

Prototipno modeliranje robotske ruke

Kuhar, Mihael

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:185343>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**

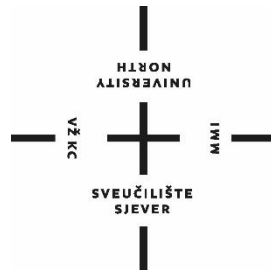


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN



DIPLOMSKI RAD br. 054/STR/2021

**PROTOTIPNO MODELIRANJE ROBOTSKJE
RUKE**

Mihael Kuhar

Varaždin, prosinac 2021.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Diplomski sveučilišni studij Strojtarstvo



DIPLOMSKI RAD br. 054/STR/2021

**PROTOTIPNO MODELIRANJE ROBOTSKE
RUKE**

Student:
Mihael Kuhar, 1404/336D

Mentor:
izv. prof. dr. sc. Sven Maričić

Varaždin, prosinac 2021.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRISTUPNIK	Mihael Kuhar	JMBAG	0035183900
DATUM	06.12.2021.	KOLEGIJ	Prototipno 3D modeliranje
NASLOV RADA	Prototipno modeliranje robotske ruke		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Prototype modeling of a robotic arm		
MENTOR	Sven Maričić	ZVANJE	Izv. prof.
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Matija Bušić, predsjednik povjerenstva		
	2. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, član		
	3. izv.prof. Sven Maričić, član mentor		
	4. izv.prof. Sanja Šolić, rezervna članica		
	5. _____		

Zadatak diplomskog rada

BRDI 054/STR/2021

OPIS

Prikazati proces prototipne izrade modela robotske ruke. Prikazati način korištenja aditivnih tehnologija. Primijeniti generativni dizajn tijekom projektiranja prototipnog dijela. Dati prikaz pripreme modela za proizvodnju odabranom tehnologijom. U zaključku dati prikaz rezultata do kojih se došlo tijekom izrade ovog rada.

ZADATAK USUČEN 6.12.2021.



11/2021

Predgovor

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Svena Maričića, koristeći stečena znanja tijekom studija i literaturu navedenu na kraju rada.

Zahvaljujem se mentoru na iskazanom povjerenju te pruženim savjetima i stručnoj pomoći prilikom izrade rada. Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci na datoj podršci tijekom cjelokupnog studija.

Sažetak

Zadatak ovog diplomskog rada je modeliranje robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja, optimiranje dobivenog modela primjenom generativnog dizajna te priprema modela za proizvodnju odabranom aditivnom tehnologijom. U samom početku procesa prototipnog modeliranja definirana su dva glavna cilja koje robotska ruka mora zadovoljavati, dakle nosivost i cijena koštanja. Prilikom modeliranja fokus je stavljen na kriterije funkcionalnosti, pristupačnosti i estetike. Radi boljeg razumijevanja odabira idejnih rješenja tokom cjelokupnog procesa u radu će se najprije pobliže razmotriti mogućnosti i ograničenja aditivnih tehnologija i generativnog dizajna. Nakon čega slijedi pregled ustaljenih konfiguracija i izvedbi robotskih ruku, vrsta primjenjivanih pogon te prijenosnika snage i gibanja. Model robotske ruke dizajnirat će se u Solidworks-u, a mogućnosti optimizacije generativnim dizajnom prikazat će se u programima Inspire i nTopology. Za konačan model robotske ruke izradit će se priprema za 3D ispis u programu ideaMaker te analiza cijene izrade finalnog modela.

Ključne riječi

robotska ruka, aditivne tehnologije, generativni dizajn

Summary

The goal of this thesis is to prototype a model of a robotic arm with six degrees of freedom, optimize the model by applying generative design approach and tools and to prepare it for production with the selected additive technology method. At the very beginning two main criteria are defined, load capacity and price. During the modeling the focus is given to functionality, accessibility and aesthetics. To better understand the choices that were made throughout whole prototyping process, firstly, a closer look at possibilities and limitations of additive technologies and generative design is given. This is followed by an overview of the established configurations and designs of robotic arms, as well as the types of drives and transmissions being used. Prototype model of a robotic arm will be designed using Solidworks and generative design optimisation will be applied using Inspire and nTopology. For the final model the preparation for 3D printing using ideaMaker slicer will be made and the analysis for the production cost will be given.

