

Oblikovanje i izrada mobilnog robota pokretanog nogama

Milković, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:208229>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Milković

Zagreb, 2024. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Petar Čurković, dipl. ing.

Student:

Ivan Milković

Zagreb, 2024. godina.

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

Zahvaljujem se mentoru, dr. sc. Petru Ćurkoviću, na pomoći pri izradi diplomskog rada, uloženom vremenu, susretljivosti, strpljenju i trudu. Zahvaljujem se obitelji Horvat na pomoći pri izradi praktičnog dijela diplomskog rada, te ustupljenoj opremi i strojevima. Zahvaljujem se svojoj užoj i široj obitelji na potpori i financijskoj pomoći tokom studiranja. Također se zahvaljujem svim kolegama i prijateljima koji su me bodrili tokom studiranja. Posebno se zahvaljujem svojoj majci na strpljenju, vjeri u moj uspjeh, te moralnoj podršci u svim trenucima mog studija.

Ivan Milković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment, mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Milković**

JMBAG: 0035213281

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Oblikovanje i izrada mobilnog robota pokretanog nogama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design and manufacture of a legged mobile robot**

Opis zadatka:

Razvoj mobilnih robota pokretanih nogama potaknut je načinima kretanja uočenim u prirodi, npr. kretanje kukaca, četveronožnih sisavaca i na kraju čovjeka. Temeljna prednost nožnog lokomotornog sustava je mogućnost kretanja koje je efikasno u različitim uvjetima i omogućuje prilagodbu različitim podlogama. Povećanom dostupnošću aditivnih tehnologija, mogu se izraditi dijelovi robota povećane kompleksnosti, koji omogućuju nejednoliku distribuciju materijala, uz izradu lakih i istodobno krutih dijelova. U podlozi ovakvog pristupa leže topološko optimiranje (TO) i generativno oblikovanje (GO). Temeljem svega iznesenog, u okviru diplomskog rada zadatak je izraditi mobilnog robota pokretanog s četiri noge.

Potrebno je napraviti sljedeće:

- Dati pregled aditivnih tehnologija prikladnih za izradu dijelova robota, uzimajući u obzir kompatibilnost s TO i GO metodama i cijenu izrade.
- Izraditi kompletno konstrukcijsko rješenje robota s osam stupnjeva slobode gibanja, odabrati upravljačku jedinicu, te odgovarajuće motore i senzore.
- Odabrati okolinu prikladnu za provođenje TO i GO metoda, analizirati sve komponente robota s ciljem minimizacije mase i minimalnog gubitka krutosti.
- Izraditi optimirane dijelove, povezati ih s elektroničkim komponentama i testirati funkcionalnost razvijene robotske platforme.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

16. studenoga 2023.

18. siječnja 2024.

22. – 26. siječnja 2024.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Petar Ćurković

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	2
POPIS TABLICA.....	3
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	4
POPIS OZNAKA	5
SAŽETAK.....	6
SUMMARY	7
1. UVOD.....	8
2. MOBILNI ROBOTI	9
2.1. Mobilni roboti pokretani nogama	12
2.2. Fizikalni model robota	14
3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE	16
3.1. Tehnologije aditivne proizvodnje	17
3.2. 3D printane komponente	27
4. OPTIMIRANJE DIZAJNA	29
4.1. Topološko optimiranje	29
4.2. Topološki optimirani dijelovi.....	32
4.3. Generativni dizajn	36
4.4. Dijelovi dobiveni generativnim dizajnom.....	39
5. ELEKTRONIČKE KOMPONENTE	42
5.1. Funkcionalnost robota.....	44
6. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA.....	48
PRILOZI.....	50

POPIS SLIKA

Slika 2.1	Atlas [6]	13
Slika 2.2	3D render mobilnog robota	15
Slika 3.1	FDM [8]	19
Slika 3.2	Stereolitografija [8]	19
Slika 3.3	MultiJet metoda [8]	20
Slika 3.4	LOM [8]	21
Slika 3.5	CAL metoda [8]	22
Slika 3.6	SLM [8]	23
Slika 3.7	EBM [8]	23
Slika 3.8	3DP [8]	24
Slika 3.9	LENS [8]	25
Slika 3.10	LCM [8]	26
Slika 3.11	FEF [8]	27
Slika 3.12	Tijelo robota	27
Slika 3.13	Potpornja ploča	28
Slika 3.14	Komponente printane Elegoo Saturn 8K printerom	28
Slika 4.1	Ograničenja topološke optimizacije tijela robota	33
Slika 4.2	Optimizacija tijela robota	33
Slika 4.3	Topološka optimizacija prsta	34
Slika 4.4	Optimizacija tarne pločice	35
Slika 4.5	Optimizacija noge	35
Slika 4.6	Priprema generativnog dizajna tijela robota	39
Slika 4.7	Rezultat generativnog dizajna tijela robota	40
Slika 4.8	Priprema generativnog dizajna prsta	40
Slika 4.9	Rezultat generativnog dizajna prsta robota	41
Slika 4.10	Priprema generativnog dizajna tarne pločice	41
Slika 4.11	Rezultat generativnog dizajna tarne pločice	41
Slika 5.1	Dasduino CONNECTPLUS [24]	42
Slika 5.2	NEMA 17 [24]	42
Slika 5.3	Litij-ionska baterija [24]	43
Slika 5.4	Li-ion punjač BQ24295 [24]	44
Slika 5.5	Step-up modul LM2587 [24]	44
Slika 5.6	A4988 driver [24]	45
Slika 5.7	Blok dijagram A4988 [24]	45
Slika 5.8	Sklopljen robot	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste aditivnih proizvodnih procesa [8] 17
Tablica 2. NEMA 17 specifikacije [24] 43

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

- 1 Finger
- 2 Body [Motor]
- 3 Leg
- 4 Skid plate
- 5 Leg [Motor]
- 6 Robot
- 7 Support cross

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
V	m/s	brzina
m	kg	masa
l	m	duljina
t	s	vrijeme
T	°C	temperatura
	°C/min	brzina zagrijavanja
A	m^2	površina
I	A	jačina struje
R	Ω	otpor
F	N	sila
	byte	kapacitet podataka
M	Nm	moment
V	m^3	volumen
	Ah	kapacitet baterije
L	H	induktivitet
	Pa · s	viskozitet

SAŽETAK

Mobilna robotika sve više je prisutna u svakodnevnom životu. Sve češće ju pronalazimo u našim domovima, industriji, medicini, za vojne upotrebe te hobistički. Glavni gradivni materijali mobilnih robota su polimeri radi svojih dobrih mehaničkih svojstava te male mase. Trenutno su sve veća ulaganja i razvoj 3D printera i aditivnih metoda što omogućuje proizvodnju kompleksnih dijelova. Aditivne tehnologije proizvodnje omogućile su razvoj drugih tehnologija za optimiranje mase i krutosti. Sve više u industriji možemo pronaći komponente koje imaju optimiranu topologiju, no sve više prodire i nova tehnologija generativnog dizajna. Ona omogućuje kreiranje optimiranih struktura iz nule, bez konstruktorovog početnog modela, te se nakon predloženih optimiranih dijelova rade prototipovi za daljnju proizvodnju.

Dizajnirani mobilni robot izrađen je od polimernog materijala ABS. Pokretan je nogama te ima 8 rotacijskih stupnjeva slobode. Noge su pokretane s osam NEMA17 elektromotora. Komponente robota optimirane su pomoću generativnog dizajna, te topološkog optimiranja. Usporedbom tih dviju metoda odabrana je konstrukcija s manjom masom kako bi mu se omogućilo lakše pokretanje. Motori robota kontrolirani su pomoću dasduino mikrokontrolera, na bazi arduina, od hrvatskog proizvođača Soldereda.

Ključne riječi: mobilni roboti, roboti pokretani nogama, topološko optimiranje, generativni dizajn

SUMMARY

Mobile robotics is increasingly present in everyday life. We can find it more and more often in our homes, industry, medicine, for military and hobby use. The main building materials of mobile robots are polymers due to their good mechanical properties and low mass. Currently, there are increasing investments and development of 3D printers and additive production methods, which enables the production of complex parts. Additive manufacturing technologies enabled the development of other technologies to optimize mass and stiffness. More and more in the industry we can find components that have an optimized topology, but the new technology of generative design is becoming more present. It enables the creation of optimized structures from scratch, without the constructor's initial model, and after the proposed optimized parts, prototypes are made for further production.

The designed mobile robot is made of polymer material ABS. It is moved by legs and has 8 rotational degrees of freedom. The legs are powered by eight NEMA17 electric motors. Robot components were optimized using generative design and topological optimization. By comparing these two methods, a construction with a lower mass was chosen to enable it to be started more easily. The robot's motors are controlled using a dasduino microcontroller, based on arduino, from a Croatian manufacturer Soldered.

Key words: mobile robots, robots actuated by legs, topology optimization, generative design

1. UVOD

Generativni dizajn grana je dizajna potpomognutog računalom (CAD) koja je još u ranoj fazi razvoja. Trenutno na tržištu postoji par rješenja koja daju relativno pouzdane rezultate za proizvodnju te se mogu pronaći u programskim paketima poput Archistar, nTopology, Creo, te Fusion 360 koji se koristio u ovom radu zbog pristupačnosti i besplatnim studentskim licencama.

U sljedećim poglavljima obrađena je tema mobilne robotike s mobilnim robotima pokretanih nogama, aditivne proizvodnje koja je sve više prisutna u industriji gdje postoji potreba za proizvodnjom kompleksnih dijelova, te topološke optimizacije i generativnog dizajna koji omogućuju stvaranje kompleksnih rješenja. Fokus ovog rada jest korištenje optimizacijskih tehnologija koje pružaju moderni softveri za konstruiranje. Pri konstruiranju korišteno je topološko optimiranje i generativni dizajn, napravljena je usporedba tih dviju tehnologija te su bolja rješenja uzeta za proizvodnju.

U sklopu ovog rada izrađen je i mobilni robot kako bi se testirali dobiveni optimizirani rezultati. Odabrana je četveronožna konfiguracija mobilnog robota s osam rotacijskih stupnjeva slobode. Sve komponente izrađene su od istog materijala, korišten je polimer ABS. Komponente proizvedene privatno izrađene su SLA metodom dok je tijelo robota proizvedeno u tvrtci Izit d.o.o. FDM tehnologijom. Elektronika potrebna za kretanje robota naručena je od hrvatske tvrtke Soldered.

2. MOBILNI ROBOTI

Iako ne postoji opće prihvaćena definicija pojma "mobilni robot", često se smatra da označava uređaj koji se može autonomno kretati s mjesta na mjesto kako bi postigao niz ciljeva. Mobilni roboti koriste se u širokom rasponu primjena uključujući u tvornicama (npr. automatizirano vođena vozila ili AGV), za vojne operacije (npr. bespilotna zemaljska izviđačka vozila), u zdravstvu (npr. dostava lijekova), za potragu i spašavanje, kao zaštitari i u domovima (npr. čišćenje podova i košnja travnjaka). AGV-ovi se najčešće koriste u industrijskim aplikacijama za premještanje materijala oko proizvodnog pogona ili skladišta. Tipični tipovi AGV-a su tegljači (AGV-ovi koji vuku kolica), jedinični utovarivači (AGV-ovi s ugrađenim kotrljajućim stolovima za prijenos dijelova u ladice) i viličari (roboti slični ručnim viličarima). Upotreba mobilnih robota, a posebice AGV-a, raste kako se povećava raspon primjene robota u tvornicama, bolnicama, uredskim zgradama itd. Dok mobilni roboti mogu koristiti niz tehnika kretanja kao što su letenje, plivanje, puzanje, hodanje ili kotrljanje, ovaj se rad usredotočuje na robote pokretane nogama.

Mobilni roboti rješavaju zahtjeve za fleksibilnim rukovanjem materijalom, želju da roboti mogu raditi na velikim strukturama i potrebu za brzom rekonfiguracijom radnih područja. Velik dio ranijih radova na vanjskim vozilima za obranu, potragu i spašavanje te uklanjanje bombi relevantan je za domenu proizvodnje, kao i rad koji je obavljen na robotima za osobnu njegu i robotima za primjenu u kućanstvu i bolnicama. Očekuje se da će do 2025. biti dostupna ekonomična, brza automatizacija za utovar i istovar kamiona, kako na razini kartona tako i na razini paleta [1]. Mobilni roboti mogu biti relativno skupi i mogu zahtijevati značajno stručno znanje za instaliranje i rad. Stoga je važno osigurati da je njihova uporaba u određenoj primjeni prikladna. Ta je potreba dovela do razvoja različitih kriterija za procjenu uvjeta pod kojima bi se trebali usvojiti mobilni roboti. Učinkovitost u korištenju AGV-a može biti ograničena lošim rutama, smanjenjem brzine vozila (npr. zbog dijeljenja radnog prostora s ljudima) ili neadekvatnim poznavanjem okoline koja uzrokuje odabir lošijih ruta ili kašnjenja jer vozilo mora prikladno reagirati na promjene (npr. palete s robom unutar predviđene AGV-ove putanje). Veća upotreba senzora može pomoći u povećanju učinkovitosti. Načini povećanja fleksibilnosti sustava su smanjenje potrebe za infrastrukturom kao što su ciljevi potrebni za lokalizaciju (npr. usvajanjem alternativnih metoda lokalizacije) i povećanje sposobnosti sustava da se prilagodi promjenama u svojim zadacima. Sigurnost je od najveće važnosti, ali sredstva za njezino osiguranje mogu utjecati na učinkovitost i fleksibilnost. Povećanje upotrebe senzora, pružanje boljih semantičkih modela zadatka i okruženja može smanjiti ove utjecaje. Sve je

češće da ljudi i roboti dijele radni prostor. To je dovelo do potrebe za poboljšanom komunikacijom između čovjeka i robota, za svjesnošću robota o tome što se može očekivati od ljudi oko njega, te isto tako o tome što ljudi mogu očekivati od robota. Aspekt interakcije s robotima koji nije jedinstven za mobilne robote jest njihovo podučavanje zadacima koje je potrebno izvršiti.

Mobilni roboti često rade u velikim objektima i mnogi su različiti pristupi poduzeti za lokalizaciju i navigaciju. Oni se kreću od metoda u kojima se najprije mapira cijeli objekt te planiraju rute do onih u kojima senzori daju informacije o prohodnim područjima, a vozila određuju vlastitu trenutnu poziciju i dinamički planiraju svoje putanje na temelju značajki prepoznatih u okolini. Obično postoji kompromis između apriornih planova i dinamički generiranih planova. Kada se ne očekuju velike promjene u okolišu, a vremena ciklusa su kritična, obično se daje prednost prethodnom planiranju. Kada se radni prostor ili zadaci često mijenjaju, često je bolje dinamički planirati. Proizvodni pogoni često idu sredinom puta. U radnom području mogu se postaviti oznake koje prepoznaju senzori na vozilima i omogućuju točnu lokalizaciju kroz triangulaciju i time pojednostavljuju navigaciju. Ostali senzori u vozilu traže prepreke ili neočekivane objekte na putu vozila i mogu planirati obilazak prije nego što se vrate na svoju unaprijed planiranu rutu. Također je važno znati položaj i orijentaciju mobilnog robota, stoga su razvijene mnoge metode za pružanje tih informacija. Pristup koji se često koristi je oslanjanje na odometriju proširenu mjerenjima temeljenim na sensorima iz lasera, sustava radiofrekvencijske identifikacije (RFID), dvodimenzionalnih bar kodova (npr. QR kodova), kamera itd. Napredniji sustavi koriste algoritme koji ostvaruju zadatke lokalizacije i navigacije istovremeno. Ovi se sustavi obično nazivaju SLAM algoritmi, za simultanu lokalizaciju i mapiranje. Gledajući iste značajke u više pogleda pomoću senzora koji se kreću s vozilom, algoritmi mogu povezati informacije senzora. Kada se ove informacije kombiniraju s procjenama vozila o položajima na kojima su informacije prikupljene, može se konstruirati lokalna karta. S vremenom se cijeli objekt može mapirati, a karte se mogu koristiti za planiranje puta vozila.

U tipičnom proizvodnom okruženju može postojati veliki broj industrijskih vozila koja pomiču materijal, dijelove u procesu između radnih stanica ili, u naprednijim operacijama, alate za pozicioniranje ili robote koji rade izravno na dijelovima. Postoje mnogi aspekti rada takvih vozila koji se moraju planirati i koordinirati. Oni uključuju sprječavanje od križanja puteva vozila, zagušenje prometa, isporuku materijala na prava mjesta u pravo vrijeme, protok kompatibilan s ritmom rada tvornice i adekvatno vrijeme za punjenje baterija vozila. Planiranje

uključuje određivanje više od pukih staza kojima će se vozila kretati. Također može uključivati osiguravanje da vozilo izbjegava drugu opremu ili ljude dok istovremeno omogućuje visoko precizno spajanje s pokretnim trakama ili drugom opremom. Trenutna praksa u industriji je rukovanje koordinacijom kao offline problemom koji treba riješiti kada se vozila programiraju. Postoji niz razloga za ovakav pristup. Oni uključuju brigu o sigurnosti i želju za održavanjem stalne stope proizvodnje. Izvanmrežni pristup kviri se u situacijama kada postoji potreba za brzim prijelazom između zadataka te kada ljudi dijele radni prostor s vozilima.

Trenutačno nigdje u svijetu ne postoje standardi performansi za automatska industrijska vozila. Međutim, postoje nacionalni i međunarodni sigurnosni standardi. Ključna američka norma za AGV je Američki nacionalni institut za standarde/Zaklada za razvoj standarda za industrijske kamione (ANSI/ITSDF) B56.5 za AGV i vozila s ljudskom posadom s automatiziranim funkcijama [2]. Opseg B56.5 je definirati sigurnosne zahtjeve koji se odnose na elemente dizajna, rada i održavanja pokretanih, bez mehaničkih ograničenja, automatski vođenih industrijskih vozila bez posade i sustava čiji su vozila dio. Također se odnosi na vozila koja su izvorno dizajnirana za rad isključivo s ljudskom posadom, ali koja su naknadno modificirana za rad bez posade, automatskom načinu rada ili u poluautomatskom, ručnom načinu ili načinu rada za održavanje. Novi zadatak razvoja standarda performansi ASTM International AGV službeno je odobrio glavni odbor ASTM-a 1. svibnja 2014. Tim naporom formira se novi odbor, pod nazivom: "Automatsko vođena industrijska vozila bez vozača", s ciljem razvoja "standardizirane nomenklature i definicija pojmova, preporučene prakse, vodiča, ispitnih metoda, specifikacija i standarda performansi za automatska vođena industrijska vozila bez vozača", uz istovremeno poticanje istraživanja i sponzoriranje simpozija, radionice i publikacije za olakšavanje razvoja standarda u suradnji s drugim tehničkim odborima ASTM-a. Pet pridruženih pododborna bit će strukturirano tako da se bave utjecajima na okoliš, pristajanjem i navigacijom, otkrivanjem i zaštitom objekata, komunikacijama i integracijom i terminologijom. Osim industrijskih automatski vođenih vozila, ali relevantan za ljude koji rade u blizini mobilnih robota, ISO 13482 [3] prelazi s mobilnih robota za osobnu njegu na procjenu i ublažavanje rizika industrijskih mobilnih robota. Ovaj standard uključuje sigurnost robota za osobnu njegu dizajniranih za poboljšanje kvalitete života ljudi. Većina ovih robota su mobilni i namijenjeni su izravnoj interakciji s ljudima i preprekama u njihovom okruženju.

2.1. Mobilni roboti pokretani nogama

Hod pomoću nogu jedan je od uobičajenih oblika kretanja, što dovodi do hodajućih robota. Iako su noge obično skuplje od kotača, imaju nekoliko prednosti u odnosu na kotače. Prednosti nogu nad ostalim oblicima kretanja su njihova transverzalnost, učinkovitost, činjenica da se mogu kretati po mekom i neravnom terenu, bolja pokretljivost, bolja energetska učinkovitost, te bolja stabilnost [1]. Hodajući roboti također imaju prednost jer se lako nose s preprekama ili pukotinama koje se nalaze u okolini. Postoje mnoge vrste hodajućih robota ovisno o broju nogu. Među najvažnijima su dvonožni (humanoidi), četveronožni i šesteronožni. Kod hodajućih robota glavni problem jest stabilnost, jer su ravnoteža tijela i hoda od iznimne važnosti posebno u slučaju dvonožnog ili humanoidnog robota. Postoje dvije vrste stabilnosti: statička i dinamička. Statička stabilnost je sposobnost održavanja konfiguracije samo kada je izložena silama reakcije. Dinamička stabilnost povezana je sa sposobnošću da tijelo robota ostane uspravno kada je izloženo i reakcijskim i inercijskim silama. Tijekom hodanja treba uzeti u obzir i pravilno kontrolirati kretanje tijela koje se oslanja na potporne noge. Korištenje većeg broja udova osigurava suvišnu potporu i često povećava nosivost i sigurnost. Ove prednosti postižu se na cijenu povećane složenosti kontrole (u smislu koordinacije nogu), veće mase te potrebu za jačim aktuatorima.

