

Izrada 3D modela primjenom povratnog inženjerstva

Veršić, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:821162>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**IZRADA 3D MODELA PRIMJENOM POVRATNOG
INŽENJERSTVA**

Rijeka, srpanj 2023.

Marin Veršić

0069087088

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**IZRADA 3D MODELA PRIMJENOM POVRATNOG
INŽENJERSTVA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Kristina Marković

Komentor: izv. prof. dr. sc. Željko Vrcan

Rijeka, srpanj 2023.

Marin Veršić

0069087088

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Rijeka, 16. ožujka 2022.

Fakultet: **Tehnički fakultet**
Predmet: **Oblikovanje pomoću računala**
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Marin Veršić (0069087088)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Izrada 3D modela primjenom povratnog inženjerstva / Reverse engineering based 3D model creation**

Opis zadatka:

Potrebno je izraditi 3D virtualni model primjenom povratnog inženjerstva. Zadatak je skenirati oštećeni dio, importirati dobiveni model u program za 3D modeliranje, modificirati virtualni model te izraditi funkcionalni model predmeta aditivnom tehnologijom.

Rad treba sadržavati stanje tehnike u području 3D skeniranja, teorijsku osnovu povratnog inženjerstva i aditivnih tehnologija te izrađenu tehničku dokumentaciju predmeta izrađenog odabranom aditivnom tehnologijom.


Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:


Doc. dr. sc. Kristina Marković


Prof. dr. sc. Kristian Lenić


Doc. dr. sc. Željko Vrcan (komentor)

IZJAVA

Sukladno pravilniku o završnom radu Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam završni rad na temu „Izrada 3D modela primjenom povratnog inženjerstva“ izradio samo samostalno koristeći se znanjem stečenim tijekom studija, konzultacijama s mentorom kao i navedenom literaturom.

Msrin Veršić

Rijeka, srpanj 2023.

ZAHVALA

Zahvalio bih se mentorici izv. prof. dr. sc. Kristini Marković na iznimnom strpljenju, velikoj pomoći i prenesenom znanju tijekom pisanja ovog rada.

Velika zahvala ide i mojem kolegi Mirku Maliću iz M.S.Tech-a na savjetima i pomoći u vezi skeniranja predmeta.

Želio bih se zahvaliti i svim ostalim profesorima i asistentima Tehničkog fakulteta u Rijeci koji su mi pomogli da steknem znanje potrebno za pisanje ovog završnog rada.

I na kraju, jedno veliko hvala mojoj obitelji na nesebičnoj podršci tijekom studija.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POVRATNO INŽENJERSTVO.....	2
2.1. Definiranje pojma.....	2
2.2. Povijesni pregled povratnog inženjerstva	3
3. PRIMJENA POVRATNOG INŽENJERSTVA	7
4. FAZE PROCESA 3D SKENIRANJA	9
4.1. Faza skeniranja predmeta.....	10
4.1.1. Kontaktni skeneri.....	11
4.1.2. Beskontaktni skeneri.....	12
4.2. Faza obrade točaka.....	13
4.3. Faza razvoja geometrijskog modela.....	14
5. 3D PRINTANJE	16
5.1. Definiranje pojma	16
5.2. Povijesni pregled 3D printanja.....	17
6. FAZE PROCESA 3D PRINTANJA.....	20
6.1. Faza razvoja CAD modela	20
6.2. Pretvorba modela u STL format.....	20
6.3. Prijenos modela na stroj za 3D printanje i manipulacija STL datotekom.....	21
6.4. Priprema stroja za printanje.....	21

6.5.	Izgradnja fizičkog dijela.....	21
6.6.	Uklanjanje dijela sa stroja za printanje	21
6.7.	Naknadna obrada/čišćenje dijela.....	22
6.8.	Završna obrada.....	22
7.	SKENIRANJE POKLOPCA ZA VENTILACIJU U AUTOMOBILU	24
7.1.	ATOS Q 3D optički skener	24
7.2.	Postupak skeniranja predmeta.....	25
7.3.	Prusa i3 MK3S 3D printer.....	33
7.4.	Postupak 3D printanja predmeta	34
8.	ZAKLJUČAK.....	40
9.	LITERATURA	41
10.	POPIS KRATICA.....	43
11.	POPIS SLIKA.....	44
12.	SAŽETAK	46
13.	SUMMARY	47

1. UVOD

Povratno inženjerstvo složen je pojam čije se značenje u posljednjih 30 godina značajno proširilo, zahvaljujući primjeni metoda povratnog inženjerstva u gotovo svakoj industriji. Ovaj rad fokusirat će se na pojam povratnog inženjerstva u strojarstvu te na blisku povezanost s metodom aditivne proizvodnje. Poanta rada je objasniti u teoriji te na praktičnom primjeru pokazati izradu modela metodom povratnog inženjerstva. Jasno će biti definirani pojmovi povratnog inženjerstva, 3D skeniranja i 3D printanja; upoznat će se s povjesnim razvojem spomenutih metoda, objasniti metodologiju navedenih metoda te na praktičnom primjeru pokazati naučeno znanje.

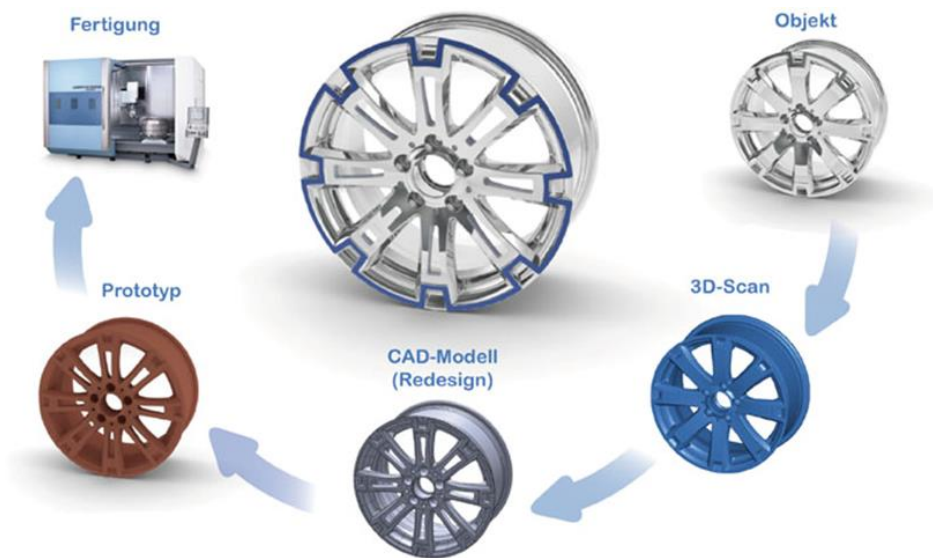
Za potrebe praktičnog dijela ovog završnog rada skenirati će se poklopac od ventilacije iz unutrašnjosti automobila ATOS Q 3D skenerom. Predmet koji će biti skeniran je oštećen, zbog čega ne može fiksno stajati na za to predviđenom mjestu unutar automobila. Nakon skeniranja predmeta i obrade dobivenih podataka, predmet će biti isprintan pomoću 3D printera, a s obzirom da je poklopac u prvobitnoj izvedbi od plastike, njegova inačica dobivena aditivnom tehnologijom biti će funkcionalna i moći će zamjeniti oštećeni dio.

2. POVRATNO INŽENJERSTVO

2.1. Definiranje pojma

Inženjerstvo je proces razvoja, planiranja, projektiranja, proizvodnje, sastavljanja i održavanja proizvoda i sustava [6] Inženjerstvo se dijeli na 2 vrste, tradicionalno inženjerstvo (*Eng. Forward Engineering*) te obrnuto inženjerstvo (*Eng. Reverse Engineering*). Tradicionalno inženjerstvo je klasični proces izrade proizvoda od idejnog rješenja, odnosno visoke razine apstrakcije, do izrade tehničke dokumentacije te fizičke implementacije krajnjeg proizvoda. Za razliku od tradicionalnog, povratno inženjerstvo je noviji pojam kojeg je nešto teže za definirati.

U najširem smislu, pojam povratnog inženjerstva prema V.Raja i K.J.Fernandes [6] obuhvaća različite pristupe kojima je cilj reproducirati postojeći fizički objekt uz pomoć tehničke dokumentacije ili podataka dobivenih računalima na temelju postojećeg fizičkog objekta (*Slika 2-1*).



Slika 2-1 Vizualni prikaz procesa povratnog inženjerstva [10]

U počecima korištenja povratnog inženjerstva postojeći fizički objekti (sklopovi, podsklopovi, dijelovi) rastavljali su se i/ili promatrali s ciljem otkrivanja temeljnih principa rada naprave/objekta,

materijala te strukture kroz sistematsku analizu te su se fizički mjerili radi izrade tehničke dokumentacije objekta.

Povratni inženjering se do danas značajno promjenio razvojem sofisticiranih računalnih softvera, specijalizirane opreme te modernih mjernih instrumenata što je rezultiralo širenjem područja uporabe obrnutog inženjerstva u raznim industrijama poput medicine, automobilske industrije, zrakoplovne industrije, industrije zabave, farmacije itd.

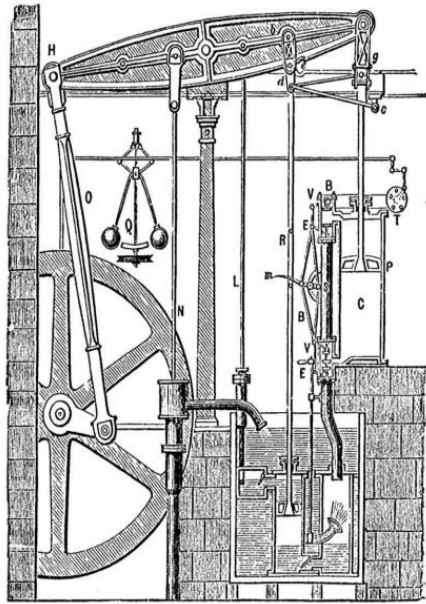
S obzirom da pojam povratnog inženjerstva danas pokriva veliki spektar znanstvenih područja, ovaj rad će se fokusirati na povratno inženjerstvo u području strojarstva potpomognuto računalima (*Eng. computer-aided engineering - CAE*). Povratno Inženjerstvo u tom pogledu odnosi se na kreiranje funkcionalnog modela kompjuterski potpomognutog dizajna (*Eng. computer-aided design - CAD*) iz postojećeg fizičkog objekta korištenjem kontaktnih ili beskontaktnih uređaja za digitalizaciju ili mjerenje, koji kasnije može biti korišten za kreiranje tehničke dokumentacije i izradu kopije postojećeg objekta ili poslužiti kao podloga za redizajniranje i razvoj novog objekta.

2.2. Povijesni pregled povratnog inženjerstva

Počeci primjene tehnika povratnog inženjerstva nisu jasno definirani u znanstvenoj literaturi. Neki znanstvenici i profesori poput Robert W. Messlera sa Rensselaer politehničkog instituta u Američkoj saveznoj državi New York pripisuju početke povratnog inženjerstva drevnim Egipćanima i Europskim srednjovjekovnim arhitektima. Obrazloženje svojeg stajališta Messler pronalazi u činjenici da su arhitekti tog doba poput Khufu-a, arhitekta Keopsove piramide, proučavali dijela prijašnjih arhitekata, učili na njihovim greškama i implementirali naučeno znanje u svojim projektima [11]. Također, svoja stajalište temelji i na podatku kako su greške u ranijoj fazi izgradnje velikih povjesnih zdanja, poput piramida u Egiptu i velikih katedrala izgrađenih u Europi u srednjem vijeku, u kasnijim fazama izgradnje ispravljane. Iz te činjenica možemo zaključiti kako su arhitekti proučavali svoje projekte, uviđali napravljene greške i ispravljali ih u daljnoj gradnji.

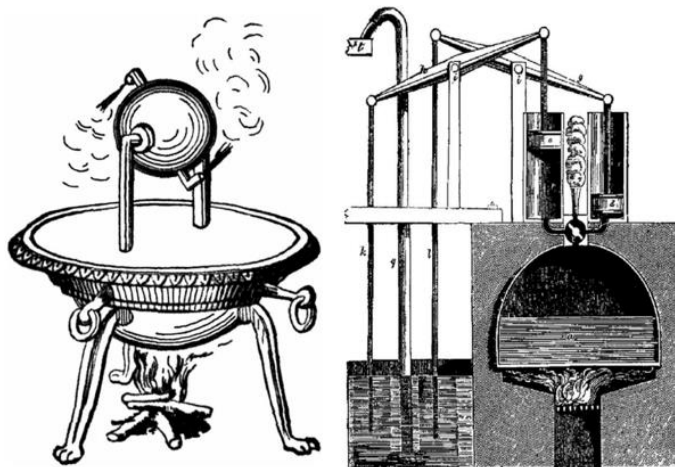
S početkom prve industrijske revolucije u 18. stoljeću, razvoj industrije i mehanizacija proizvodnje sa sobom je donijela i sve veću primjenu povratnog inženjerstva u industriji. Razvoj mehaniziranih

strojeva za agrikulturu i izum parnog stroja donijeli su značajan napredak u mnogim industrijama, a primjenom povratnog inženjerstva, novonastali izumi su vrlo brzo dobivali svoje novije, naprednije inačice. Opće poznata povjesna činjenica je da ja James Watt 1765. godine izumio parni stroj (Slika 2-2)[11].



Slika 2-2 Parni stroj James Watta iz 1765. godine [11]

Ideju o stroju koji pomoću vodene pare proizvodi mehaničku energiju imao je još Heron iz Aleksandrije u 1. stoljeću (Slika 2-3), a kroz povijest je proizvedeno nekoliko rudimentarnih inačica parnih strojeva, poput dvocilindarskog parnog stroja Jacoba Leupolda iz 1720. godine (Slika 2-3), koji je imao mnogo nedostataka.