Key words

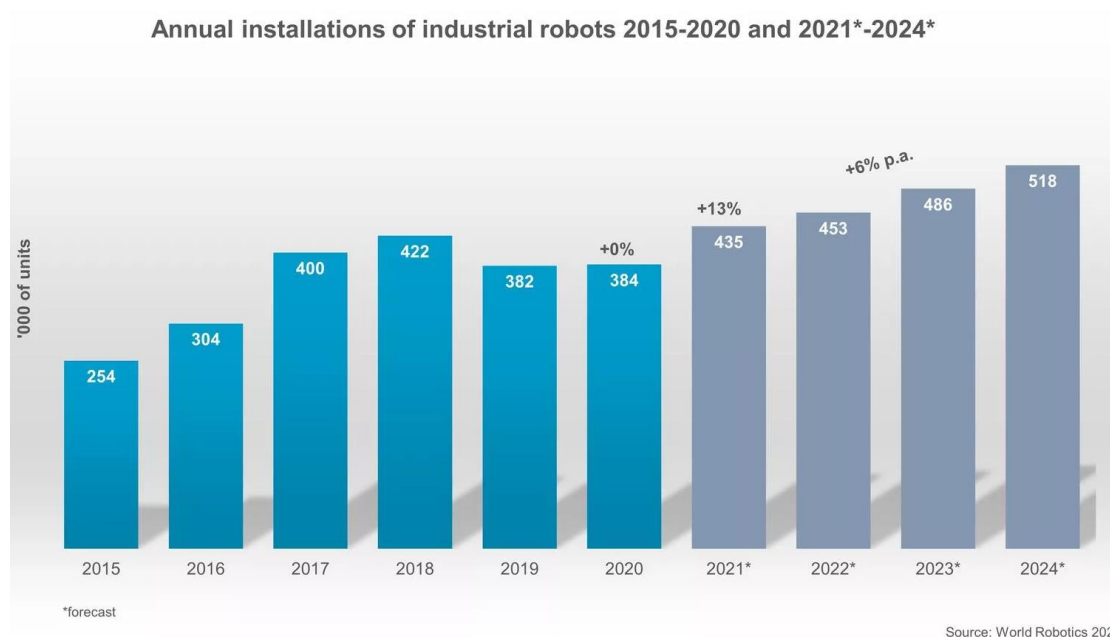
robotic arm, additive technology, generative design

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Aditivne tehnologije	2
2.1. SLA metoda – Stereolitografija.....	4
2.2. FDM / FFF metoda – Fused deposition modeling / Fused filament fabrication	6
2.3. SLS metoda – Selective laser sintering	8
2.4. MJF metoda – Multi jet fusion	10
3. Kreiranje koncepta i postavljanje uvjeta modeliranja	11
3.1. Artikulirana robotska ruka.....	11
3.2. Moguće opcije aktuatora	13
3.2.1. Koračni motori	14
3.2.2. Servo motori.....	15
3.3. Mehanički prijenosnici snage i gibanja	16
3.3.1. Planetarni reduktor	17
3.3.2. Cikloidni reduktor	18
3.3.3. Harmonijski reduktor	19
3.3.4. Prijenos zupčastim remenom	20
3.3.5. Hipoidni prijenos.....	20
3.4. Koncept upravljanja robotskom rukom.....	21
3.5. Koncept i uvjeti modeliranja	22
4. Modeliranje robotske ruke.....	24
4.1. Cikloidni reduktor	24
4.2. Zglob robotske ruke.....	25
4.3. Prihvat krajnjeg efektora	26
4.4. Spona robotske ruke	27
4.5. Model robotske ruke.....	29
5. Optimizacija modela primjenom generativnog dizajna.....	31
5.1. nTopology - Lightweighting metoda.....	34
5.2. Altair Inspire - metoda topološke optimizacije	37
5.3. Optimirani model robotske ruke.....	41
6. 3D ispis i cijena izrade.....	44
7. Zaključak	48
Literatura	49
Popis slika.....	50
Popis tablica.....	52

1. Uvod

Industrija je vrlo važna komponenta globalne ekonomije te ona unazad nekoliko godina prolazi kroz svoju četvrtu revoluciju. U tzv. Industriji 4.0 vidljiva je povećana primjena robotike u njenom okruženju kolaborativne proizvodnje. Kako bi se zadovoljila potražnja, robotiku je potrebno demokratizirati na način da se tržištu ponude jeftiniji roboti koji su lako prilagodljivi te imaju mogućnost implementacije od strane malih i srednjih poduzeća. U ovom naumu uvelike pomaže i sam razvoj softverske podrške za rapidno prototipiranje, kao što su programi za 3D modeliranje i generativni dizajn te isto tako razvoj i sve veća pristupačnost aditivnih tehnologija.

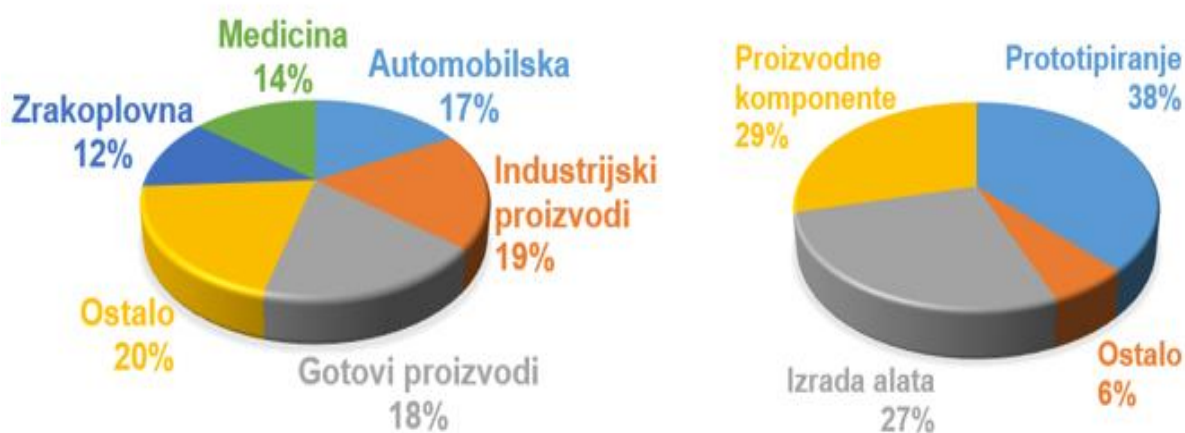


Slika 1. Godišnja instalacija jedinica industrijskih robota prema internacionalnoj federaciji robotike [1]