Roboti s jednom nogom se još nazivaju i "hoppers". Najveći izazov predstavlja njihova ne mogućnost mirovanja već moraju nastaviti skakutati kako bi održali ravnotežu. Za primjer hopper robota možemo uzeti Unirooa [5]. Robot Uniroo kinematički je sličan pravom klokanu mase 6.6 kg. Sastoji se od tijela, zglobne noge s tri zgloba (kuk, koljeno, gležanj) i repa s jednim stupnjem slobode. Hidraulički aktuatori kontroliraju svaki zglob. Uniroo nije simetričan, noga je zglobna umjesto teleskopska, kuk je pomaknut od središta mase, a noga je relativno teška (jedna trećina mase tijela). Rad s Uniroom pokazao je da je moguće kontrolirati ravnotežu nožnih robota koji imaju nesimetričnu mehaničku strukturu. Regulacija kutnog momenta omogućila je Uniroo robotu da skače u rasponu brzina prema naprijed od 0 do 1.8 m/s najmanje jednu minutu.

Jedan od najvažnijih tipova hodajućih robota su humanoidni roboti. Kako bi reproducirali ljudske sposobnosti, moraju biti dobro opskrbljeni sensorima. Jedan od najvažnijih problema sa stajališta kretanja je gubitak ravnoteže. U posljednjem desetljeću, hodanje i govor uvelike su poboljšani. Sposobnosti razmišljanja i dalje su njihova slaba točka i predstavljaju izazov. Kretanje dvonožnih robota ovisi o dinamičkoj stabilnosti. Dvonožni roboti mogu hodati, trčati, kretati se uz i niz stepenice, skakati, pa čak i raditi salto. Pokreti su

sofisticirani jer su stopala tih robota mala i ravnoteža mora biti dinamična u svakom trenutku; čak i stajanje na mjestu zahtijeva sofisticiranu kontrolu. Humanoidni roboti dolaze u različitim oblicima i veličinama, od potpunih dvonožnih robota ljudske veličine do izoliranih robotskih ruku ili glava s ljudskim osjetilima i izrazom. Kod ovih robota, kao i kod navigacije, bitno je uzeti u obzir druge važne ljudske funkcije kao što su hvatanje i rukovanje predmetima, postavljanje koraka i pokreti cijelog tijela. Pouzdani dvonožni roboti razvijeni su tek posljednjih godina i mnogo je pozornosti usmjereno na ovu liniju istraživanja, tako da humanoidni roboti imaju najveći potencijal da postanu industrijski alati budućnosti. Postoji nekoliko izvanrednih humanoidnih robota, poput Atlasa (Boston Dynamics) [Slika 2.1].



Slika 2.1 Atlas [6]

Dizajniran je za zadatke potrage i spašavanja, uglavnom u situacijama u kojima ljudi ne mogu preživjeti. Može hodati ostavljajući gornje udove slobodnima za podizanje, nošenje i manipuliranje okolinom, kao i trčati, penjati se stepenicama, govoriti, podići se nakon pada i učiniti gotovo sve što bi pravi čovjek učinio da spasi život druge osobe. Atlasa pokreće 28 hidraulički aktuiranih stupnjeva slobode, koristi stereo kamere i laserski daljinomjer (Lidar) koji mu omogućuje izbjegavanje prepreka, procjenu terena i orijentaciju. Humanoidni roboti koriste se u aplikacijama kao što su osobna pomoć, zdravstvena njega, zabava, automobilska proizvodna linija, obrazovanje i pozdravljanje gostiju i posjetitelja. Očekuje se da će se uporaba humanoidnih robota razvijenih s algoritmima umjetne inteligencije povećati u opasnim zadacima kao što su misije istraživanja svemira.

Tronožni roboti nisu baš uobičajeni zbog neparnog broja nogu. Primjer tronožnog robota jest STriDER (RoMeLa na UCLA-u). Predstavlja jednostavnu kinematičku strukturu koja je sama po sebi stabilna poput stativa za kameru, lako se njime upravlja, energetski je učinkovit i lagan. Tijekom koraka, dvije noge se ponašaju kao potporne dok treća djeluje kao zamašna noga. Cilj nogu je gurnuti težište izvan potpornih nogu kako bi se započeo korak. Dok tijelo pada prema naprijed, zamašna noga prirodno se zanjše između dviju potpornih nogu i hvata pad.

Četveronožni roboti se koriste kada je potrebna veća sigurnost ili nosivost. Imaju prednost što su statički stabilni kada se ne kreću, ali zahtijevaju dinamičku kontrolu hoda, budući da se težište robota mora lako pomicati tijekom hodanja. Međutim, kontrola i koordinacija nogu ovih većih robota je kompleksnija. Ovi sustavi zahtijevaju veliku brzinu računanja. Motori i sustavi za skladištenje energije potrebni za ove sustave su vrlo skupi. Dobar primjer četveronožnog robota je BigDog (Boston Dynamics). BigDog može trčati 6.5 km/h i nositi 150 kg. Impresivnija karakteristika robota jest dinamika hodanja, odnosno mogućnost oporavka od klizanja, pa čak i od guranja. Peteronožni roboti se rijetko razvija zbog neparnog broja nogu

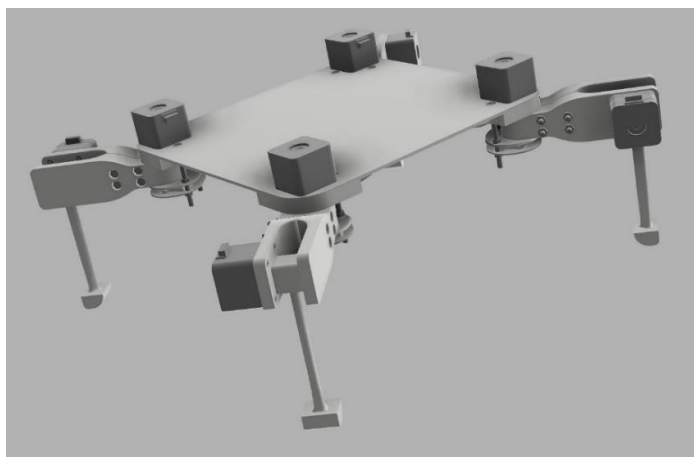
Šestonožni (heksapodni) roboti mogu biti statički stabilni na tri ili više nogu, tako da se robotom sa šest ili više nogu može upravljati statičkim tehnikama hodanja čime se smanjuje složenost upravljanja. Uobičajena arhitektura za hodajuće robote je heksapodna. Heksapodov hod je obično stabilan, čak i na blago stjenovitom i neravnom terenu. Ukoliko su jedna ili dvije noge onesposobljene, robot još uvijek može hodati.

2.2. Fizikalni model robota

Za potrebe izrade CAD modela za ovaj diplomski rad korišten je CAD/CAM software Fusion 360 od tvrtke Autodesk. Fusion 360 sveobuhvatan je alat koji nudi širok raspon mogućnosti. Omogućuje 3D dizajn i modeliranje, pružajući robustan skup alata za podršku tokom dizajniranja. Također upravlja raznim proizvodnim procesima, uključujući strojnu obradu, glodanje, tokarenje i aditivnu proizvodnju. Fusion 360 uključuje značajke automatizacije elektroničkog dizajna (EDA), kao što su shematski dizajn, dizajn PCB-a i upravljanje komponentama. Također uključuje značajke upravljanja podacima kao što su parametarsko modeliranje, povijest dizajna temeljena na vremenskoj crti, integrirana simulacija, generativni dizajn, CAM mogućnosti i suradnja u oblaku. Uz Fusion Team, korisnici mogu surađivati pohranjujući i dijeleći datoteke dizajna u oblaku. Fusion 360 također

nudi generativne tehnologije dizajna, naprednu simulaciju i 5-osni CAM. Njegove ugrađene mogućnosti proširuju se na simulaciju i dokumentaciju. Također nudi sučelje za programiranje aplikacija (API) i mogućnosti skriptiranja za prilagodbu i automatizaciju. To čini Fusion 360 svestranim alatom koji može neprimjetno prevesti dizajn od koncepta do proizvodnje.

Mobilni robot [Slika 2.2] napravljen za potrebe diplomskog rada sastoji se od 8 rotacijskih stupnjeva slobode. Glavne konstrukcijske komponente su tijelo, noge, prsti te tarne pločice. Materijal odabran za printane komponente jest jak i izdržljiv polimer ABS. To je amorfni polimer koji se sastoji od tri monomera, akrilonitrila, butadiena i stirena. ABS se najčešće polimerizira kroz proces emulgiranja. Kada se tri monomera kombiniraju, akrilonitril razvija polarno privlačenje s druge dvije komponente, što rezultira čvrstim i vrlo izdržljivim konačnim proizvodom. Različita količina svakog monomera može se dodati u proces kako bi se dodatno mijenjao gotov proizvod. Svestranost svojstava ABS plastike uvelike doprinosi njezinoj popularnosti u nekoliko industrijskih sektora. Od tipki na računalnoj tipkovnici do LEGO kockica, proizvodi izrađeni od ABS-a mogu se pronaći diljem svijeta u brojnim domaćim, komercijalnim i specijalnim postavkama. Akrilonitril u ABS-u osigurava kemijsku i toplinsku stabilnost, dok butadien dodaje žilavost i snagu. Stiren daje gotovom polimeru lijep, sjajan završni sloj. ABS ima nisko talište, što omogućuje njegovu jednostavnu upotrebu u procesu injekcijskog prešanja i 3D printanju. Također ima visoku vlačnu čvrstoću, te je vrlo otporan na fizičke udare i kemijsku koroziju, što omogućuje da gotova plastika izdrži tešku upotrebu i nepovoljne uvjete okoline. ABS se može jednostavno brusiti i oblikovati, dok je njegova sjajna površina visoko kompatibilna sa širokim rasponom boja i ljepila. ABS lako poprima boju, što omogućuje bojanje gotovih proizvoda u točnim nijansama kako bi se zadovoljile precizne specifikacije projekta. Iz tih razloga odabran je kao materijal za fizikalni model.



Slika 2.2 3D render mobilnog robota

3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Tehnologije brze izrade prototipova (RP) poznate su nekoliko desetljeća. Ovaj izraz se koristi u raznim industrijama i odnosi se na proces brze izrade prototipa prije dobivanja njegove konačne verzije i komercijalizacije. Menadžeri i programeri počeli su koristiti ovaj termin u kontekstu razvoja novih rješenja u poslovnom i informatičkom aspektu tako što su ih testirali klijenti, a zatim slali povratne informacije kako bi optimizirali postojeće rješenje. U kontekstu razvoja proizvoda, termin brza izrada prototipa naširoko se koristi za opisivanje tehnologija koje proizvode prototipove fizičkih objekata izravno iz digitalnih podataka (modela). Razvojem tehnologije uvidjelo se da je ovaj termin nedovoljan. Mnogi objekti proizvedeni u uređajima tipa RP nisu prototipovi, već konačni objekti. Pojam brze izrade prototipova također uključuje osnovni princip tehnologije aditivne proizvodnje (AM), a to je izrada objekata sloj po sloj. Tehnički odbor Međunarodnog američkog društva za ispitivanje i materijale (ASTM International) u suradnji s Poljskim odborom za standardizaciju (PKN), odobrila je novu terminologiju u ovom predmetnom području - aditivna proizvodnja. [7].

Gotovo sve aditivne proizvodne metode imaju iste dvije zajedničke točke: povezivanje materijala sloj po sloj (osim CAL metodom) i specifičnu pripremu proizvodnog procesa u nekoliko koraka. Prvi korak je kreiranje modela virtualnog objekta pomoću računalnog potpomognutog dizajna (CAD) s određenim oblikom i geometrijskim dimenzijama. Sljedeći korak je postavljanje parametara procesa i dijeljenje virtualnog modela u slojeve određene debljine. Pripremljeni virtualni model se prenosi na uređaj u kojem se izrađuje finalni predmet koji po želji može imati i finalnu doradu. Metode aditivne proizvodnje omogućuju projektiranje virtualnih trodimenzionalnih modela i izradu čvrstih i poroznih stvarnih objekata koji imaju određeni geometrijski oblik. Aditivna proizvodnja ne rješava sve probleme klasičnih metoda proizvodnje. Uređaji za AM procese omogućuju izradu predmeta ograničenih geometrijskih dimenzija. To je zbog geometrijskih dimenzija radne komore. Ne postoji metoda koja bi omogućila provođenje procesa za sve vrste materijala. Klasične metode proizvodnje predmeta metalurgijom praha, lijevanjem ili strojnom obradom u nekim su slučajevima nezamjenjive.

3.1. Tehnologije aditivne proizvodnje

Tablica 1. Vrste aditivnih proizvodnih procesa [8]

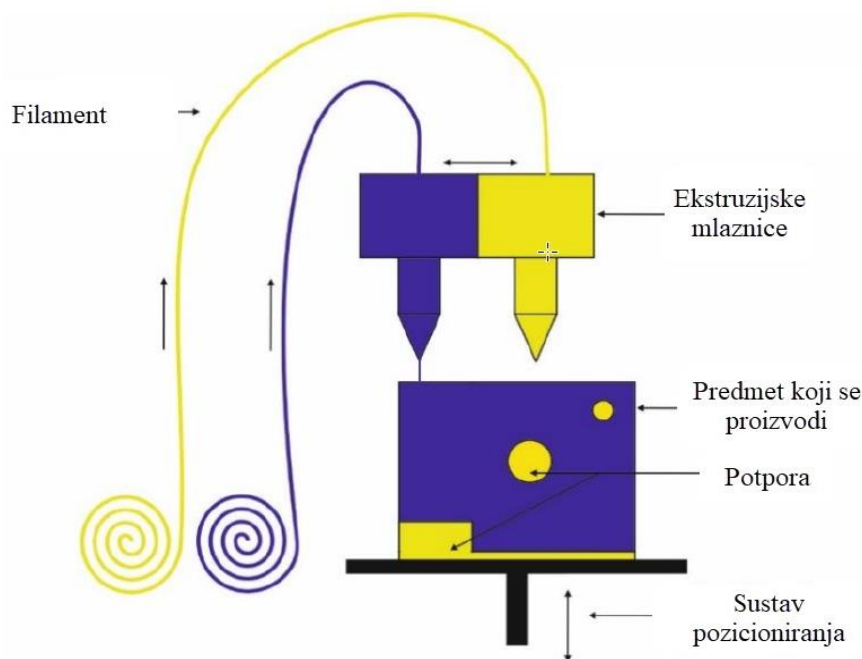
Aditivna proizvodnja						
Kruti materijal		Fluid	Prah			Pasta
Lijepljenje	Topljenje	Polimerizacija	Sinteriranje	Topljenje	Uvezivanje	Topljenje
LOM	FDM/FFF	SL/SLA	SLS	SLM/DMLS	CJP	FEF
		DLP	SLM	DMP	3DP	
		PolyJet	DMLS	LENS	LCM	
		MJM/MJP	DMP	DLM	Binder Jetting	
		CAL		EBM		

Najpopularnije metode aditivne proizvodnje prikazane su u tablici 1. Metode su razdvojene prema ulaznom materijalu i vrsti procesa koji se provodi. Ulazni materijali su: fluid, kruti materijali, prah i pasta. Upotreba fluida (fotopolimera ili fotoosjetljive smole) kao ulaznog materijala uzrokuje korištenje procesa fotostvrdnjavanja (korištenje izvora svjetlosti za proces polimerizacije). Za čvrsti materijal koriste se postupci lijepljenja/spajanja ili taljenja. Međutim, ako je ulazni materijal prah, tada se koriste postupci vezanja, sinteriranja i taljenja. U skladu s idejom aditivne proizvodnje, aditivnom procesu uvijek prethodi faza računalno potpomognutog dizajna. Softver omogućuje projektiranje modela s određenim geometrijskim dimenzijama. Parametri procesa i podjela na slojeve mogu se izvršiti u CAD softveru (poseban softver koji isporučuje proizvođač uređaja) ili u softveru stroja nakon prijenosa datoteke na uređaj. Dizajnirani model sprema se pomoću ekstenzije .stl, koju prepoznaje većina uređaja koji se koriste za aditivne procese. Zatim počinje proces proizvodnje sloja po sloja (osim CAL metodom) te se na kraju procesa uklanjaju potpornji materijal. Po potrebi se može izvesti završna obrada. CAD softver (uključujući namjenske uređaje koji provode aditivne procese) omogućuje odabir parametara procesa koji omogućuju proizvodnju proizvoda s određenim svojstvima. Računalno potpomognuto projektiranje u inženjerstvu materijala potrebno je za projektiranje već postojećih ili potpuno novih inovativnih materijala čiji će model imati specifične geometrijske dimenzije sa specifičnom strukturom i svojstvima. CAD softver i različiti dodaci ovom softveru (simulacije procesa i materijala) i alatima (neuronske mreže, metode konačnih elemenata, genetski algoritmi, ekspertni sustavi) unaprjeđuju rad

konstruktora, tehnologa i specijalista. Softver ne samo da omogućuje dizajniranje potpuno novog modela, već i modificiranje postojećeg.

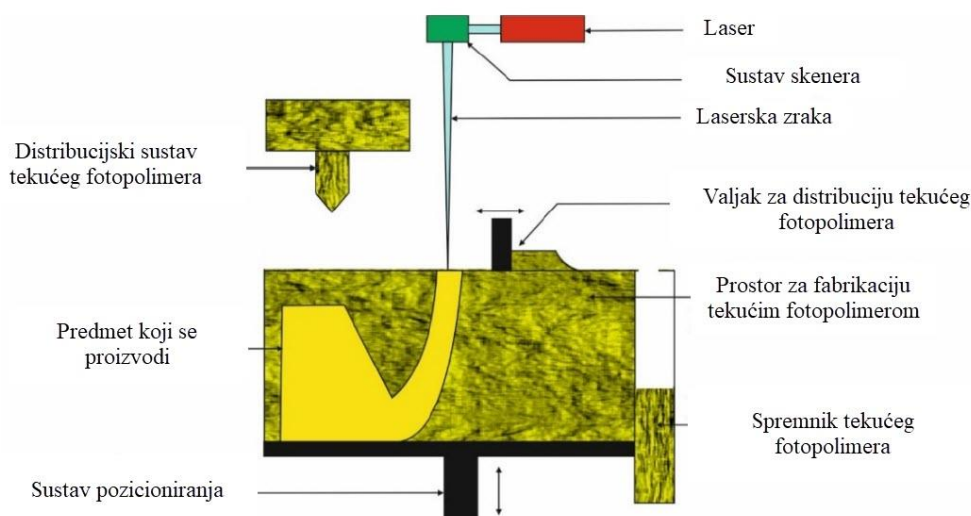
Ovi alati omogućuju predviđanje pogrešaka i jamče odabir materijala s najboljim tehnološkim i funkcionalnim svojstvima uz najniže troškove materijala. Najpopularniji CAM softveri su: SolidWorks, AutoCAD, Autodesk Inventor, Catia. Svi ovi softveri omogućuju projektiranje modela, njihovu animaciju, simulaciju i odabir iz baze podataka vrste materijala za dizajnirani model. Softver nema ograničenja na dizajn geometrije modela. CAM sustavi također uključuju 3D skenere i digitalnu tomografiju. Svrha ovih alata je prikupljanje podataka o obliku stvarnog objekta, kao i izborno bilježenje drugih svojstava (npr. boja). Prikupljeni podaci se koriste za automatsko projektiranje digitalnog trodimenzionalnog modela, koji se kasnije po želji može modificirati u CAD softveru. Ovako pripremljen virtualni model može se izraditi u aditivnim procesima. Svi ovi alati omogućuju skeniranje 3D modela s vrlo visokom točnošću, što olakšava rad na projektiranju vrlo složenih oblika.

Metoda FDM/FFF [Slika 3.1] omogućuje izradu dijelova od termoplastičnih materijala. Inicijator FDM (Fused Deposition Model) tehnologije je tvrtka Stratasys koja ulaže u njen razvoj od ranih 90-ih. Zbog velikog interesa za FDM tehnologiju i mogućnosti konstruiranja vlastitih uređaja temeljenih na Stratasys proizvodu, uveden je novi alternativni naziv FFF (Fused Filament Fabrication) [9]. To je najpopularnija i najdostupnija tehnologija aditivne proizvodnje. U početku se FDM tehnologija koristila za izradu relativno jeftinih prototipova i demonstracijskih modela. Trenutno se koristi za izradu visokokvalitetnih funkcionalnih prototipova i konceptualnih modela od raznih termoplastičnih materijala. Ova metoda omogućuje primjenu najmanje dva materijala (potporni materijal i materijal za izradu dijelova). Potporni materijal obično ima niža mehanička svojstva od materijala od kojeg je izrađen dio. To omogućuje jednostavno mehaničko uklanjanje potpornog materijala, koji može biti i lako topiv.