Slika 2-3 Parni stroj Herona iz Aleksandrije (lijevo) i parni stroj Jacoba Leupolda iz 1720. godine (desno) [11]

James Watt je proučavanjem ranijih inačica parnih strojeva uvidio, i rješio, probleme koje su ti strojevi imali, te napravio prvi industrijski upotrebljiv parni stroj.

Primjena povratnog inženjerstva također je odigrala značajnu ulogu u 2. svjetskom ratu (1939. – 1945.) i u hladnom ratu između Sjedinjenih Američkih Država u SSSR-a (1945. – 1991.). Oružane snage i obavještajne službe prikupljale bi podatke ili bi dolazile u posjed neprijateljske tehnologije koja bi naknadno bila proučavana u cilju razvoja kopija ili unaprijeđenih inačica neprijateljskih oružja, uređaja, vozila i slično. Odličan primjer primjene povratnog inženjerstva iz razdoblja 2. svjetskog rata je sovjetska inačica američkog ratnog zrakoplova „B-29 Superfortress“ (Slika 2-4) koja je nazvana „Tupolev Tu-4“ (Slika 2-5). Naime, u studenom 1944. godine Američki pilot spomenutog zrakoplova bio je prisiljen sletjeti na sovjetsko tlo, nakon čega je morao napustiti zrakoplov. Sovjetski inženjeri proučili su američki zrakoplov, kopirali 105000 dijelova zrakoplova i napravili gotovo identičnu kopiju [11].



Slika 2-4 Američki zrakoplov „B-29 Superfortress“ [13]



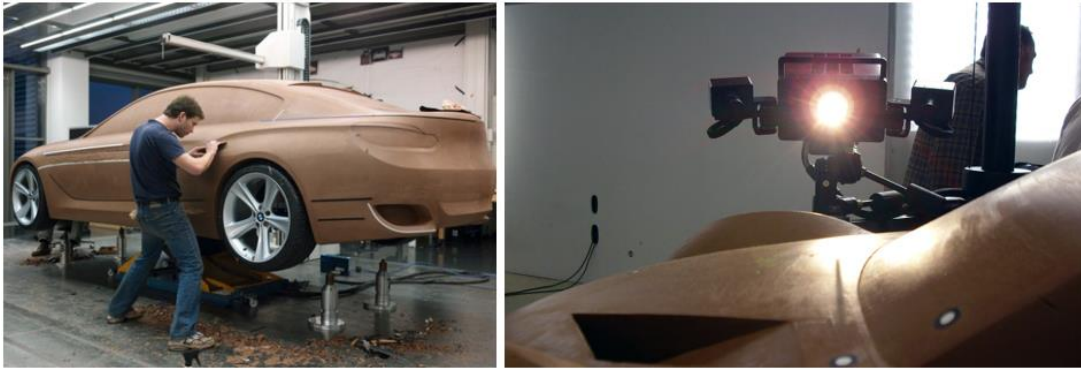
Slika 2-5 Sovjetski zrakoplov "Tupolev Tu-4" [14]

U posljednjih 30-ak godina primjena povratnog inženjerstva se proširila i značajno promjenila, kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, pa je tako danas zastupljeno u granama od vojne industrije do računalnih igrica. U navedenom periodu, automobilska industrija i zrakoplovna industrija su zahvaljujući izazovnim zahtjevima tržišta odigrale značajnu ulogu u razvoju strojeva, softvera i ostalih tehnologija koje se danas upotrebljavaju u povratnom inženjerstvu.

3. PRIMJENA POVRATNOG INŽENJERSTVA

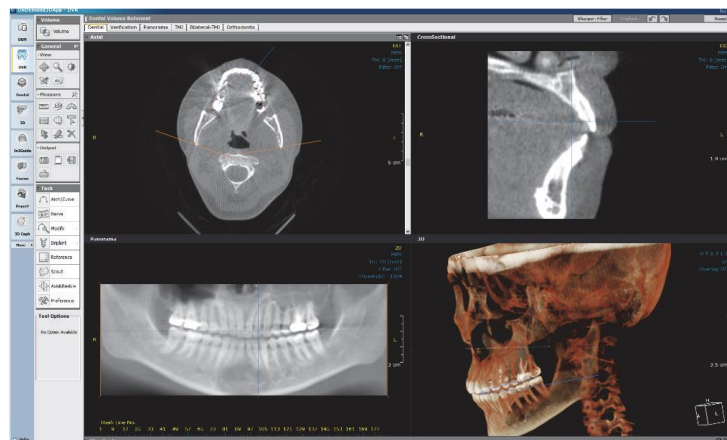
Kao što je spomenuto u prethodnim poglavljima, razvojem računalnih softvera, specijalizirane opreme i modernih mjernih instrumenata primjena povratnog inženjerstva se značajno proširila u mnoge grane industrije, pogotovo u posljednjih 30ak godina. U ovom poglavlju biti će navedena nekolicina razloga za korištenje povratnog inženjerstva u industriji kako bi se dobio dojam o važnosti razvoja softvera i opreme za povratni inženjering.

- 1) Izvorni proizvođač proizvoda više ne postoji, no kupac treba rezervne dijelove ili sami proizvod. Ukoliko je originalni proizvod uvezen i korisnik nema njegovu popratnu tehničku dokumentaciju, često je jeftinije proizvesti rezervne i potrošne dijelove koji će biti potrebni tijekom dužeg perioda korištenja proizvoda, umjesto da ih se redovito uvozi od dobavljača [3]
- 2) Izvorni proizvođač proizvoda više ne proizvodi proizvod
- 3) Izvorna projektna dokumentacija proizvoda je izgubljena ili nikad nije postajala
- 4) Potrebna za stvaranjem podataka za obnovu ili redizajn proizvoda za koji ne postoji CAD dokumentacija ili je ona zastarjela
- 5) Kontrola kvalitete proizvoda; usporedba proizvedenog dijela s njegovim CAD modelom
- 6) Analiza dobrih i loših osobina proizvoda konkurenata. Uobičajena praksa danas je da kada jedna automobilska kompanija stavi novi model automobila na tržište, konkurentna kompanija kupi jedan primjerak modela s ciljem proučavanja i učenja principa rada svojih konkurenata [4]
- 7) Istraživanje novih načina za poboljšanje performansi i značajki proizvoda. Dizajniranje i proizvodnja automobila i aviona, danas bi bila znatno otežana bez naprednih CAD programa i alata za simulacije uz pomoć kojih je moguće predvidjeti ponašanje prototipa vozila [3]
- 8) Stvaranje 3D modela iz fizičkog modela ili strukture za animaciju u igrama i filmovima, reprodukcija umjetničkih djela ili digitalizacija ručno rađenog prototipa proizvoda. U određenim slučajevima dizajneri automobila, umjetnici, oblikuju svoje ideje izradom modela automobila u glini, gipsu ili drvu, nakon čega se dobiveni modeli digitaliziraju u obliku CAD modela (*Slika 3-1*) [4]



Slika 3-1 Izrada prototipa automobila u glini [10]

- 9) projektiranje ergonomski funkcionalnih proizvoda, poput invalidskih pomalagala, ortopedske obuće, računalnih tipkovnica i miševa, stolica, kaciga, obuća itd.
- 10) generiranje podataka za izradu zubnih ili kirurških proteza (*Slika 3-2*)



Slika 3-2 Izrada zubnih proteza metodom povratnog inženjerstva [10]

- 11) Dokumentiranje i reprodukcija mjesta zločina u kriminalistici
- 12) Itd.

Svaka od navedenih primjena tehnike obrnutog inženjerstva rezultira skraćivanjem vremena ciklusa razvoja proizvoda te samim time i smanjivanjem ukupnih troškova proizvodnje.

4. FAZE PROCESA 3D SKENIRANJA

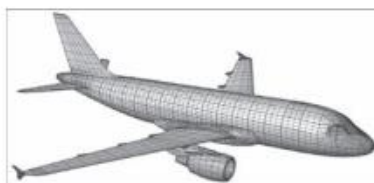
Proces povratnog inženjerstva sastoji se od 3 glavne faze: faze skeniranja fizičkog predmeta, obrade točaka dobivenih 3D skeniranjem te razvojem funkcionalnog geometrijskog modela na temelju dobivenih točaka (*Slika 4-1*).



(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 4-1(a) skeniranje fizičkog dijela 3D skenerom; (b)rezultat nakon prve faze 3D skeniranja - oblak točaka; (c)rezultat druge faze 3D skeniranja - uređeni oblak točaka povezan vektorima koji tvore površinu; (d)krajnji rezultat - CAD model skeniranog dijela

Prije početka skeniranja u obzir moramo uzeti nekoliko aspekata kako bi odredili optimalne parametre procesa. Stvari koje moramo uzeti u obzir su:

- Razlog zbog kojeg skeniramo predmet i izrađujemo 3D model
- Broj dijelova koje ćemo skenirati te hoćemo i ih skenirati kao cijelinu ili zasebno dio po dio
- Je li predmet malen ili velik (u odnosu na područje skeniranja 3D skenera)
- Je li predmet jednostavne ili složene geometrije
- Je li površina predmeta sjajna
- Je li geometrija predmeta prizmatična/pravilna ili nepravilna te je li nam bitna vanjska ili unutarnja geometrije predmeta
- Potrebna točnost predmeta je linearna ili volmetrijska
- (a) skeniranje fizičkog dijela 3D skenerom, (b)rezultat nakon prve faze 3d skeniranja - oblak točaka, (c)rezultat druge faze 3D skeniranja - uređeni oblak točaka povezan vektorima koji tvore površinu, (d)krajnji rezultat - CAD model skeniranog dijela [14]

4.1. Faza skeniranja predmeta

Skeniranje fizičkog predmeta 3D skenerom prvi je korak procesa povratnog inženjerstva i od velike je važnosti za kvalitetu krajnjeg 3D modela. Prije samog skeniranja predmeta moramo odabrati optimalne parametre skeniranja i pripremiti predmet za skeniranje. Parametri skeniranja ovise o vrsti 3D skenera i o postavkama softwera koji koristimo za skeniranje. Uređaji za skeniranje proizvode se kao zasebni namjenski alati ili kao nadogradnja na već postojeće računalno numerički upravljane (*Eng. Computer numerical control - CNC*) alatne strojeve. Priprema predmeta sastoji se od pozicioniranja predmeta, ograničavanje slobode kretanja predmeta te obrade površine ukoliko je to potrebno (npr. kod optičkih 3D skenera sjajne površine mogu znatno smanjiti kvalitetu 3D skena, pa je korisno nanijeti privremeni sloj finog praha, poput pudera, prije skeniranja, kako površina predmeta ne bi sjajila). Nakon izvršene pripreme, započinje skeniranje 3D skenerom, gdje se sakupljaju informacije o geometrijskim značajkama predmeta skeniranja (prorezi, utori, rupe, izbočine itd.) i izrađuje se oblak točaka (*Eng. Point cloud*) (Slika 4-2).

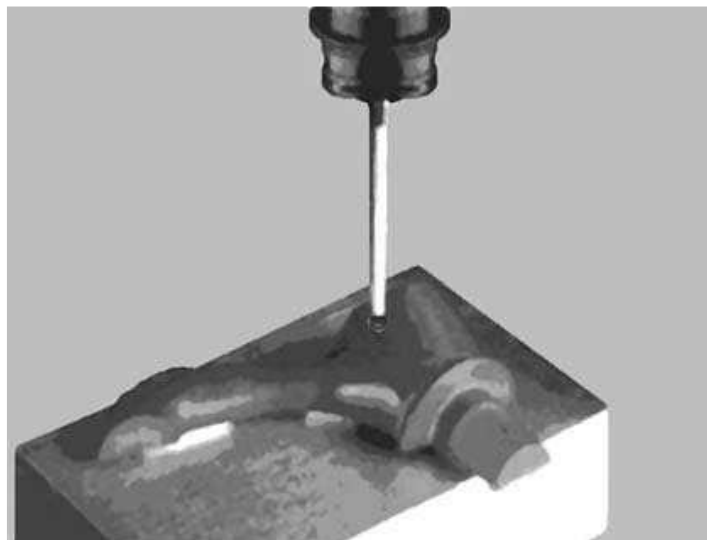


Slika 4-2 Tipični detalj rezultata skeniranja u obliku oblaka točaka, prije obrade podataka [1]

Oblak točaka je skup točaka u Kartezijevom 3D koordinatnom sustavu. Svaka točka zasebno predstavlja rezultat jedne izmjerene lokacije na površini objekta, dok skup svih točaka čini vanjsku površinu predmeta skeniranja. Osnovna podjela 3D skenera je na kontaktne i bezkontaktne skenera.

4.1.1. Kontaktne skenera

Kontaktne uređaje za 3D skeniranje koriste kontaktne sonde (tzv. „ticala“) (Slika 4-3) koje slijede fizičku površinu predmeta i sakupljaju informacije o njemu. Za vrijeme skeniranja sonda se giba po predmetu, dok sam predmet miruje.