Promatrajući tržište, ponudu i potražnju robotskih ruku može se svrstati u tri skupine. Najvišoj skupini pripadaju robotske ruke vodećih kompanija kao što su ABB, Kuka, Omron i sl. te su one primjerene za srednja i veća poduzeća sa uhodanim procesima automatizacije. Najnižoj skupini pripadaju edukacijske robotske ruke čiji je glavni kriterij da budu što jeftinije te primarno služe u svrhu učenja programiranja. Unazad nekoliko godina pa do danas na tržište istupa sve više startup kompanija čija je misija ponuditi nešto između, tj. robotsku ruku koja će svojom cijenom biti pristupačna individui te mu poslužiti kao edukacijski model, ali također biti u mogućnosti obaviti neki funkcionalan rad pa samim time biti primjerena i za neko manje poduzeće ili tvrtku koja tek kreće u implementaciju ovog tipa automatizacije u svoju proizvodnju. Za modeliranu robotsku ruku u ovom radu kao dva glavna kriterija nosivost i cijena koštanja bit će određeni komparacijom robotskih ruku upravo iz te skupine.

2. Aditivne tehnologije

Prema ASTM-u¹ termin aditivne tehnologije definiran je kao skup procesa izrade objekata iz podataka 3D modela, spajanjem materijala i to najčešće sloj po sloj. Upravo ovo svojstvo razlikuje aditivne tehnologije od tradicionalnih proizvodnih tehnologija odvajanja čestica [2]. Tako kod aditivnih tehnologija umjesto početnog obradka sa kojeg se skida višak materijala, počinje se od prazne radne podloge te se na nju nanosi materijal u željenoj geometriji. Aditivne tehnologije stare su gotovo 30 godina, a sve je započelo izumom Charlesa Hulla koji je 1986. god. predstavio proces stereolitografije. U prvih 20 godina razvoja, tehnologija se razvija sporijim tempom te pretežito unutar okvira rapidnog prototipiranja. Situacija se mijenja u narednim godinama istekom patenata nad različitim procesima aditivnih tehnologija, točnije 2007. SLA, 2009. FDM i 2014. SLS metode. Time ove tehnologije postaju dostupne mnogo širem spektru proizvođača i korisnika, što rezultira ubrzanom razvojem, komercijalizacijom te širenjem područja njihove primjene. Danas se stoga aditivne tehnologije sve više koriste u zrakoplovnoj, automobilskoj, medicinskoj i drugim industrijama te se osim u svrhu prototipiranja koriste i za izradu alata, ali i sastavnih komponenti nekog proizvoda [2].



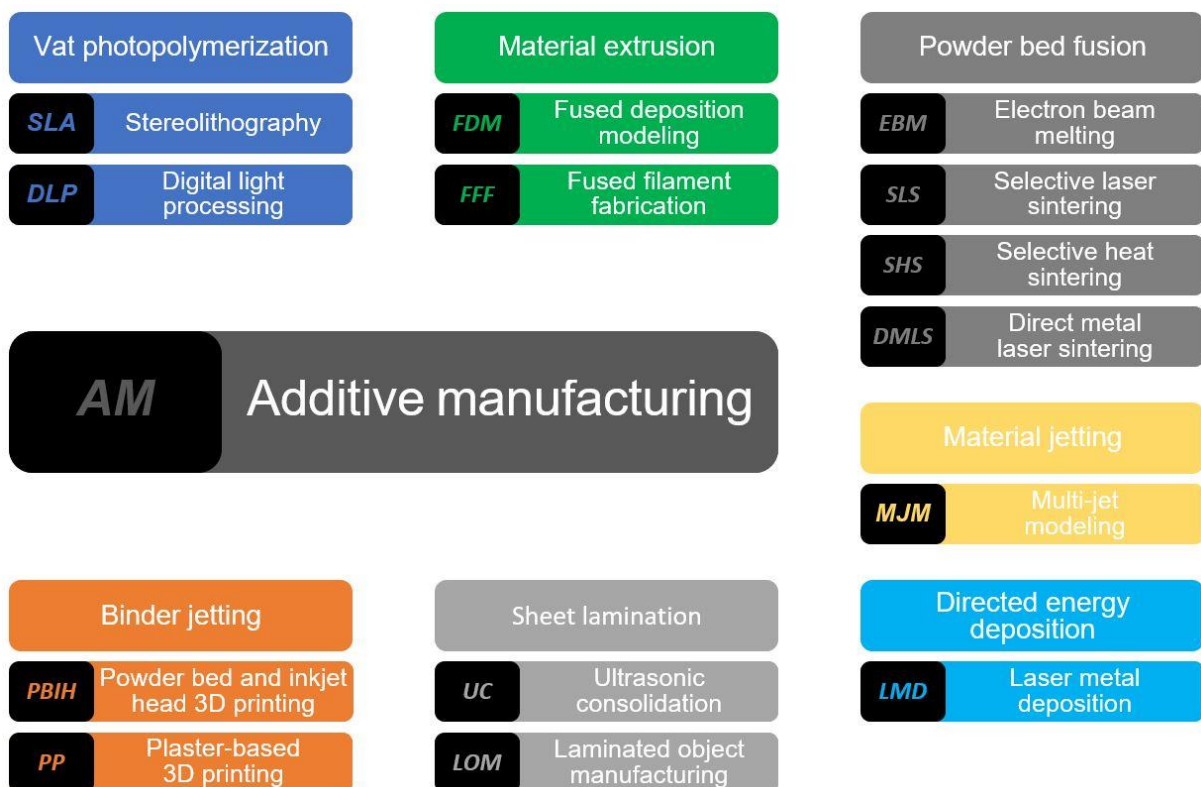
Slika 2. Područja primjene aditivnih tehnologija (iz vlastite arhive: 03.11.2021. 20:44)