Slika 3.1 FDM [8]

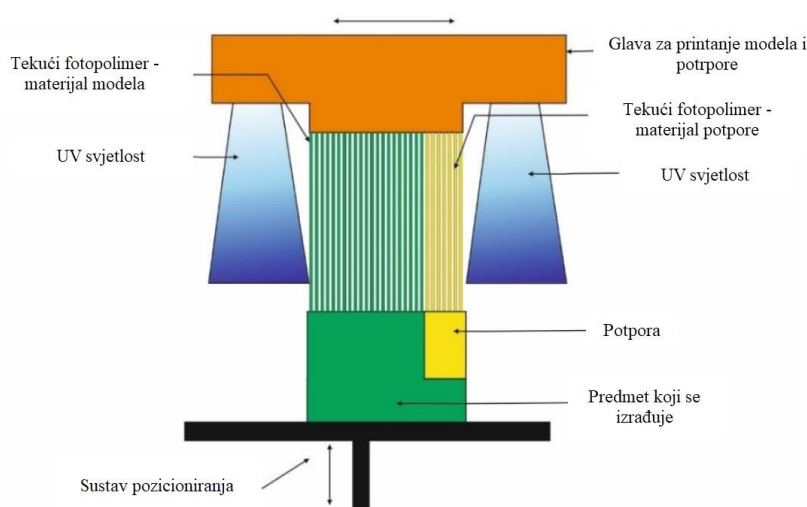
Stereolitografija/Stereolithography Apparatus (SL/SLA) [Slika 3.2] je najstarija metoda aditivne proizvodnje. Fotoosjetljivi sloj smole/fotopolimera nanosi se na radni stol. Laser male snage polimerizira konturu dijela, a zatim unutrašnjost ove konture stvara križno ojačanje. U sljedećem koraku polimerizira se cijela unutrašnjost konture. Proces polimerizacije nastaje korištenjem svjetlosti određene valne duljine. Zatim se radni stol spušta za jednu debljinu sloja (SL metoda) i nanosi se sljedeći sloj fotoosjetljive smole/fotopolimera. Proces se provodi ciklički dok se ne izradi cijeli dio. U slučaju SLA metode, proces se provodi na sličan način, s razlikom što se platforma podiže i dolazi u kontakt sa spremnikom s fotoosjetljivom smolom/fotopolimerom.



Slika 3.2 Stereolitografija [8]

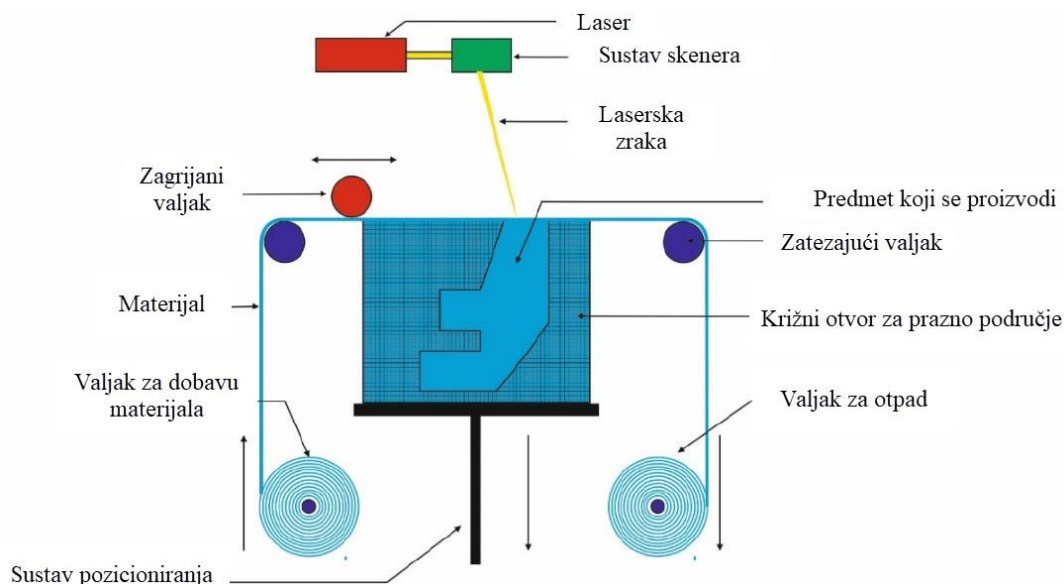
Digitalna obrada svjetlom (DLP) aditivna je metoda proizvodnje koja se sastoji od polimerizacije fotoosjetljivih materijala (polimeri/smole). Ova tehnika slična je SL/SLA metodi. Glavna razlika je u izvoru svjetlosti. Za SL i SLA metode koristi se laser, dok kod ove metode zamijenjen je DLP projektorom. Ova tehnologija je izuzetno precizna (dimenzijska točnost do nekoliko desetaka mikrometara) i jamči izvrsnu, vrlo glatku površinu proizvedenih dijelova. Veličina jednog piksela je važna tijekom projekcije. Što je manja dimenzija jednog piksela, to je veća geometrijska točnost proizvedenog dijela. Ova metoda također ima i ograničenja, što je veći radni stol to je veća udaljenost između projektora i radnog stola. Što je projektor udaljeniji od radnog stola, to su pikseli veći i kvaliteta izrađenih dijelova je lošija. Obrnuto, što je radna platforma manja, veća je točnost proizvedenih dijelova DLP metodom. Nedostatak ove tehnologije je mala mehanička čvrstoća proizvedenih dijelova u usporedbi s drugim tehnologijama, posebice SLS. Trenutno proizvođači uređaja sustavno pokušavaju povećati broj projektora u uređaju kako bi postigli veću geometrijsku točnost velikih dijelova proizvedenih DLP metodom. Potporne konstrukcije izrađene su od istog materijala i moraju se mehanički ukloniti nakon procesa proizvodnje.

PolyJet, MJM (MultiJet Modeling), MJP (MultiJet Printing) su metode koje podsjećaju na klasični inkjet printer [Slika 3.3]. U ovoj metodi ispisna glava ima 96 malih mlaznica. Ovisno o obliku dijela, pojedinačne mlaznice se otvaraju ili zatvaraju i nanose sloj fotopolimera na površinu radnog stola. Polimerni sloj se zatim polimerizira pomoću ultraljubičastog svjetla (UV). Topivi nosači također se koriste u ovoj metodi za stabilizaciju proizvedenog dijela kompliciranog oblika. Izrađeni dio nakon uklanjanja potpornog materijala (npr. voska) vodenim mlazom nema tragova kontakta s radnim stolom. S ovom metodom moguće je koristiti nekoliko materijala istovremeno.



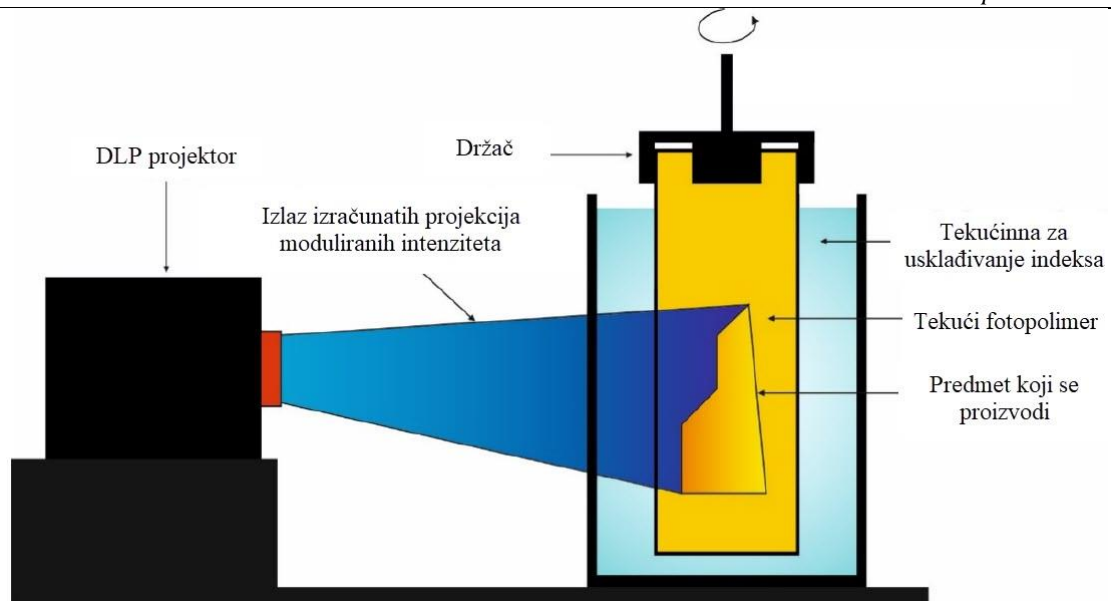
Slika 3.3 MultiJet metoda [8]

Proizvodnja metodom laminiranih predmeta (LOM) [Slika 3.4] izvodi se pomoću folije na koju je nanesen laminat (toplinski aktivirano ljepilo). Folija se postavlja na radni stol i zatim se zagrijanim valjkom folija veže/vari na radni stol. Laser reže pravilan oblik sloja (konture), a ostatak folije (vanjski dio konture) laser reže na kvadratiće kako bi se nakon procesa jednostavno uklonio nepotreban materijal. Radni stol se spušta i postavlja sljedeći sloj folije.



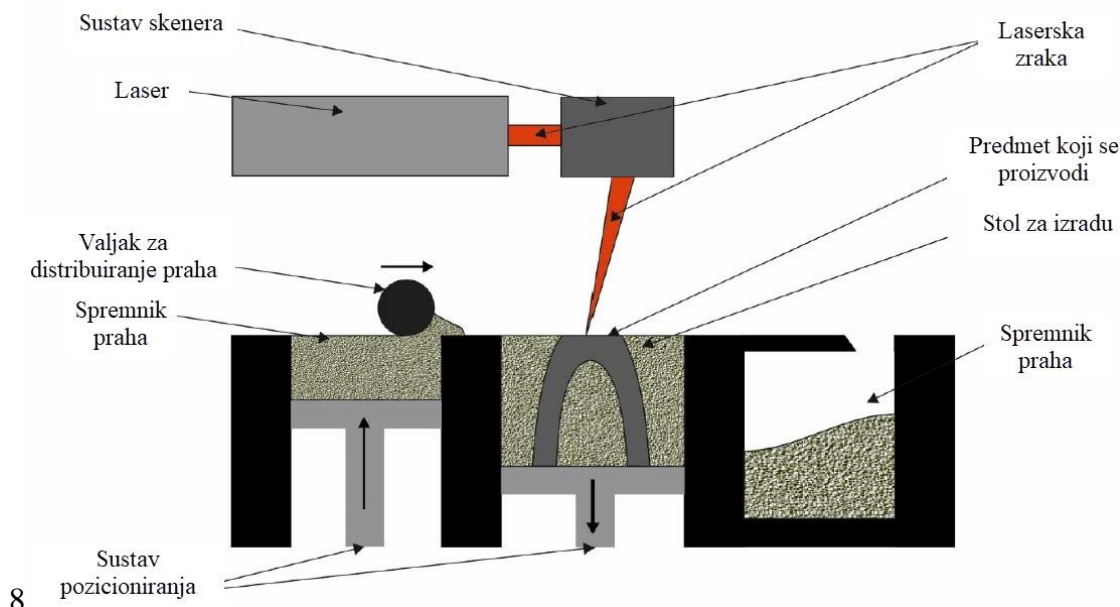
Slika 3.4 LOM [8]

Računalna aksijalna litografija (CAL) [Slika 3.5] koristi DLP projektor kao izvor svjetla. Ova nova metoda omogućuje ispis složenih oblika bez nosača i neusporedivo je brža od SLA metode i sličnih tehnologija. Izrađuje dijelove od nekoliko centimetara u 30 do 120 sekundi, te također omogućuje ispis dijelova na postojeće stvarne objekte. Uređaj koji izvodi CAL proces nazvan je Replikator [10]. Dio se ne proizvodi "sloj po sloj", kao u SLA ili DLP metodama, već se cilindar (s fotoosjetljivom smolom/fotopolimerom) rotira tijekom procesa oko svoje osi i izložen je DLP-u koji stvara kontinuiranu digitalnu projekciju (2D) dijelova u obliku videa. Prikazana projekcija izračunava se algoritmom za svaki kut upada svjetlosti. Tijekom ovog izračuna, algoritam optimizacije stvara niz slika koje fotopolimer izlaže. Svaki kadar filma je izlazna slika za određeni kut upada svjetlosti. Na mjestima gdje je fotopolimer/fotoosjetljiva smola izložena, kisik je osiromašen što uzrokuje umrežavanje polimera. Fotopolimeri koji se mogu koristiti u ovoj metodi moraju imati visoku viskoznost (do ~ 90 000 centipoisesa) ili moraju biti čvrsti (termički gelirani). Ovo minimizira relativno kretanje između tiskanog dijela i prethodnika. Gotovi dio ispire se otapalom kako bi se uklonili ostaci.



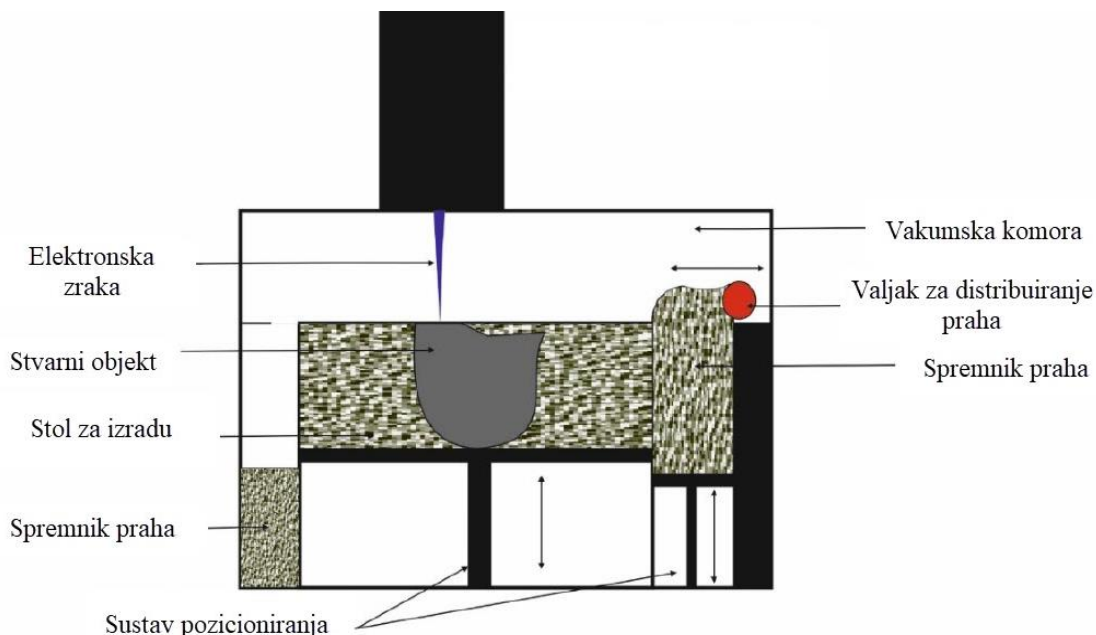
Slika 3.5 CAL metoda [8]

SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering), DMP (Direct Metal Printing) i DML (Direct Laser Melting) metode su koje imaju vrlo sličan princip rada [67-68]. Princip ovih metoda je sinteriranje/taljenje metalnog praha točku po točku i sloj po sloj pomoću lasera [Slika 3.6]. Pri maloj snazi lasera provodi se proces sinteriranja, pri visokoj snazi lasera materijal se topi. Najvažniji procesni parametri su: veličina laserske zrake, brzina skeniranja i snaga lasera. Proces se odvija odozdo prema gore u vakuumu ili u atmosferi zaštitnog plina (npr. dušik, argon). Proces izrade započinje spuštanjem radne platforme za visinu jednaku debljini jednog sloja virtualnog modela. Zatim se nanosi prah iz spremnika/magazina s ulaznim materijalom. Prah se ravnomjerno raspoređuje po površini radne platforme pomoću valjka/brisača. Višak praha uklanja se kroz valjak/brisač u drugi prazan spremnik. Računalno kontrolirana laserska zraka sinterira/topi točku po točku praha s odabranom strategijom te na mjestima odabranim selektivno za sloj. Nakon završetka procesa izrade jednog sloja, radna platforma se spušta za zadanu visinu i proces se nastavlja. Svaki sloj dijelova stapa se s prethodnim dok se proces ne završi. Nanošenje pojedinačnih slojeva praha i selektivno sinteriranje/taljenje praha provodi se naizmjenično, sve dok se ne dobije cijeli integrirani stvarni objekt. Višak praha (nakon procesa) uklanja se s radne platforme. Prašak se uklanja u spremnik i zatim prosijava u sito. Nakon završenog procesa izrade, radna platforma s izrađenim dijelom (nakon uklanjanja praha) se uklanja iz radne komore uređaja. Potrebno je mehanički ukloniti nosače koji povezuju izrađeni dio s radnom platformom.



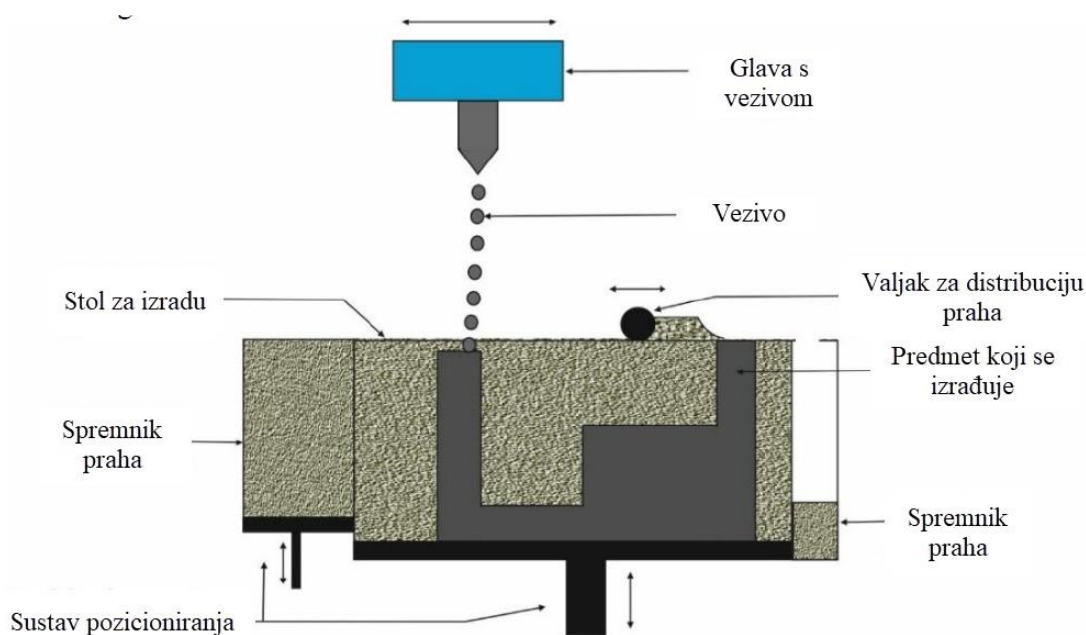
Slika 3.6 SLM [8]

Taljenje elektronskim snopom (EBM) [Slika 3.7] je proces koji se odvija u vakuumu. Proces se provodi odozdo prema gore. Elektronski top opremljen katodom od volframovih vlakana emitira elektronski snop koji se zatim ubrzava prema radnom stolu. Ubrzani elektroni udaraju u metalni prah. Kinetička energija pretvara se u toplinsku energiju, što uzrokuje taljenje praha. Elektronski top nema pokretne mehaničke dijelove koji bi odbili snop elektrona. Elektronski snop se kontrolira pomoću zavojnica za fokusiranje i otklon [11].



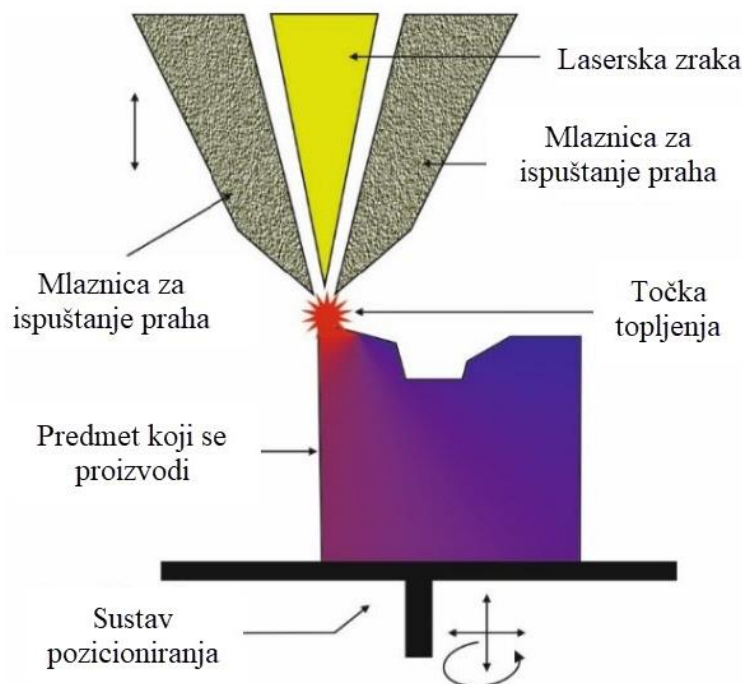
Slika 3.7 EBM [8]

Metode CJP (Color Jet Printing), 3DP (Three Dimensional Printing) i Binder Jetting vrlo su slične u smislu rada. Izvode se pomoću uređaja opremljenog mlaznicom s vezivom i spremnikom za prah [Slika 3.8]. Praškasti sloj se nanosi na podlogu brisačem. Mlaznica taloži vezivo u područjima poprečnog presjeka proizvedenog dijela. Proces se provodi odozdo prema gore, sloj po sloj, kako bi se proizveo konačni model. Izrađeni dio se zagrijava (uklanjanje veziva) i potom sinterira [12].



