranja i modeliranja
	Sken	CAD (brojevi značajki)	Sken	CAD (brojevi značajki)	Sken	CAD (prosječni brojevi značajki)	
Pužno kolo	41	22,5 (6)	36	35 (4)	38,5	28,8 (5)	25 %
Pužnik	32	24 (6)	69	22 (8)	50,5	23,0 (7)	54 %
Potpora rotora	52	20 (15)	31	28 (14)	41,5	24,0 (14,5)	42 %
Prekidač	22	32 (12)	28	31 (16)	25,0	31,5 (14)	-26 %
Graničnik	33	19 (5)	33	10 (6)	33,0	14,5 (5,5)	56 %
Stator	29	29,5 (11)	16	44 (18)	22,5	36,8 (14,5)	-63 %
Donje kućište baze	37	63 (12)	19	44 (15)	28,0	53,5 (13,5)	-91 %
Gornje kućište pjenjače	17,5	49 (18)	24	34 (14)	20,8	41,5 (16)	-100 %
Gornje kućište baze	40,5	77 (22)	17	71 (19)	28,8	74,0 (20,5)	-157 %
Gornji sklop ležaja	16	65 (26)	17	103,5 (30)	16,5	84,3 (28)	-411 %



Slika 111. Vrijeme izrade prikaza u ovisnosti o broju značajki CAD modela (sudionici eksperimenta)

Prikazana je usporedba vremena CAD modeliranja i 3D skeniranja istih komponenti u ovisnosti broja značajki koje su sudionicima eksperimenta bili potrebni za izradu CAD modela. Razlog ove usporedbe je analiza potrebnog vremena za izradu modela, u svrhu odabira efikasnije metode, gdje se kao pokazatelj kompleksnosti koristi broj značajki. Kompleksnost CAD modela moguće je mjeriti mnoštvom metoda, među kojima su metrike bazirane na grafovima (npr. ciklomatska kompleksnost) te one bazirane na geometriji (točke, plohe, rubovi), čak i na temelju količine memorije koja je potrebna za spremanje samog modela [26]. Kao mjera kompleksnosti modela u ovoj analizi uzet je broj značajki, kako se on može na temelju iskustva bolje procijeniti nego druge metrike geometrije prije samog modeliranja. Provedene studije kompleksnosti CAD modela također povezuju manji broj značajki sa njihovom vremenski efikasnom izradom [27], [28]. Broj značajki, kao što se to može iščitati iz danih podataka, ovisi za istu komponentu o razini modeliranih detalja, kao i pristupu modeliranja pojedinog sudionika. Unatoč tome koristeći Pearson-ov korelacijski koeficijent uočena je snažna korelacija između vremena modeliranja i broja potrebnih značajki. Na dvadeset mjerenja vremena modeliranja sudionika eksperimenta, korelacijski koeficijent r iznosi 0.842, uz koeficijent statističkog značaja $p =$

$3.14 \cdot 10^{-6}$. Zbog lakše vizualizacije, podaci su uprosječeni za svaku komponentu [Slika 112]. Uz ovaj uzorak od 10 prosječnih vrijednosti korelacija iznosi $r = 0.876$ uz nešto niži statistički značaj, $p = 8,82 \cdot 10^{-4}$. Statistički značaj svake od prikazanih korelacija je puno veći od uobičajene (stroge) granice koja glasi $p < 10^{-3}$.



Slika 112. Vrijeme izrade prikaza u ovisnosti o broju značajki CAD modela (prosječna vremena)

Intuitivno je da se vrijeme modeliranja povećava sa višim brojem značajki, a visoka korelacija to i potvrđuje. Iako način modeliranja i kompleksnost pojedinih značajki zasigurno utječu na ukupno vrijeme modeliranja, ova analiza pokazuje kako se broj značajki može koristiti za procjenu potrebnog vremena modeliranja. Na primjeru srednje kompleksnosti tako je pokazano da je optimalni pristup modeliranju komponenti s jednoznačnim brojem značajki. Vrijeme potrebno za skeniranje u provedenom eksperimentu čak i pada sa kompleksnijim komponentama.

Jedan mogući razlog za takva mjerenja je postojanje više prepoznatljivih značajki koje je moguće iskoristiti za točno i jednostavno poklapanje oblaka točaka. Drugi potencijalni razlog koji se odnosi na viša vremena skeniranja kod jednostavnih komponenti proizlazi iz prirode

korištenih uređaja. Pri korištenju POP 2 skenera korišten je prateći softver sa visokom razinom automatizacije koji je pogodan za ciljanu skupinu ljudi koja se prije nije susrela sa 3D skeniranjem. Svaki korak je prikazan po redu kao kartica unutar korisničkog sučelja te su svi koraci uključujući poklapanje automatizirani. Pri korištenju Tupel 3D skenera sudionici su bili upućeni na direktno korištenje zasebnog softvera, dok su kod POP-a 2 morali isti koristiti samo ako pratećim automatiziranim softverom poklapanje oblaka točaka nije bilo moguće.

Sama granica efikasnosti metode skeniranja umjesto modeliranja dakako ovisi i o vještini modeliranja, odnosno skeniranja svakog korisnika. Tijekom provođenja eksperimenta pojedini sudionici izjavili su ukoliko bi se sreli s izborom jednako vrijeme potrošiti skenirajući kao modelirajući da bi izabrali skeniranje kao manje zamoran proces. Jednako vrijeme skeniranja i modeliranja prikazano u ovoj analizi nije posve usporedivo. Ovisno o položaju komponente u sklopu i broju funkcijskih sučelja ili sučelja položaja, dodatno vrijeme potrebno za definiranje zasebne konstrukcijske geometrije moglo bi nadvladati malu uštedu u vremenu preliminarne izrade. Analogno, potrebom za kompleksnom obradom modela u procesu primjene boje također može dodati znatno vrijeme ukupnom procesu.

5.3. Kvalitativna usporedba rezultata

Uz objektivno mjerljivo vrijeme potrebno za izradu modela, vrlo je bitna i percipirana kvaliteta krajnjih modela. Naime, model koji je napravljen vrlo brzo, nije zadovoljavajući ako nije na zahtijevanoj razini kvalitete, odnosno ako nije u mogućnosti prenijeti informacije o funkcijama, što je glavni cilj predložene metodologije. Svrha kvalitativne analize prikazane u ovom odjeljku je direktna usporedba modela nastalih pristupima 3D skeniranja i CAD modeliranja.

Kao što je to navedeno u opisu eksperimentalne procedure, u eksperimentu je sudjelovalo deset studenata i nastavnika te je korišteno deset različitih komponenti istog proizvoda. Svakoj osobi nasumično su dodijeljene dvije komponente, odnosno svaka komponenta bila je dodijeljena dvjema različitim osobama. Svaka osoba je nakon uvodnih primjera 3D skeniranja skenirala obje komponente, a zatim ih je modelirala u preferiranom CAD alatu. Takvom su procedurom proizvedena ukupno četiri prikaza za svaku komponentu – dva skenirana mrežna modela i dva CAD modela, koje su izradile dvije osobe.

Predmetni nastavnici iz kolegija Razvoj proizvoda i Teorija konstruiranja Katedre za konstruiranje i razvoj proizvoda Fakulteta strojarstva i brodogradnje, zajednički su, kroz

diskusiju ocijenili svaki model na temelju četiri kriterija ocjenama od 1 (najniža ocjena) do 5 (najviša ocjena). Kriteriji su mogućnost prepoznavanja podfunkcija, točnost reprodukcije detalja, sličnost teksture te sličnost proporcija. Ocjena reprodukcije detalja temelji se na mogućnosti tehnologije i sudionika da vjerno zabilježe bitne značajke prisutne u fizičkom objektu. Ocjenom sličnosti teksture razmatra se reprodukcija boje te fizičkih uzoraka na površini, dok se pregledom proporcija ocjenjuje vjernost odnosa dimenzija značajki fizičkom modelu. Ocjena mogućnosti prepoznavanja podfunkcija procjena je nastavnika kvalitete ispunjavanja glavnog cilja izrađenih prikaza.

Ocjene su dodjeljivane tijekom usporednog ocjenjivanja svih modela iste komponente, komponentu po komponentu, kako bi se za svaku komparativno utvrdio najbolji prikaz. Predmetni nastavnici su svaki model mogli zasebno rotirati, kao što je to uobičajeno u standardnim CAD alatima. Redosljed komponenti, kao i prikaza svake komponente određen je nasumično. Anketa je provedena u Microsoft Wordu posebnim 3D objektima, kako bi se omogućio pregled, odnosno manipulacija četiri komponente na istoj stranici. Nedostaci ovakvog provođenja ankete pokazali su se kroz nisku percipiranu kvalitetu reprodukcije tekstura. Njih nije moguće dodijeliti kao u CAD sustavu, nego je moguće samo postavljanje boja.

Podaci o ocjenama su međusobno vrlo zavisni, zbog čega nije moguće koristiti jednostavne postupke inferencijalne statistike za usporedbu ocjena CAD i mrežnih modela. Takva bi analiza zanemarila velik broj ovisnosti između varijabli, a ocjenjivani uzorak modela nije dovoljno velik za korištenje adekvatnih statističkih postupaka koji bi opisane ovisnosti uzele u obzir. Stoga je prikazana analiza podataka koristeći postupke deskriptivne statistike, kako bi se što bolje opisale karakteristike izrađenih modela i percepcija njihove kvalitete od strane predmetnih nastavnika.