Razlog sve veće primjene aditivnih tehnologija je u tome što nude drugačiji, moderniji pristup dizajniranju proizvoda. Osim što ubrzavaju fazu izrade prototipa te uvelike smanjuju troškove te faze, također omogućuju laku izradu modela zahtjevne geometrije bez dodatnih ulaganja u posebne alate i naprave što dizajnerima i konstruktorima daje veću slobodu stvaranja. Ubrzanom razvojem aditivnih tehnologija uređaji za izradu modela ovom tehnologijom, tzv. 3D printeri

¹ American Society for Testing and Materials – Američko društvo za ispitivanje i materijale

također su bivali dostupniji sve široj masi. Svake godine osim profesionalnih industrijskih 3D printera na tržište izlazi i velik broj stolnih (desktop) varijanti povoljnih cijena te zavidne tolerancije i kvalitete izrade.

Napredak i današnja pristupačnost aditivne tehnologije omogućuje postavljanje prvog kriterija kod prototipnog modeliranja robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja u okviru ovog rada. Dakle jedan od postavljenih ciljeva ovog projekta zahtjeva da model robotske ruke omogućuje izradu svih nestandardnih komponenti primjenom aditivne tehnologije. Kako vidljivo sa Slike 3. postoji pozamašan broj različitih kategorija aditivnih tehnologija, a svaka prikazana metoda pruža neke prednosti, ali i nedostatke. Stoga u ovom radu fokus će biti dan samo na metode koje su danas dohvatljive širem krugu korisnika. Ove metode pobliže će se promotriti u nastavku ovog rada kako bi se prikazalo na što treba obratiti pozornost prilikom modeliranja robotske ruke, ali i olakšalo odabir metode i materijala za izradu konačnog modela.



Slika 3. Kategorizacija aditivnih tehnologija prema ASTM (iz vlastite arhive: 01.11.2021. 00:38)