Slika 3.8 3DP [8]

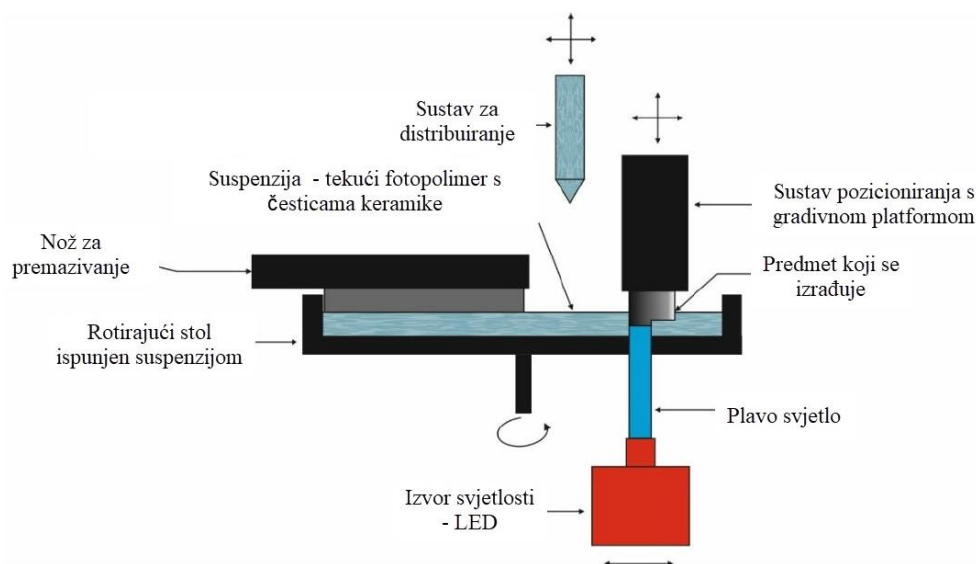
Metode LENS (Laser Engineered Net Shaping) i LMD (Laser Metal Deposition) su slične po principom rada, međutim LMD metoda ima manju dimenzijsku točnost i kvalificirana je kao tvrdo navarivanje. LENS metodu [Slika 3.9] karakterizira činjenica da se radni stol tijekom procesa pomiče. U drugim metodama pokretni element je laserska zraka, laser ili ispisna glava. Radni stol se postavlja točno na mjesto gdje će se proizvoditi dio. Uređaj je opremljen laserom, a laserska zraka se fokusira pomoću leća unutar mlaznice. Praš se dovodi do izlaza mlaznice pomoću plina (npr. argona). Praš se tali laserom na izlaznoj mlaznici te se rastopljeni praš taloži sloj po sloj na izrađeni dio. LMD metoda korištena je za hibridne procese zbog visoke učinkovitosti proizvodnje. Hibridni procesi kombiniraju aditivnu proizvodnju i strojnu obradu. Jedna od najstarijih i vodećih tvrtki u industriji strojne obrade (tvrtka OKUMA) prodaje ovaj tip hibridnog stroja koji implementira oba procesa [13].



Slika 3.9 LENS [8]

Metoda proizvodnje keramike temeljena na litografiji (LCM) [Slika 3.10] omogućuje proizvodnju keramičkih dijelova. Korištenje aditivnih metoda za sinteriranje keramičkih materijala uzrokuje poteškoće u oblikovanju, pucanje i poteškoće pri postizanju točnosti dimenzija. 3DP metoda spajanja keramičkih prahova nije vrlo precizna i stvara velike poroznosti u strukturi materijala tijekom sinteriranja. Metode ekstruzije za izradu keramičkih detalja su neprecizne i ne mogu proizvesti tanke stijenke. Prije LMD metode nije postojala aditivna metoda koja je omogućavala proizvodnju čvrstih keramičkih materijala (cirkonij - ZrO_2 , aluminijev oksid - Al_2O_3) visoke geometrijske točnosti i niske poroznosti. Od ovih materijala proizvode se precizne komponente za električnu, kemijsku i strojnu industriju. LCM tehnologiju patentirala je austrijska tvrtka Lithoz GmbH. Ova tehnologija omogućuje brzu izradu složenih oblika od keramičkih materijala. Metoda proizvodnje keramike temeljena na litografiji slična je procesu stereolitografije (SLA). LCM koristi plavu svjetlost kao izvor svjetlosti. Keramički materijal se isporučuje u obliku praha i dozira u obliku suspenzije. Suspenzija sadrži keramički prah, fotoosjetljivi polimer, otapalo i fotoinicijator (manje od 1% masenog udjela). Suspenzija se zatim taloži na podlogu te se radni stol ovjesom spušta u podlogu. Debljina jednog sloja iznosi otprilike $25\ \mu m$. Fotoinicijator reagira s izvorom svjetla (LED 460 nm) te plava svjetlost reagira s monomerima i započinje proces polimerizacije. Dio se proizvodi na mjestu gdje je izloženo plavom svjetlu te se zatim radni stol podiže na vrh. Nanosi se novi sloj suspenzije i proces ponovno počinje. Nakon završetka procesa, dio se

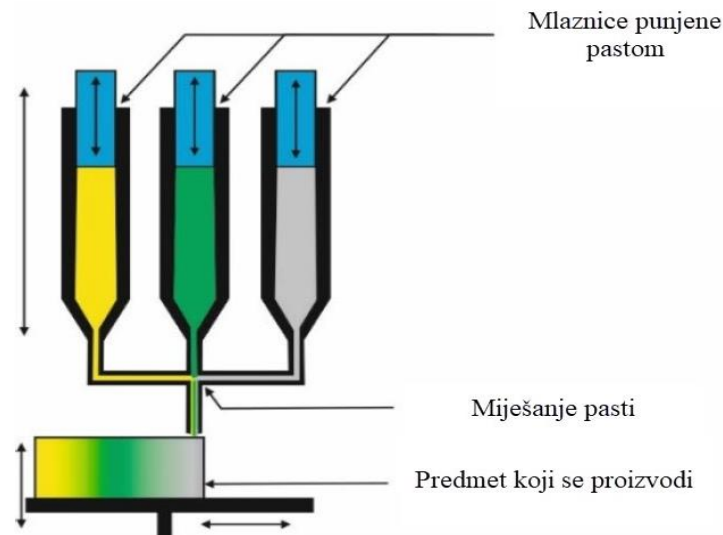
uklanja s radne platforme te se zatim stavlja u otapalo na nekoliko minuta čime se uklanja nepolimerizirana suspenzija. U sljedećoj fazi, dio se stavlja u peć i zagrijava čime se uklanja otapalo. Temperatura tijekom ovog procesa polako raste u rasponu od 30 °C do 400 °C. Sporo povećanje temperature ne uzrokuje unutarnji stres. Zatim se materijal sinterira na 1600 °C. Ova metoda omogućuje dobivanje keramičkih materijala gustoće od 99.85 % - 99.95 % [14].



Slika 3.10 LCM [8]

Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF) metoda koristi se za proizvodnju keramičkih dijelova [Slika 3.11]. Nakon sinteriranja dobiva se konačni predmet. Ulazni materijal za uređaj su keramičke paste. Pasta se sastoji od keramičkog praha, termoplastične smole (vezivo), glicerola, sredstva za raspršivanje i deionizirane vode. Ovi aditivi i njihovi točni omjeri utječu na reološka svojstva paste i njezinu ekstruziju. Dodatak glicerola služi za sprječavanje stvaranja velikih kristala leda i stvaranja nedostataka povezanih s kristalizacijom smrznute vode. Svi elementi (bez termoplastične smole – veziva) se miješaju i melju u mlinu minimalno 24 h. Cilj ovog procesa je uklanjanje aglomerata praha. U sljedećem koraku potrebno je ukloniti mjehuriće zraka u pasti. U tu svrhu koristi se vakuumska miješalica. Materijal se prenosi iz mlina u miješalicu. Termoplastična smola se otapa u vodi na 60 °C i dodaje u miješalicu. Ovim postupkom dobiva se homogena keramička pasta koja se tako pripremljena stavlja u tri spremnika. Spremnici su opremljeni servomotorima koji guraju pastu zadanom brzinom. Tri paste se spajaju jedna s drugom, a zatim se istiskuju kroz mlaznicu na radni stol. Promjer rupe u mlaznici je u rasponu od 190 do 580 μm. Dio se izrađuje sloj po sloj. Na planiranje putanje i taloženje materijala utječu tri glavna parametra: promjer mlaznice, brzina stola i brzina ekstruzije. Izrađeni dio se stavlja u komoru iz koje se odvodi zrak (vakuum) te se komora zamrzava. U ovoj metodi otapalo (voda) se uklanja na niskoj temperaturi. Vrijeme procesa ovisi

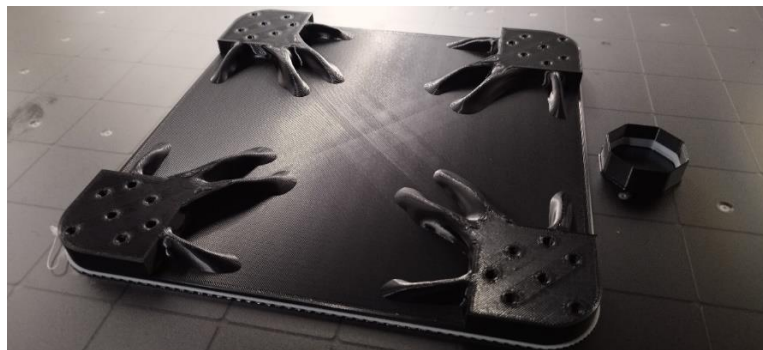
o veličini dijela izrađenog FEF tehnikom. Dio se zatim suši na sobnoj ili višoj temperaturi. U sljedećem koraku, dio se zagrijava na visoku temperaturu (npr. 600 °C). Tada se temperatura povećava na 1550 °C i provodi se proces sinteriranja, a trajanje ovog procesa je minimalno 2 sata. Proces zagrijavanja i sinteriranja je spor. Brzina zagrijavanja nije veća od 5 °C/min [15].



Slika 3.11 FEF [8]

3.2. 3D printane komponente

Za potrebe izrade fizikalnog modela ovog diplomskog rada većina komponenti printano je privatno kako bi se smanjili troškovi, no tijelo robota radi svojih dimenzija i kompleksnosti printano je u poduzeću Izit d.o.o.



Slika 3.12 Tijelo robota

Na slici 3.12 prikazan je 3D print tijela robota. Korišten je Stratasys F770 3D printer koji ima radni volumen 1000 mm x 600 mm x 600 mm te koristi FDM tehnologiju. Vrijeme printanja iznosilo je približno 13 sati, utrošeno je 540 cm³ gradivnog materijala i 91 cm³ potpornog materijala. Komponenta je naknadno zahtijevala površinsku obradu kako bi se dobila ravna tarna površina između nogu i tijela. Također je bilo potrebno doraditi rupe za vijke pošto

komponenta nije najbolje izašla iz printera. Iako je FDM tehnologija pogodna za izradu jeftinih prototipova, za ovu komponentu mogla se koristiti neka druga tehnologija s većom preciznošću i boljom kvalitetom. Radi svojih dimenzija printana komponenta je žilava, no ne i kruta. Potrebno je bilo izraditi potpornju ploču [Slika 3.13] da bi se zadovoljio kriterij krutosti kako se elektroničke komponente ne bi odljepljivale od površine zbog savijanja. Na potpornju ploču urezani su utori kako bi se mogla montirati radi kompleksne geometrije dobivene generativnim dizajnom. Time se nadodala neuračunata masa od otprilike 500 g što je narušilo funkcionalnost robota. Cijena usluge 3D printanja iznosila je 157,50 eura.



Slika 3.13 Potpornja ploča

Komponente printane privatno [Slika 3.14] izrađene su na 3D printeru Elegoo Saturn 8K te su printane SLA metodom. Na slici 3.14 možemo vidjeti rezultate 3D printanja, te ako ih usporedimo s FDM metodom, primjećujemo puno bolje stanje komponenti. Na tim komponentama nije bila potrebna nikakva daljnja dorada osim skidanja potpornog materijala.



Slika 3.14 Komponente printane Elegoo Saturn 8K printerom

4. OPTIMIRANJE DIZAJNA

4.1. Topološko optimiranje

Metode optimizacije topologije rješavaju problem distribucije materijala kako bi se stvorila optimalna topologija [16]. Uobičajeno je da se svaki konačni element unutar projektne domene definira kao projektna varijabla, dopuštajući varijacije u gustoći (dvosmjerna evolucijska strukturna optimizacija (BESO)) [17]. Obično se metode optimizacije topologije koriste za rješavanje praktičnih problema dizajna imajući na umu tradicionalne proizvodne procese, kao što su lijevanje i strojna obrada. Procesi u kojima se dio proizvodi uklanjanjem materijala mogu se opisati kao subtraktivni procesi, a procesi u kojima se dio proizvodi pomoću kalupa mogu se opisati kao procesi oblikovanja. Ovi pristupi imaju značajna proizvodna ograničenja koja se moraju uzeti u obzir tijekom faze projektiranja kako bi se osigurao izvediv dizajn. Na primjer, potreba za pristupom alatu u slučaju strojne obrade ili potreba za uklanjanjem dijela iz kalupa u slučaju lijevanja ili kalupljenja. To ograničava fizičku realizaciju optimalne topologije, te se mora napraviti kompromis između optimalnosti i jednostavnosti proizvodnje. Obično su ta ograničenja ili uključena u stvarnu optimizaciju ograničavanjem topologije na izvedive dizajne ili naknadnim pojednostavljenjem optimizacije. Prvo od ovih je obično poželjno, ali se ne mogu sva ograničenja lako uključiti u proces optimizacije.

Aditivna proizvodnja razlikuje se od dvije prije navedene klasifikacije procesa, po tome što se dio izrađuje sloj po sloj. AM je razvoj iz brze izrade prototipova (RP) i ima za cilj proizvodnju dijelova za krajnju upotrebu, a ne prototipova. U tu svrhu, posljednjih su godina uloženi značajni napor u preradu metala uz polimere, a sada postoji nekoliko komercijalnih metalnih procesa koji mogu proizvesti dijelove za krajnju upotrebu. Kao i RP, AM obično zahtijeva 3D računalno potpomognuto projektiranje (CAD) model dijela. Zbog ovog pristupa slojevitoj proizvodnji mogu se proizvesti dijelovi znatno veće složenosti u usporedbi s tradicionalnim procesima, a ova povećana složenost općenito nema značajan učinak na trošak procesa. To konstruktoru daje značajno veću slobodu dizajna i omogućuje da izgrađeni dio bude bliži optimalnom dizajnu nego što je to moguće s tradicionalnim procesima.

Optimizacija topologije moćan je pristup za određivanje najbolje distribucije materijala unutar definirane domene dizajna. Često je optimizirana topologija složena, zbog ograničenja proizvodnje obično zahtijeva ili pojednostavljenje nakon procesa optimizacije ili ograničavanje prostora dizajna kako bi se omogućili samo dizajni koji se mogu izraditi. Ponekad se trošak

može smanjiti s povećanom složenošću zbog smanjenih zahtjeva potporne strukture. Kao što je istaknuto u nedavnom radu Sigmunda [18], dizajn optimalne krutosti favorizira vrlo finu mikrostrukturu, koja je inherentno vrlo složena. Za tradicionalne načine proizvodnje obično je skuplja proizvodnja veće složenosti, te je stoga visok stupanj složenosti obično nepoželjan. To znači da se proizvode komponente koje nisu optimalne. Uz AM, postoji mogućnost proizvodnje vrlo složenih topologija i stoga nema razloga za zabranu stvaranja ove složenosti.

To dovodi do nekih praktičnih poteškoća pri implementaciji optimizacije topologije za AM. Prvo, optimalna topologija može se odrediti samo ako mreža dopušta njen prikaz. Dobro je poznato da kako se mreža pročišćava, pojavljuju se dodatni detalji, te se optimira topologija. Za optimizaciju topologije, uobičajeno je da se svaki konačni element s projektnom domenom definira kao projektna varijabla, dopuštajući varijacije u gustoći (homogenizacija, SIMP) ili void-solid (BESO). Svaki član strukture trebao bi imati najmanje 2-3 konačna elementa po svojoj debljini kako bi se osigurao točan izračun pomaka, a to ima implikacije na ukupan broj projektiranih varijabli u modelu. Neke potporne strukture potrebne su za podršku velikih prepusta, ali sama topologija je jednostavno izglađeni rezultat optimizacije korištenjem SIMP metode. Niske minimalne veličine značajki koje se obično postižu s AM znači da je potreban vrlo velik broj varijabli dizajna za predstavljanje topologije maksimalne složenosti. Trenutačno je to nedopustivo za bilo što osim za optimizaciju vrlo male komponente, te stoga faza proizvodnje više nije ograničavajući faktor u realizaciji optimalnog dizajna; to je faza projektiranja. Postoji nekoliko radnji koje bi se mogle provesti kako bi se poboljšala učinkovitost procesa optimizacije topologije za AM. Prvo, mogao bi se usvojiti pristup eliminacije elementa teškog uništavanja gdje se elementi koji su ostali na vrlo niskom modulu tijekom brojnih iteracija optimizacije potpuno uklanjaju iz modela čime se smanjuje broj konačnih elemenata. To bi, međutim, moglo potaknuti lošiji rezultat jer se elementi ne mogu vratiti dok se optimizacija nastavlja. Drugi pristup mogao bi biti korištenje iterativnog ponovnog preoblikovanja čime bi se pročišćavalo samo tamo gdje je potrebno i pogrubljuje tamo gdje fina mreža više nije potrebna. Treći pristup mogao bi biti korištenje metoda optimizacije topologije temeljene na granicama kao što je metoda skupa razina [19]. Varijable dizajna tada su samo granice, a ne konačni elementi unutar volumena.

Dok su proizvodna ograničenja za AM puno manje značajna od tradicionalne proizvodnje, još uvijek postoje neka koja zahtijevaju razmatranje. Mnoga ograničenja bolje bi se nazvala proizvodnim razmatranjima, budući da ona ne ograničavaju nužno dizajn. Do određene točke, procesi koji zahtijevaju potporni materijal, mogu se sami podržavati sve dok je

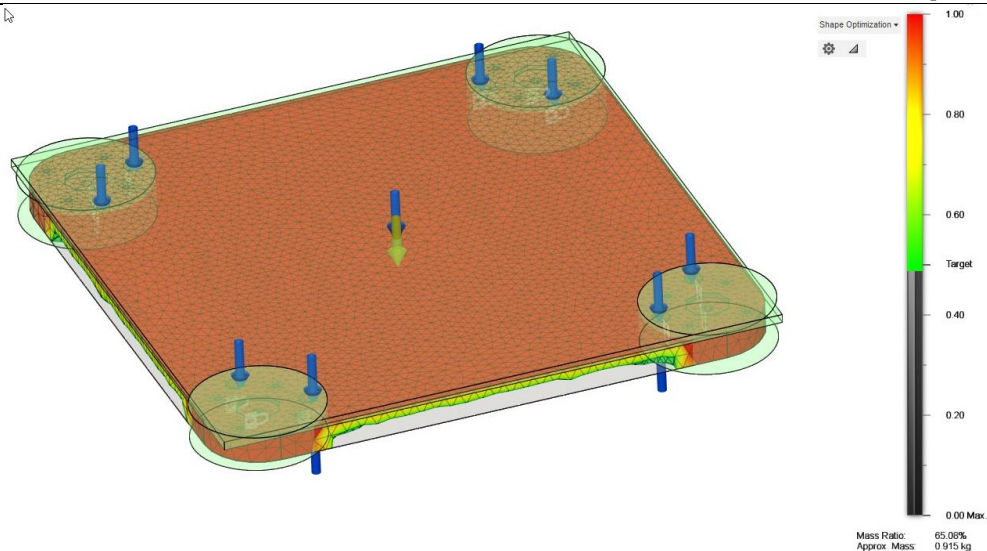
prepust iznad određenog kuta u odnosu na horizontalu. Kod nekih metalnih procesa, kao što je SLM, strukture su prvenstveno potrebne za ograničavanje uvijanja/savijanja rastopljenog praša zbog visokih temperaturnih gradijenata, umjesto da pružaju mehaničku potporu. Potreba za potpornim materijalom također ovisi o geometriji, te se često razmatra modifikacija dizajna kako bi postala samonosiva. Glavna prednost je smanjenje zahtjeva za naknadnom obradom uklanjanja potpornih struktura iz dizajnirane komponente, što je obično ručni zadatak, ali potencijalno smanjenje upotrebe materijala također je prednost. Ovisno o specifičnoj primjeni komponente, ušteda težine može biti primarni cilj, a ne smanjenje troškova proizvodnje, zbog potrošnje energije tijekom faze upotrebe komponente. U tim slučajevima ne bi bilo razumno povećati težinu komponente kako bi se smanjili troškovi proizvodnje, smanjenjem količine potporne strukture. Za primjene gdje su troškovi proizvodnje značajniji, ovo bi moglo biti korisno. Jedina postojeća primjenjiva metoda je ograničenje minimalne debljine elementa [16] koja je primjenjiva na ograničenje minimalne veličine elementa za AM procese. Ograničenje najvećeg prepusta trebalo bi se temeljiti na najvećoj horizontalnoj udaljenosti prepusta i kutu prepusta. Ograničavanjem maksimalne debljine elemenata rezultirati će povećanjem količine elemenata. To bi trebalo smanjiti horizontalnu udaljenost prepusta između elemenata, čime se smanjuje količina potrebne potporne strukture. Međutim, bilo bi teško znati koju specifičnu maksimalnu vrijednost debljine elementa koristiti unaprijed, te bi vjerojatno bilo potrebno nekoliko pokreta za podešavanje ovog parametra. Također je malo vjerojatno da bi ovo potpuno eliminiralo potrebu za bilo kakvim potpornim materijalom jer ne oštećuje rubove velikih šupljina bez potpore.