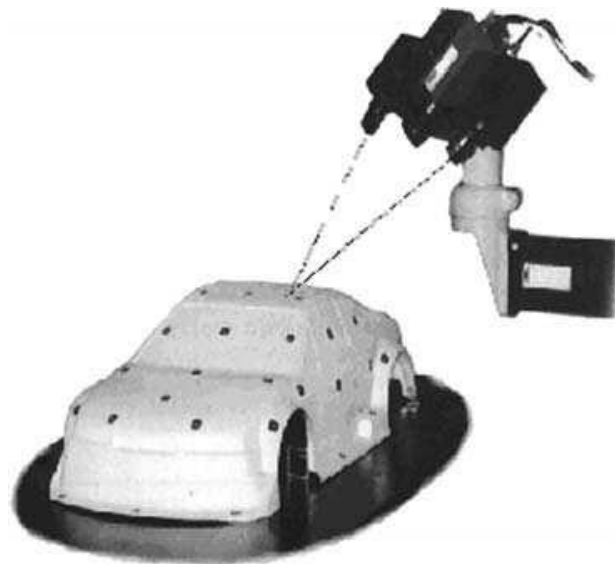


Slika 4-3 Sonda kontaktnog skenera prelazi preko predmeta skeniranja [6]

Kontaktne 3D skeneri temelje se na tehnologiji koordinatnih mjernih uređaja (*Eng. Coordinate Measuring Machine – CMM*). Koordinatni mjerni uređaji rade na principu dodira, gdje se koordinate točke dodira vrha ticala sa površinom koja se mjeri detektiraju automatski, mjerenjem sile dodira preko senzora pritiska na ticalu. Koordinatna mjerna mašina obično ima podešenu granicu na 200 mN. Preciznost (maksimalna greška mjerenja) dimenzija koordinatnim mjernim uređajem može biti i ispod 1 μm [10]. Ovisno o veličini površine skeniranog predmeta, opcija kontaktnog skeniranja predmeta može biti veoma spora, jer se svaka točka budućeg oblaka točaka generira individualno na vrhu sonde. Nakon generiranja svake točke, taktilni senzor smanjuje pritisak na površinu predmeta te prelazi na očitavanje sljedeće točke. Sila koju stvara sonda na predmet skeniranja je ograničavajući faktor ove metode skeniranja, s obzirom da se predmeti malene črstoće (npr. guma) pri kontaktu sa sondom deformiraju, pa je nemoguće dobiti točan 3D sken.

4.1.2. Beskontaktni skeneri

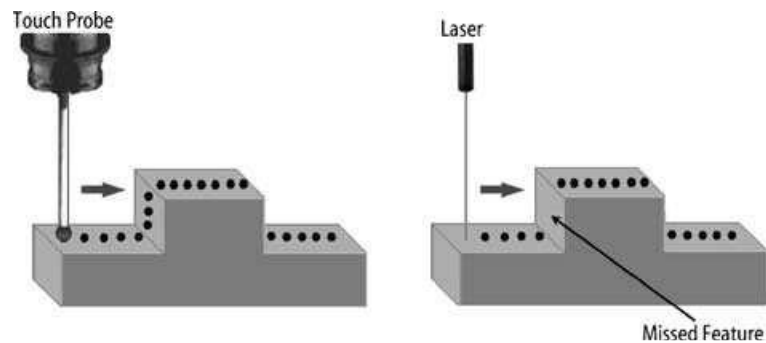
Beskontaktni uređaji za 3D skeniranje koriste lasere, optiku ili senzore slike spajane s nabojem (*Eng. Charge-Coupled Device sensors – CCD*) za hvatanje podataka o točkama na površini skeniranog predmeta (*Slika 4-4*).



Slika 4-4 Beskontaktni optički 3D skener [6]

Iako ovi uređaji hvataju velike količine podataka u relativno kratkom vremenu (znatno kraćem nego kontaktni uređaji), pri korištenju nailazimo na niz problema vezanih s ovom tehnologijom skeniranja:

- Tipična tolerancija beskontaktnog skeniranja je između 0,025 i 0,2 milimetara (znatno manje naspram kontaktnih uređaja).
- Neki beskontaktni uređaji imaju problem s generiranjem podataka koji opisuju površine paralelne zrakama lasera (Slika 4-5).



Slika 4-5 Vizualni prikaz razlike u skeniranju paralelnih linija ticalom i laserom. Pri skeniranju s laserom podaci o koordinatama plohe paralelne zrakama lasera nisu prikupljeni [6]

- Većina metoda koje koriste beskontaktni 3D skeneri koriste svjetlo u procesu snimanja podataka. Ovakve metode imaju problem s dohvaćanjem podataka kada svjetlost padne na sjajne površine predmeta. Ovaj problem uspješno se rješava privremenim premazom površine skeniranja finim prahom (poput pudera).

Problemi koji su navedeni ograničavaju uporabu beskontaktnih metoda 3D skeniranja na područja u inženjerstvu, gdje je točnost generiranih informacija sekundarna u odnosu na brzinu hvatanja podataka. Prednost naspram kontaktnih skenera nije samo u brzini sakupljanja informacija, već i u tome da dio beskontaktnih skenera može sakupiti i informacije o boji predmeta te imaju mogućnost skeniranja sitnih detalja na predmetu kojima ticalo kontaktnog skenera ne bi moglo pristupiti.

4.2. Faza obrade točaka

Nakon što smo kao rezultat skeniranja predmeta 3D skenerom dobili skup podataka u obliku oblaka točaka, obrađujemo ga, pripremamo i optimiziramo kako bi ga pripremili za konstrukciju 3D modela. Obrada točaka vrši se specializiranim softverima koji sadrže niz predefiniраниh filtera koji izvršavaju

potrebne funkcije za obradu rezultata skeniranja. Dobro poznavanje algoritama na temelju kojih rade spomenuti filteri su ključan faktor za uspješnost i vrijeme trajanja ove faze skeniranja. U ovoj fazi povezujemo različite skenove predmeta u jedan oblak točaka. Višestruko skeniranje predmeta učestala je praksa kako bi dobili informacije o cijelom predmetu i kako ne bi izostavili njegove pojedine značajke (rotiranjem i premještanjem predmeta 3D skeneru omogućavamo da prikupi informacije o ranije nedostupnim dijelovima predmeta). Ovaj korak svodimo na vremenski minimum dobrim planiranjem višestrukog skeniranja u početnoj fazi procesa. Rezultat faze obrade točaka dobivenih skeniranjem je čist i povezan oblak točaka na temelju kojeg poligonizacijom dobivamo mrežu poligoniziranih trokuta dobivenih spajanjem točaka (*Eng. Mesh*). Na taj način dobili smo površinski 3D model sastavljen od velikog broja trokuta koji možemo pohraniti u obliku .STL datoteke.

T. Weyrich i dr. [1] tvrde kako je naknadna obrada rezultata skeniranja znatno kvalitetnija ukoliko se funkcije čišćenja 3D skena obavljaju na oblaku točaka, a ne na 3D Meshu, prije uporabe sofisticiranih algoritama za rekonstrukciju površine ili naprednih operacija modeliranja., najčešće u STL formatu datoteke.

4.3. Faza razvoja geometrijskog modela

Razvoj digitalnog 3D modela na temelju fizičkog predmeta zahvaljujući tehnologijama povratnog inženjerstva znatno je smanjen. Potreba za generiranjem CAD informacija iz fizičkih komponenti javlja se tijekom svakog procesa predstavljanja novog proizvoda na tržište. Iz tog je razloga izrada CAD modela često krajnji rezultat procesa povratnog inženjerstva. Generiranje 3D modela definiranih ploha iz oblaka točaka najsloženija je aktivnost povratnog inženjerstva, jer su potrebni kompleksni algoritmi za generiranje površina koje točno opisuju trodimenzionalne informacije opisane oblakom točaka.

S obzirom da većina CAD sustava nije dizajnirana za obradu i prikaz velikih količina točkastih podataka, razvijeni su posebni paketi tih sustava ili zasebni, specijalizirani programi za povratno inženjerstvo (poput „Geomagic Design X“ softvera). Iako danas imamo složene algoritme za generiranje površina iz skupova točaka i dalje je ovaj proces većinom subjektivan i ručno rađen,

stoga krajnji rezultat najviše ovisi o iskustvu i stručnosti inženjera. Primjena CAD modela, tj. razlog zbog kojeg ga izrađujemo, najvažniji je podatak za obradu softvera koji će se koristiti u ovoj fazi procesa. Na primjer, ukoliko skeniramo razbijeni komad opreme koji će u više primjeraka biti izrađivan na CNC stroju, potrebno je vrlo precizno definirati sve geometrijske značajke predmeta, pa razvoj geometrijskog modela mora biti vrlo detaljan. S druge strane, ukoliko je poanta skeniranja predmeta radi analize geometrijskih značajki radi usporedbe s već postojećim nacrtom ili CAD modelom, možda nije ni potrebno izrađivati novi CAD model, već možemo analizirati podatke u STL formatu (npr. pomoću softvera poput „GOM Inspect“). Ukoliko je razvoj geometrijskog modela ipak potreban, krajnji rezultat biti će u datoteci oblika poput DXF, OBJ, IGES, STL i slično.

5. 3D PRINTANJE

5.1. Definiranje pojma

3D printanje je pojam koji opisuje brojne tehnologije kojima se može konstruirati trodimenzionalni objekt primjenom aditivne proizvodnje.

Osnovni princip na kojem se zasniva aditivna proizvodnja je da se dijelovi izrađuju dodavanjem materijala u tankim slojevima, gdje je svaki sloj jedan poprečni presjek dijela konstruiranog u CAD sustavu. S obzirom da svaki presjek u fizičkom svijetu ima konačnu debljinu, rezultat 3D ispisa biti će aproksimacija izvornog 3D modela, a što je debljina presjeka manja, to će aproksimirani predmet biti sličniji originalu (*Slika 5-5.1-1*).



Slika 5-5.1-1 Prikaz CAD modela predmeta (gore) i aproksimacija predmeta bazirana na principu rada ne temelju slojeva (dolje). Na donjim slikama vidi se razlika u točnosti aproksimacije predmeta kada je primarni sloj deblji (lijevo) i tanji (desno) [8]

Danas svi komercijalni 3D printeri imaju princip rada na temelju slojeva (*Eng. Layer-based approach*), a razlikuju se po materijalu koji koriste za izradu dijelova, načinu na koji su slojevi stvoreni i naknadno povezani. Te razlike direktno utječu na točnost i mehanička svojstva gotovog dijela, koliko je završne obrade potrebno i koliki je ukupni trošak izrade.

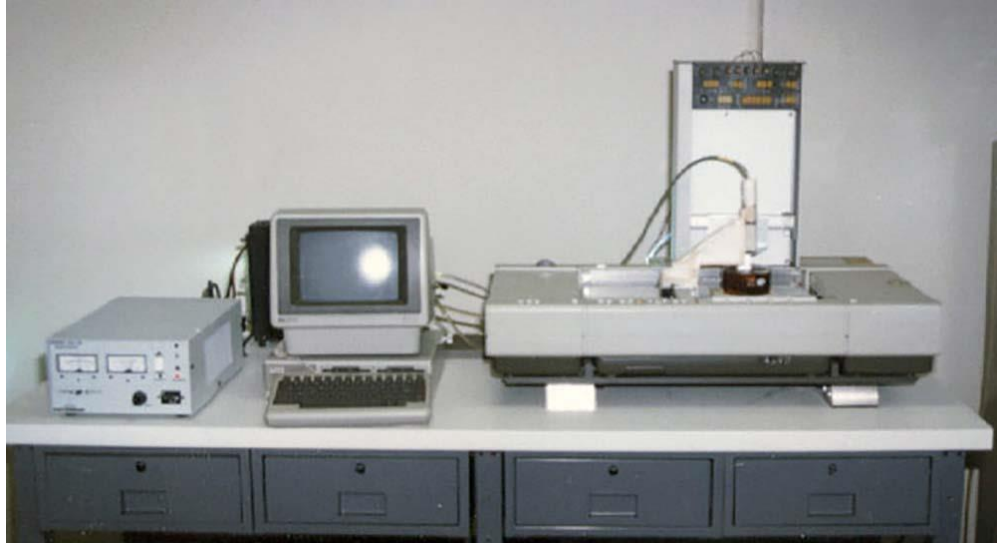
Aditivna tehnologija koju koriste 3D printeri prvobitno se poistovjećivala s tehnologijom brze izrade prototipova (*Eng. Rapid prototyping*). Izraz brza izrada prototipova koristi se u raznim industrijama kako bi se opisao proces ubrzanog razvoja sustava ili pojedinog dijela proizvoda prije izrade njegove konačne verzije. S razvojem ove tehnologije širilo se i njeno područje primjene, a kvaliteta krajnjeg proizvoda dobivenog ovom tehnologijom je porasla. Poboljšanja u kvaliteti strojeva omogućili su da se mnogi dijelovi izravno proizvode aditivnim tehnologijama, tako da ih više nije ispravno nazivati prototipovima. Pojam „brza izrada prototipova“ također zanemaruje osnovni princip na kojem se rade ovi strojevi, pa je tako Američko društvo za ispitivanje i materijale (*Eng. American Society for Testing and Materials – ASTM*) usvojilo novu terminologiju te njihovi standardi za navedenu tehnologiju danas koriste izraz aditivna proizvodnja (*Eng. Additive Manufacturing*). [8]

3D printanje, razlikuje se u usporedbi sa subtraktivnim procesima koji zahtijevaju da se materijal mehanički deformira ili uklanja tijekom obrade (poput tokarenja ili glodanja). Također, 3D printanje se razlikuje od procesa poput injekcijskog prešanja plastike i lijevanja pod pritiskom, jer se u tim slučajevima materijali tale i stavljaju u kalupe fiksnog oblika i veličine. Navedene tehnologije izrade dijelova optimalne su za proizvodnju identičnih ili sličnih dijelova u velikim količinama, ali su neefikasne za proizvodnju predmeta u malim količinama ili predmeta koji zahtijevaju česte preinake i podešavanja dizajna. U takvim slučajevima 3D printeri imaju veliku prednost, jer 3D ispis nema troškove promjene dizajna predmeta (osim troška projektanta) te ima mogućnost proizvesti jedinstvene dijelove uz niske troškove izrade. Dok se procesi strojne obrade, injektiranja i lijevanja koriste u tvornicama desetljećima, tehnika aditivne proizvodnje donosi prednosti poput jednostavnosti izrade prototipova i predmeta značajno povećane geometrijske složenosti.

5.2. Povijesni pregled 3D printanja

Tehnologija 3D printanja puno je mlađa od tehnologija razvijenih za povratno inženjerstvo. Iako je razvojni ciklus 3D printanja relativno kratak, zahvaljujući današnjem konkurentnom tržištu i kratkom vremenu razvoja novih proizvoda, tehnologija 3D printanja vrlo se brzo razvila.