2.1. SLA metoda – Stereolitografija

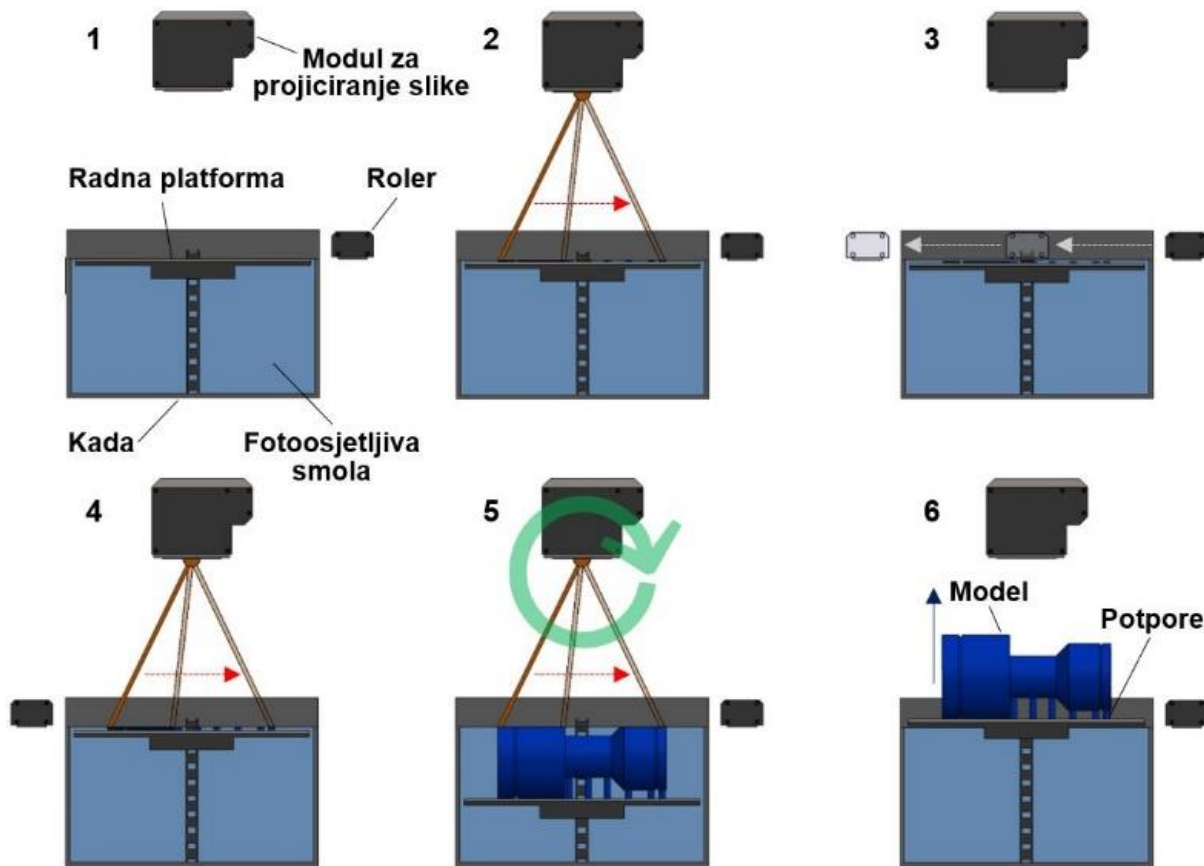
Stereolitografija izvorna je tehnologija aditivne proizvodnje koju je 1986. god. predstavio Charles Hull, osnivač tvrtke 3D Systems, danas jedne od najvećih ponuđača opreme u industriji aditivnih tehnologija. Ova metoda se zasniva na fotopolimerizaciji, tj. skrućivanju fotopolimera u tekućem stanju prilikom osvjetljenja ultraljubičastim svjetlom iz tanke zrake emitirane laserom.

Glavne komponente SLA printera su:

- Modul za projiciranje slike laserom
- Kada ispunjena fotopolimernom smolom u tekućem stanju
- Radna platforma
- Roler

Proces izrade modela SLA metodom sastoji se od nekoliko ključnih koraka [2]:

- Prazna platforma pozicionira se tako da je uronjena u neposrednoj blizini površine fotopolimera
- Roler prelazi duž cijele kade pritom gladeći površinu fotopolimera
- Uključuje se laser koji emitira tanku zraku ultraljubičastog svjetla na točno određene konture presjeka prvog sloja željenog 3D modela
- Platforma se pomiče prema dolje te se pozicionira na način da između prethodno skrućenog sloja i površine fotopolimera ostaje točno definiran zazor, debljinom ovog zazora ujedno je i određena visina sloja printa
- Roler prelazi duž cijele kade pritom gladeći površinu fotopolimera, nakon čega se opet uključuje laser koji osvjetljava konture presjeka sljedećeg sloja željenog 3D modela
- Postupak se iterira dovoljan broj puta, tako da pri zadnjoj iteraciji bude osvjetljen i posljednji sloj presjeka 3D modela
- Gotov 3D model skida se sa radne platforme
- Sa modela se ispire višak nakupina neprocesirane fotopolimerne smole
- Model se ostavlja pod UV svjetlom radi procesa dozrijevanja pri čemu se dobiva potpuna čvrstoća strukture i tvrdoća površine



Slika 4. Proces izrade modela SLA metodom (iz vlastite arhive: 01.11.2021. 16:37)