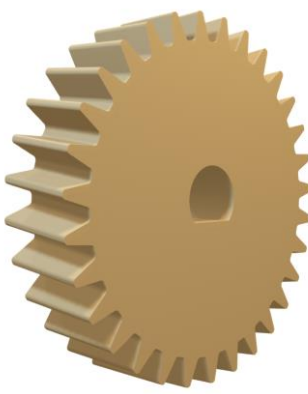

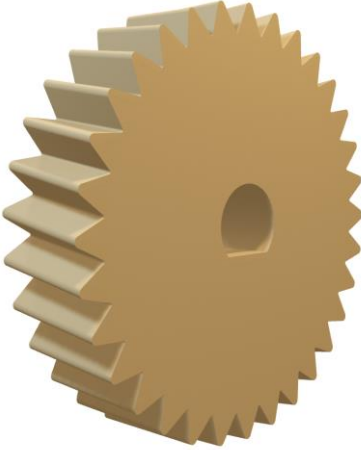
5.3.1. Pregled modela i dodijeljenih ocjena

U nastavku su redom izloženi prikazi izrađenih računalni modela komponenata s pripadajućim ocjenama i obrazloženjima.

Kako je komponenta pužnog kola relativno jednostavna, funkcije je moguće prepoznati iz svih modela, s iznimkom središnjeg provrta jedne skenirane komponente, gdje središnji provrt nije u potpunosti skeniran. Više ocjene prikaza tekstura dane su modeliranim komponentama, zbog

glatke površine stvarne komponente. Naime, uobičajene greške u skeniranju proizvode teksturu koja je na pravom objektu nepostojeća.


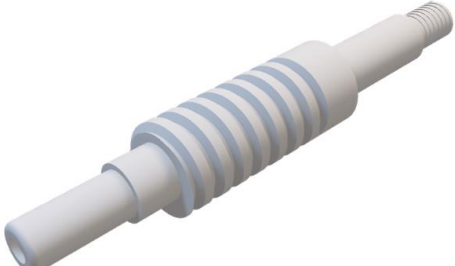


Tablica 6. Prikazi komponente pužnog kola i pripadajuće ocjene

Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem		Prikaz izrađen CAD modeliranjem	
1	<p style="text-align: center;">A</p> 		<p style="text-align: center;">C</p> 	
4	<p style="text-align: center;">B</p> 		<p style="text-align: center;">D</p> 	
Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	A: 5 B: 4 C: 5 D: 5	Točnost detalja (reprodukcija značajki) A: 4 B: 3 C: 5 D: 4	Sličnost površina i tekstura A: 4 B: 4 C: 5 D: 5	Sličnost proporcija značajki A: 5 B: 4 C: 4 D: 4

Opisani nedostaci teksture skeniranih komponenti prisutni su i kod mrežnih modela pužnika. Kako bi se uklonila ta tekstura moguće je oprezno koristiti filtere koji zaobljuju mrežne prikaze,

kao i dodijeliti metalnu teksturu unutar CAD softvera. Prikazima su zbog načina provođenja ankete samo dodijeljene boje.





Tablica 7. Prikazi komponente pužnika i pripadajuće ocjene

Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem	Prikaz izrađen CAD modeliranjem		
7	A 	C 		
10	B 	D 		
Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	A: 5 B: 5 C: 5 D: 4	Točnost detalja (reprodukcija značajki) A: 4 B: 4 C: 3 D: 4	Sličnost površina i tekstura A: 3 B: 3 C: 4 D: 4	Sličnost proporcija značajki A: 5 B: 5 C: 5 D: 5

Iako komponenta poklopca izgleda jednostavna za CAD modeliranje, sve površine su blago zakrivljene zbog tehnologije proizvodnje komponente što komplicira postupak izrade modela. Iz ocjena je vidljivo kako su ti nedostaci prepoznati kao greške u proporcijama i reprodukciji značajki, gdje su skenirani modeli postigli bolje ocjene. To u konačnici utječe i na ocjene mogućnosti prepoznavanja funkcija, odnosno podfunkcija. Razlika ocjena u sličnosti površina i tekstura između skeniranih i modeliranih komponenti proizlazi iz toga što fizička komponenta

ima istrošenu okruglu površinu (uslijed korištenja uređaja), što nije bilo moguće ili jednostavno reproducirati postupcima CAD modeliranja.





Tablica 8. Prikazi komponente poklopca i pripadajuće ocjene

Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem		Prikaz izrađen CAD modeliranjem				
2	<p style="text-align: center;">A</p> 		<p style="text-align: center;">C</p> 				
5	<p style="text-align: center;">B</p> 		<p style="text-align: center;">D</p> 				
Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	A: 4 B: 4 C: 3 D: 3	Točnost detalja (reprodukcija značajki)	A: 4 B: 4 C: 3 D: 3	Sličnost površina i tekstura	A: 4 B: 5 C: 3 D: 3	Sličnost proporcija značajki	A: 5 B: 5 C: 4 D: 4

Nalik prošloj komponenti, prekidač na prvi pogled izgleda jednostavan za modeliranje. Sam prekidač i dio kućišta koji je predviđen da bude viđen od strane korisnika su zakrivljeni u više ravnina. Zbog pomicanja prekidača i manjka čvrste reference ispitanici nisu uspjeli reproducirati geometriju modeliranjem kao što je to moguće skeniranjem, što je rezultiralo lošijim ocjenama prikaza detalja i sličnosti proporcija značajki. Uz navedeno, procijenjeno je


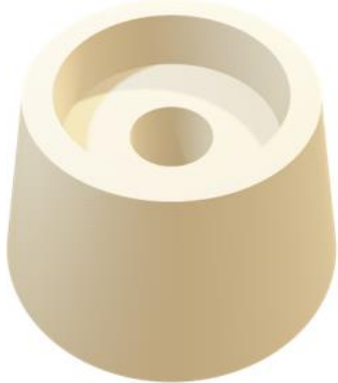

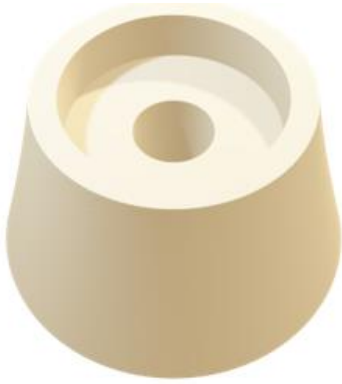
kako greške u CAD modelima rezultiraju slabijom mogućnosti shvaćanja funkcija komponente prekidača.

Tablica 9. Prikazi komponente prekidača i pripadajuće ocjene

Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem		Prikaz izrađen CAD modeliranjem				
3	<p style="text-align: center;">A</p> 		<p style="text-align: center;">C</p> 				
6	<p style="text-align: center;">B</p> 		<p style="text-align: center;">D</p> 				
Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	A: 5 B: 5 C: 3 D: 3	Točnost detalja (reprodukcija značajki)	A: 5 B: 4 C: 3 D: 3	Sličnost površina i tekstura	A: 4 B: 4 C: 4 D: 4	Sličnost proporcija značajki	A: 5 B: 5 C: 3 D: 3





Modelirane komponente graničnika ne prikazuju geometriju vjerno sa svim postojećim zaobljenjima, koja su vidljiva na prikazu dobivenom tehnologijom skeniranja. Nedostaci skeniranih prikaza javljaju se ponajprije u obliku grešaka prilikom procesa izrade zbog materijala i veličine same komponente.

Tablica 10. Prikazi komponente graničnika i pripadajuće ocjene

Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem		Prikaz izrađen CAD modeliranjem				
8	<p style="text-align: center;">A</p> 		<p style="text-align: center;">C</p> 				
9	<p style="text-align: center;">B</p> 		<p style="text-align: center;">D</p> 				
Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	A: 5 B: 5 C: 4 D: 4	Točnost detalja (reprodukcija značajki)	A: 5 B: 5 C: 4 D: 4	Sličnost površina i tekstura	A: 3 B: 3 C: 4 D: 4	Sličnost proporcija značajki	A: 5 B: 5 C: 5 D: 5

Zbog kompleksnog razdvajanja dijelova komponente izrađenih od različitih materijala i dodjeljivanja boja tim dijelovima, prepoznavanje glavne funkcije i podfunkcija je vrlo otežano. Uz to, modelirane komponente još teže prenose informacije o podfunkcijama, zbog nemogućnosti reprodukcije organske geometrije kao što su namotaji statora. Dodjeljivanjem realistične teksture na vjerniju skeniranu geometriju rezultira prikazom kojeg je lako prepoznati i uočiti pojedine funkcije [Slika 113]. Izrada ovakvih prikaza uz izradu prvobitne geometrije zahtjeva dodatna znanja fotografiranja i registracije fotografija u teksturu.

Tablica 11. Prikazi komponente statora i pripadajuće ocjene




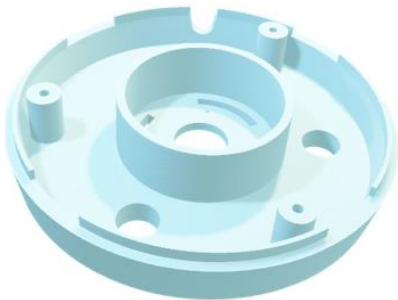
Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem	Prikaz izrađen CAD modeliranjem		
4	<p>A</p> 	<p>C</p> 		
10	<p>B</p> 	<p>D</p> 		
Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	A: 2 B: 2 C: 1 D: 1	Točnost detalja (reprodukcija značajki) A: 3 B: 3 C: 1 D: 1	Sličnost površina i tekstura A: 3 B: 3 C: 2 D: 2	Sličnost proporcija značajki A: 5 B: 5 C: 3 D: 3



Slika 113. Poboljšanje shvaćanja funkcija i prikaza značajki komponente teksturom





3D skenirane komponente kućišta baze ne prikazuju vjerno provrte zbog poteškoća u skeniranju dubokih konkavnih značajki, kao što je to opisano ranije. Dodatnim greškama i anomalijama zbog poklapanja oblaka točaka prilikom izrade modela prikazana je nepostojeća tekstura. Značajno poboljšanje u kvaliteti prikaza funkcija i reprodukcije značajki dobilo bi se dodatnim CAD modeliranjem rupa i ostalih konkavnih značajki koje nisu prikazane (hibridni pristup izrade modela opisan u studiji slučaja).