Povijest 3D printanja započinje u Japanu 1981. godine zahvaljujući doktoru znanosti Hideo Kodami, japanskom inženjeru i dizajneru, koji je tada predao svoj patent za uređaj koji je opisao kao uređaj za brzo prototipiranje koji koristi laser i foto-osjetljiv materijal u obliku smole. Dr. Kodama imao je rok od godine dana da dovrši svoj patent, no u nedostatku vremena i financija nije uspio u tome, pa mu patent na kraju nije odobren. Ideja o uređaju za brzo prototipiranje nastavila se razvijati u Francuskoj 80-tih godina prošlog stoljeća zahvaljujući inženjerima Olivier de Witteu, Jean-Claude Andréu i Alain le Méhautéu. Le Méhauté i de Witte pokušali su izraditi i patentirati uređaj za brzo prototipiranje koji bi koristio laser i tekuće monomere za izradu čvrstih 3D objekata, no ideja im je bila odbijena zbog nedostataka znanstvenih podataka i jednadžbi. Naknadno im se pridružio i Andréu, znanstvenik Francuskog nacionalnog centra, te su se zajedno prijavili za odobrenje novog patenta 1984. godine, no zbog neostataka financija, nisu uspjeli nastaviti sa svojim projektom. Nakon niza neuspjelih pokušaja patentiranja uređaja za 3D printanje, 1986. godine Amerikancu Charlesu Hullu odobren je patent nazvan „Stereolitography“, koji je poznat kao prvi uređaj za 3D printanje. Charles Hull radio je za tvrtku koja je proizvodila namještaj te je želio pronaći inovativni, efikasniji način za izradu malih, po narudžbi rađenih dijelova (*Eng. Custom*). To mu je pošlo za rukom izumom stroja koji uporabom UV lampe i foto-osjetljive smole aditivnim načinom proizvodnje izrađuje dijelove. Iste je godine Hull osnovao tvrtku „3D Systems“ koja je danas jedan od lidera na tržištu 3D printanja. 1988. godine Hull je predstavio prvi stereolitografski (*Eng. Stereolitography - SLA*) komercijalizirani 3D printer (*Slika 5.2-1*).



Slika 5.2-1Prvi komercijalni 3D priner kojeg je razvio Charles Hull [15]

Stereolitografija je aditivni način proizvodnje koji stvara čvrste dijelove iz CAD crteža pomoću tekuće plastike, koja se učvršćuje pomoću ultraljubičaste laserske svjetlosti (pojam je poznat i kao optička izrada) Danas su uz stereolitografske 3D printere najzastupljeniji printeri s FDM/FFF i SLS tehnologijama, a razvijeno je još 7 manje poznatih metoda 3D printanja.

6. FAZE PROCESA 3D PRINTANJA

Postupak 3D printanja aditivnim tehnologijama odvija se u nekoliko koraka kako bi od virtualnog CAD modela dobili fizički dio. Sam postupak djelomično se razlikuje ovisno o svrsi korištenja i specifikacijama samog dijela.

Za proizvodnju malih, relativno jednostavnih proizvoda, 3D printanje može se koristiti samo za izradu modela radi vizualizacije, dok složeniji proizvodi s kompleksnijim ciklusom razvoja proizvoda mogu uključivati 3D printere tijekom brojnih faza i iteracija tijekom razvojnog procesa. Nadalje, rane faze razvojnog procesa često zahtjevaju samo grub, površan prikaz geometrije dijela, pri čemu se aditivne tehnologije koriste zbog brzine kojom se takvij dijelovi mogu proizvesti. Svaki od navedenih primjera, barem do određenog stupnja, uključuje 8 osnovnih faza postupka 3D printanja (*Slika 6-1*).

6.1. Faza razvoja CAD modela

Svi dijelovi izrađeni aditivnom tehnologijom polaze iz digitalnog 3D modela koji u potpunosti opisuje vanjsku geometriju predmeta. Ova faza može uključivati uporabu bilo kojeg CAD softvera, s kojim kao krajnji rezultat možemo dobiti 3D prikaz črstog tijela ili njegove vanjske površine. Također, za dobivanje prikaza predmeta u digitalnom obliku možemo se koristiti i tehnologijom za obrnuto inženjerstvo.

6.2. Pretvorba modela u STL format

S obzirom da gotovo svaki stroj koji koristi aditivne tehnologije ima softver koji podržava datoteke s 3D modelom u STL formatu, pretvorba modela u STL format postao je standardni korak u postupku 3D printanja. STL datoteka opisuje vanjske zatvorene površine izvornog CAD modela i čini osnovu za izračune koji služe za razgradnju 3D modela na poprečne presjeke.

6.3. Prijenos modela na stroj za 3D printanje i manipulacija STL datotekom

3D model u obliku STL datoteke moramo prije printanja postaviti u ispravni položaj i orijentaciju u prostoru kako bi printanje bilo lakše izvedivo. Također, u obzir uzimamo i veličinu predmeta koju trebamo prilagoditi veličini radnog prostora 3D printera. Ukoliko je predmet prevelik, možemo ga skalirati (eng. Scale) ili ga rastaviti u više dijelova. Tako pripremljenu STL datoteku šaljemo na 3D printer.

6.4. Priprema stroja za printanje

Svaki stroj koji koristi metodu aditivne proizvodnje prije samog procesa izrade mora biti ispravno pripremljen za rad. Pripremanje stroja za rad uključuje namještanje postavka koje se odnose na parametre izrade kao što su ograničenje materijala, izvor energije, debljina jednog poprečnog sloja, vrijeme izrade i slično.

6.5. Izgradnja fizičkog dijela

Nakon što su svi parametri za izgradnju predmeta određeni, sam proces izgradnje je uglavnom automatizirani proces i stroj može raditi bez nadzora. U ovoj fazi potrebno je povremeno nadgledati stroj kako bi bili sigurni da nije došlo do grešaka poput nestanka struje ili materijala za izradu ili su se pojavile nekakve softverske greške.

6.6. Uklanjanje dijela sa stroja za printanje

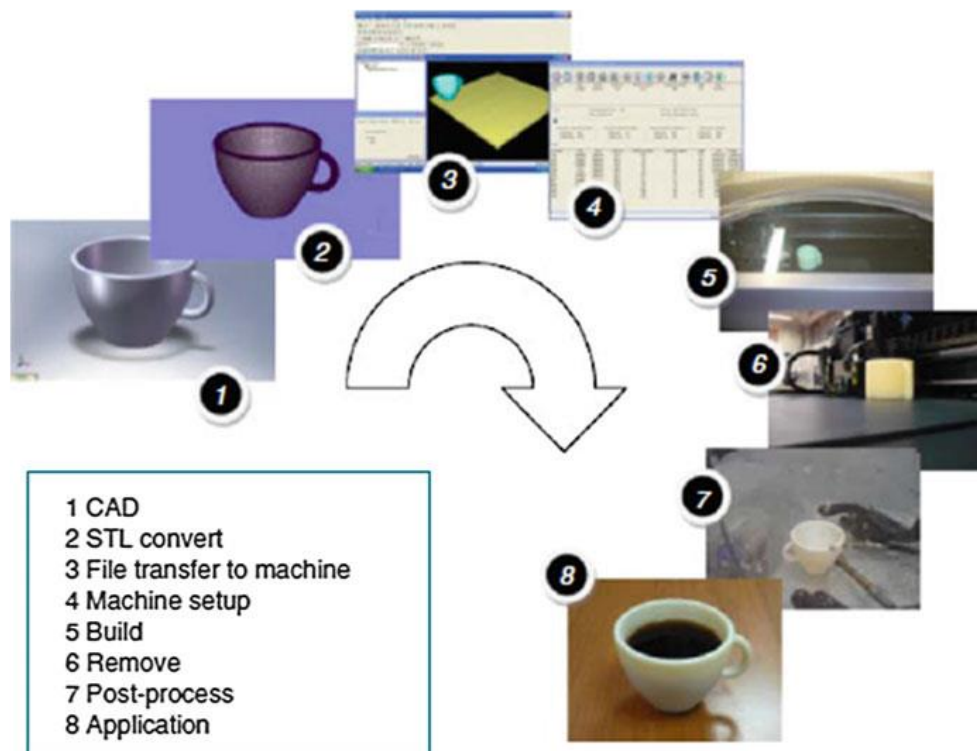
Nakon što je stroj gotov s izradom predmeta i prestao je s radom, novonastali predmet možemo sigurno ukloniti s radne jedinice stroja. S obzirom da je sam stroj vrlo složen i krhak, moramo biti sigurno da nema aktivno pokretnih dijelova prije interakcije sa strojem, kako ga ne bismo oštetili. Također, pojedini 3D printeri imaju sigurnosne blokade koji onemogućavaju interakciju sa strojem dok temperatura nakon izrade ne postigne određenu vrijednost.

6.7. Naknadna obrada/čišćenje dijela

Nakon uklanjanja sa stroja, predmetu je često potrebno dodatno čišćenje prije nego bude spreman za upotrebu. Predmet u ovoj fazi može krhak te može sadržavati potporne značajke koje se moraju ukloniti prije upotrebe. Kako predmet ne bi oštetili, ovaj korak zahtjeva vrijeme i pažljivo ručno rukovanje. 3 korak, odnosno manipulacija 3D datotekom, može znatno olakšati čišćenje predmeta nakon izgradnje.

6.8. Završna obrada

Ovaj korak je najraznolikiji dio procesa izrade predmeta aditivnim tehnologijama. Uključuje sve dodatne obrade koje predmet zahtjeva prije nego što bude prihvatljiv za upotrebu. Na primjer, izgrađeni dijelovi mogu zahtijevati temeljne premaze radi očuvanja materijala ili bojanje iz estetskih razloga; u završnoj fazi brušenjem, poliranjem ili sličnim procesima postizemo i željenu hrapavost površine. Također, može se zahtijevati da se izgrađeni predmet sastavi s drugim mehaničkim ili elektroničkim komponentama, koje mogu (ali i ne moraju) biti izrađene aditivnim tehnologijama, kako bi se formirao konačni proizvod.



Slika 6-1 Slikovni prikaz procesa 3D printanja od CAD modela do gotovog proizvoda. Koraci su usklađeni s koracima opisanima u poglavljima od 6.1. do 6.8. [8]

7. SKENIRANJE POKLOPCA ZA VENTILACIJU U AUTOMOBILU

7.1. ATOS Q 3D optički skener

3D skener korišten za praktični dio ovog završnog rada je ATOS Q 3D skener njemačke tvrtke GOM Metrology (Slika 7-1). ATOS Q je skener posebno razvijen za industrijsku upotrebu, relativno je kompaktnog dizajna, a optički i elektronički sustavi skenera otporni su na prašinu i prskanje što ovaj skener čini jednostavnim za premještanje iz mjerne sobe u proizvodne pogone.



Slika 7-1 ATOS Q 3D skener [16]

ATOS Q ima projektor linijskih uzoraka plave boje te dvije kamere koje snimaju projekcije linija i rade po principu stereo kamere (stereo kamere su dvije obične kamere na stalnoj međusobnoj udaljenosti koje snimaju istu scenu te tako imaju mogućnost dobivanja informacije o dubini scene). Tehnologija uskopojasnog plavog svjetla koju koristi ATOS Q je novije generacije i omogućava filtriranje ometajuće svjetlosti koja dolazi iz okoline tijekom snimanja. Zahvaljujući trima setova leća na kamerama, ima mogućnost mijenjati mjerni volumen 3D skenera ovisno o potrebama, tj. o veličini predmeta koji skeniramo. Zahvaljujući izmjenjivim lećama omogućeno je precizno mjerenje malih ili srednjih dijelova predmeta. ATOS Q skeneri na tržištu postoje u dvije varijante: oni koji mogu snimiti do 8 milijuna koordinatnih točaka po slici te oni koji ih mogu snimiti 12 milijuna. Verzija korištena za potrebe ovog rada je 12M, odnosno ona koja snima 12 milijuna koordinatnih

točaka po slici. Ovaj 3D skener je izuzetno brz, za svaku snimku je potrebno dvije do tri sekunde za obradu. Detaljnija specifikacija skenera se može vidjeti u *tablici 7-1*.

Tablica 1 Specifikacije ATOS Q 3D skenera [17]

Izvor svjetla	LED rasvjetna tijela
Maksimalna rezolucija	12 milijuna
Mjerno područje [mm ²]	100 x 70 do 500 x 370
Udaljenost između točaka [mm]	0,03 do 0,12
Optimalna udaljenost [mm]	490
Masa [kg]	4
Dimenzije [mm]	340 x 240 x 83
Mjerni volumen [mm]	100, 170, 270, 350 i 500

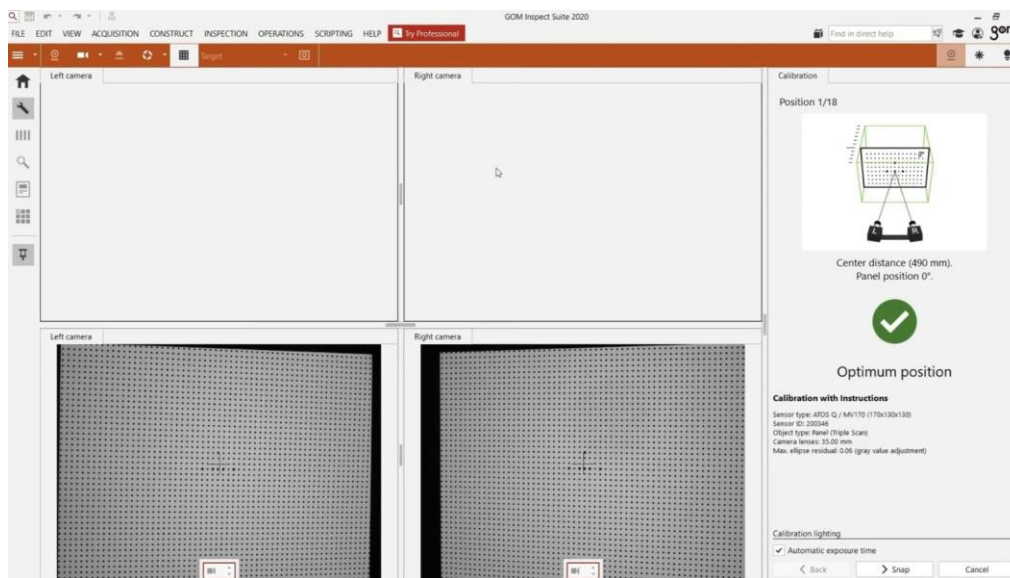
7.2. Postupak skeniranja predmeta

Kao što je napomenuto u uvodu, predmet koji će biti skeniran u sklopu završnog rada biti će plastični poklopac od ventilacije iz unutrašnjosti automobila. Poklopac je oštećen kao što se vidi slici (*Slika*). Dio predmeta je ofarban privremenim bijelim mat premazom kako zbog odsjaja 3D skener ne bi imao problema s prikupljanjem podataka o površini predmeta.