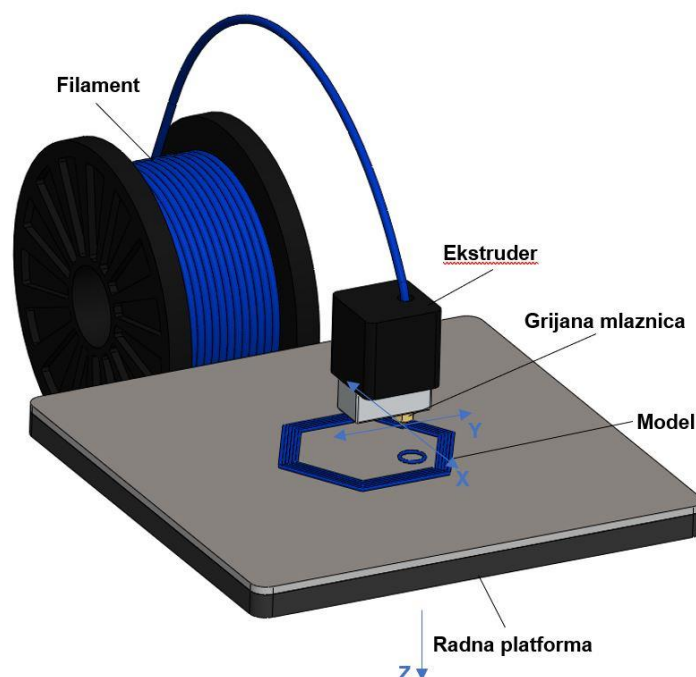
U usporedbi sa ostalim aditivnim tehnologijama prednostima SLA metode smatraju se mogućnost dobivanja visoke preciznosti i vrlo komplicirane geometrije te glatkoća i visoki detalji površine. Izbor fotopolimernih smola također je vrlo širok, pa je moguća izrada ne samo mehanički čvrstih već i fleksibilnih, ali i prozirnih modela. Mogućnosti primjene SLA metode primarno ograničavaju mehanička svojstva materijala te njihovo slabljenje prilikom izloženosti okolnoj svjetlosti. Iako su u posljednjim godinama ona postala znatno bolja, u tom pogledu fotopolimerne smole još uvijek zaostaju u usporedbi sa primjenjivanim materijalima kod ostalih metoda. Također valja napomenuti da je kod SLA metode za neke geometrije nužno koristiti dodatne strukturne potpore te da je prilikom konstruiranja šupljih modela isto tako potrebno obratiti pažnju na kreiranje otvora kako bi iz šupljina bilo moguće iscijediti preostalu neprocesiranu smolu. Zbog ovih karakteristika SLA metodu primarno se koristi u svrhu rapidnog prototipiranja, tj. metoda je vrlo prikladna u cilju prikaza izgleda modela konačnog proizvoda, no izbjegava se njezina primjena ukoliko je želja da model bude dugotrajan i postojan prilikom eksploatacije.

2.2. FDM / FFF metoda – Fused deposition modeling / Fused filament fabrication

Kada se govori o FDM i FFF metodi zapravo se opisuje isti proces, razlika je jedino u tome što naziv FDM obuhvaća patentiranu tehnologiju jedne od vodećih tvrtki u industriji aditivnih tehnologija, Stratasys. Istekom tog patenta 2009. godine dolazi do značajnog preokreta u razvoju i komercijalizaciji 3D printera. Upravo su FDM printeri predvodnici širenja aditivnih tehnologija sa pretežito industrijske primjene na privatne korisnike. Razlog tome je jednostavnost principa rada i primjene ove tehnologije te velik izbor polimernih materijala zavidnih mehaničkih svojstava. Također gledajući cijenu koštanja, ulaganja u opremu i materijal najmanja su kod ove metode što je često i odlučujući faktor za nekog tko tek započinje sa primjenom aditivnih tehnologija.

FDM proces temelji se na omekšavanju polimernog materijala, taloženju tog materijala na radnu podlogu ili na prethodno nanesen sloj u obliku tanke niti te njihovom srašćivanju, hlađenju i skrućivanju pri sobnoj temperaturi. Za izradu modela ovom metodom svaki FDM printer u principu mora sadržavati sljedeće komponente:

- Kolut sa željenim materijalom u obliku žice, tj. filamentom
- Ekstruder
- Grijanu mlaznicu
- Radnu platformu



Slika 5. Proces izrade modela FDM metodom (iz vlastite arhive: 01.11.2021. 18:15)

Postoji više različitih tipova izvedbe FDM printera, te ovisno o odabranom tipu i sam proces izrade modela FDM metodom se ponešto razlikuje. Kada se promatra najzastupljeniji tip ovih printera, tj. printer sa Kartezijevim koordinatnim sustavom proces izrade modela može se podijeliti u nekoliko ključnih koraka [2]:

- Zagrijavanje mlaznice i radne platforme na potrebnu radnu temperaturu
- Pomicanje radne podloge na visinu neposredno blizu ispod vrha mlaznice
- Pozicioniranje glave sa ekstruderom i grijanom mlaznicom u početnu točku
- Ekstrudiranje materijala kroz vrh grijane mlaznice na podlogu u obliku tanke niti te istovremeno pomicanje glave u X i Y smjeru, formirajući tako konture presjeka prvog sloja 3D modela
- Pauziranje ekstrudiranja te pomicanje radne platforme po Z osi prema dolje, platforma se pozicionira tako da između prethodno istisnutog sloja i vrha grijane mlaznice ostaje točno definiran zazor, čime je određena i sama visina sloja printa
- Pozicioniranje glave u početnu točku presjeka trenutnog sloja te ponovni početak ekstrudiranja uz istovremeno micanje glave po X i Y osima
- Postupak se iterira sve do završetka ekstrudiranja presjeka zadnjeg sloja modela
- Vađenje radne platforme iz printera, hlađenje i skidanje modela sa platforme

FDM metoda zanimljiva je korisnicima, jer je uz mala početna ulaganja osim prototipova moguće dobivanje i funkcionalnih dijelova zadovoljavajuće kvalitete izrade te postojanosti. Ipak kada se promatra rezolucija kontura i površina te točnost dimenzija ova metoda zaostaje za ostalim aditivnim tehnologijama. Razlog tome su okrugli presjek mlaznice te visoke radne temperature, dakle pojava sitnih, ali u nekim primjenama značajnih deformacija prilikom hlađenja modela. FDM metoda stoga je prikladna za kućnu i manje zahtjevnu profesionalnu primjenu, no može se koristiti i za zahtjevnije zadatke u svrhu izrade početnog obradka koji se naknadno podvrgava dodatnoj strojnoj i površinskoj obradi.