Zbog željene složenosti rezultirajuće topologije, postoje neke praktične poteškoće koje treba prevladati nakon faze optimizacije. Te se poteškoće obično susreću pri korištenju tradicionalnih proizvodnih procesa koji zahtijevaju jednostavniju topologiju, ali se pogoršavaju s AM-om. Nakon faze optimizacije topologije, uobičajeno je izgladiti topologiju kako bi se smanjili učinci granica elemenata i pretvorio rezultat u matematički CAD prikaz. Konstruktor ovu fazu obično mora obaviti ručno ili 'praćenjem' rezultata optimizacije ili korištenjem nekog oblika prepoznavanja značajki, što je izvedivo samo za jednostavne topologije. Često će topologija biti pojednostavljena u ovoj fazi kako bi se omogućilo da pretvorba bude jednostavnija imajući na umu ograničenja proizvodnje. Zbog visokog stupnja topološke složenosti pri optimizaciji za AM, ručna pretvorba u CAD je nerazumna, a trenutne automatske metode pretvorbe nisu dizajnirane za rukovanje ovom razinom složenosti. Glavne radnje koje je potrebno provesti nakon optimizacije su tumačenje/uglađivanje/modificiranje optimizirane

topologije i ponovna analiza performansi s preciznijom FE analizom. Uobičajeno je generirati površinsku mrežu iz isosurfaced topologije s pragom, obično datoteke STereoLithography (STL). STL datoteke koriste se kao standardni format geometrijske datoteke za AM, pa ako se daljnji zadaci na optimiziranoj topologiji mogu provesti na STL razini, izbjegava se glomazna i vrlo teška konverzija u CAD format. U softveru za optimizaciju topologije obično postoje ugrađene funkcije izgladivanja, ali su one dizajnirane samo kao pomoć u tumačenju rezultata optimizacije prije rekonstrukcije u CAD-u. STL alati za izgladivanje nude veću fleksibilnost za korisničku kontrolu, omogućujući lokalno ili globalno izgladivanje. Geometrija se također može modificirati korištenjem izravne manipulacije STL-om ili generiranjem nekih dijelova geometrije u CAD-u, a zatim pretvaranjem u STL format i spajanjem s postojećim ili oduzimanjem od njega. Iako ovaj pristup nije posebno jednostavan za korištenje, on je učinkovitija alternativa pretvaranju topologije u CAD i radu unutar tog okruženja. Za ponovnu analizu izgladene topologije, funkcija ponovnog miješanja unutar STL softvera vrlo je korisna. To omogućuje da se mreža s trokutima niske uniformnosti pretvori u mrežu bolje kvalitete. SIMP algoritam za optimizaciju topologije kažnjava srednje gustoće kako bi potaknuo diskretne void-solid dizajne. To je zato što se pretpostavlja da su troškovi realizacije tih srednjih gustoća visoki. Međutim, ova umjetna penalizacija označava gubitak optimalnosti topologije nego da srednje gustoće nisu bile kažnjene. Kada bi postojao način za proizvodnju tih međuregija bez izravne korelacije s troškovima, tada ne bi bilo potrebe za njihovim kažnjavanjem.

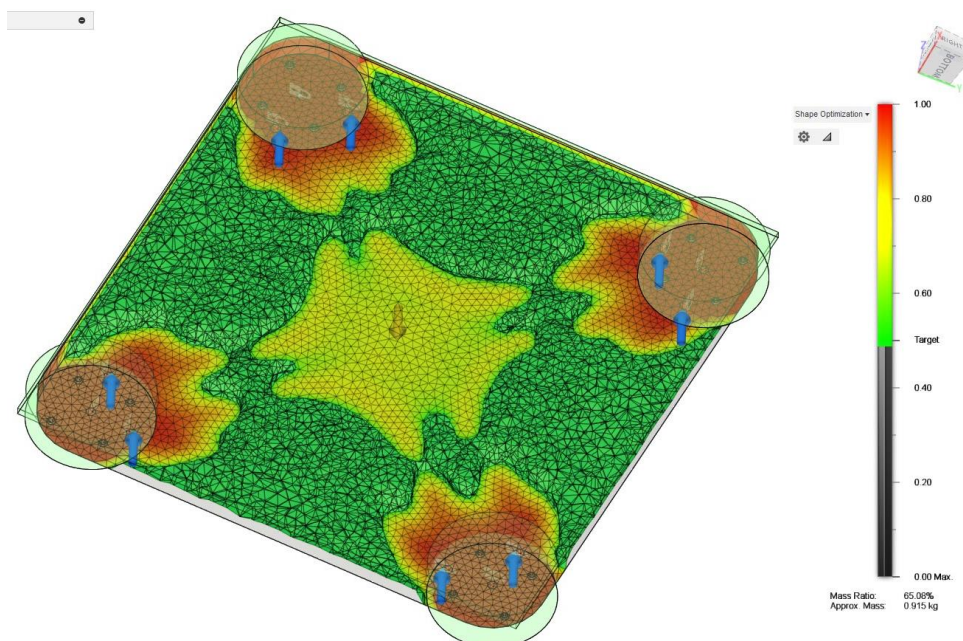
4.2. Topološki optimirani dijelovi

Za smanjenje mase bez značajnijeg smanjenja krutosti korištena je funkcija topološkog optimiranja u Fusionu 360. Smanjenje mase poželjno je radi smanjena troškova materijala, smanjenja inercije, manjeg opterećenja nosivih dijelova te smanjenje potrebne energije za pokretanje. No ukoliko smanjenjem mase previše narušimo integritet konstrukcije, može doći do plastičnog deformiranja ili pucanja. Kako bi izbjegli prekomjerno smanjenje mase potrebno je dobro definirati uvjete optimizacije u softveru [Slika 4.1]. Kako bi se omogućila ravna površina za elektroničke komponente koje će kasnije biti ugrađene, potrebno je bilo postaviti volumene na kojima se neće raditi optimizacija.



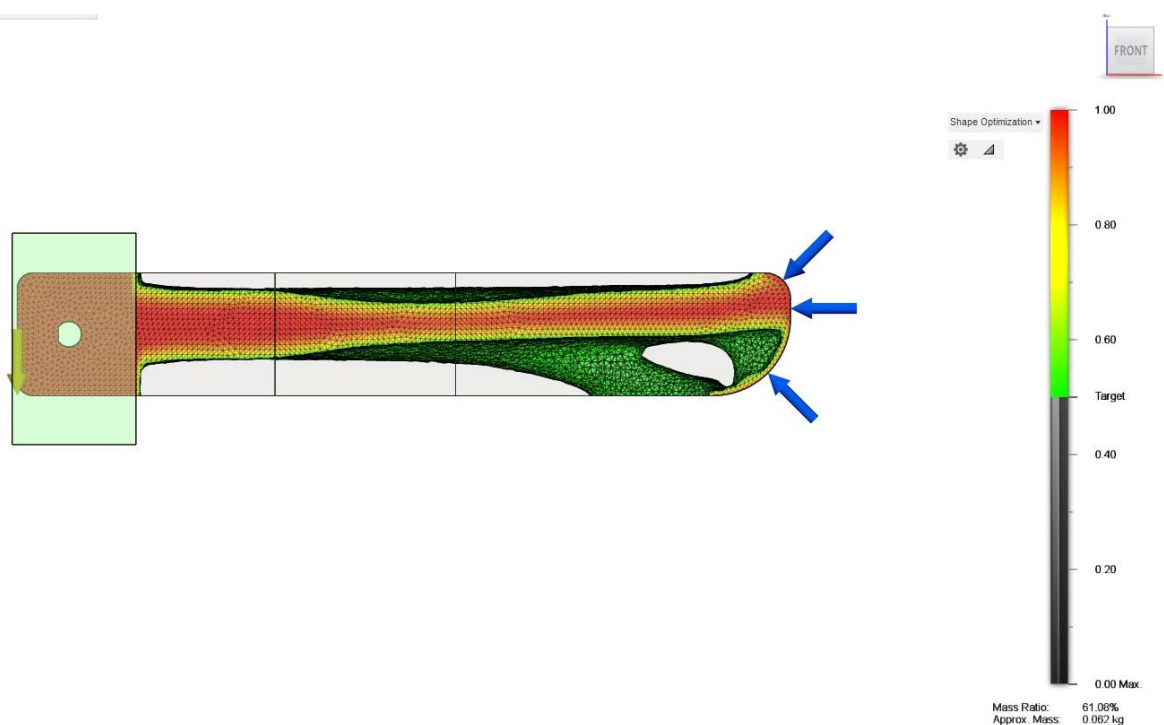
Slika 4.1 Ograničenja topološke optimizacije tijela robota

Označen je volumen duž cijele gornje ploče i 3 mm u dubinu, te utori za motore. Kako bi se osigurala dovoljna čvrstoća s faktorom sigurnosti komponenta je opterećena sa silama od 100 N koje su označene plavim strelicama. Osnovna masa neoptimizirane komponente iznosi 1405 g, dok masa optimizirane komponente nakon zaglađenja oštih rubova iznosi 861 g. Optimizacijom je ostvarena ušteda mase od 38.7 %. Pošto je gornja ploča morala ostati netaknuta većina materijala maknuta je od ispod [Slika 4.2]. Crvena područja označuju veću koncentraciju naprezanja te ćemo na tim mjestima pronaći više materijala, dok se na ostalim mjestima oduzima materijal.



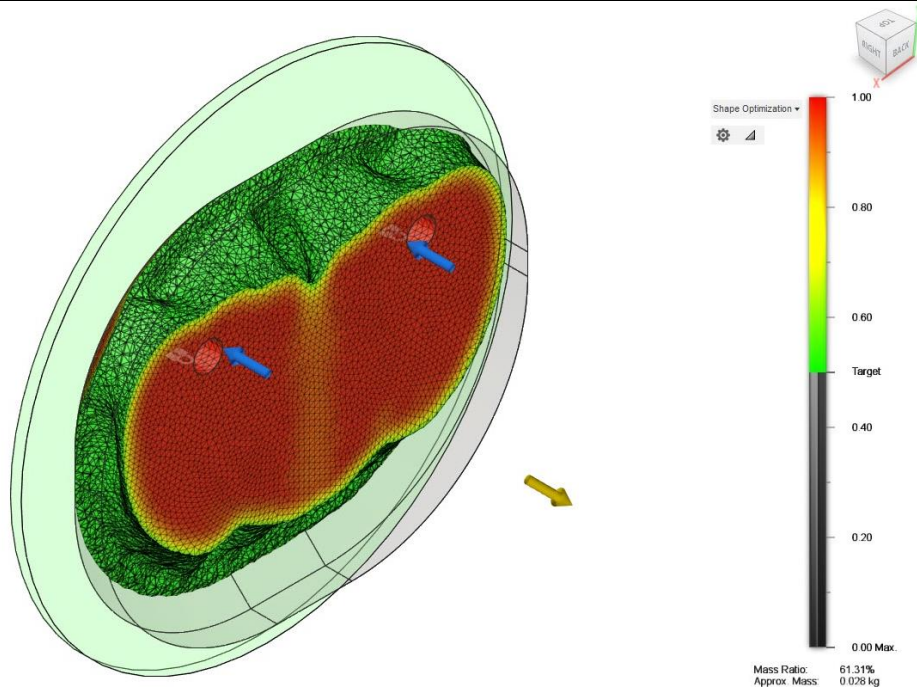
Slika 4.2 Optimizacija tijela robota

Isti postupak koristio se pri optimizaciji prstiju mobilnog. Radi montaže prsta na motor, morao se izopćiti početni dio kako bi se omogućila montaža i nesmetana rotacija prsta [Slika 4.3]. Sile su označene plavim strelicama te također iznose 100 N. Nakon optimizacije također se na dobivenom modelu provodi zaglađivanje površina radi previše oštih rubova. Ovaj postupak bi se mogao izbjeći povećanjem gustoće mreže prije topološke optimizacije, no time se povećava i vrijeme simulacije. Kako je Fusion 360 temeljen na cloud-u često dolazi do pada programa. Početna masa neoptimiranog dijela je 102 g, a nakon optimizacija masa iznosi 66 g. Ostvareno je smanjenje mase od 35.3 %.



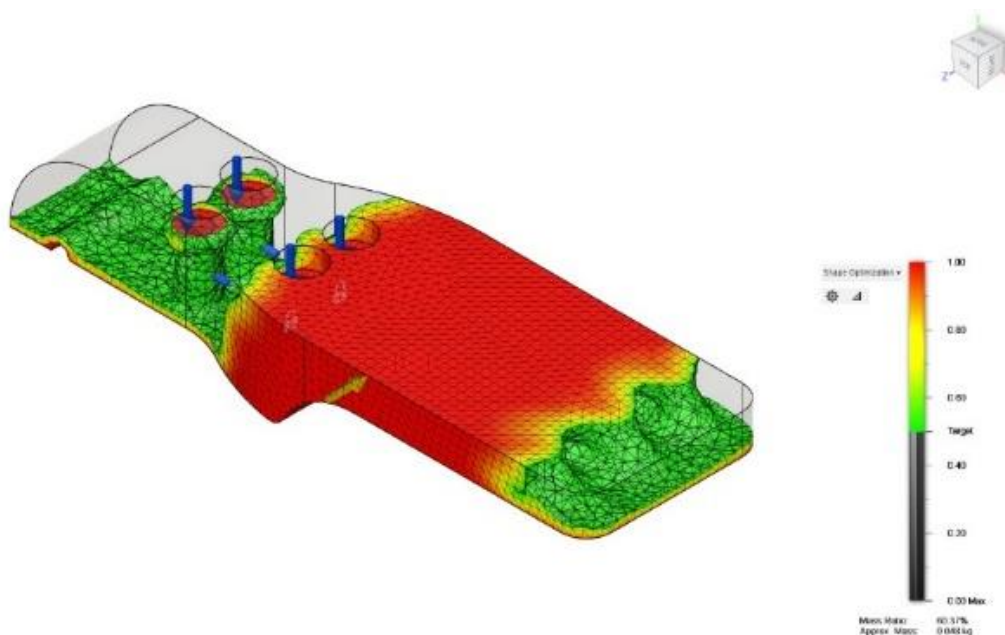
Slika 4.3 Topološka optimizacija prsta

Kod manjih dijelova poput tarne pločice [Slika 4.4] može se povećati gustoća mreže čvorova i time dobiti bolji model. Masa osnovnog dijela iznosi 37 g, dok masa optimiziranog dijela iznosi 31.5 g. Ostvareno je smanjenje mase od 14.8 %. Također je radi sigurnosti opterećeno silama od 100 N, te možemo primijetiti kako kod manjih dijelova postoji manje prostora za optimizaciju. Kod većih dijelova ušteda materijala može iznositi između 40 do 20%. Kod manjih dijelova od 10 do 20 %.



Slika 4.4 Optimizacija tarne pločice

Optimiziranjem noge nisu dobiveni adekvatni rezultati koji bi se mogli sigurno izraditi 3D printanjem [Slika 4.5]. Oduzeto je previše materijala gdje dolazi vratilo motora. Komponenta je dizajnirana s obzirom na potrebnu geometriju kako bi se povezale sve komponente i objedinio robot. Na noge robota se vežu dva motora, prst, tarne pločice te je sama noga u kontaktu s tijelom robota. Iz tih razloga nije moguće optimizacijom mijenjati geometriju noge.



Slika 4.5 Optimizacija noge

4.3. Generativni dizajn

Danas je općenito prihvaćeno da u zrakoplovnim i industrijskim primjenama možemo postići glavne prednosti uvođenjem naprednih postupaka dizajna, ako ih kombiniramo s procesima i tehnikama aditivne proizvodnje. Stoga moramo uzeti u obzir i spregu evolucijskih algoritama s inovativnim proizvodnim procesima, kao što je aditivna proizvodnja, i novim materijalima. Ova kombinacija uvodi više stupnjeva slobode u konačni koncept dizajna: na primjer, miješanje materijala s različitim svojstvima omogućuje raspodjelu različitih svojstava u različitim zonama istog dijela, što dovodi do višenamjenskih koncepata. Mogućnosti koje nudi AM nisu ograničene na višenamjenske koncepte. Tijekom posljednjih godina usvajanje AM-a povećalo se u svim industrijama, pri čemu je zrakoplovna industrija doprinijela s oko 10.2 % globalnih prihoda AM-a u 2012 [20]. AM pruža fleksibilnost za stvaranje složenih geometrija dijelova koje je teško izraditi korištenjem tradicionalne proizvodnje, kao što su unutarnje šupljine ili rešetkaste strukture koje pomažu smanjiti težinu dijelova bez ugrožavanja njihove mehaničke izvedbe. Novi sustav, jednom proizveden zahvaljujući AM-u, trebao bi zadovoljiti funkcionalne zahtjeve na inovativan i učinkovitiji način, također ciljajući na jednostavniji dizajn i značajno smanjenje troškova. Novi strukturni materijali i napredne AM tehnike čine ove tehnologije spremnima za uvođenje u proces generativnog projektiranja i za kontekst kritičan za sigurnost, kao što je zrakoplovstvo.

Tipične prakse projektiranja smatraju da se proces projektiranja dijeli na tri glavne faze: idejni dizajn, idejni projekt i detaljni dizajn. Projektno rješenje se predlaže tijekom tipičnog divergentno-konvergentnog procesa, u odnosu na projektne zahtjeve i ograničenja. Trenutno se razvijaju multidisciplinarni optimizacijski procesi koji podržavaju projektanta u procjeni optimalnog rješenja, u odnosu na sve značajke i parametre dizajna. Generativni dizajn je novi proces pronalaženja oblika koji uzima u obzir strukturne performanse, svojstva materijala i ergonomske zahtjeve, kroz automatski iterativni holistički pristup za optimizaciju topologije komponenti. Aktivnost dizajna mora biti dizajnirana na temelju evolucijskih algoritama kako bi se postigla optimalna ocjena za objektivnu funkciju prikladnosti. Evolucijski pristupi dizajnu ograničavaju izvođenje numeričke optimizacije skupa projektnih parametara [20]. S druge strane, optimizacija topologije namjerava pronaći optimalnu konstrukcijsku konfiguraciju unutar zadane projektne domene za specificirane ciljeve, ograničenja, opterećenja i rubne uvjete. Općenito, odnosi se na pitanja optimizacije veličine ili oblika, s posebnim osvrtom na smanjenje težine komponenti, definiraju se optimizirane konfiguracije preraspodjelom materijala u projektiranim domenama s propisanim opterećenjima i rubnim uvjetima.