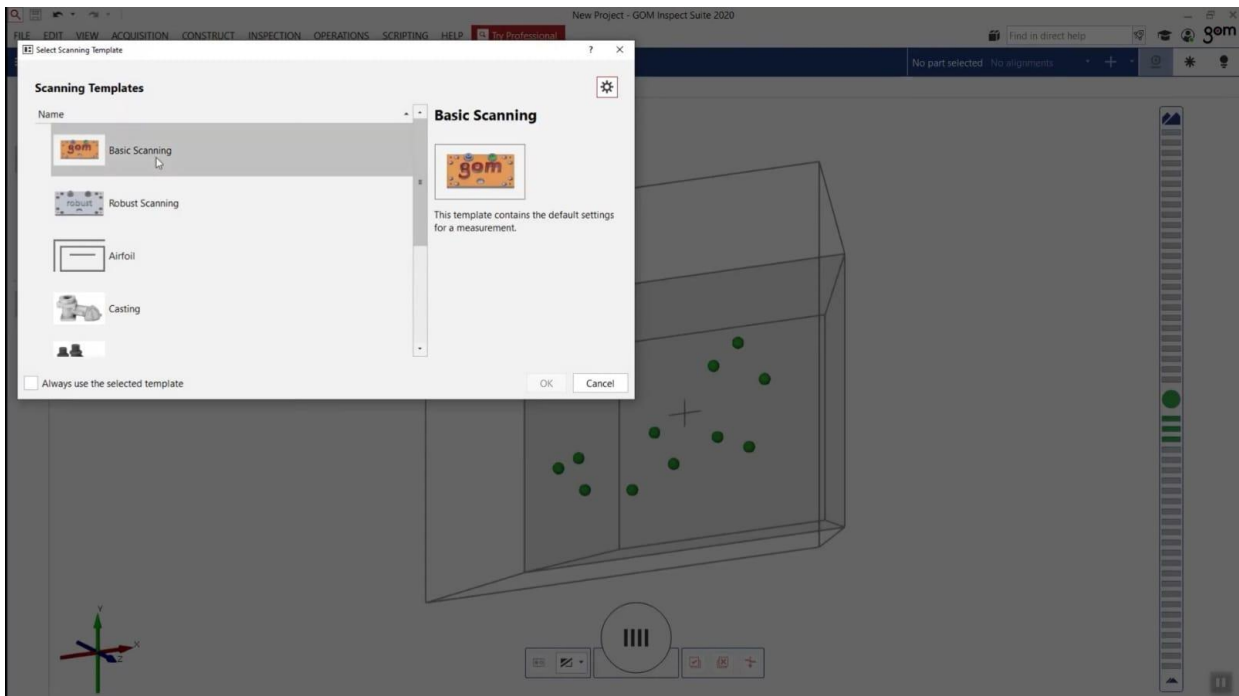
Slika 7-2 Plastični poklopac od ventilacije automobila - predmet skeniranja

Priprema 3D optičkog skenera sastoji se od pokretanja programa GOM Inspect i 3D skenera ATOS Q kojim upravljamo preko navedenog programa. Proces zagrijavanja 3D skenera traje između 15 i 20 minuta. Za što točnije i kvalitetnije 3D skeniranje potrebno je kalibrirati skener. Svaki set leća na kamerama, odnosno svaki određeni mjerni volumen ATOS Q skenera ima svoju kalibracijsku ploču. Proces kalibriranja se sastoji od mjerenja temperature okoline u kojoj se skenira, unosa iste u softver te skeniranja kalibracijske ploče po različitim visinama i različitim kutovima između ploče i kamera skenera (Slika 7-2).



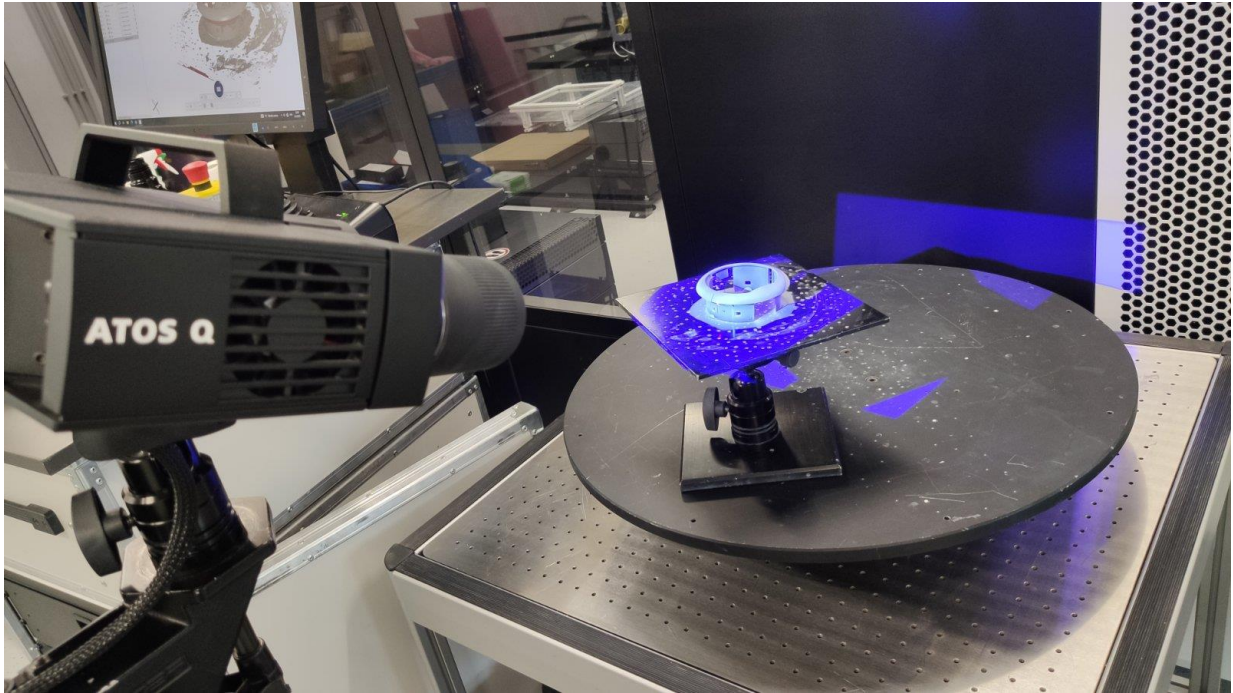
Slika 7-3 Skeniranje ploče za kalibriranje predmeta

Nakon što je skener kalibriran, možemo pozicionirati predmet koji skeniramo na rotacijski stol te ga pomoću ljepljive gline pričvrstiti za podlogu. Na rotacijskom stolu nalaze se referentne točke koje pomažu softveru da spoje različite snimke predmeta u jednu cijelinu. U programu GOM Inspect odaberemo opciju „New Project“ te u gornjem lijevom kutu u padajućem izborniku odaberemo naredbu „Digitize“. Prije početka skeniranja na glavnoj alatnoj traci odaberemo naredbu „Scanning Template“, nakon čega odabiremo vrstu predloška kojeg skeniramo. Odabirom vrste predloška odabiremo predefinirani skup parametara kojim pomažemo softveru da napravi najprecizniji mogući 3D sken predmeta. U ovom slučaju, odabran je „Basic Scanning“ predložak (Slika 7-3).



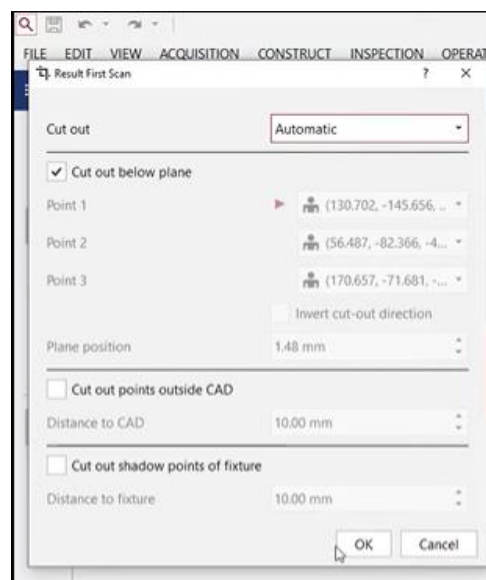
Slika 7-4 Odabir vrste predloška za skeniranje

Ukoliko je uz skener imamo i rotacijski stol povezan s računalom, imamo opciju namjestiti skeniranje predmeta uz rotiranje rotacijskog stola između pojedinih koraka skeniranja. U našem slučaju odabrano je 8 koraka skeniranja, gdje je između svakog koraka skeniranja rotacijski stol zarotiran za 45 stupnjeva. Nadalje, klikom na žuti gumb u donjem dijelu sučelja programa pokrećemo prvu seriju skeniranja (*Slika 7-4*).



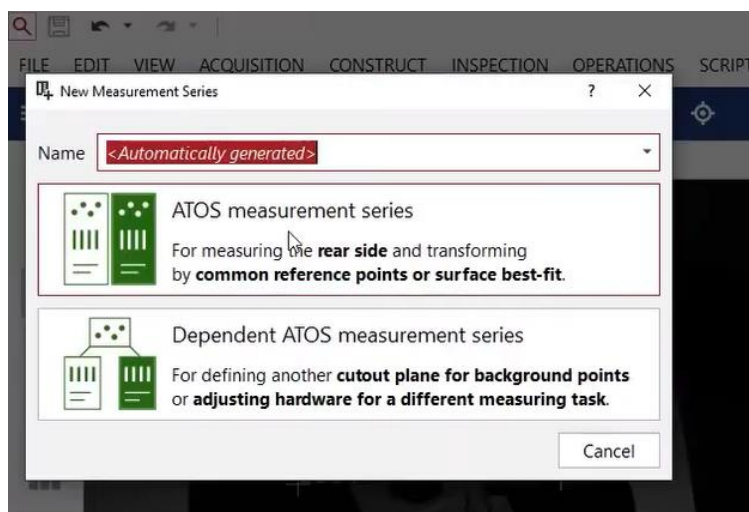
Slika 7-5 Prva serija skeniranja poklopca od ventilacije automobila ATOS Q 3D skenerom

Ne trebamo namještati parametre skeniranja, jer softver automatski izračunava optimalne parametre za skeniranje predmeta. Nakon što je skener prikupio potrebne podatke, prikazuje nam se opcija „Automatic Cut Out“ koja automatski čisti rezultat skeniranja od dijelova rotacijskog stola i pozadine te nam ostaje samo oblak točaka predmeta (Slika 7-5).



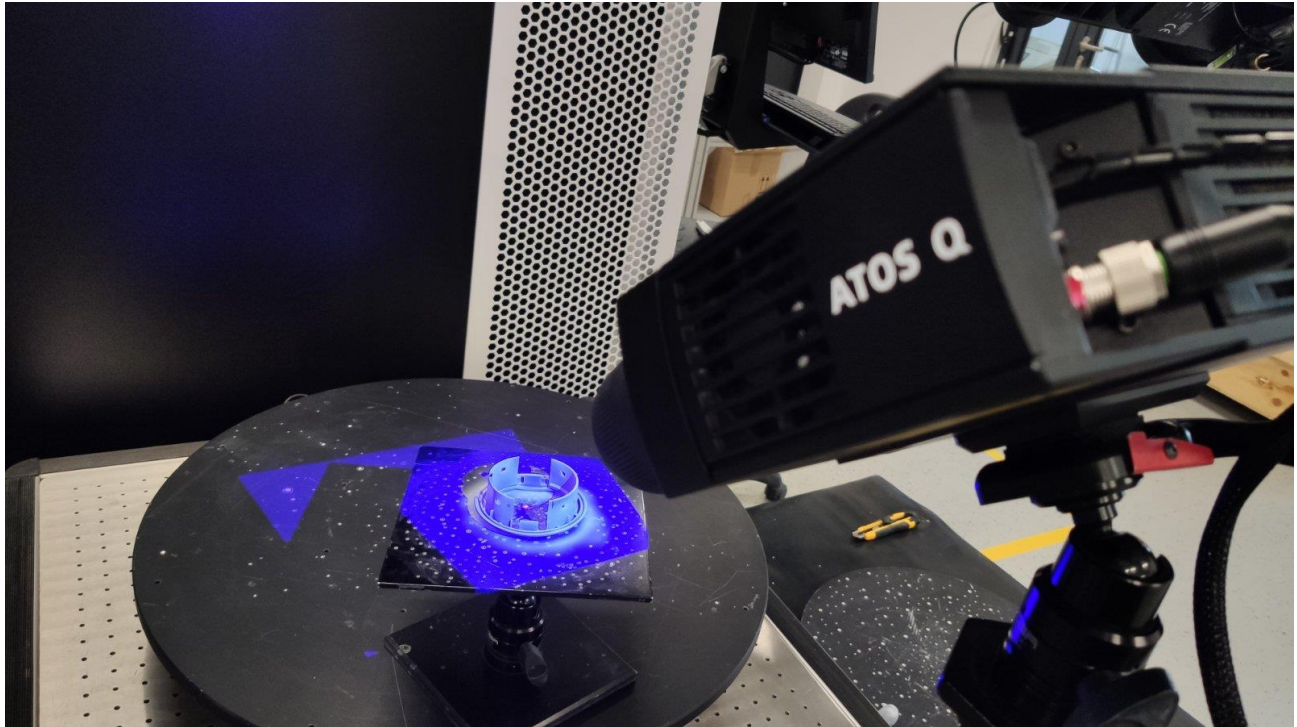
Slika 7-6 naredba "Automatic Cut Out" kojom brišemo skeniranu pozadinu nakon skeniranja

Kako bi 3D skener mogao prikupiti podatke o koordinatnim točkama kompletne površine predmeta, okrenut ćemo ga na drugu stranu, a u GOM Inspect programu ćemo sa glavne alatna trake odabrati naredbu „New Measurement Series“. Zatim odabiremo opciju „ATOS measurement series“ nakon koje nam se otvara prostor za novu seriju skeniranja (Slika 7-6).