Tablica 12. Prikazi komponente donjeg kućišta baze i pripadajuće ocjene

Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem		Prikaz izrađen CAD modeliranjem				
1	<p style="text-align: center;">A</p> 		<p style="text-align: center;">C</p> 				
7	<p style="text-align: center;">B</p> 		<p style="text-align: center;">D</p> 				
Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	A: 3 B: 3 C: 4 D: 5	Točnost detalja (reprodukcija značajki)	A: 3 B: 2 C: 4 D: 5	Sličnost površina i tekstura	A: 5 B: 3 C: 5 D: 5	Sličnost proporcija značajki	A: 5 B: 4 C: 5 D: 5

Analizom savršeno glatke komponente gornjeg kućišta pjenjače još je jednom vidljiva gruba tekstura koja proizlazi iz grešaka u postupku 3D skeniranja. Poboljšanje modela moguće je dobiti modeliranjem provrta za metlice i dodjeljivanjem glatke teksture mreži u CAD sustavu [Slika 114.]. Iako teksture nisu idealne, proporcije geometrije puno je lakše zabilježiti skeniranjem, što je vidljivo u značajnoj razlici u ocjenama prema kriteriju sličnosti proporcija značajki, ali i na samim prikazima gdje su greške u dimenzijama pojedinih značajki modeliranih komponenti vrlo očite.

Tablica 13. Prikazi komponente gornjeg kućišta pjenjače i pripadajuće ocjene

Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem		Prikaz izrađen CAD modeliranjem	
5	A 		C 	
	B 		D 	
	Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	Točnost detalja (reprodukcija značajki)	Sličnost površina i tekstura	Sličnost proporcija značajki
	A: 2 B: 2 C: 3 D: 2	A: 2 B: 2 C: 3 D: 2	A: 3 B: 3 C: 4 D: 4	A: 4 B: 4 C: 3 D: 2





Slika 114. Komponenta s dodatnim modeliranim značkama i dodijeljenom teksturom u CAD sustavu

Skenirani prikazi gornjeg kućišta baze sadrže već opisane greške grube površine i zatvorenih rupa. Na modeliranim komponentama primijećena je problematična značajka navoja. CAD model D uopće ne sadrži značajku navoja, dok je na CAD modelu C isti nije modeliran vjerno stvarnom.





Tablica 14. Prikazi komponente gornjeg kućišta baze i pripadajuće ocjene

Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem	Prikaz izrađen CAD modeliranjem
3	<p>A</p>	<p>C</p>

9	B		D				
							
Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	A: 3 B: 4 C: 3 D: 2	Točnost detalja (reprodukcija značajki)	A: 3 B: 4 C: 3 D: 2	Sličnost površina i tekstura	A: 3 B: 3 C: 5 D: 4	Sličnost proporcija značajki	A: 4 B: 5 C: 4 D: 5

Kao i druge veće komponente skenirane skenerom POP 2, mrežni model gornjeg sklopa ležaja ne prikazuje vjerno teksturu površine te su provrti zatvoreni. Ipak, proporcije lijevane komponente puno se brže i točnije skeniraju nego modeliraju. Još jednom bi optimalni model bio rezultat tzv. hibridnog pristupa, gdje bi skenirani model bio nadograđen odgovarajućim CAD značajkama uz optimizaciju mreže i dodjelu realne teksture [Slika 91]. No, važno je naglasiti da modeliranje, za razliku od skeniranja, može prikazati unutarnju geometriju samopodesivog ležajnog mjesta, što može biti ključno za identifikaciju funkcija svih komponenti u podsklopu [Slika 115].

Tablica 15. Prikazi komponente gornjeg sklopa ležaja i pripadajuće ocjene

Sudionik	Prikaz dobiven 3D skeniranjem	Prikaz izrađen CAD modeliranjem					
5	<p style="text-align: center;">A</p> 	<p style="text-align: center;">C</p> 					
6	<p style="text-align: center;">B</p> 	<p style="text-align: center;">D</p> 					
Mogućnost prepoznavanja podfunkcija	A: 2 B: 2 C: 3 D: 2	Točnost detalja (reprodukcija značajki)	A: 2 B: 2 C: 3 D: 2	Sličnost površina i tekstura	A: 3 B: 3 C: 4 D: 4	Sličnost proporcija značajki	A: 4 B: 4 C: 3 D: 2

Pregledom komponenti vidljivo je kako 3D skenirane komponente često sadrže anomalije dobivene nedovoljnom obradom podataka ili greškama tijekom samog skeniranja, no proporcije i ukupnost svih značajki su uvijek vjerne stvarima. Greške skeniranja donekle proizlaze iz tehnologije i korištenja relativno jeftinih uređaja, no primarno iz neiskustva ispitanika u izradi ovakvih modela. Pretpostavlja se kako bi komponente bile kvalitetnije kako bi korisnik postajao iskusniji u izradi. Proizvod iz drugog primjera tako zahtjeva optimalnim pristupom skeniranje deset komponenti, dok su prikazane prve dvije komponente koje su sudionici ikad skenirali. Promatrajući modelirane komponente, uočeno je kako su sudionici eksperimenta neke značajke

zaboravili modelirati ili ih uopće nisu primijetili. Također, greškama ili poteškoćama u mjerenju dolazi do značajnih greški u reproduciranju proporcija stvarnih komponenti.

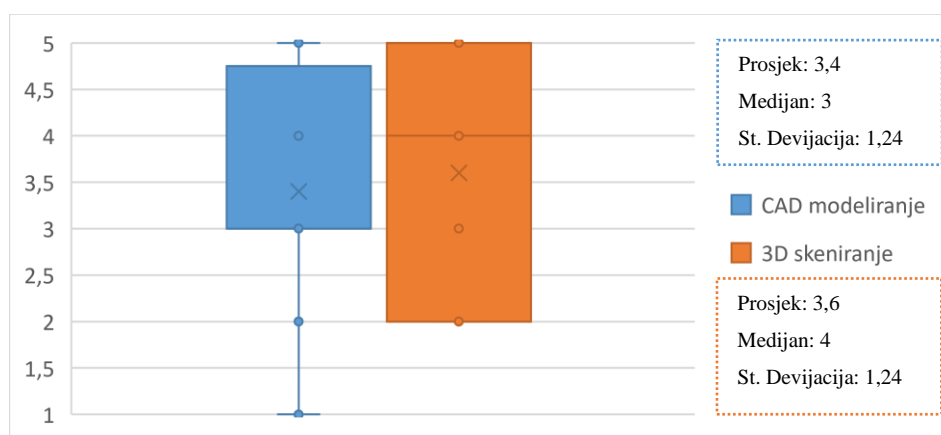


Slika 115. Dodatni prikaz funkcije moguć CAD modeliranjem

5.3.2. Deskriptivna statistička analiza dodijeljenih ocjena

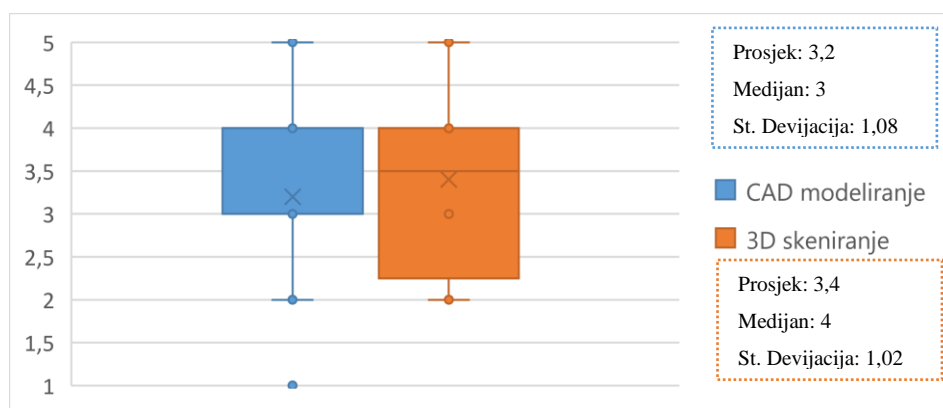
Na sljedećim slikama prikazani su različite analize ocjena koje dodijeljene modelima prikupljenim u eksperimentu. Analize su u obliku dijagramima i pripadajućih deskriptivnih statističkih podataka poput srednjih vrijednosti, medijana i standardne devijacije.

Prvi dio analize uključuje direktnu usporedbu prosječnih ocjena svih mrežnih (3D skeniranih) i svih CAD (modeliranih) modela za svaki od četiri kriterija [Slika 116 - Slika 119].



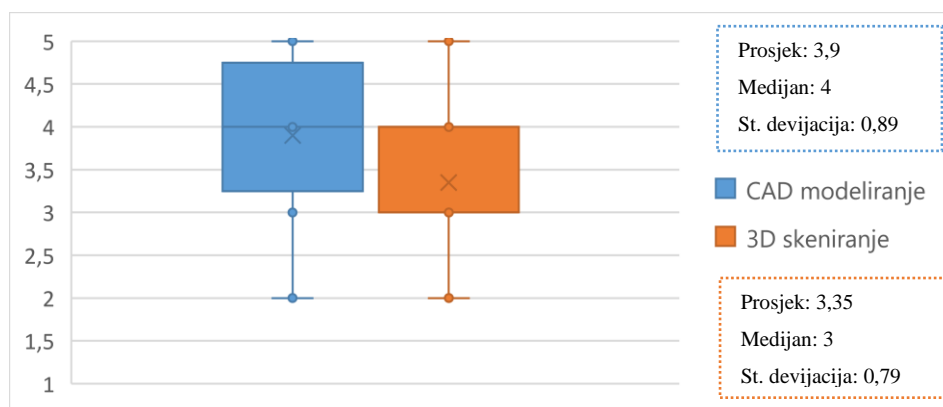
Slika 116. Raspodjela ocjena prema kriteriju mogućnosti prepoznavanja podfunkcija

Glavni cilj metodologije je izrada virtualnih prikaza koji će omogućiti prepoznavanje podfunkcija, odnosno funkcijsku dekompoziciju. Prikazi dobiveni 3D skeniranjem ocjenjeni su kao blago kvalitetniji u ispunjavanju ovog cilja te za razliku od modeliranja bez najniže moguće ocjene (1). Srednja vrijednost (prosjek) ocjena CAD komponenti iznosi 3,4 uz medijan 3 te standardnu devijaciju 1,24, dok ocjene skeniranih komponenti prosječno iznose 3,6 uz vrijednost medijana 4 te standardnu devijaciju 1,24.