Generativni dizajn uključuje i evolucijski dizajn i topološku optimizaciju, ali nije ograničen na to. Nakon godina istraživanja i razvoja, neki specijalizirani alati za generativni dizajn postaju dio CAD/CAE platformi i ulaze na tržište [21]. Unutar tipičnog divergentno-konvergentnog procesa projektiranja, uvodi se domena generativnog dizajna za odabir koncepta: kompromis između performansi komponenti, težine i troškova je pojednostavljen, a pristup multidisciplinarnе optimizacije je poboljšан. Napredni sustav generativnog dizajna i alati trebali bi uključivati neke ključne aspekte i u značajkama dizajna i u predstavljanju rješenja: modularnost, pravilnost i hijerarhija. Sa stajališta računalnog programskog jezika, programi za projektiranje i konstrukciju temeljeni na pravilima definiraju alat za programiranje dizajna. Elementi slični podproceduri temelj su značajke modularnosti; iterativne petlje i podprocedure omogućuju ulogu regularnosti, a pristup baze ugniježđenja definira hijerarhiju, za povezivanje svih podprocedura i petlji, unutar skupne procedure. Konačni postignuti dizajn optimiziran je u skladu s predloženim zahtjevima i ograničenjima i sastoji se od „obitelji dizajna“ prema različitim parametrima koji se mogu koristiti kao input za definirana pravila ili mijenjanje objektivne funkcije prikladnosti.

Pokrećući proces dizajna, ljudski konstruktor ima središnju ulogu u stvaranju i definiranju najprikladnijeg konstrukcijskog rješenja. CAD alati omogućeni za prakse generativnog dizajna nemaju unaprijed strukturirani tijek rada; nadalje, proces razvoja dizajna povezan je s generiranjem novog znanja o problemu dizajna u svakom koraku iterativne procedure. Nedavno je objavljeno nekoliko "softverskih alata za generativni dizajn", koji se pružaju ili kao dio CAE (Computer Aided Engineering) paketa kao što su proizvodi Autodesk i Dassault Systèmes ili kao samostalne aplikacije (Genoform i nTopology Element) s različitim razinama interoperabilnosti s postojećim CAD softverom. Ti alati koji su dio CAE iskorištavaju FEM alate kako bi korisniku pružili alat za podršku u projektiranju potpuno napregnutih komponenti koje maksimiziraju učinkovitost strukturne funkcije. Korisnik crta prostor dizajna kao omotnicu u koju komponenta treba stati. Opterećenja i ograničenja primjenjuju se na sličan način kao u FEM alatima, a odabire se ciljna funkcija optimizacije (npr. minimalna težina, maksimalna krutost). Kao rezultat primijenjenog optimizacijskog algoritma, korisniku se daje jedinstveno rješenje putem grubog modela koji se potom treba ručno doraditi kako bi se dobilo prihvatljivo rješenje. Ti su alati moćni sa stajališta građevinskog inženjerstva, ali ne zahvaćaju u potpunosti kreativnu namjeru projektanta. S druge strane, samostalne aplikacije generativnog dizajna (one koje nisu dio CAE paketa) konstruktoru pružaju skup alternativnih konfiguracija proizvoda koje konstruktor može procijeniti prema estetskim, strukturnim ili funkcionalnim

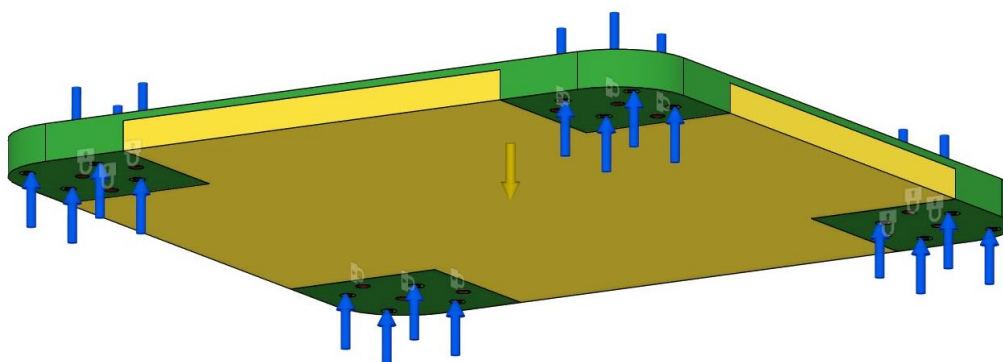
kriterijima koristeći odgovarajuće alat za svaki relevantni kriterij. Parametarski CAD sustavi za genoformiranje temelje se na CAD parametarskim modelima, to su plugin aplikacije koje rade djelujući na parametre CAD programa pomoću genetskog algoritma. Specifične značajke omogućuju korisniku kontrolu razine kreativnog istraživanja pomoću klizne trake (Genoform).

Općenito govoreći, aktivnost optimizacije dizajna ima glavni cilj osigurati značajnu uštedu težine; nadalje, danas su napredne komponente dizajnirane za izravnu proizvodnju aditivnom tehnikom. Proces generativnog dizajna počinje tako da konstruktor definira područje dizajna, spojne točke povezane parametrima. Optimizacija se temelji na željenim materijalima, proizvodnim tehnologijama, temperaturnoj toleranciji, cijeni i čvrstoći dijela i njegovoj sposobnosti da izdrži određene sile. Inovativni alati za generativni dizajn podržavaju konstruktora da se prilagodi svim definiranim ograničenjima i ispuni zahtjeve. Učinkovito visoka razina automatizacije podržava sve zadatke dizajna, uključujući estetske značajke i definiciju inovativnih i učinkovitih modela za istraživanje, smanjujući vrijeme dizajna i poboljšavajući rezultate. Unutar okvira Autodesk Research, Project Dreamcatcher omogućuje konstruktoru iterativno definiranje nekih najprikladnijih rješenja, testiranje čvrstoće i uklanjanje nepotrebnog materijala u svakom koraku dizajna [22]. Airbus i Autodesk razvili su jedan od najučinkovitijih primjera generativnog dizajna u aeronautici [23]. Pregrade kabine dizajnirane su za proizvodnju 3D aditivnim proizvodnim procesom. Prilagođeni algoritmi razvijeni su za generiranje nekonvencionalnih struktura koje oponašaju stanične oblike i rast kostiju. Dizajnirane su jače i lakše mikrorešetkaste nove bioničke pregradne strukture. Svaki model je 45 % (30 kg) lakši od trenutnih dizajna. Kada se primijeni na kabinu A320, to rezultira smanjenjem od 465.000 metričkih tona emisija CO₂ godišnje. Laser Powder Bed Additive Layer Manufacturing (ALM) je tehnologija koja se koristi za proizvodnju novih bioničkih pregrada. Scalmalloy je aluminijski prah visokih performansi koji se koristi za proces 3D ispisa, zahvaljujući svojoj visokoj čvrstoći i žilavosti, u kombinaciji s malom težinom aluminijskih legura. Pristup generativnog dizajna razmatra definirani osnovni model; iterativno se provodi proces optimizacije makro i mikro geometrije. Na makro razini, algoritam skicira linije za umrežavanje mnogih referentnih točaka, dok se na mikro razini primjenjuje logika slična rastu kostiju kako bi se poduprla područja najveće snage strukture.

4.4. Dijelovi dobiveni generativnim dizajnom

Generativni dizajn u Fusionu 360 proces je koji oponaša prirodni evolucijski pristup dizajnu. Konstruktori unose ciljeve dizajna, materijale, metode proizvodnje i ograničenja troškova u softver. Softver zatim istražuje sve moguće permutacije rješenja, generirajući alternative dizajna i učeći iz svake iteracije. Postavljanje za generativni dizajn dovršava se unutar softvera, s datotekama i postavkama koje se učitavaju za analizu. Ovaj proces pomaže u otkrivanju novih načina dizajniranja dijelova s ograničenjima mogućnosti izrade, performansi i troškova, pružajući višestruka konstruktorska rješenja koja se mogu uređivati koristeći jedno rješenje u oblaku. Konstruktori zatim mogu istražiti ta rješenja kako bi odabrali optimalni dizajn za proizvodnju.

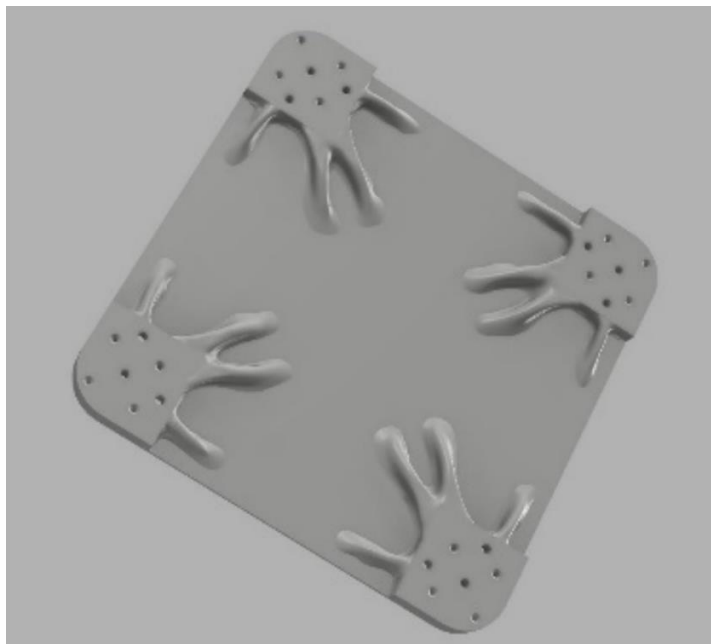
Za razliku od topološkog optimiranja gdje se materijal oduzima od početnog dizajna kako bi se dobila optimalna geometrija, generativni dizajn djeluje upravo suprotno. Od osnovnog dizajna uzima se samo potrebna geometrija koja je bitna kako bi se montirao dio u pitanju, te se prepušta algoritmu da prazan prostor između popuni na najbolji mogući način s obzirom na konstrukcijske zahtjeve. Slika 4.6 prikazuje fazu pripreme za generativni dizajn tijela robota. Zelenom bojom označena je osnovna geometrija koja se ne optimizira tokom procesa. Žutom bojom označen je dio koji će se mijenjati tokom procesa, radi potrebe za ravnom plohom gdje će se kasnije montirati el. komponente nije bilo moguće ostaviti taj prostor praznim, te time dobivamo proces sličan topološkom optimiranju. Crvenom bojom označeni su volumeni u kojima se ne smije nalaziti materijal, to su najčešće rupe za vijke ili vratila.



Slika 4.6 Priprema generativnog dizajna tijela robota

Plavim strelicama označene su sile kojima će dio biti opterećen pri montaži ostalih dijelova. Žutom strelicom označena je sila gravitacije. Masa novog dijela [Slika 4.7] iznosi 554.5 g, te je ostvarena redukcija mase od 39.4 %. Dobiveno je 0.7 % veće smanjenje mase nego kod

topološkog optimiranja. Generativnim dizajnom dobiveno je puno ljepše rješenje koje ne zahtijeva nikakvu naknadnu doradu te se odmah može proizvesti u 3D printeru.



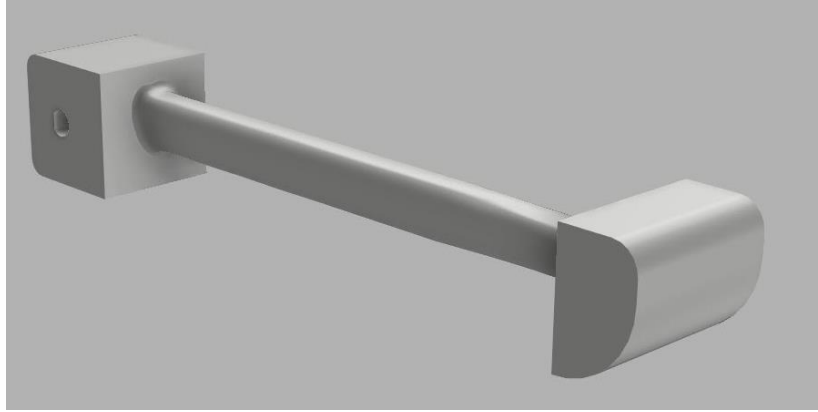
Slika 4.7 Rezultat generativnog dizajna tijela robota

Slika 4.8 prikazuje dobar primjer generativnog dizajna. Zelenom bojom označeni su volumeni koji se ne mijenjaju kao i kod prethodnog procesa.



Slika 4.8 Priprema generativnog dizajna prsta

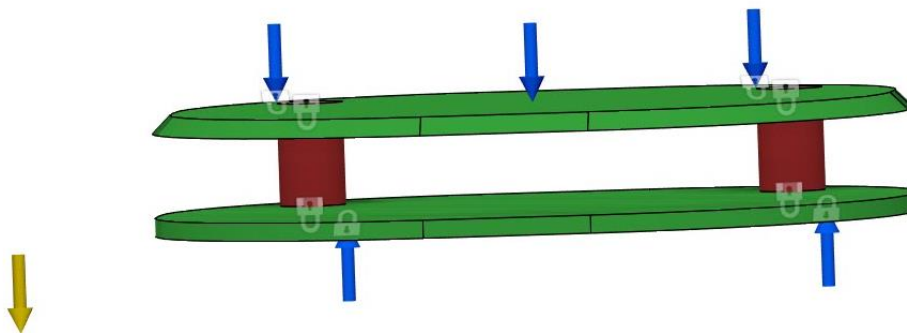
Kod prsta robota može se maknuti ostatak materijala koji je nepotreban, pošto se ništa ne montira na prst. Crvenom bojom je označen volumen u kojem će se nalaziti vratilo motora te ne želimo da ga algoritam popuni. Plavim strelicama su označena opterećenja kao i kod topološkog optimiranja.



Slika 4.9 Rezultat generativnog dizajna prsta robota

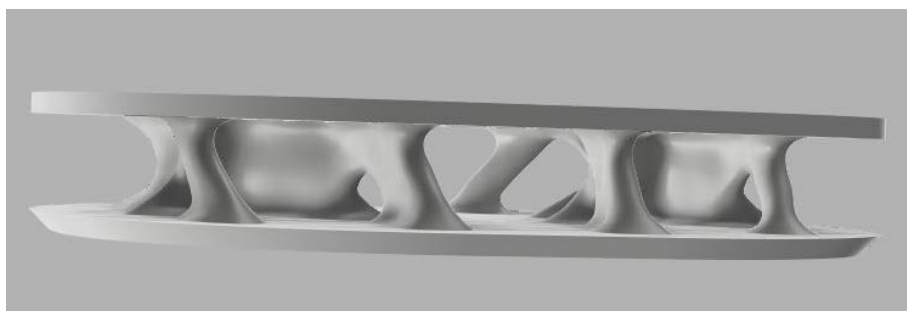
Dobiven rezultat [Slika 4.9] ima masu samo 30.9 g, što je smanjenje od 16.4 %, te je 1.68 % više nego kod topološkog optimiranja.

Kao i kad prethodnih dijelova, na tarnoj pločici [Slika 4.10] može se lako i dobro provesti generativni dizajn. Postupak se ponavlja kao i kod tijela i prsta robota.



Slika 4.10 Priprema generativnog dizajna tarne pločice

Dobiveno je rješenje [Slika 4.11] zanimljivog izgleda. Masa optimiranog dijela iznosi 11 g, te je ostvareno značajno smanjenje mase od 70 %.

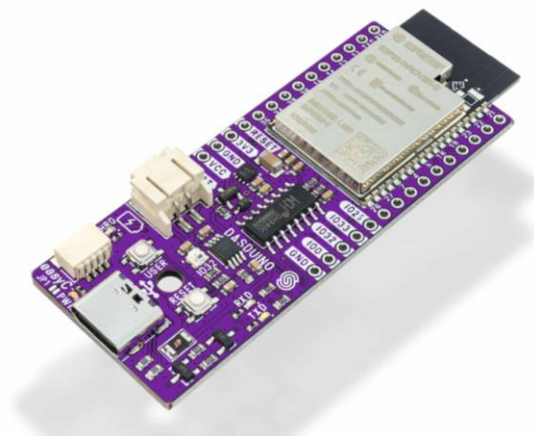


Slika 4.11 Rezultat generativnog dizajna tarne pločice

Iz istih razloga kao i kod topološkog optimiranja, na nogama robota nije proveden generativni dizajn.

5. ELEKTRONIČKE KOMPONENTE

Sve električne komponente korištene za ožičenje napravljene su od tvrtke Soldred. Tvrtka Soldered Electronics danas je samofinancirana kompanija u privatnome vlasništvu. Nalazi se u gradu Osijeku u Hrvatskoj. Bavi se razvojem te dizajniranjem i proizvodnjom vlastitih elektroničkih proizvoda. Za potrebe upravljanjem elektromotorima odabran je Dasduino CONNECTPLUS [Slika 5.1].



Slika 5.1 Dasduino CONNECTPLUS [24]

Dolazi s integriranim Wi-Fi i Bluetoothom 4.2, koji omogućuju sigurno povezivanje uz istovremene nisku potrošnju energije. Koristi ESP32-WROVER-E modul s 4 MB integrirane flash memorije i 8 MB integriranog PSRAM-a. Odgovara standardnoj eksperimentalnoj pločici za brzo prototipiranje i radi s većinom projekata. Nudi mnoštvo slobode sa svojih 30 pinova. Vrlo jednostavno se može povezati s računalom preko standardnog USB Type-C kabela i programirati preko Arduino IDE softvera.



Slika 5.2 NEMA 17 [24]

Za pokretanje robota odabrani su motori NEMA 17. NEMA17 [Slika 5.2] je manji stepper motor velike preciznosti. Često se može naći u 3D printerima i manjim CNC strojevima,

budući da ima dovoljnu snagu [Tablica 2.] pomicati manje predmete. Također se koristi za 3D printer, CNC, robote ili preciznu kontrolu svega što se okreće ili pomiče.

Tablica 2. NEMA 17 specifikacije [24]

Električne specifikacije		Fizičke specifikacije	
Broj proizvođača	17HS19-2004S1	Veličina okvira	42 x 42 mm
Tip motora	Bipolarni stepper	Duljina tijela	48 mm
Koračni kut	1.8°	Promjer vratila	5 mm
Zakretni moment	59 Ncm	Duljina vratila	24 mm
Nazivna struja/faza	2 A	Težina	390 g
Fazni otpor	1.4 Ω	Broj vodova	4
Induktivitet	3.0 mH ± 20%	Duljina kabla	1000 mm

Za potrebe napajanja cijelog sustava odabrala se litij-ionska baterija od kapaciteta 5000 mAh napona 3.7 V. Ova litij-ionska baterija je mala, lagana i izdržljiva. Kroz standardni JST 2mm ženski konektor dat te daje nominalnih 3.7 V. Baterija ima ugrađen sustav za zaštitu od prevelikog napona (sprječava pretjeranog punjenja), preniskog napona te kratkog spoja.



Slika 5.3 Litij-ionska baterija [24]

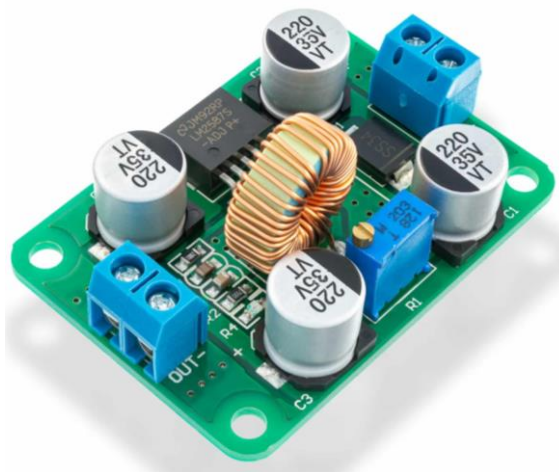
Baterija se puni pomoću punjača BQ24295 [Slika 5.4]. Podržava različite načine punjenja, uključujući konstantnu struju (CC) i konstantni napon (CV). Punjač BQ24295 radi na širokom rasponu ulaznog napona, obično od 4.35 V do 17 V, što mu omogućuje napajanje iz različitih izvora energije, uključujući USB priključke i AC adaptere. Također ima integrirano

upravljanje putem napajanja, što omogućuje istovremeno punjenje baterije i napajanje povezanog uređaja, osiguravajući neprekidno djelovanje.



Slika 5.4 Li-ion punjač BQ24295 [24]

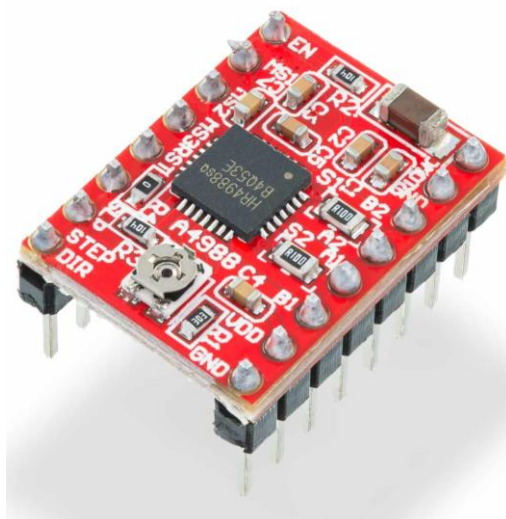
Napajanje za motor dovodilo se preko step-up modula LM2587 [Slika 5.5]. To je monolitni integrirani krug dizajniran za povratne, pojačane aplikacije i pretvarače. Raspon ulaznog napona je od 3.5 V do 30 V, a izlazni napon je podesiv od 4.0V do 30 V. Maksimalna izlazna struja je 5 A. Učinkovitost modula je od oko 90 % do 94 %, ovisno o ulaznom i izlaznom naponu. Ovaj modul dio je serije regulatora LM2587 i izvrstan je izbor za aplikacije koje zahtijevaju viši izlazni napon od ulaznog napona.