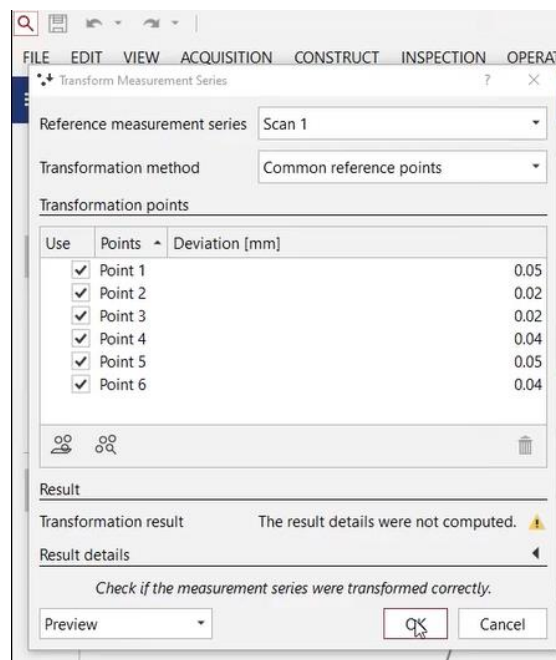
Slika 7-7 "New Measurement Series" naredba kojom kreiramo novu seriju skeniranja predmeta

Odabiremo iste automatske opcije kao u prvoj seriji skeniranja te ponovo skeniramo predmet (Slika 7-7). Zahvaljujući referentnim točkama na predmetu, GOM Inspect softver u mogućnosti je spojiti više serija skeniranja u jednu cijelinu.



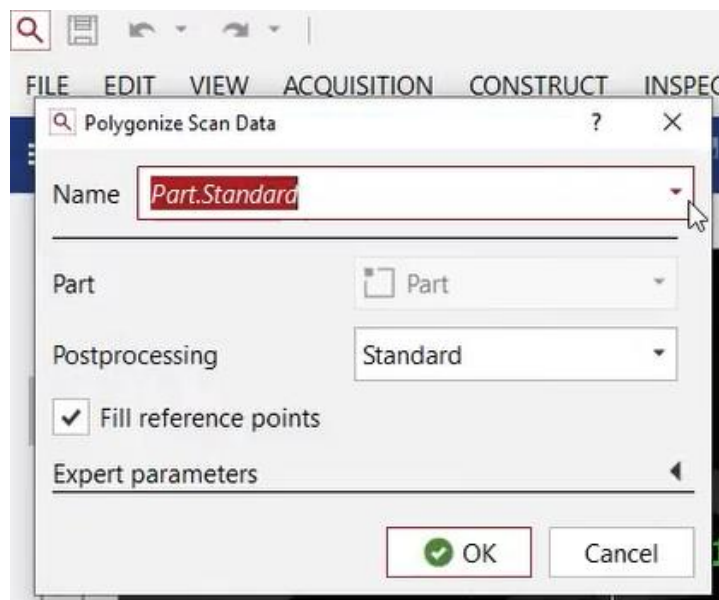
Slika 7-8 Druga serija skeniranja poklopca od ventilacije automobila ATOS Q 3D skenerom

3D sken gornje i donje strane poklopca za ventilaciju, odnosno prvu i drugu seriju skeniranja, povežujemo u jednu cijelinu naredbom „Transform Measurement Series“ koja se nalazi na glavnoj alatnoj traci (Slika 7-8).



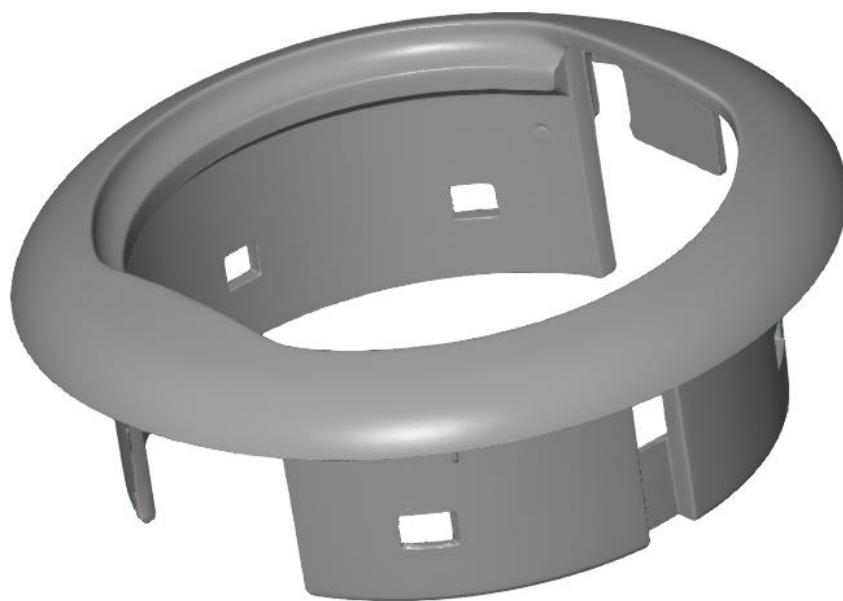
Slika 7-9 "Transform Measurement Series" naredba kojom povežujemo različite serije skeniranja u jednu cijelinu

Nakon što smo dobili kompletan oblak točaka, preostaje nam samo povezati dobivene točke linijama kako bi dobili površinu koja je aproksimacija fizičkog predmeta, metodom poligonizacije točaka. Poligonizacija točaka ostvaruje se naredbom „Polygonize Scan Data“ koja se nalazi na glavnoj alatnoj traci (Slika 7-9). Prije poligonizacije točaka, softver ima mogućnosti popunjavanja rupa u oblaku točaka, no ta se opcija koristi samo u specifičnim slučajevima.



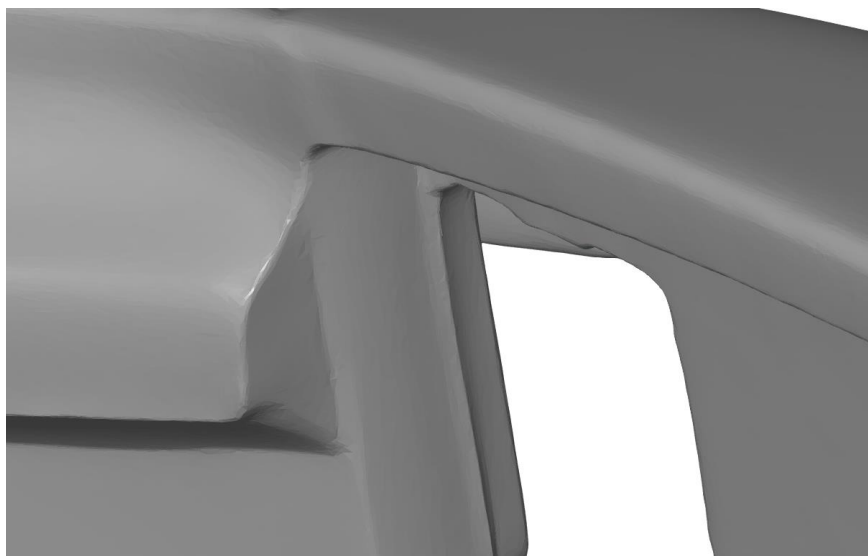
Slika 7-10 Naredba "Polygonize Scan Data" kojom poligoniziramo postojeći oblak točaka

Rezultat 3D skeniranja je digitalizirani oblik poklopca za ventilaciju automobila u STL formatu (Slika 7-10). Ovakav poligonizirani 3D model ne može se koristiti za izradu tehničke dokumentacije predmeta, jer bi za to trebali prvo napraviti jasno definirani CAD model pomoću softvera kao što je Geomagic Design X ili slično. S obzirom da izrada tehničke dokumentacije u ovom slučaju nije potrebna, nema potrebe za razvojem CAD modela.



Slika 7-11 Poligonizirani model poklopca za ventilaciju

Iako ovakav model ima nesavršenosti i nema jasno definiranu geometriju (*Slika 7-11*), zbog velike točnosti ATOS Q skenera dovoljno je precizan za svoju svrhu.



Slika 7-12 Detalj modela poklopca za ventilaciju na kojem se jasno vide njegove nesavršenost

7.3. Prusa i3 MK3S 3D printer

Printer korišten za praktični dio ovog rada je Prusa i3 MK3S, 3D printer Češke tvrtke Prusa Research (*Slika 7-13*) koji koristi tehnologiju taložnog srašćivanja (*Eng. Fused Deposition Modeling - FDM*). Navedeni printer konstruiran je nakon niza iteracija Prusa i3 serije printera te je danas jedan od najčešće korištenih 3D printera u svijetu.



Slika 7-13 Prusa i3 MK3S 3D printer [17]

Tehnologija taložnog srašćivanja je danas najraširenija i najjeftinija tehnologija 3D printanja, a razvila ju je Američka tvrtka Startasys 1992. godine. Ova tehnologija bazira se na istiskivanju polimera u obliku filameta koji se nanosi sloj po sloj te tako izgrađuje 3D model (filament je naziv za termoplastičnu sirovinu koju koriste 3D printeri za izgradnju modela taloženjem). Istiskani polimer se gura kroz komoru s grijačem pomoću ekstrudera filameta u obliku kotača nakon čega rastaljeni polimer izlazi kroz nosnicu (*Eng. Nozzle*) te gradi 3D model. Glavni dijelovi 3D printera koji koristi FDM tehnologiju su ekstruder filameta, grijač, nosnica te radna površina printera (*Eng. Bed*) s grijačem. Glavna prednost ove tehnologije je široki raspon materijala koji se mogu koristiti za izradu dijelova, stoga dijelovi izrađeni 3D printerima s FDM tehnologijom imaju bolja tehnička svojstva u odnosu na dijelove izrađene 3D printerima baziranim na drugim tehnologijama. S druge strane, negativna strana printera s FDM tehnologijom je veliko vrijeme izrade dijelova, zahvaljujući točkastom

iscrtavanju materijala koji uključuje mnoge promjene smjera tijekom rada. Detaljne specifikacije Prusa i3 MK3S printera nalaze se u *tablici 7-2*.

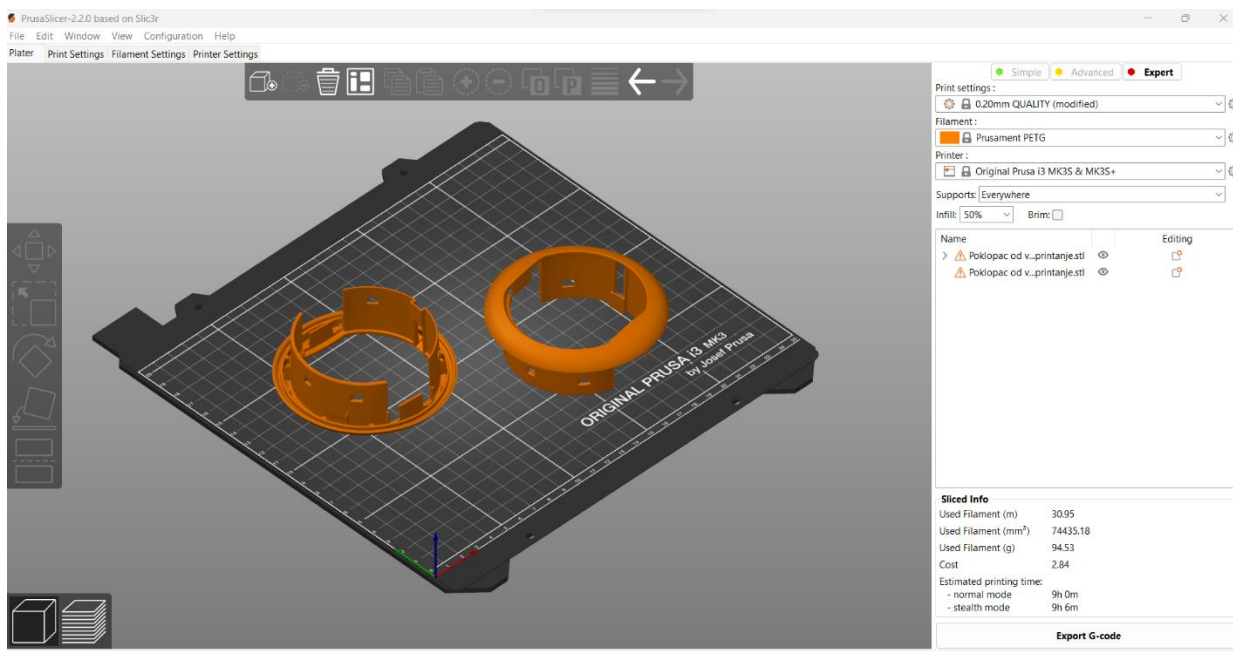
Tablica 7-2 Specifikacije Prusa i3 MK3S 3D printera [18]

Radni volumen [mm]	25 x 21 x 21
Visina sloja [mm]	0,05 – 0,35
Promjer nosnice [mm]	0.4
Promjer filamenta [mm]	1,75
Maksimalna brzina [mm/s]	200
Maksimalna temperatura nosnice [°C]	300
Maksimalna temperatura podloge [°C]	120
Model ekstrudera	Bondtech gears, E3D V6 HotEnd
Materijal podloge	Čelik za opruge
Dimenzije printera [mm]	500 x 550 x 400
Potrošnja energije [W]	PLA: 80; ABS: 120