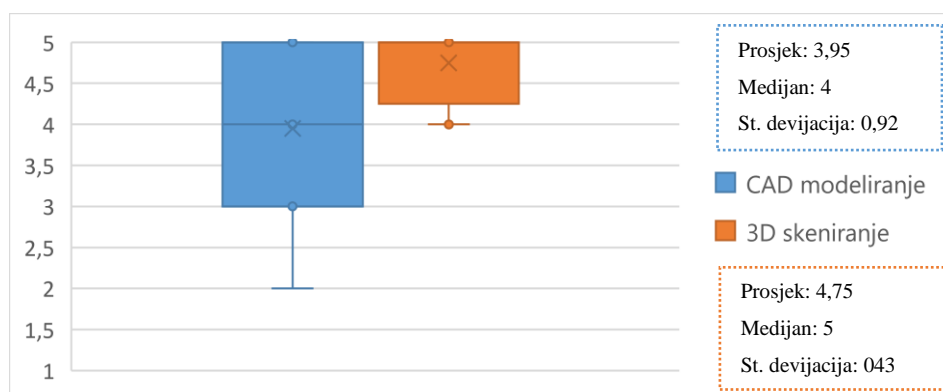
Slika 117. Raspodjela ocjena prema kriteriju točnosti detalja (reprodukcije značajki)

Ocjene točnosti detalja, odnosno reprodukcije značajki pokazale su se usko povezane s mogućnošću prepoznavanja podfunkcija (svaka značajka najčešće ima specifičnu podfunkciju) te prate isti trend blago boljih rezultata za skenirane komponente. Prosječna ocjena CAD modela iznosi 3,2 uz medijan 3 te standardnu devijaciju 1,08, dok one 3D skeniranih modela prosječno iznose 3,4 uz vrijednost medijana 4 te standardnu devijaciju 1,02.



Slika 118. Raspodjela ocjena prema kriteriju sličnosti površina i tekstura

Pregledom modela uočene su česte greške tijekom skeniranja u obliku neadekvatne teksture modela nastale šumom u oblacima točaka, odnosno nedostatkom adekvatne naknadne obrade modela. Uočene greške su također rezultat medija provođenja ankete gdje nije, kao u CAD sustavu, bilo moguće dodijeliti kvalitetnu teksturu modelu. Taj trend potvrđen je ocjenama gdje je prosječna ocjena CAD modela 3,9 uz medijan 4 i standardnu devijaciju 0,89, dok su skenirani modeli u prosjeku lošije ocijenjeni ocjenom 3,35 uz medijan 3 i standardnu devijaciju 0,79.

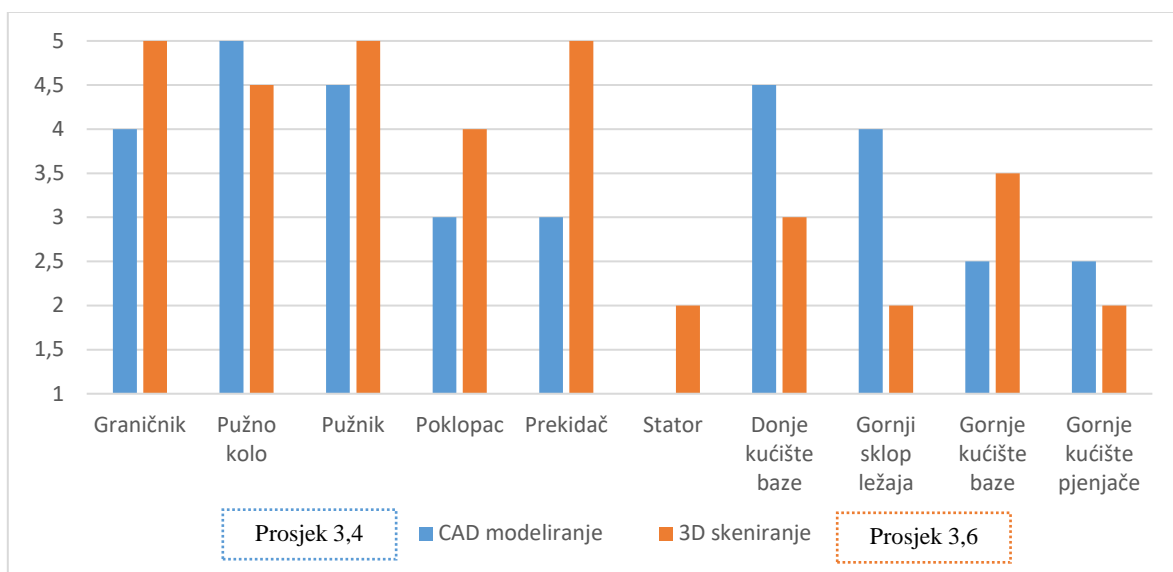


Slika 119. Raspodjela ocjena prema kriteriju sličnosti proporcija značajki

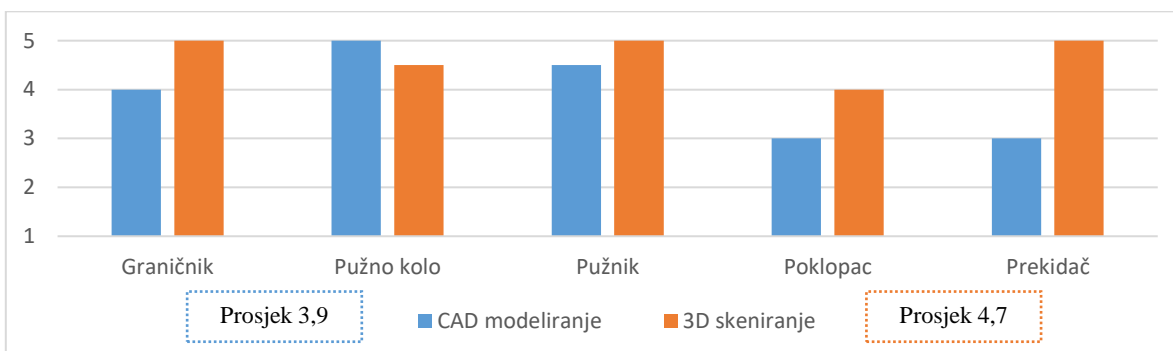
Ocjene sličnosti proporcija su značajno bolje za modele izrađene tehnologijom 3D skeniranja. Greška u proporcijama prikaza izrađenim 3D skeniranjem mogu biti jedino rezultat vrlo pogrešnog poklapanja pojedinih prolaza skeniranja, što je najčešće vrlo očita greška koja je na vrijeme eliminirana. Prosječna ocjena CAD modela po kriteriju sličnosti proporcija iznosi 3,95 uz medijan 4 te standardnu devijaciju 0,92, dok one skeniranja prosječno iznose vrlo visokih 4,75 uz vrijednost medijana 5 te standardnu devijaciju 0,43.

Drugi dio analize odnosi se na usporedbu ocjena za pojedinačne komponente te njihovo grupiranje po veličini kako bi se proučio utjecaj veličine na dodijeljene ocjene.

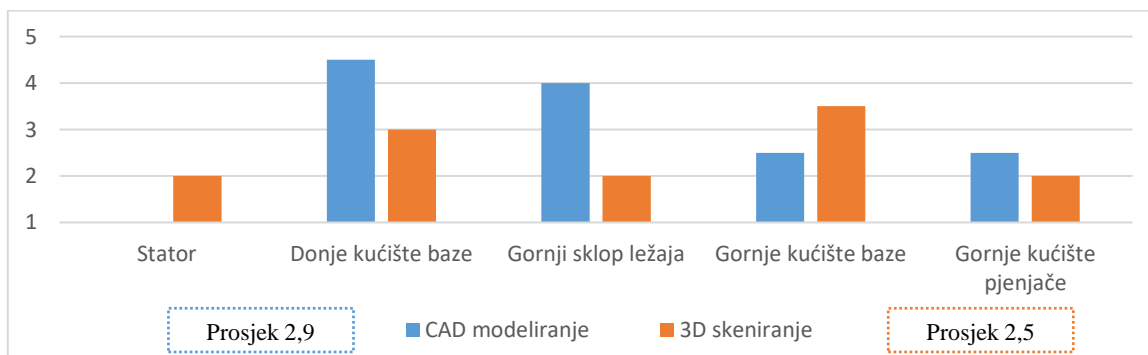
Dijagrami raspodjele prosječnih ocjena za svaku komponentu individualno [Slika 120]. Prikaz je naknadno podijeljen na velike i male komponente, odnosno na one skeniranje POP-om 2 te Tupel Dentalom. Vidljivo je kako su kod malih komponenti ocjene generalno značajno više, odnosno prikazi kvalitetniji, bez obzira jesu li skenirani ili modelirani. Ipak, skenirane male komponente ocjenjene su višom prosječnom ocjenom od 4,7, naspram one modeliranih prikaza koja iznosi 3,9. Velike komponente generalno su ocijenjene slabije, gdje je bolja od dvije prosječne ocjene ona CAD modela iznosa 2,9, a ocjena za 3D skenirane prikaze je 2,5.