Slika 5.5 Step-up modul LM2587 [24]

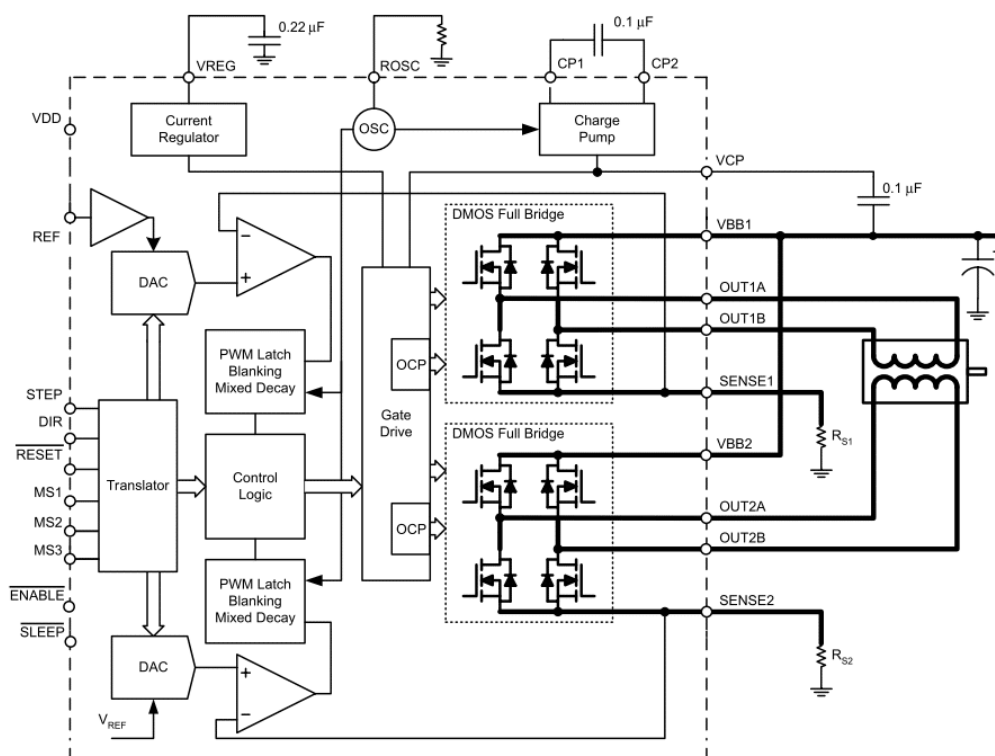
5.1. Funkcionalnost robota

Struja za napajanje motora dovodi se od baterije, preko punjača, step-up modula sve do drivera A4988 [Slika 5.6]. A4988 je potpuni driver mikrokoračnog motora s ugrađenim prevoditeljem za jednostavno rukovanje. Dizajniran je za rad s bipolarnim koračnim motorima u punom koraku, polovini, četvrtini, osmini i šesnaestini koraka, s izlaznim pogonskim kapacitetom do 35 V i 2 A.



Slika 5.6 A4988 driver [24]

A4988 upravljački program koračnog motora ima prevoditelj koji olakšava korištenje. Kada su impulsi spojeni na driverov step pin, on nadzire zavojnicu koju treba spojiti na napajanje te kako je spojena (koji kraj na pozitivni pol napajanja, a koji na negativni pol napajanja) pomoću translatora i logičkog regulatora [Slika 5.7], a ovisno o broju impulsa motor čini isti broj koraka.



Slika 5.7 Blok dijagram A4988 [24]

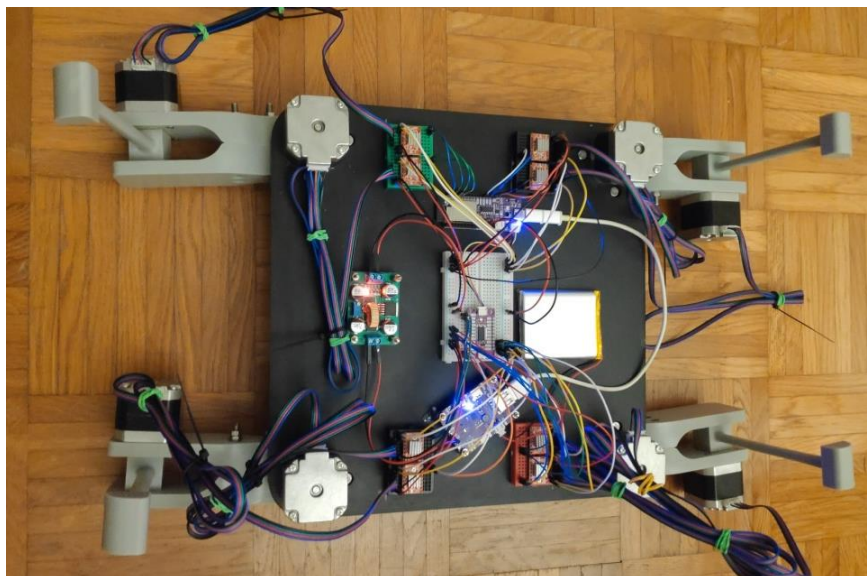
Kako driver određuje sve, potrebno je poslati impuls koliko koraka želimo da motor napravi na STEP pinu. DIR pin se koristi za određivanje smjera vrtnje motora i može se

postaviti na visoko ili nisko stanje, ovisno o željenom smjeru. Unutar drivera nalaze se mosfet tranzistori koji omogućuju driveru da isporuči struju do 2 A po zavojnici, te ima i zaštitu od prekomjerne struje koja se može podesiti potencijetrom ovisno o tome kolika je struja potrebna. Ako koristimo mikrokoračnu funkciju, ovisno o tome kako želimo podijeliti korak motora, potrebno je spojiti pinove MS1, MS2, MS3, ako želimo da driver radi ispravno bez dijeljenja koraka motora u mikrokorake, ne spajamo pinove MS1, MS2, MS3 i tada se postiže cijeli korak.

Tokom ožičenja robota uočen je problem pri puštanju struje u motor. Iako je driver A4988 deklariran za 2 A, okretanjem vijka na potencijetru nije moguće dobiti struju jaču od 1 A (1). Svih osam drivera tvornički je limitirano na V_{ref} od 0.8 V. Time struja koju motor vidi nikada ne može biti veća pošto su otpornici R_{CS} veličine 0.1 Ω .

$$I = \frac{V_{ref}}{8 \cdot R_{CS}} = \frac{0,8}{(8 \cdot 0,1)} = 1 \text{ A} \quad (1)$$

Nakon montaže i probe rada motora utvrđeno je da ista komponenta dolazi u tri varijante s R_{CS} od 0.025, 0.1 i 0,2 Ω . Time je ostvareno pola željene jačine struje za pokretanje robota.



Slika 5.8 Sklopljen robot

Uz neuračunatu masu dobivenu radi lijepljenja potporne ploče na tijelo robota, te ostvarene pola od očekivane jačine struje mobilni robot [Slika 5.8] mase 4.5 kilograma nije u mogućnosti pokretati se.

6. ZAKLJUČAK

Generativni dizajn pruža velike mogućnosti tokom dizajniranja proizvoda. Uz pravilnu upotrebu, dobro postavljanje studije za optimiranje moguće je ostvariti velike uštede mase pri tome da krutost ostaje ista. U gotovo svim slučajevima poželjno je smanjenje mase pošto je potrebno manje energije za pokretanje istog komada, te se smanjuju troškovi komponenti zbog manjeg utroška materijala. Najveću korist ove tehnologije ostvaruju industrije koje imaju pokretljive proizvode poput automobilske, motociklističke, avio, te brodske industrije. Veliku primjenu možemo očekivati pri izradi dronova, mobilnih robota i robotskih ruku u proizvodnji.

Iako je generativni dizajn još uvijek u testnoj fazi te ne vidi široku primjenu, topološko optimiranje je već dulje vrijeme u upotrebi. Najbolji primjer može se vidjeti u softverskom paketu Creo, koji daje vrlo pouzdane rezultate. Prilikom izrade praktičnog dijela diplomskog rada korištene su obje metode optimizacije, te se generativni dizajn pokazao kao bolja metoda. Dobivene su kompleksne strukture koje su pogodne za izradu aditivnim tehnologijama. Polimeri te kompoziti mogu vidjeti veliku primjenu ovih tehnologija u budućnosti s napretkom tehnologija 3D printanja. U masovnoj proizvodnji moguće je metalne dijelove izraditi lijevanjem, no kako su dobivene strukture kompleksne teško su izvedive na CNC strojevima. Trenutno ima malo metalnih 3D printera na tržištu te je s time cijena takvih proizvoda vrlo visoka. Daljnjim napretkom te tehnologije očekuje se i sve veća prisutnost metalnih kompleksnih geometrija.

Unatoč ostvarenim uštedama na masi mobilnog robota, nije se ostvarila zadana funkcionalnost. Kako bi robot bio pokretljiv potrebno je više reducirati masu komponenti upotrebom smanjenog postotka infilla (popunjenosti modela) tokom aditivne proizvodnje što nije bilo korišteno tokom izvođenja optimizacije dijelova. Komponente poput nogu robota gdje se radi stroge geometrije potrebne za montiranje nije moglo upotrijebiti optimiziranje, savršen je primjer za izradu s manjim postotkom popunjenosti dijela. Također je potrebno odabrati ispravne elektroničke komponente koje su u stanju iskoristiti maksimalnu snagu koji elektromotori mogu pružiti.

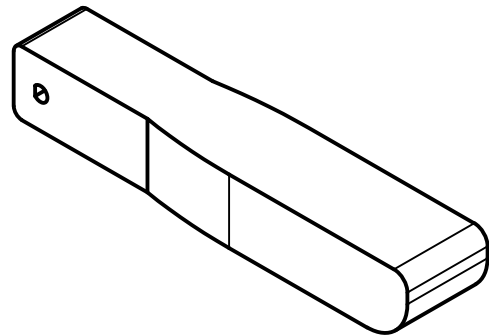
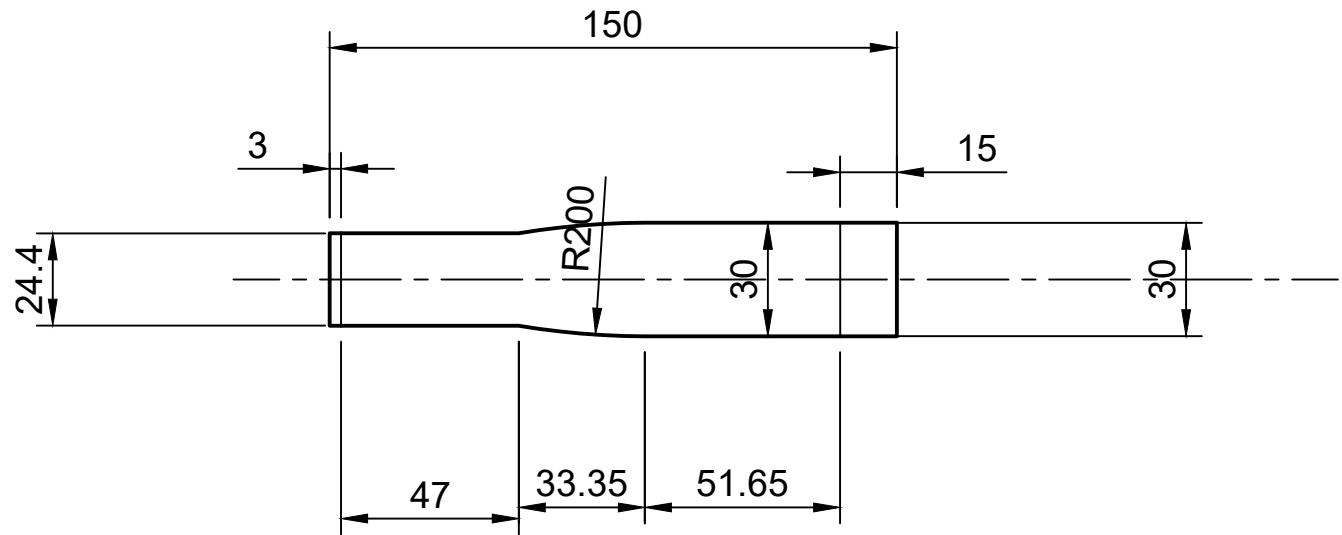
LITERATURA

- [1] Shneier, M., Bostelman, R.: Literature Review of Mobile Robots for Manufacturing, National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [2] Industrial Truck Standards Development Foundation, "ANSI/ITSDF B56.5-2012, Safety Standard for Driverless, Automatic Guided Industrial Vehicles and Automated Functions of Manned Industrial Vehicles," ed, 2012.
- [3] International Organization for Standardization, "ISO 13482:2014 Robots and robotic devices–Safety requirements–Non medical personal care robot," ed: Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2014.
- [4] Rubio, F., Valero, F., Llopis-Albert, C.: A review of mobile robots: Concepts. Methods, theoretical framework, and applications, International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019., pp. 1-22.
- [5] Zeglin, G. J. Uniroo: A One-Legged Dynamic Hopping Robot, BS Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1991.
- [6] <https://bostondynamics.com/atlas/>, 13.10.2023.
- [7] Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies, Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2010.
- [8] Gawel, G. T.: Review of Additive Manufacturing Methods, Solid State Phenomena, 308, 2020., pp. 1-20.
- [9] Pranzo, D., Larizza, P., Filippini, D., Percoco, G.: Extrusion-Based 3D Printing of Microfluidic Devices for Chemical and Biomedical Applications: A Topical Review, Micromachines 9/8, 2018., pp. 1-27
- [10] Kelly, B. E., Bhattacharya, I., Heidari, H., Shusteff, M., Spadaccini, C. M., Taylor H. K.: Volumetric Additive Manufacturing via Tomographic Reconstruction, Science 363/6431, 2019., pp. 1-5.
- [11] Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S., Christensen, A.: Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM), Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 3/3, 2010., pp. 249-259.
- [12] Utela, B., Storti, D., Anderson, R., Ganter, M.: A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP), Journal of Manufacturing Processes 10/2, 2008., pp. 96-104.

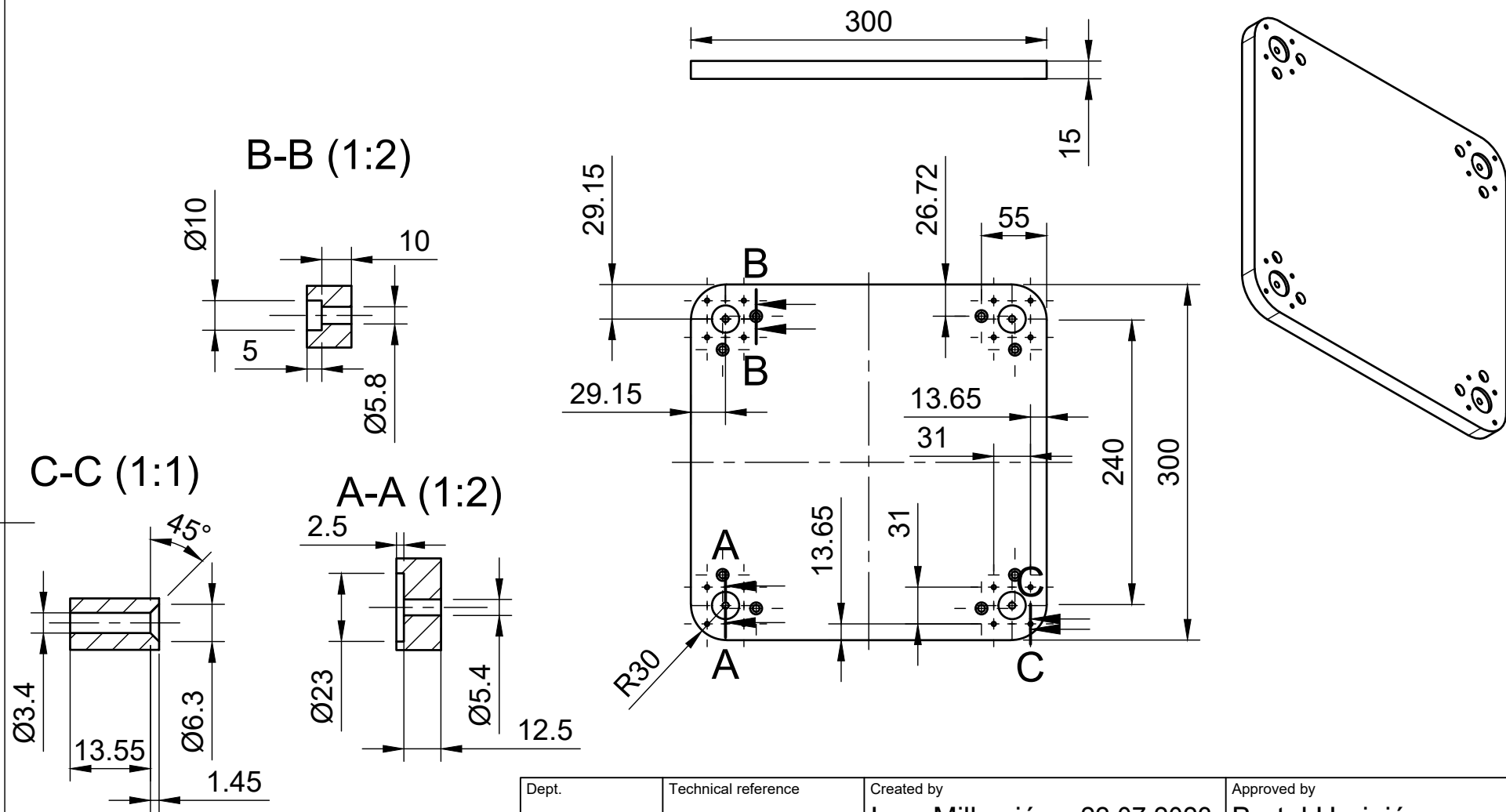
-
- [13] <https://www.okuma.com/mu-8000v-laser-ex>, 17.10.2023.
- [14] Lantada, A. D., Romero, A. B., Schwentenwein, M., Jellinek, C., Homa, J.: Lithography-based Ceramic Manufacture (LCM) of Auxetic Structures: present capabilities and challenges, *Smart Materials and Structures* 25/5, 2016., pp. 1-10.
- [15] Huang, T., Mason, M. S., Hilmas, G. E., Leu, M. C.: Freeze-form Extrusion Fabrication of Ceramics, *Virtual and Physical Prototyping* 1/2, 2006., pp. 93-100.
- [16] Brackett, D., Ashcroft, I., Hauge, R.: *Topology Optimization For Additive Manufacturing*, Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Sveučilište Loughborough, Loughborough, Leicestershire, 2011.
- [17] Querin, O. M., Steven, G. P., Xie, Y. M.: Evolutionary structural optimization using a bi-directional algorithm, *Engineering Computations*, 15/8, 1998., pp. 1031-1048.
- [18] Sigmund, O.: On the usefulness of non-gradient approaches in topology optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43, 2011., pp. 589-596.
- [19] Wang, M. Y., Wang, X., Guo, D.: A level set method for structural topology optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192 1/2, 2003., pp. 227-246.
- [20] Bagassi, S., Lucchi, F., De Crescenzo, F., Persiani F.: *Generative Design: Advanced Design Optimization Processes for Aeronautical Applications*, Industrial Engineering Department, University of Bologna, 2016.
- [21] <http://www.autodesk.com/products/within/overview>, 25.10.2023.
- [22] <https://autodeskresearch.com/blog/dreamcatcherswingarm>, 25.10.2023.
- [23] <http://www.airbusgroup.com/int/en/storyoverview/Pioneering-bionic-3D-printing.html>, 26.10.2023.
- [24] <https://soldered.com/>, 03.01.2024.