7.4. Postupak 3D printanja predmeta

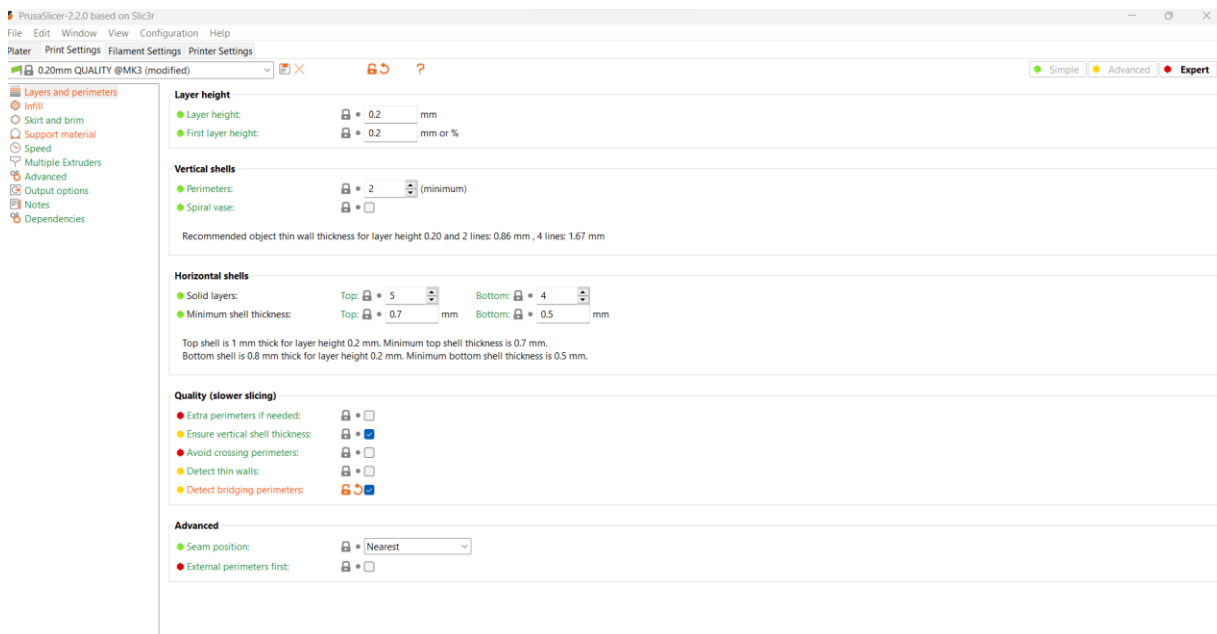
Priprema 3D printera za printanje sastoji se od kalibracije printera za rad i određivanja parametara za printanje. Prije kalibracije moramo biti sigurni da je printer na ravnoj površini te da je površina horizontalna. Ukoliko materijal printanja nije postavljen na uređaj, treba ga se postaviti na uređaj i ubaciti u glavu uređaja pomoću naredbe „*Load filament*“.. Glava uređaja treba biti prethodno zagrijana pomoću opcije „*Preheat*“. Kalibracija uređaja sastoji se od kalibracije X, Y i Z osi i radne podloge na način da se prate koraci na LCD ekranu printera. Za kalibraciju osi potrebno je na podlogu staviti A4 papir i provjeriti hoće li nosnica printera pokidati papir; ukoliko nosnica ne pokida papir, kalibracija je uspješno izvedena. Kalibracija radne površine izvodi se provjerom debljina sloja uzorka koju izlazi iz nosnice nije prozirna i ne odvaja se od podloge (vrijednost Z osi na LCD ekranu trebala bi biti otprilike -1 mm).

Nakon što je printer kalibriran, u PrusaSlicer softver odabiremo printer kojim ćemo printati model, materijal iz kojeg će biti izgrađen te importiramo 3D model u obliku STL datoteke (*Slika 7-14*).

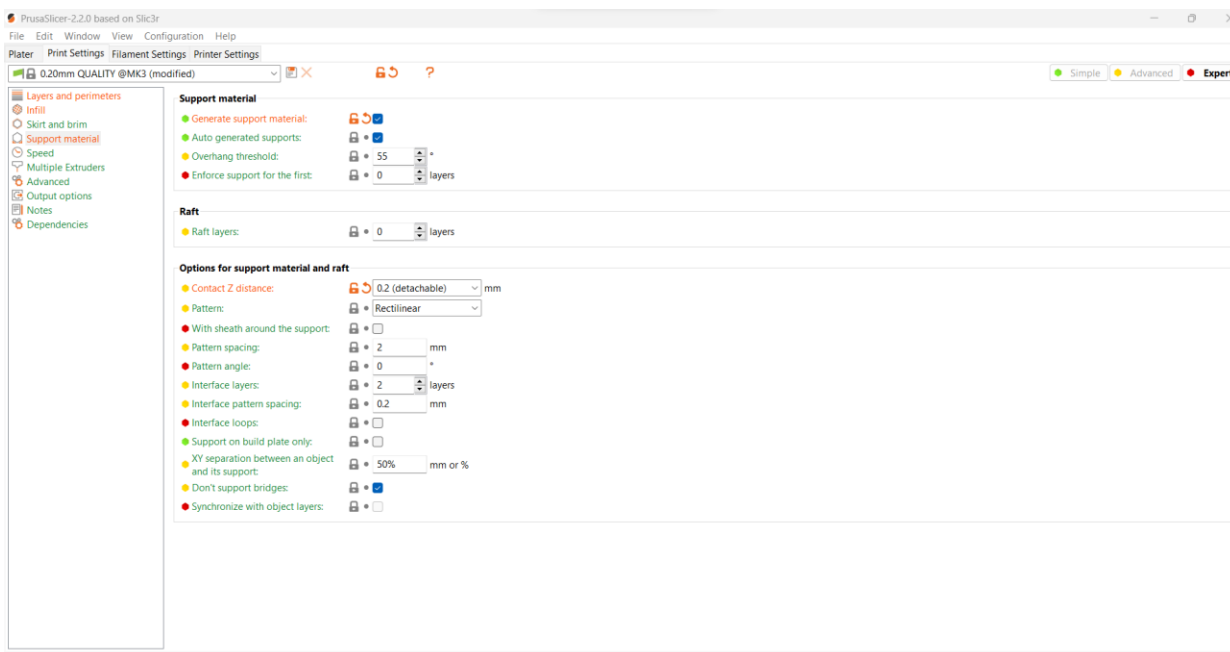


Slika 7-14 3D model poklopca za ventilaciju u PrusaSlicer softveru

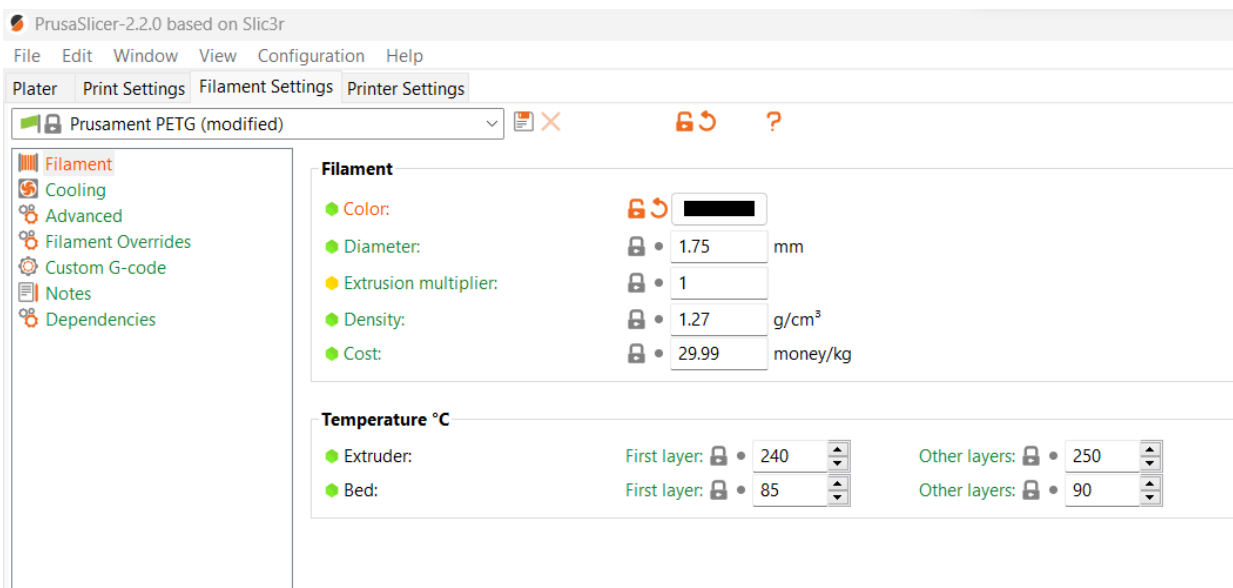
Materijal iz kojeg gradimo predmet biti će polietilen tereftalat glikol (*Eng. polyethylene terephthalate glycol - PETG*). PETG je vrsta polimera s dobrom otpornošću na udarce, dobrih toplinskih karakteristika (pri hlađenju se hladi s gotovo zanemarivom deformacijom), glatke površine, bez mirisa i relativno visoke čvrstoće, stoga je vrlo čest izbor materijal filameta. Nakon importiranja 3D modela u softver, ovisno o materijalu i geometriji predmeta, određujemo parametre slojeva (Slika 7-15), pomoćnog materijala (Slika 7-16) te filameta (Slika 7-17). Iz određenih parametara vidimo da će ispuna predmeta biti 50%, pomoćni materijal će biti oko cijelog predmeta, visina jednog sloja je 2mm, temperatura podloge za prvi sloj je 85°C, a za ostale slojeve je 90°C. Vrijeme procijenjeno za izradu predmeta je 9 sati. Ostale parametre možemo isčitati iz slika 7-15, 7-16 te 7-17. Nakon što smo odredili sve potrebne parametre, u donjem desnom kutu na odabiremo opciju „Slice now“ kojom dobivamo aproksimaciju našeg 3D modela kakav će biti nakon izgradnje u slojevima (Slika 7-18). Dodatni materijal koji je na ekranu prikazan zelenom bojom nije dio predmeta, već je pomoćni materijal koji će nakon printanja biti odvojen od predmeta



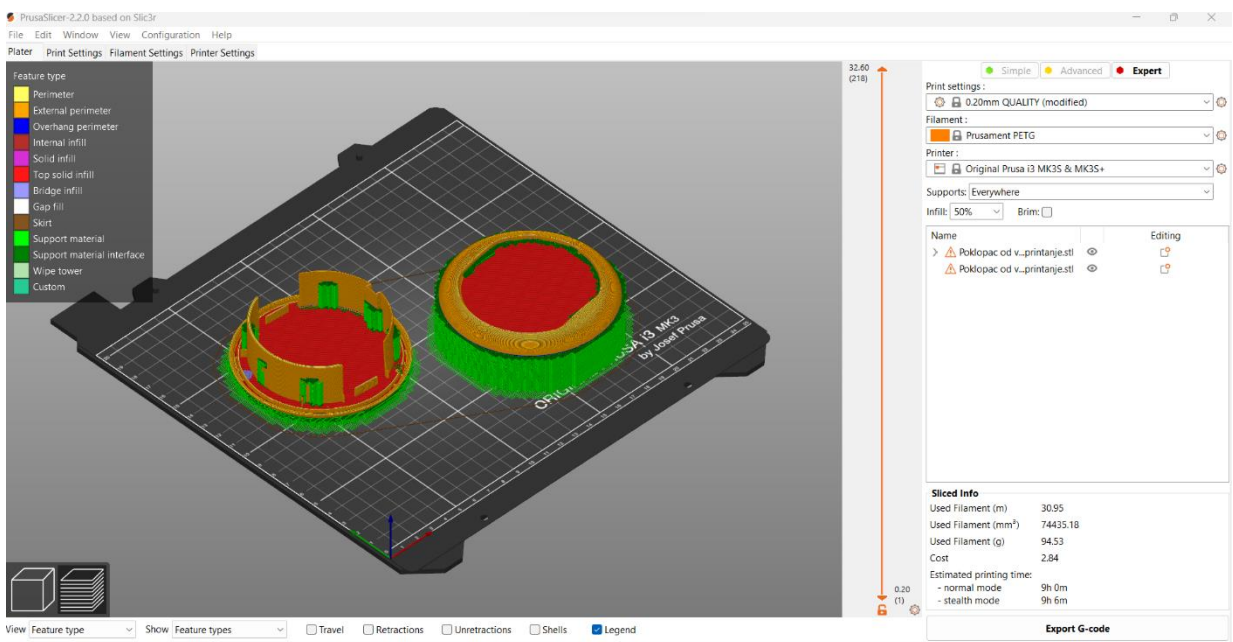
Slika 7-15 Parametri slojeva printanog predmeta



Slika 7-16 Parametri pomočnega materijala za izgradnjo predmeta



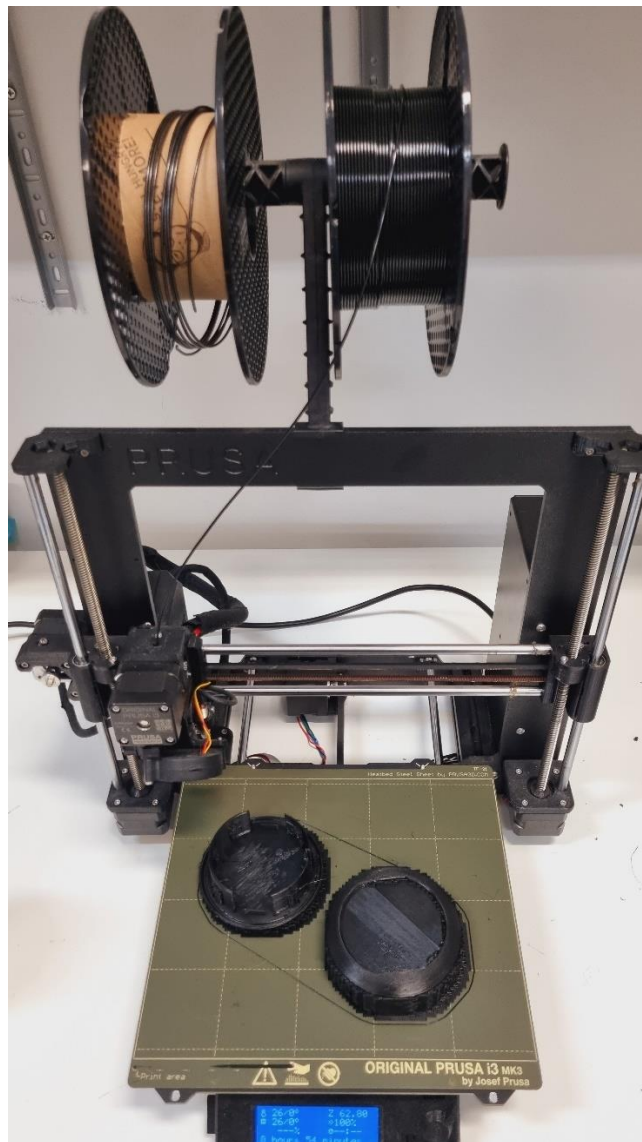
Slika 7-17 Parametri filameta za 3D printanje



Slika 7-18 Aproksimacija 3D modela predmeta nakon izgradnje u slojevima (nakon "slajsanja")

Nadalje, odabirom opcije „Export G-code“ dobivamo G kod koji spremamo na memorijsku karticu koju ubacujemo u 3D printer te započinjemo sa printanjem. G kod je programski jezik koji se koristi za programiranje automatskih alatnih strojeva, poput 3D printera.