Slika 120. Prosječne ocjene svih komponenti prema kriteriju mogućnosti prepoznavanja podfunkcija



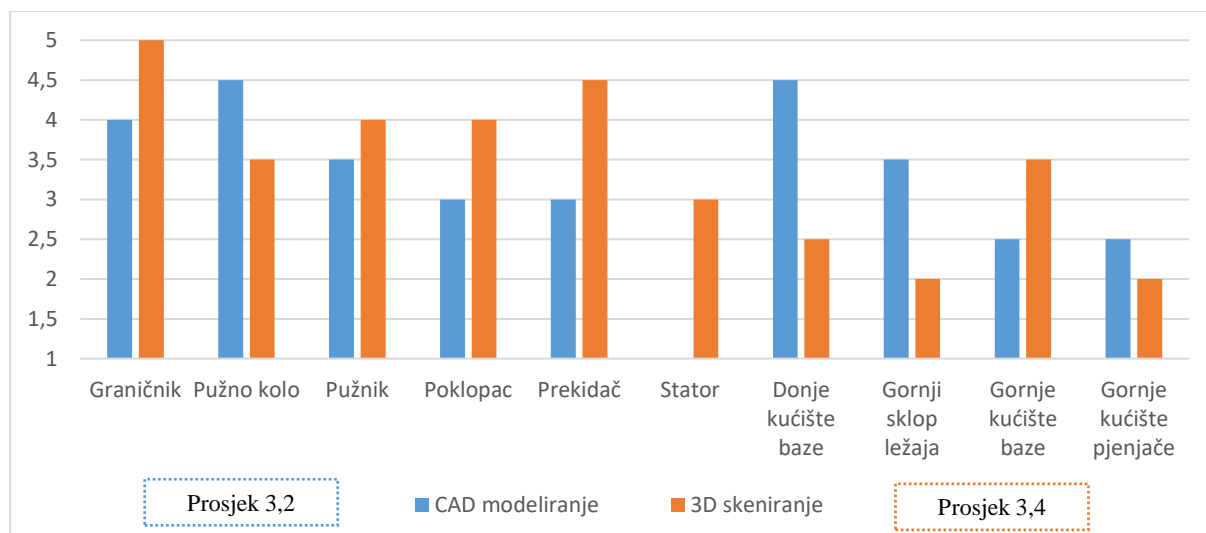
Slika 121. Prosječne ocjene malih komponenti prema kriteriju mogućnosti prepoznavanja podfunkcija



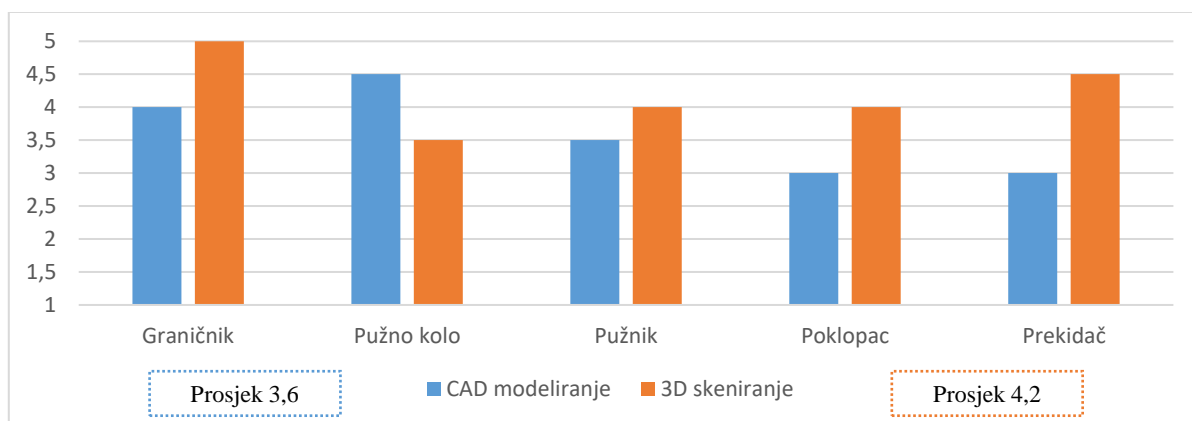
Slika 122. Prosječne ocjene velikih komponenti prema kriteriju mogućnosti prepoznavanja podfunkcija

Korištenjem skenera koji je u mogućnosti zabilježiti površine cijelih velikih komponenti gubi se mogućnost zapisa malih detalja direktno povezanih s funkcijama. Također, moguće je da posvećenost malim detaljima (malim značajkama) pada kada je njihov broj veći. Sudionici se kod takvih komponenti fokusiraju na generalnu geometriju. Primjer toga je vrlo dobra reprodukcija provrta graničnika, gdje je on jedan od samo nekolicine značajki, dok su provrti kod komponenti s mnogo značajki puno lošije reproducirani.

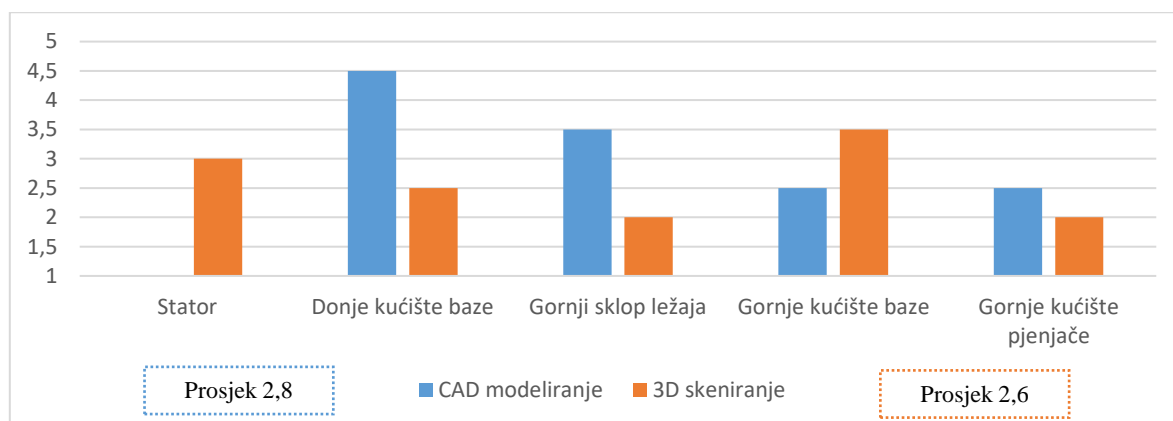
Kao što je to i ranije opisano, ocjene točnosti detalja usko su povezane s mogućnosti prepoznavanjem značajki te se kod njih uočava isti trend za manje i veće komponente. Prikazi manjih komponenti pomno izrađeni na preciznijem skeneru ocijenjeni su višom prosječnom ocjenom od 4,2, dok su modelirani prikazi ocijenjeni s 3,6. Kako je prilikom modeliranja potrebno obratiti pažnju na svaku značajku, na primjer pri direktnom mjerenju veličina na fizičkoj komponenti, CAD modeli velikih komponenti ocijenjeni su boljom prosječnom ocjenom 2,8, dok su skenirani ocijenjeni s 2,6. Razlika bi bila i veća, ali modeliranje kompleksne površine namota rotora rezultiralo je lošom ocjenom tih modela. U studiji utjecaja točnosti skeniranih modela u ovisnosti o iskustvu operatera i veličini modela, pokazano je kako manje dimenzije objekta doprinose preciznosti njegova prikaza [29], što se podudara sa ocjenama malih komponenti i u ovoj analizi.



Slika 123. Prosječne ocjene svih komponenti prema kriteriju točnosti detalja (reprodukcije značajki)

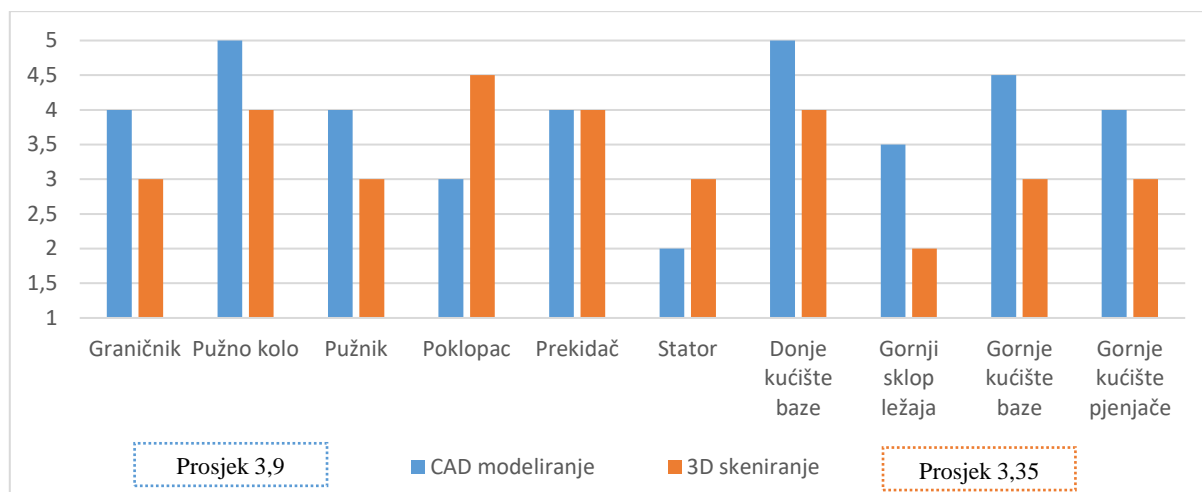


Slika 124. Prosječne ocjene malih komponenti prema kriteriju točnosti detalja (reprodukcije značajki)

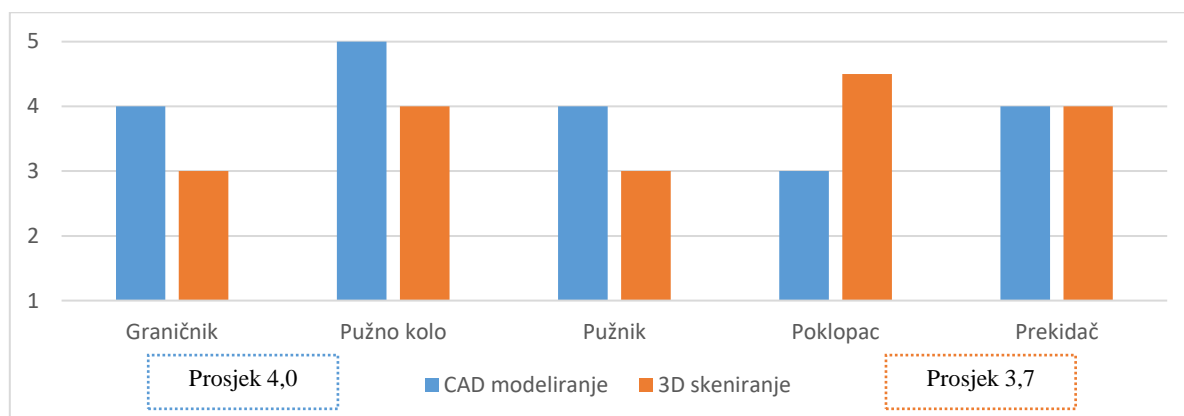


Slika 125. Prosječne ocjene velikih komponenti prema kriteriju točnosti detalja (reprodukcije značajki)