2.3. SLS metoda – Selective laser sintering

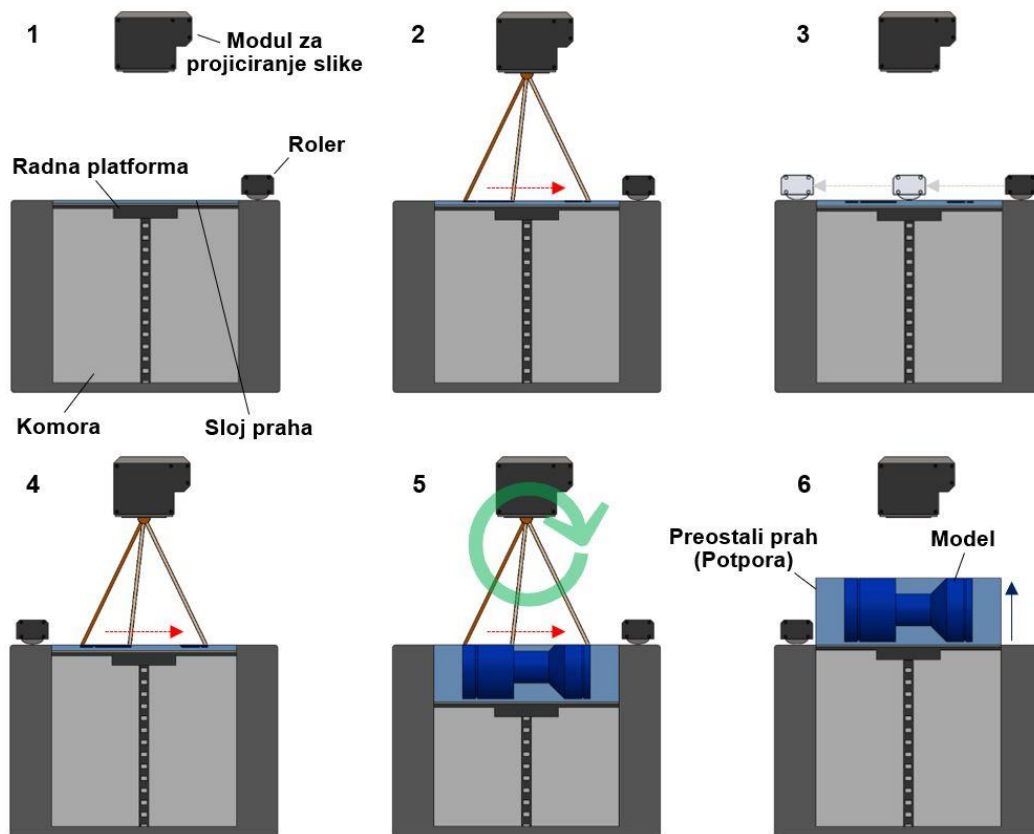
SLS metoda prilično je slična SLA metodi, no umjesto fotopolimerne smole u tekućem stanju, koriste se termopolimeri u praškastom obliku. Valja napomenuti da se osim termopolimernog praška mogu koristiti i metalni prahovi, no u okviru ovog rada oni nisu značajni. Ova tehnologija također je otkrivena u 1980-tim godinama, a zasniva se na selektivnom sinteriranju čestica polimernog praška laserskom zrakom.

Glavne komponente SLS printera su:

- Modul za projiciranje slike
- Komora
- Radna platforma
- Roler

Proces izrade modela SLA metodom može se raščlaniti na nekoliko ključnih koraka [2]:

- Prelazom rolera preko prazne radne platforme, na njenu površinu nanosi se i zaglađuje prvi sloj praškastog termopolimera
- Uključuje se laser koji emitira tanku zraku infracrvene svjetlosti na točno određene konture presjeka prvog sloja željenog 3D modela
- Platforma se pomiče prema dolje te se pozicionira na način da između prethodno skrućenog sloja i dna rolera ostaje točno definiran zazor, čime je ujedno i određena visina sloja printa
- Roler prelazi duž cijele radne platforme te pritom nanosi i gladi novi sloj praškastog termopolimera, nakon čega se opet uključuje laser koji osvjetljava konture presjeka sljedećeg sloja željenog 3D modela
- Postupak se iterira dovoljan broj puta, tako da pri zadnjoj iteraciji bude osvjetljen i posljednji sloj presjeka 3D modela
- Kompletan blok praška vadi se iz komore, a model se ostavlja u bloku sve dok se potpuno ne ohladi, ovo može potrajati i do 12 sati
- Iz bloka se odvaja neprocesirani prašak, te preostaje procesirani prašak, odnosno 3D model
- Sa površina i šupljina modela ispuhuju se ostaci neprocesiranog praška
- Neprocesirani prašak sakuplja se u poseban spremnik te ga je moguće ponovo iskoristiti, uz udio recikliranog praška pri novom ciklusu do 50%