Nakon što je printer završio s radom (*Slika 7-19*), predmet je maknut s radne površine i pomoćni materijal je odstranjen (*Slika 7-20*). Kao što se može vidjeti iz priloženih slika, isprintane su dvije inačice modela, koje zbog različite orijentacije imaju drugačiji raspored pomoćnog materijala, pa je sukladno tome i kvaliteta samog izratka drugačija. Nadalje je prikazan samo jedan isprintani model, jer je printanje drugog modela bilo neuspješno, zahvaljujući lošijem pozicioniranju predmeta. Nakon završne obrade, tj. odrstanjivanja preostalih sitnih dijelova pomoćnog materijala na mjestima na kojima je poklopac za ventilaciju u kontaktu s ostatkom automobila, predmet je uporabljiv i može zamjeniti oštećeni dio.



Slika 7-19 3D printer nakon završetka rada



Slika 7-20 Poklopac od ventilacije automobila izgrađen 3D printerom (uspješno isprintani model)

8. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada bio je upoznati se s izradom 3D modela primjenom metode povratnog inženjerstva. Tijekom izrade rada stečena su znanja o metodi povratnog inženjerstva u domeni strojarstva, što uključuje tehnologije 3D skeniranja i 3D printanja predmeta. Također, uz definiranje glavnih pojmova i upoznavanje s metodologijom postupaka 3D skeniranja i 3D printanja, stečena su znanja i o povijesnom razvoju spomenutih tehnologija. U sklopu praktičnog dijela ovog rada, metodom povratnog inženjerstva napravljen je fizički model plastičnog poklopca od ventilacije automobila na temelju oštećenog primjera izvornog proizvođača. Tijekom izrade modela upoznati su softveri GOM Inspect (tijekom skeniranja predmeta) i PrusaSlicer (tijekom printanja 3D modela).

Praktični dio rada uspješno je odrađen, s obzirom da je njegova poanta bila pokazati primjenu teorijskog znanja stečenog u ranijoj fazi izrade ovog rada. U procesu izrade modela metodom povratnog inženjerstva korišteni su 3D skener ATOS Q te 3D printer Prusa i3 MK3S pomoću kojih je teorijsko znanje potvrđeno u praksi. Rezultat praktičnog dijela je funkcionalni model koji može biti upotrebljen umjesto izvornog predmeta, što je na neki način i potvrda usvojenog teorijskog znanja.

Izrada 3D modela može se poboljšati izradom geometrijski definiranog 3D CAD modela na temelju poligoniziranog 3D modela koji je dobiven kao rezultat 3D skeniranja. Rezultat printanja tako bi zasigurno bio vjernija kopija originala, no u inženjerstvu ne težimo savršenom, već optimalnom rješenju, što je u ovom slučaju značilo izostaviti navedeni korak.

9. LITERATURA

- [1] T. Weyrich, M. Pauly, R. Keiser, S. Heinzle, S. Scandella, M. Gross, Post-processing of Scanned 3D Surface Data, Eurographics Symposium on Point-Based Graphics, 2004.
- [2] Z. Hercigonja, T. Krištof, Postupci brze izrade prototipova u trodimenzionalnom (3D) Ispisu, stranice 135 – 148, International Journal of Digital Technology & Economy, Volume 3, Number 2, 2018.
- [3] A. Kumar, P. K. Jain, P.M. Pathak, Reverse Engineering in Product Manufacturing: An Overview, poglavlje 39, stranice 665 – 678, DAAAM International Scientific Book, 2013.
- [4] N. Singh i dr., Reverse Engineering- A General Review, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 2012.
- [5] R. J. Abella, J. M. Daschbach, R. J. McNichols, Reverse Engineering Industrial Applications, stranice 381 – 385, Computers & Industrial Engineering, 1994.
- [6] V. Raja, K. J. Fernandes, Reverse Engineering: An Industrial Perspective, Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [7] R. H. Helle, H. G. Lemu, A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control, University of Stavanger, 4036 Stavanger, Norway, 2021.
- [8] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition, Springer-Verlag London Limited, 2015.
- [9] A. Horvat, Rekonstrukcija, aditivna izrada i funkcionalno testiranje zamjenske plastične komponente (Završni rad), Veleučilište u Bjelovaru, Bjelovar, 2020., <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:144:330520>
- [10] K. Marković, Materijali s predavanja kolegija Oblikovanje pomoću računala, Tehnički fakultet u Rijeci, 2020.
- [11] Robert W. Messler, Reverse engineering : mechanisms, structures, systems, and materials, McGraw-Hill Education, New York, 2014

- [12] W. Wang, Reverse Engineering: Technology of Reinvention, 1. izdanje, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2010.
- [13] „Boeing B-29 Superfortress“ Wikipedia, s Interneta https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_B-29_Superfortress, 5.7.2023.
- [14] „Tupolev Tu-4 (Bull)“ Military Factory, s Interneta https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.php?aircraft_id=701#images, 5.7.2023.
- [15] „Povijest 3D printanja“ 3D Globe, s Interneta <https://www.3dglobe.net/povijest-3d-printanja>, 5.7.2023.
- [16] „ATOS Q“ Topomatika, s Interneta <https://topomatika.hr/proizvodi/3d-skeneri/atos-q-vrhunski-kompaktni-skener-za-3d-mjeriteljstvo/>, 5.7.2023.
- [17] GOM Metrology, s Interneta <https://www.gom.com/>, 5.7.2023.
- [18] Prusa3D , s interneta <https://www.prusa3d.com/>, 8.7.2023.
- [19] „PETG filament“ Printer3D, s interneta <https://printer3d.hr/edukacija-i-podrska/filamenti-i-smole/petg-filament/>, 9.7.2023.

10. POPIS KRATICA

CAE – Computer-aided engineering

CAD – Computer-aided design

3D – Three-dimensional

CNC – Computer numerical control

CMM – Coordinate measuring machine

CCD – Charge-coupled device

STL – Standard tessellation language

ASTM - American Society for Testing Materials

SLA - Stereolithography

FDM – Fused Deposition Modeling

PETG - polyethylene terephthalate glycol

11. POPIS SLIKA

Slika 2-1 Vizualni prikaz procesa povratnog inženjerstva [10].....	2
Slika 2-2 Parni stroj James Watta iz 1765. godine [11].....	4
Slika 2-3 Parni stroj Herona iz Aleksandrije (lijevo) i parni stroj Jacoba Leupolda iz 1720. godine (desno) [11]	5
Slika 2-4 Američki zrakoplov „B-29 Superfortress“ [13]	6
Slika 2-5 Sovjetski zrakoplov "Tupolev Tu-4" [14].....	6
Slika 3-1 Izrada prototipa automobila u glini [10].....	8
Slika 3-2 Izrada zubnih proteza metodom povratnog inženjerstva [10]	8
Slika 4-1(a) skeniranje fizičkog dijela 3D skenerom; (b)rezultat nakon prve faze 3D skeniranja - oblak točaka; (c)rezultat druge faze 3D skeniranja - uređeni oblak točaka povezan vektorima koji tvore površinu; (d)krajnji rezultat - CAD model skeniranog dijela [14]	9
Slika 4-2 Tipični detalj rezultata skeniranja u obliku oblaka točaka, prije obrade podataka [1].....	11
Slika 4-3Sonda kontaktnog skenera prelazi preko predmeta skeniranja [6].....	11
Slika 4-4 Beskontaktni optički 3D skener [6].....	12
Slika 4-5 Vizualni prikaz razlike u skeniranju paralelnih linija ticalom i laserom. Pri skeniranju s laserom podaci o koordinatama plohe paralelne zraka lasera nisu prikupljeni [6].....	13
Slika 5-5.1-1Prikaz CAD modela predmeta (gore) i aproksimacija predmeta bazirana na principu rada ne temelju slojeva(dolje). Na donjim slikama vidi se razlika u točnosti aproksimacije predmeta kada je primarni sloj deblji (lijevo) i tanji (desno) [8].....	16
Slika 5.2-1Prvi komercijalni 3D printer kojeg je razvio Charles Hull [15]	19
Slika 6-1Slikovni prikaz procesa 3D printanja od CAD modela do gotovog proizvoda. Koraci su usklađeni s koracima opisanima u poglavljima od 6.1. do 6.8. [8]	23
Slika 7-1 ATOS Q 3D skener [16].....	24
Slika 7-2 Plastični poklopac od ventilacije automobila - predmet skeniranja	25
Slika 7-3Skeniranje ploče za kalibriranje predmeta	26
Slika 7-4 Odabir vrste predloška za skeniranje.....	27
Slika 7-5Prva serija skeniranja poklopca od ventilacije automobila ATOS Q 3D skenerom.....	28
Slika 7-6 naredba "Automatic Cut Out" kojom brišemo skeniranu pozadinu nakon skeniranja	28
Slika 7-7 "New Measurement Series" naredba kojom kreiramo novu seriju skeniranja predmeta	29
Slika 7-8Druga serija skeniranja poklopca od ventilacije automobila ATOS Q 3D skenerom	30

Slika 7-9 "Transfrom Measurement Series" naredba kojom povezujemo različite serije skeniranja u jednu cijelinu	30
Slika 7-10Naredba "Polygonize Scan Data" kojom poligoniziramo postojeći oblak točaka.....	31
Slika 7-11 Poligonizirani model poklopca za ventilaciju	32
Slika 7-12 Detalj modela poklopca za ventilaciju na kojem se jasno vide njegove nesavršenost	32
Slika 7-13 Prusa i3 MK3S 3D printer [17]	33
Slika 7-14 3D model poklopca za ventilaciju u PrusaSlicer softveru.....	35
Slika 7-15Parametri slojeva printanog predmeta	36
Slika 7-16Parametri pomoćnog materijala za izgradnju predmeta	36
Slika 7-17Parametri filameta za 3D printanje.....	37
Slika 7-18 Aproksimacija 3D modela predmeta nakon izgradnje u slojevima (nakon "slajsanja")	37
Slika 7-19 3D printer nakon završetka rada.....	38
Slika 7-20Poklopac od ventilacije automobila izgrađen 3D printerom (uspješno isprintani model)	39

12. SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je upoznati se s izradom 3D modela primjenom metode povratnog inženjerstva te s tehnologijama koje ova metoda koristi. S obzirom da je primjena povratnog inženjerstva danas veoma široka, bitno je napomenuti da se ovaj rad fokusira na primjenu povratnog inženjerstva u domeni strojarstva. Tehnologije koje su spomenute i korištene u sklopu ovog rade jesu tehnologije za 3D skeniranje i 3D printanje. Prvi dio rada je teorijski i pokriva definiranje pojmova, povijesni pregled i metodologiju spomenutih pojmova. Drugi dio rada je praktični dio u kojem se metodom povratnog inženjerstva izrađuje model oštećenog poklopca za ventilaciju automobila. Kroz praktični dio korišteni su ATOS Q 3D skener za skeniranje predmeta, zajedno sa softverom GOM Inspect u kojemu su naknadno obrađeni rezultati skeniranja, a za printanje 3D modela korišten je printer Prusa i3 MK3S i softver Prusa Slicer.

Ključne riječi: Povratno inženjerstvo, 3D skeniranje, 3D printanje, ATOS Q, Prusa i3 MK3S

13. SUMMARY

The aim of this thesis was to familiarize oneself with the creation of 3D models using the method of reverse engineering and the technologies employed by this method. Considering the wide range of applications of reverse engineering today, it is important to note that this paper focuses on its application in the field of mechanical engineering. The technologies mentioned and utilized within this paper are 3D scanning and 3D printing technologies. The first part of the thesis is theoretical and covers the definition of terms, a historical overview, and the methodology of the mentioned concepts. The second part is the practical section where a model of a damaged car ventilation cover is created using the method of reverse engineering. In the practical part, an ATOS Q 3D scanner was employed for object scanning, along with GOM Inspect software used for subsequent processing of the scanning results. The Prusa i3 MK3S printer and Prusa Slicer software were utilized for 3D model printing.

Keywords: Reverse engineering, 3D scanning, 3D printing, ATOS Q, Prusa i3 MK3S