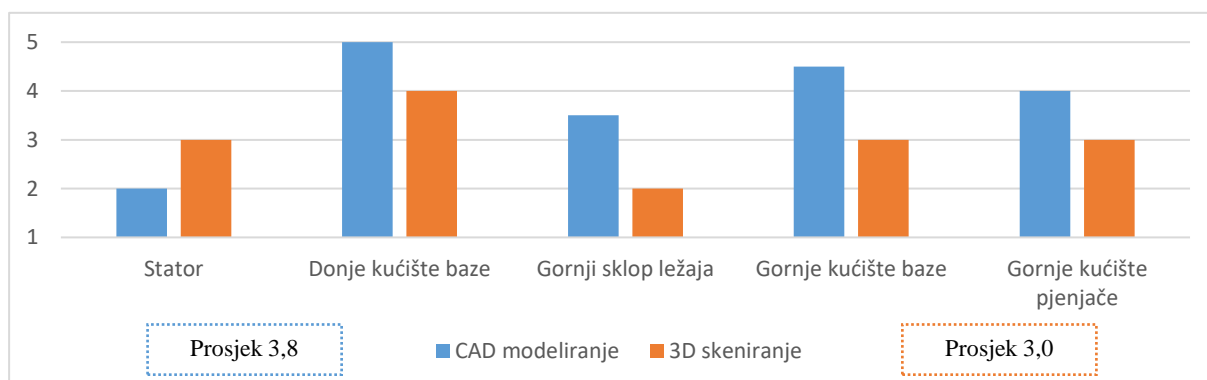
Reprodukcija odgovarajućih površina u analizi modela pokazala se kao česta greška kod skeniranih modela te upravo zbog toga predložena metodologija sadrži smjernice za poboljšavanje prikaza površina i tekstura. CAD modeli velikih komponenti ocjenjeni su ocjenom 3,8, dok su skenirani ocjenjeni s 3,0. Male komponente pokazuju manju razliku, no i ovdje je viša prosječna ocjena 4,0 za CAD modele, dok je ocjena skeniranih modela 3,7. Manja razlika kod manjih komponenti može se djelomično prepisati većoj preciznosti korištenog skenera te manjim neželjenim devijacijama u skeniranoj površini. To dodatno potvrđuje na važnost izbora optimalnog uređaja i popratnog softvera u ovisnosti o geometrijskim i površinskim karakteristikama komponente, kao što je propisano u okviru predložene metodologije.



Slika 126. Prosječne ocjene svih komponenti prema kriteriju sličnosti površina i tekstura

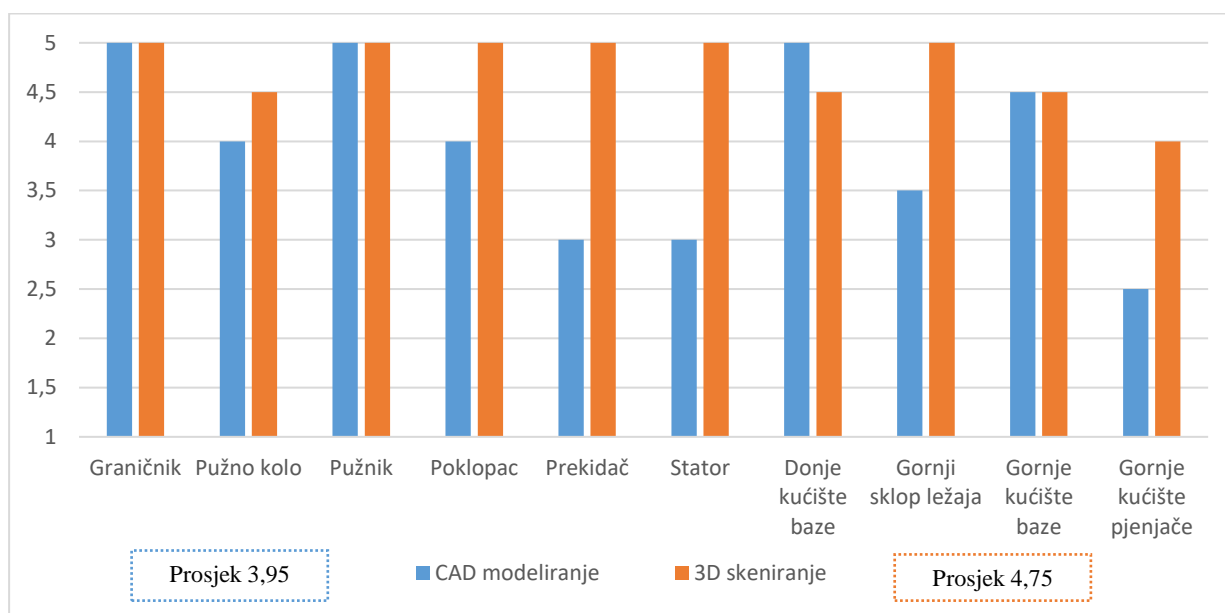


Slika 127. Prosječne ocjene malih komponenti prema kriteriju sličnosti površina i tekstura

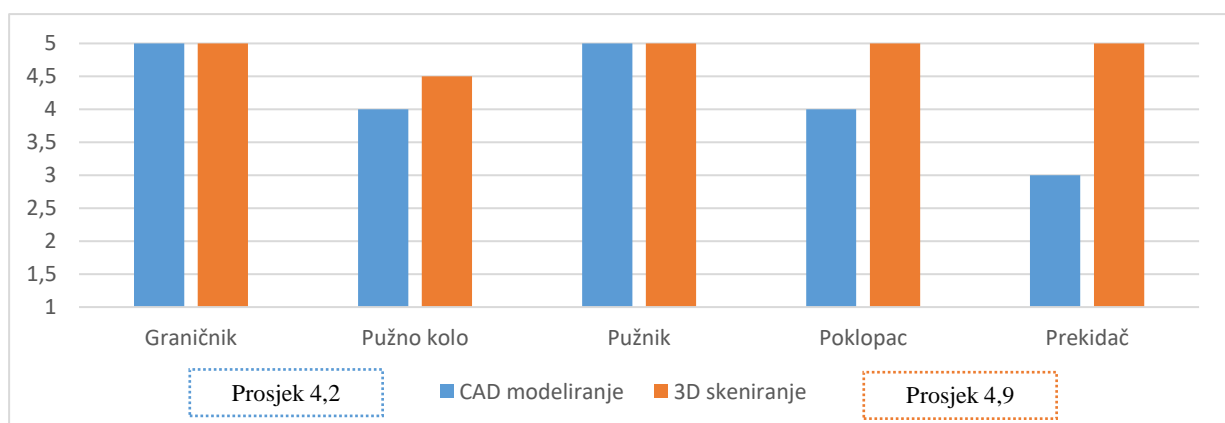


Slika 128. Prosječne ocjene velikih komponenti prema kriteriju sličnosti površina i tekstura

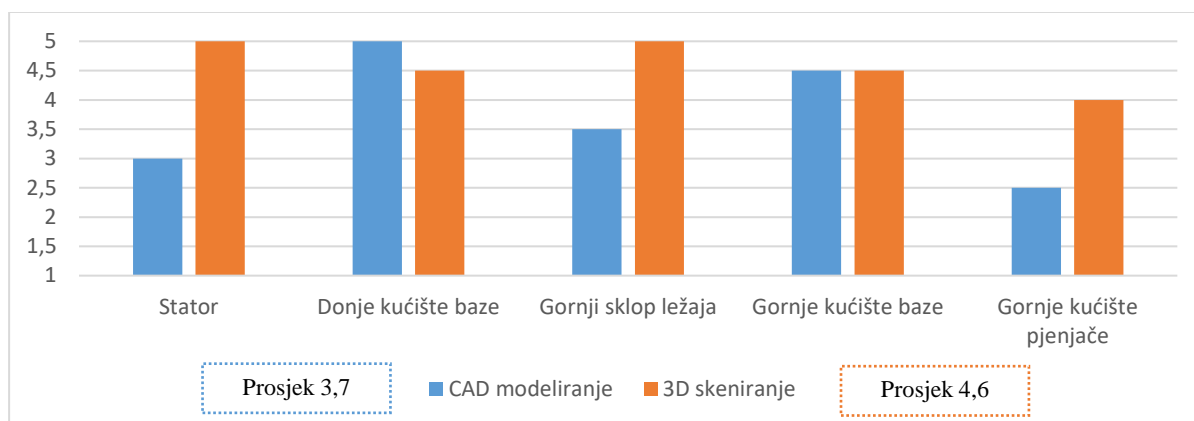
Pregledom ocjena sličnosti proporcija uočava se značajna prednost skeniranih modela. Skenirani modeli malih komponenti ocjenjeni su vrlo visokom prosječnom ocjenom 4,9, te CAD modeli istih komponenti ocjenom 4,2. Mali broj jednostavnijih značajki omogućuje relativno kvalitetno modelirane komponente. Kod modeliranja velikih komponente, koje često zadrže kompleksnije značajke, prosječna ocjena pada na relativno niskih 3,7, dok ona skeniranih komponenti također pada, no još uvijek iznosi vrlo visokih 4,6.