PRILOZI

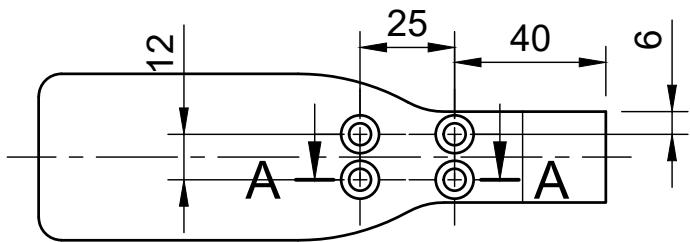
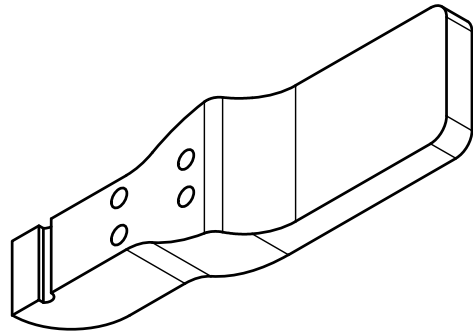
- I. Tehnička dokumentacija
- II. CD-R disc



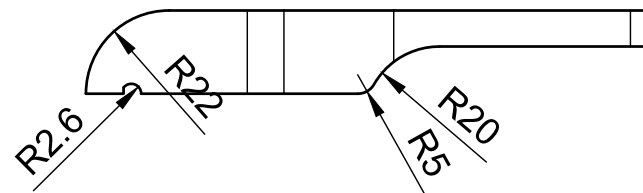
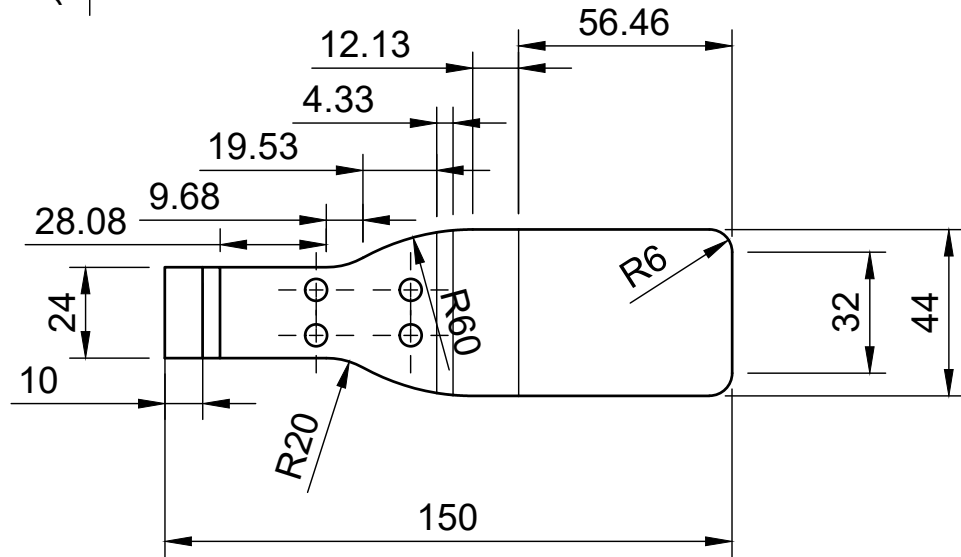
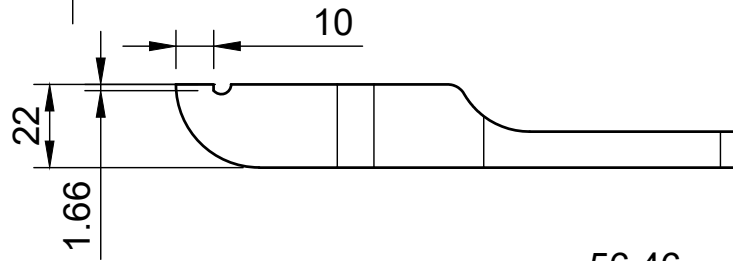
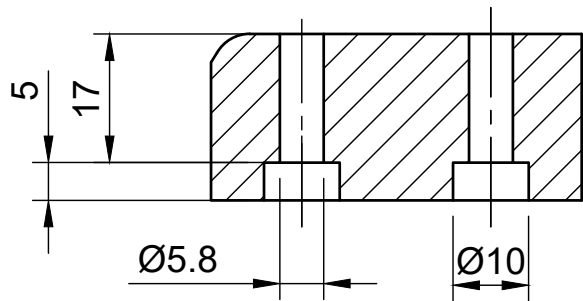
Dept.	Technical reference	Created by Ivan Milković	21.01.2023.	Approved by Bartol Ugrinić
		Document type Diplomski rad	Mentor Dr. sc. Petar Ćurković	
		Title Finger	DWG No. 1	
		Scale 1:1	Material ABS plastic	Sheet 1/1



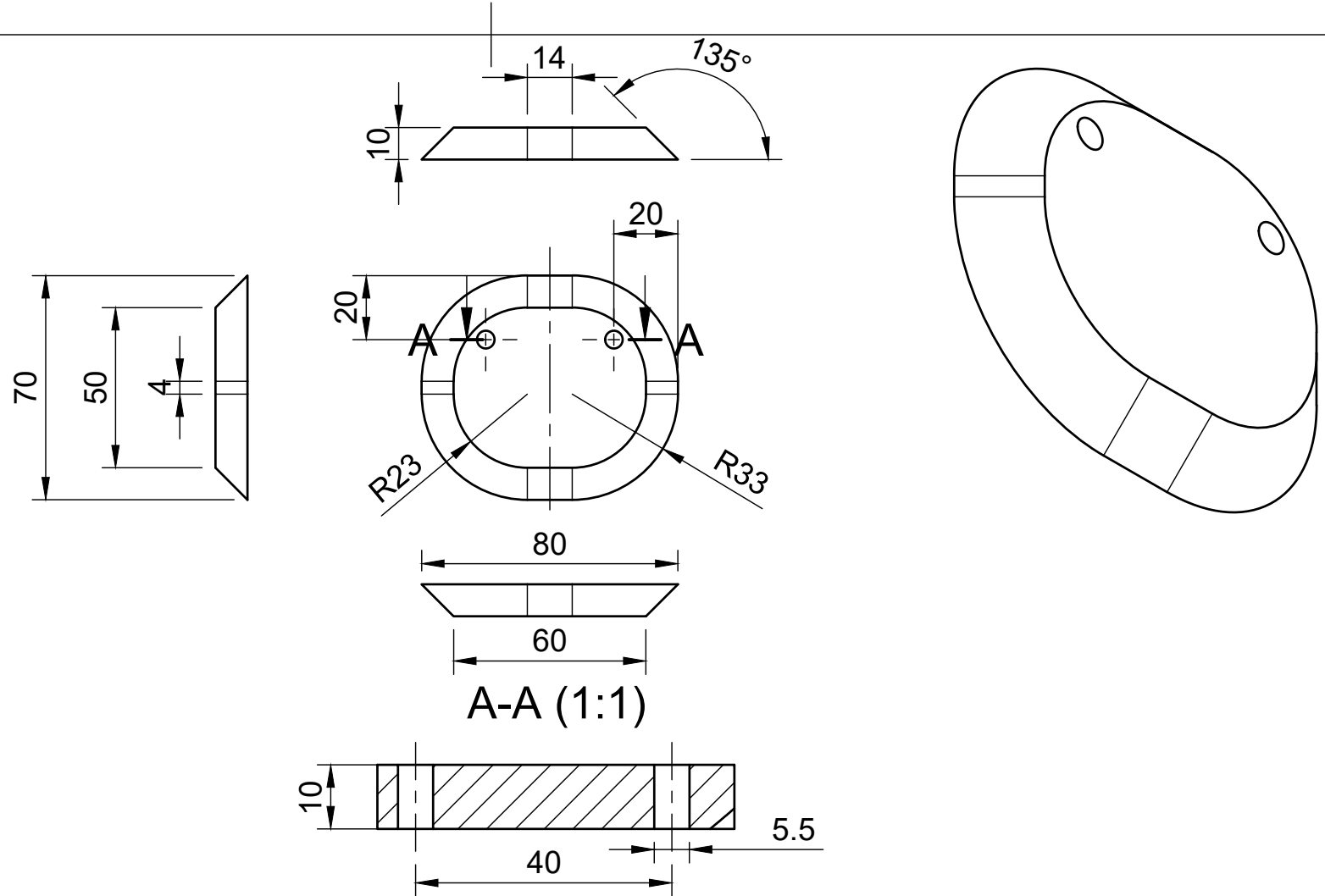
Dept.	Technical reference	Created by Ivan Milković 22.07.2023.	Approved by Bartol Ugrinić	
		Document type Diplomski rad	Mentor Dr. sc. Petar Ćurković	
		Title Body [Motor]	DWG No. 2	
		Scale 1:5	Material ABS plastic	Sheet 1/1



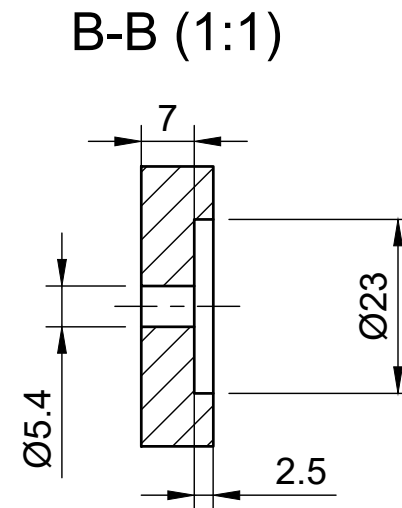
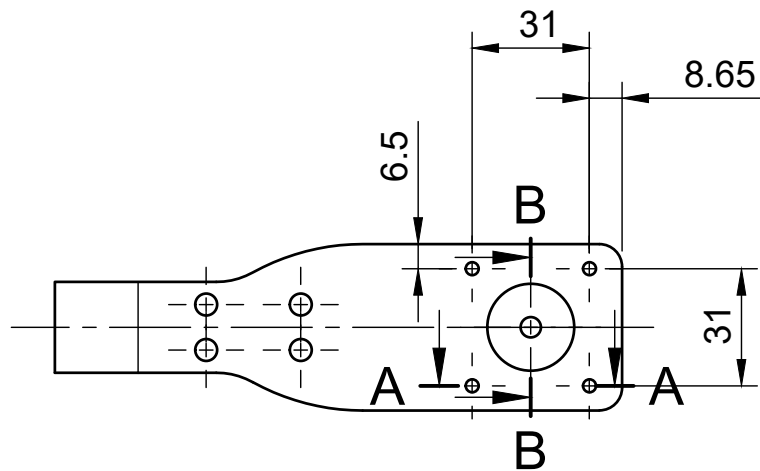
A-A (1:1)



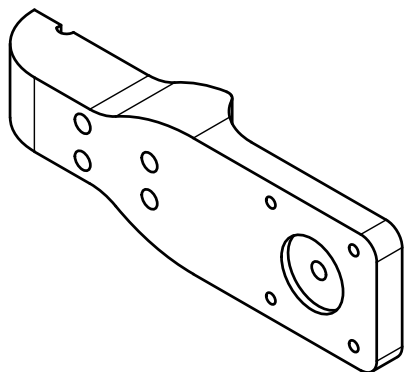
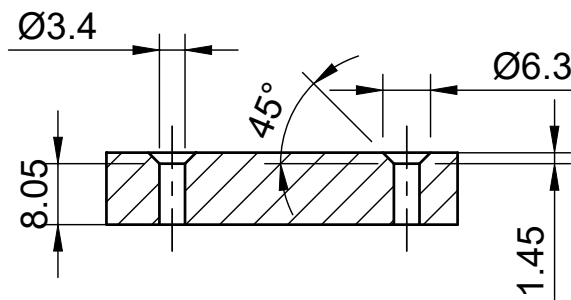
Dept.	Technical reference	Created by Ivan Milković	23.07.2023.	Approved by Bartol Ugrinić
		Document type Diplomski rad	Mentor Dr. sc. Petar Ćurković	
		Title Leg	DWG No. 3	
		Scale 1:2	Material ABS plastic	Sheet 1/1



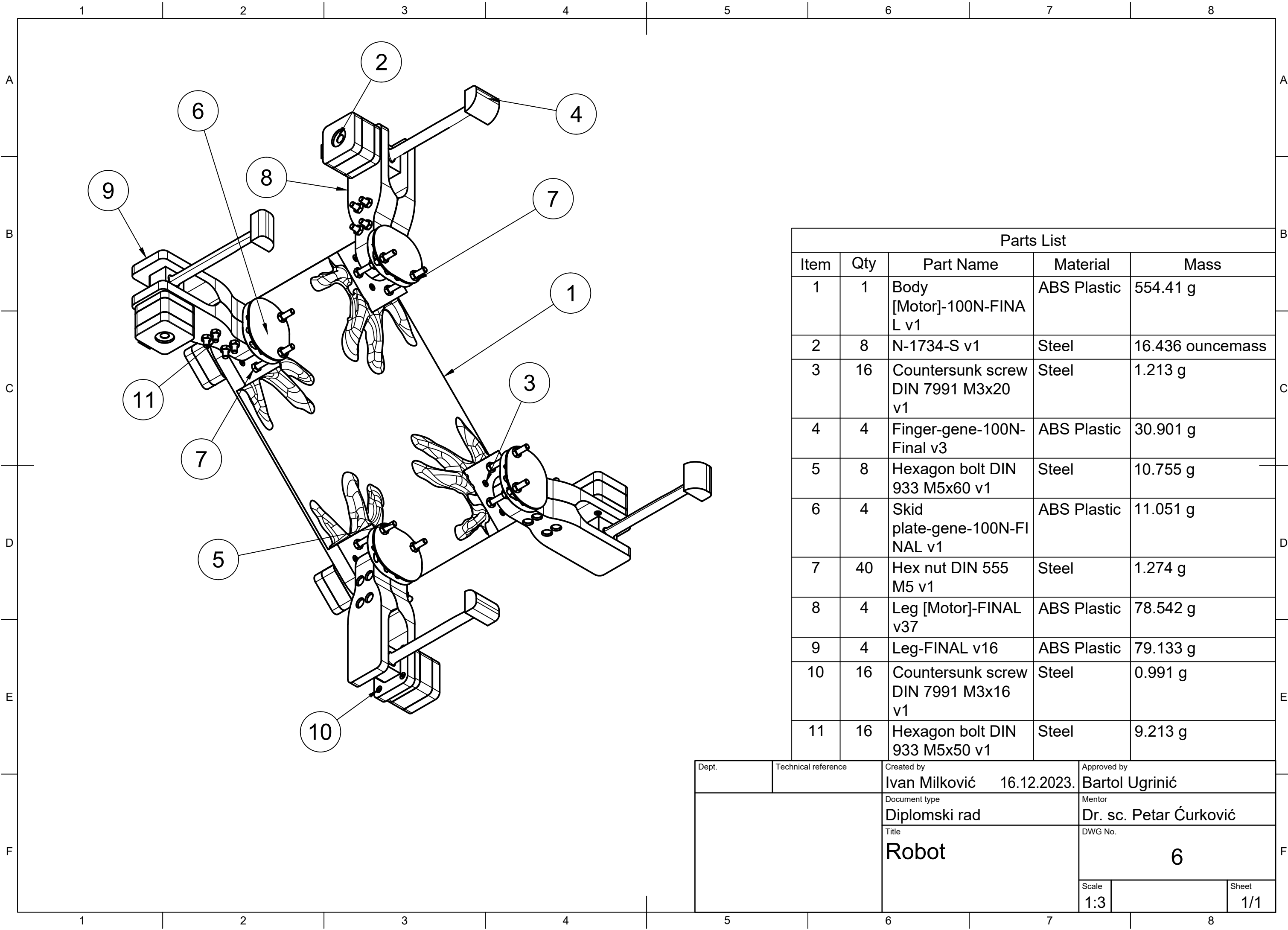
Dept.	Technical reference	Created by Ivan Milković 25.07.2023.	Approved by Bartol Ugrinić	
		Document type Diplomski rad	Mentor Dr. sc. Petar Ćurković	
		Title Skid plate	DWG No. 4	
		Scale 1:2	Material ABS plastic	Sheet 1/1



A-A (1:1)

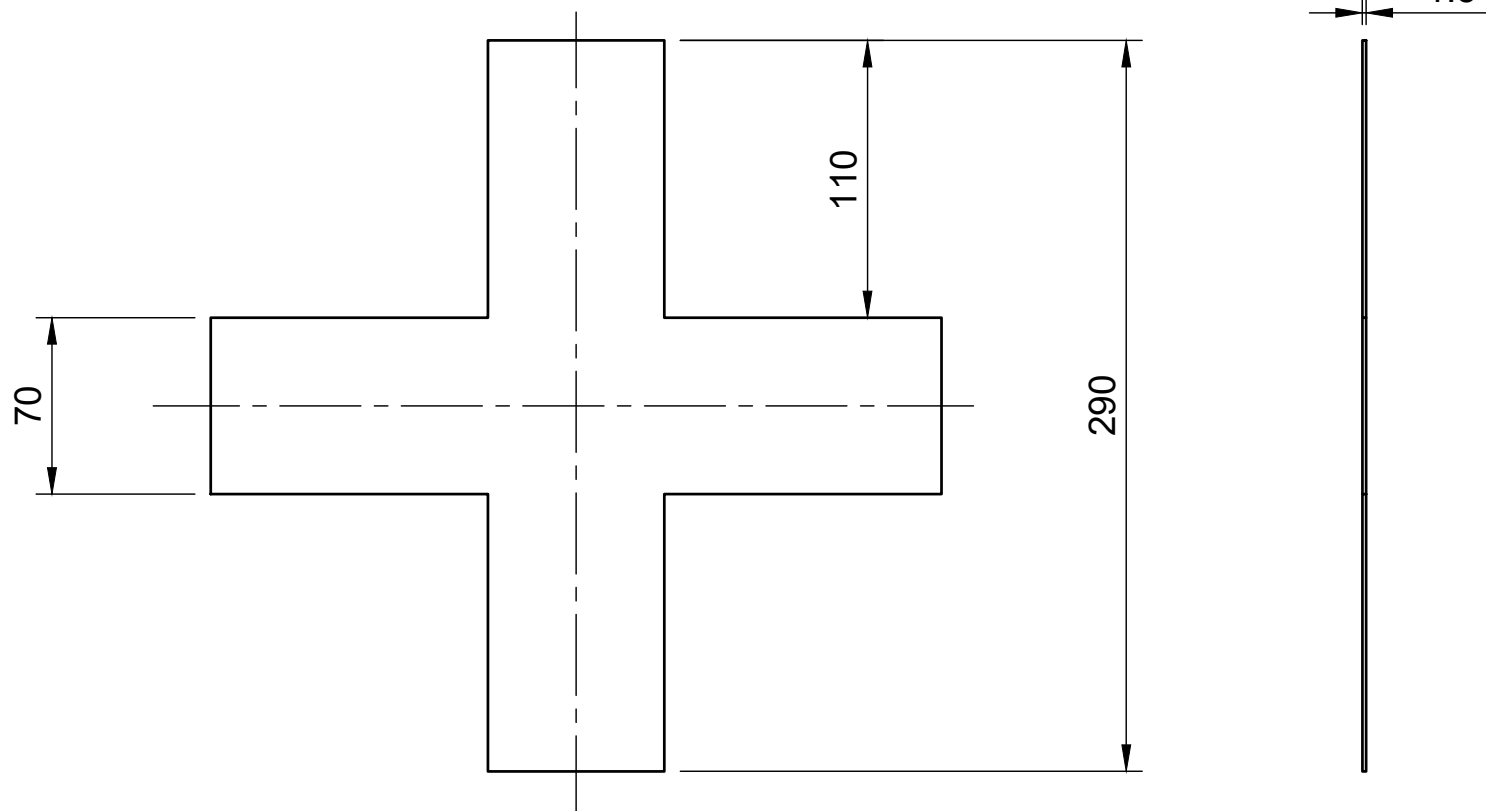


Dept.	Technical reference	Created by Ivan Milković 26.07.2023.	Approved by Bartol Ugrić	
		Document type Diplomski rad	Mentor Dr. sc. Petar Ćurković	
		Title Leg [Motor]	DWG No. 5	
		Scale 1:2	Material ABS plastic	Sheet 1/1



Parts List				
Item	Qty	Part Name	Material	Mass
1	1	Body [Motor]-100N-FINAL v1	ABS Plastic	554.41 g
2	8	N-1734-S v1	Steel	16.436 ouncemass
3	16	Countersunk screw DIN 7991 M3x20 v1	Steel	1.213 g
4	4	Finger-gene-100N-Final v3	ABS Plastic	30.901 g
5	8	Hexagon bolt DIN 933 M5x60 v1	Steel	10.755 g
6	4	Skid plate-gene-100N-FINAL v1	ABS Plastic	11.051 g
7	40	Hex nut DIN 555 M5 v1	Steel	1.274 g
8	4	Leg [Motor]-FINAL v37	ABS Plastic	78.542 g
9	4	Leg-FINAL v16	ABS Plastic	79.133 g
10	16	Countersunk screw DIN 7991 M3x16 v1	Steel	0.991 g
11	16	Hexagon bolt DIN 933 M5x50 v1	Steel	9.213 g

Dept.	Technical reference	Created by Ivan Milković 16.12.2023.	Approved by Bartol Ugrinić
		Document type Diplomski rad	Mentor Dr. sc. Petar Ćurković
		Title Robot	DWG No. 6
		Scale 1:3	Sheet 1/1



Dept.	Technical reference	Created by Ivan Milković 23.12.2023.	Approved by Bartol Ugrinić	
		Document type Diplomski rad	Mentor Dr. sc. Petar Ćurković	
		Title Support cross	DWG No. 7	
		Scale 1:3	Material Steel	Sheet 1/1