Slika 129. Prosječne ocjene svih komponenti prema kriteriju sličnosti proporcija značajki



Slika 130. Prosječne ocjene malih komponenti prema kriteriju sličnosti proporcija značajki



Slika 131. Prosječne ocjene velikih komponenti prema kriteriju sličnosti proporcija značajki

Najbolje ocjene mogu se povezati sa komponentama koje odgovaraju strojnim dijelovima. Primjer takvih komponenti su pužnik i pužno kolo, koji nužno nisu sastavljeni od najjednostavnijih značajki, no studenti i asistenti ih često susreću. Svi prikazi tih komponenti rezultirali su zadovoljavajućim modelima. Analizirajući sve razmatrane metrike kvalitete prikaza, uočava se stator kao komponenta sa najnižim ocjenama. Prema tipu značajki, obliku i korištenim materijalima, za komponentu rotora može se pretpostaviti kao jednako teška za oba pristupa. U studijama slučaja pokazano je kako je 3D skeniranjem, naknadnim dodavanjem CAD značajki i ručnim teksturiziranjem moguće uspješno izraditi kvalitetne prikaze tih komponenti.

6. ZAKLJUČAK

U radu su opisani razvoj i testiranje metodologije izrade računalnih prikaza proizvoda koji se mogu koristiti za virtualno rastavljanje i analizu funkcija. Prikazano je da kombinacija CAD modeliranja i priuštivih tehnologija reverzibilnog inženjerstva omogućuje efikasnu izradu kvalitetnih i funkcionalnih računalnih replika proizvoda. Motivacija za razvoj takvog postupka jest zamjena skupog fizičkog rastavljanja proizvoda u edukacijskom okruženju, čime takva vrsta nastave zbog smanjenja potrebnih kontinuiranih troškova nabavljanja proizvoda, alata i zaštitne opreme, ali i samih organizacijskih napora, postaje dostupnija i održivija. Funkcijske, kao i ostale analize koje je moguće provoditi na temelju ovakvih prikaza, ključan su aspekt inženjerskog obrazovanja, pogotovo u ranijim stadijima studija.

Koristeći opremu dostupnu u Laboratoriju za konstruiranje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, najprije su izrađeni hibridni prikazi (kombinacija mrežnog i CAD modela) dvaju proizvoda: puhalice lišća i miksera. Temeljem saznanja te dvije studije slučajeva predložena je metodologija za efikasnu i kvalitetnu izradu virtualnih prikaza. Metodologija je validirana eksperimentom u kojem su njezini ciljani korisnici, studenti i nastavnici, na temelju pokaznih primjera izradili vlastite prikaze komponenti koristeći pristupe 3D skeniranja i CAD modeliranja. Na temelju tih podataka analizirana je kvaliteta i vremenska efikasnost uporabe obje tehnologije. Dodatno, eksperimentom je potvrđeno kako je na temelju predložene metodologije uz ograničeno poznavanje tehnologije 3D skeniranja, moguće izraditi prikaze komponenti zadovoljavajuće kvalitete, ali i da je za najbolju kvalitetu prikaza potrebno koristiti hibridni pristup.

Temeljem pregleda dostupnih tehnologija za izradu virtualnih prikaza odgovoreno je na prvo istraživačko pitanje prikladne tehnologije za upotrebu u edukacijskom okruženju. Kao pogodni načini izrade prikaza pokazalo se preuzimanje modela standardnih dijelova, CAD modeliranje jednostavnijih komponenti te 3D skeniranje kompleksnijih komponenti priuštivim uređajima koji koriste tehnologiju laserske triangulacije i strukturiranog svjetla uz naknadno dodavanje značajki te dodjeljivanje boje ili ručno teksturiranje. Primjenom identificiranih pristupačnih tehnologija u studiji slučajeva pokazano je da je takvim pristupom moguće izraditi visokokvalitetne modele za virtualno rastavljanje proizvoda, čime je odgovoreno na drugo istraživačko pitanje. Studija slučajeva je ujedno pomogla pri identifikaciji primjera najbolje

prakse, odnosno koraka i odluka za izradu modela komponenata i sklopova različitih geometrija, tekstura i funkcija koje metodologija izrade takvih modela mora sadržavati.

Metodologija tako opisuje postupak izrade modela, gdje je prvi korak odabir odgovarajuće metode. Standardne komponente čiji su modeli dostupni potrebno je preuzeti, a odabir između CAD modeliranja i 3D skeniranja vrši se na temelju potrebnog vremena za izradu prikaza te vrsti značajki. Dovođenjem u korelaciju broja značajki i potrebnog vremena za izradu CAD modela te analizom kvalitete komponenti moguće je odrediti optimalan pristup. Za izradu prikaza komponente tehnologijom 3D skeniranja potrebno je između dostupnih uređaja odabrati najbolji. Izbor optimalnog uređaja vrši se primarno prema dimenzijskim ograničenjima komponente koje je moguće skenirati. Zbog jednostavnosti teži se skeniranju na okretnom stoliću, dok je najveće komponente potrebno ručno skenirati.

Metodološki propisan postupak izrade modela je primarni doprinos ovog rada. Ona obuhvaća izbore i opise postupaka koje je potrebno pratiti za izradu kvalitetnih virtualnih prikaza fizičkih proizvoda vremenski efikasno. Prijedlogom opširne i strukturirane metodologije je također odgovoreno na treće istraživačko pitanje. Konačno, provedba eksperimentalne studije s ciljanim korisnicima i analizom dobivenih modela zaključeno je kako korisnici mogu reproducirati korake metodologije i izraditi prikaze zadovoljavajuće kvalitete. Tom analizom također su identificirane komponente čiji je prikaz teže izraditi te su dane upute za poboljšanje kvalitete i tih komponenti. Diskusijom rezultata eksperimenta je ujedno odgovoreno na četvrto istraživačko pitanje.

Glavno ograničenje prikazanih rezultata je činjenica kako su izrađena samo dva virtualna prikaza od strane iste osobe. Također, prikazi su izrađeni korištenjem dostupna četiri uređaja, pa neka saznanja nije moguće generalizirati. Naime, mogućnosti i prepreke u njihovom korištenju ne reflektiraju nužno sve uređaje iz spektra dostupnih priuštivih 3D skenera. Nadalje, iako se oba reproducirana proizvoda sastoje od mnoštva različitih komponenti, moguće je da metodologija osmišljena na njihovom primjeru nije jednako primijenjiva na sve komponente koje je moguće pronaći u ostalim proizvodima. Također je važno naglasiti da usprkos eksperimentalno potvrđenoj mogućnosti korištenja metodologije od strane ciljanih korisnika, svakako postoji potreba za daljnjom validacijom različitih aspekata metodologije.

Buduća istraživanja potrebno je usmjeriti na proširivanje postojeće metodologije širim spektrom izrađenih proizvoda, a time i većim brojem različitih komponenti koje se pojavljuju u proizvodima koji se najčešće rastavljaju u okviru nastave. Istraživanjem automatizacije obrade podataka moguće je dodatno poboljšati vremensku efikasnost izrade modela, ali i smanjiti zahtjeve na potrebne vještine za njihovu izradu. Potrebno je također u proces izrade modela uključiti širi raspon korisnika, kako bi se metodologija provjerila i prilagodila za olakšano korištenje svim korisnicima raznih, bez obzira na razinu poznavanja postupaka CAD modeliranja i 3D skeniranja.

Korištenjem cjenovno pristupačnih uređaja za 3D skeniranje i prikazane metodologije moguće je izraditi kvalitetne prikaze stvarnih proizvoda kao temelj za njihovo virtualno rastavljanje. Takvi modeli omogućavaju nastavnicima opetovano provođenje vježbi rastavljanja proizvoda iz godine u godinu, bez potrebe za kontinuiranim investicijama, alatom i zaštitnom opremom. Poboljšanjem dostupnih digitalnih proizvoda cilj je virtualno rastavljanje proizvoda kvalitetom približiti fizičkom. Također, cilj je omogućiti takvu vrstu nastave različitim obrazovnim ustanovama gdje je ona ranije zbog financijskih troškova i organizacijskih napora bila neodrživa.

LITERATURA

- [1] K. L. Wood, D. Jensen, J. Bezdek i K. N. Otto, »Reverse Engineering and Redesign: Courses to Incrementally and Systematically Teach Design,« *Journal of Engineering Education*, pp. 363-374, 2001.
- [2] R. B. Stone, K. L. Wood i R. H. Crawford, »Using quantitative functional models to develop,« *Design Studies*, pp. 239-260, 2000.
- [3] R. L. Nagel, R. Hutcheson, D. A. McAdams i R. Stone, »Process and event modelling for conceptual design,« *Journal of Engineering Design*, p. 145–164, 2011.
- [4] CADLab. [Mrežno]. Available: <http://cadlab.fsb.hr>.
- [5] M. M. Ogot, G. E. Okudan, T. W. Simpson i J. S. Lamancusa, »A framework for classifying disassemble/analyse/assemble activities in engineering design education,« *Jornal of Design Research*, pp. 120-135, 2008.
- [6] A. Medland, G. Mullineux i S. R., »Creating CAD models from physical parts,« 1992. [Mrežno]. Available: https://doi.org/10.1007/978-1-349-12433-6_3.
- [7] Keyence, »Coordinate Measuring Machines (CMM),« 2024. [Mrežno]. Available: <https://www.keyence.com/products/3d-measure/cmm/>. [Pokušaj pristupa 4. Kolovoza 2024.].
- [8] G. P. Pavlidis, »Laser scanning using a laser pointing device and a camera,« 2006. [Mrežno]. Available: <https://georgepavlidis.info/research/LaserScanningAndTriangulation.php>. [Pokušaj pristupa 4. Kolovoza 2024.].
- [9] S. 3D, »Handheld 3D Scanner Light Sources: Laser Lines vs Structured Light vs Infrared,« 19. Prosinac 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.shining3d.com/blog/handheld-3d-scanner-light-sources-laser-lines-vs-structured-light-vs-infrared/>. [Pokušaj pristupa 4. Kolovoza 2024.].
- [10] Bitfab, »3D Structured Light Scanning,« [Mrežno]. Available: <https://bitfab.io/blog/3d-structured-light-scanning/>. [Pokušaj pristupa 4. Kolovoza 2024.].
- [11] M. Lindner, A. Kolb i K. Hartmann, »3D Shape Scanning with a Time-of-Flight,« 2010.

- [12] J. LaRocco i D. G. Paeng, »A functional analysis of two 3D-scanned antique pistols from New Zealand,« 2020.
- [13] U. Ertu, P. Atkinson i D. Tancock, »Applying 3D Scanning and Modeling in Transport Design Education,« 2013.
- [14] Y. Li, S. Wang, Q. Tian i X. Ding, »A survey of recent advances in visual feature detection,« *Neurocomputing*, pp. 736-751, 2015.
- [15] M. Martorelli, A. Lepore i A. Lanzotti, »Quality analysis of 3D reconstruction in underwater photogrammetry by bootstrapping design of experiments,« *International Journal of Mechanical Sciences*, pp. 39-45, 2016.
- [16] J. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. D. Chiffre i A. Weckenmann, »Computed tomography for dimensional metrology,« 2011.
- [17] LTT Labs, »NVIDIA GeForce RTX 4080 Super 16GB,« [Mrežno]. Available: <https://www.lttlabs.com/articles/gpu/nvidia-geforce-rtx-4080-super-16gb>. [Pokušaj pristupa 4. Kolovoza 2024.]
- [18] M. Goyal, S. Murugappan, C. Piya, W. Benjamin, M. L. Y. Fang i K. Ramani, »Towards locally and globally shape-aware reverse 3D modeling,« *Computer-Aided Design*, pp. 362-375, 2013.
- [19] R. Bénéière, G. Subsol, G. Gesquière, F. L. Breton i W. Puech, »A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models,« *Computer-Aided Design*, pp. 1382-1393, 2013.
- [20] J. Novak-Marcincin, J. Torok, M. J. J. Barna, L. Novakova-Marcincinova i V. Fecova, »Realization of 3D Models for Virtual Reality by Use of Advanced Scanning Methods,« 2012.
- [21] A.-C. Voicu i G. I. Gheorghe, »Complex 3D Measuring by Multiple Laser Scanning of Automotive Parts,« *Advanced Materials Research*, pp. 511-516, 2014.
- [22] J. D. Camba, A. B. d. León, J. T. Cantero i J. L. Saorín, »Application of low-cost 3D scanning technologies to the development of educational augmented reality content,« 2016.
- [23] I. Perković, »Izrada računalnih prikaza sklopova proizvoda tehnologijama povratnog inženjerstva,« Zagreb, 2023.

- [24] TraceParts, »TraceParts: Mechanical Components, Fasteners, Screws and Bolts,« [Mrežno]. Available: <https://www.traceparts.com>. [Pokušaj pristupa 7. kolovoza 2024.].
- [25] G. D. Pintilie i W. Stuerzlinger, »An Evaluation of Interactive and Automated Next Best View Methods,« *Computer-Aided Design & Applications*, pp. 279-291, 2013.
- [26] M. Contero, D. Pérez-López, P. Company i J. D. Camba, »A quantitative analysis of parametric CAD model complexity and its relationship to perceived modeling complexity,« *Advanced Engineering Informatics*, 2023.
- [27] M. D. Johnson, L. M. Valverde i W. D. Thomison, »An investigation and evaluation of computer-aided design model complexity,« *COMPUTER-AIDED DESIGN & APPLICATIONS*, pp. 61-75, 2018.
- [28] M. D. Johnson i R. P. Diwakaran, »n educational exercise examining the role of model attributes on the creation and alteration of CAD models,« *Computers & Education*, pp. 1749-1761, 2011.
- [29] C. B. Resende, B. M. Salgado, E. L. Lima, F. A. Lima i M. E. Lima, »Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans,« *Latin American Symposium on Circuits & Systems*, pp. 1-4, 2020.

MIŠLJENJE ETIČKOG POVJERENSTVA

Etičko povjerenstvo
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb

Zagreb 02. srpnja 2024.

doc.dr.sc. Tomislav Martinec
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb

Predmet: Mišljenje Etičkog povjerenstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu za potrebe izrade rada za Rektorovu nagradu

Prijedlog prijave rada za Rektorovu nagradu studenta Ivana Perkovića pod radnim naslovom *Metodologija pripreme modela za virtualno rastavljanje proizvoda koristeći priuštive tehnologije povratnog inženjerstva*, mentor doc.dr.sc. Tomislav Martinec, planira uključiti ispitivanje razlika geometrijskih modela dobivenih postupcima 3D CAD modeliranja i 3D skeniranja, za što mu treba veći broj modela koje su izradili ili skenirali studenti i nastavnici (asistenti). Sudionici će tijekom eksperimenata koristiti uređaje i softver za 3D skeniranje i 3D CAD modeliranje, s predviđenim ukupnim trajanjem od tri sata po sudioniku.

Etičko povjerenstvo Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu zaključilo je da su etički aspekti predviđenih ispitivanja za vrijeme izrade rada za Rektorovu nagradu iscrpno razrađeni te da uvažavaju načela i norme Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu.

Predsjednik Etičkog povjerenstva FSB-a



dr. sc. Vladimir Soldo, red.prof.

ZAHVALE

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Tomislavu Martinecu na pruženoj prilici, stručnoj i organizacijskoj pomoći te motivaciji tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se sudionicima eksperimenta na suradnji prilikom validacije predstavljene metodologije te uloženom trudu prilikom CAD modeliranja i 3D skeniranja komponenti.

Zahvaljujem nastavnicima izv. prof. dr. sc. Stanku Škecu i prof. dr. sc. Mariu Štorgi koji su dali povratne informacije i ispunili anketu o kvaliteti izrađenih modela.

Zahvaljujem se djevojci i obitelji na pruženoj potpori tijekom izrade ovog rada.

SAŽETAK

Autor: Ivan Perković

Naslov rada: Metodologija pripreme modela za virtualno rastavljanje proizvoda

Sažetak: Rad opisuje razvoj i validaciju metodologije za pripremu računalnih modela proizvoda namijenjenih virtualnom rastavljanju u edukacijskom okruženju. Tradicionalno se u obrazovanju razvojnih inženjera koristi fizičko rastavljanje proizvoda, kao metoda za analizu i razumijevanje njihovog oblikovanja, funkcija, strukture, tokova energije i korištenih materijala. No, fizičko rastavljanje nosi sa sobom niz izazova, uključujući visoke troškove, logističke zahtjeve i ograničenja u pogledu dostupnosti i stanja proizvoda, alata i zaštitne opreme. U radu se razmatra potreba za prelaskom na digitalne modele koji bi omogućili sličnu razinu razumijevanja, ali uz značajno smanjenje troškova i operativnih poteškoća. Istražene su dostupne tehnologije povratnog inženjerstva, s posebnim naglaskom na priuštive tehnologije 3D skeniranja, kako bi se identificirale najprikladnije metode za izradu visokokvalitetnih računalnih prikaza geometrije, strukture i ponašanja komponenti proizvoda. Provedena je studija slučaja, u kojoj je kroz digitalizaciju proizvoda puhalice za lišće i miksera demonstrirana mogućnost primjene različitih metoda i tehnologija za izradu modela pogodnih za virtualno rastavljanje. Studija slučaja je ujedno pomogla pri identifikaciji primjera najbolje prakse, odnosno pri formulaciji metodologije za izradu modela komponenata i sklopova različitih geometrija, tekstura i funkcija. Fokus je stavljen na optimizaciju procesa skeniranja i modeliranja, odabir odgovarajućih uređaja i softverskih alata, te na obradu i pripremu modela za korištenje u obrazovnom okruženju. Validacija metodologije provedena je kroz eksperimentalnu studiju s ciljanim korisnicima. Korisnici su tijekom eksperimenta izradili ukupno 40 modela komponenata proizvoda, a za svaki model je mjereno vrijeme izrade te su im dodijeljene ocjene kvalitete reprodukcije funkcionalnosti, geometrije i tekstura. Analizom rezultata zaključeno je kako korisnici mogu reproducirati korake metodologije i izraditi prikaze zadovoljavajuće kvalitete. Tom analizom također su identificirane komponente čiji je prikaz teže izraditi te su dane upute za poboljšanje kvalitete pripadajućih modela.

Ključne riječi: rastavljanje proizvoda, povratno inženjerstvo, računalni prikazi proizvoda, CAD modeliranje, 3D skeniranje

SUMMARY

Author: Ivan Perković

Title: Model preparation methodology for virtual product disassembly

Abstract: The presented work describes the development and validation of a methodology for the preparation of computer models for virtual product disassembly in an educational environment. Traditionally, in the engineering education, disassembly of physical products is used as a method for analysing and understanding products' design, functions, structure, energy flows and materials used. But this traditional approach comes with a number of challenges, including high costs, logistical requirements, and limitations on the availability and condition of products, tools, and protective equipment. Hence, the need to switch to digital models is considered, that would enable a similar level of understanding, but with a significant reduction in costs and operational difficulties. Available reverse engineering technologies, with particular emphasis on affordable 3D scanning technologies, were explored to identify the most appropriate methods for producing high-quality computer representations of the geometry, structure and behaviour of product components. A case study was conducted, in which the possibility of applying different methods and technologies to create models suitable for virtual disassembly was demonstrated through the digitisation of leaf blower and mixer products. The case study also helped in the identification of best practice examples, i.e. in the formulation of the methodology for preparing component and assembly models of different geometries, textures and functions. The focus is set on optimising the scanning and modelling processes, selecting appropriate devices and software tools, and processing and preparing models for use in educational environments. The validation of the methodology was carried out through an experimental study with target users. During the experiment, users created a total of 40 models of product components. Creation time was measured for each model and they were assigned quality ratings for the reproduction of functionality, geometry and textures. By analysing the results, it was concluded that users can reproduce the steps of the methodology and create representations of satisfactory quality. This analysis also identified components whose representations are more difficult to create, and instructions were given on how to improve the quality of the associated models.

Keywords: product disassembly, reverse engineering, computer renderings of products, CAD modeling, 3D scanning