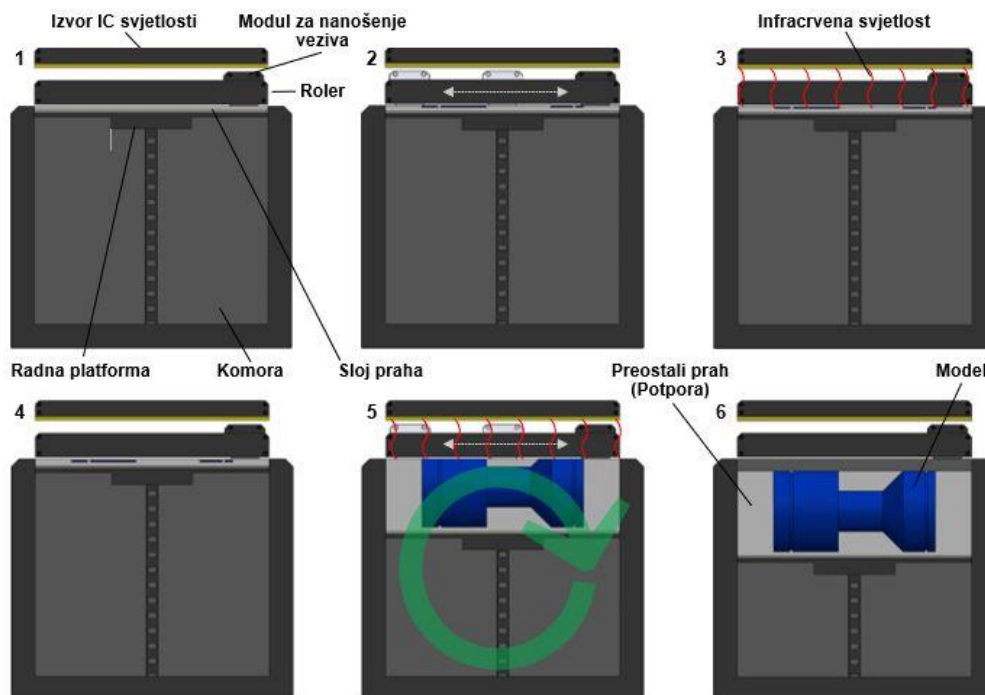
Slika 6. Proces izrade modela SLS metodom (iz vlastite arhive: 01.11.2021. 21:58)

SLS metoda privlačna je korisnicima radi nekoliko faktora zbog kojih prednjači nad SLA i FDM metodama. Kako prethodno spomenuto jedna od prednosti FDM nad SLA metodom je u tome što FDM metoda nudi mogućnost primjene polimernih materijala iznimnih mehaničkih svojstava. Uzeći u obzir sva mehanička svojstva tih materijala, dakle čvrstoću, tvrdoću, otpornost na temperaturno popuštanje, duktilnost i otpornost na abraziju, najbolje rezultate među njima pruža poliamid. Ipak poliamid nije najpopularniji materijal za primjenu kod FDM tehnologije jednostavno iz razloga što je primjenom poliamida puno teže ispisati model zadovoljavajuće geometrijske točnosti. Princip rada SLS printera rješava ovaj problem pa se kod SLS metode, promatrajući termopolimere, primarno koristi upravo poliamid. SLS metoda također je zanimljiva jer se njome izbjegava potreba za dodatnim potpornjima prilikom izrade modela vrlo komplicirane geometrije čime se štedi na utrošenom materijalu. Kao treći ključan faktor primjene SLS metode valja spomenuti mogućnost ispune kompletnog radnog volumena različitim modelima u različitim orijentacijama što uvelike smanjuje troškove serijske ili višekomponentne proizvodnje. Ključni nedostaci ove tehnologije su hrapavost, granuliranost površine i visoka cijena opreme. Ipak kroz prethodne godine mnoge tvrtke specijalizirale su se za usluge 3D printa gdje obrađuju brojne narudžbe primjenom SLS metode, pri čemu maksimalna iskoristivost radnog volumena uvelike smanjuje troškove izrade naručenih dijelova pa je stoga i sama primjena SLS metode u tom obliku postala prihvatljiva za svakog pojedinca.

2.4. MJF metoda – Multi jet fusion

MJF novija je metoda aditivnih tehnologija koja je kao i SLS metoda primjerena većim kompanijama zbog same cijene opreme, no zahvaljujući specijaliziranim tvrtkama za usluge 3D ispisa i ova metoda, u skorije vrijeme, postala je vrlo prihvatljiva širem krugu korisnika. Štoviše zbog bolje automatiziranosti post-procesiranja i mogućnosti recikliranja te ponovne upotrebe i do 80% neprocesiranog praha cijena naručenih dijelova čak je nešto niža od dijelova izrađenih SLS metodom.

U osnovi MJF metoda kombinacija je SLS i Binder jetting tehnologije. Dakle na sloj praškastog termopolimera izgladenog rolerom poseban modul nanosi vezivni agens iscrtavajući time konture presjeka pripadajućeg sloja modela. Zatim preko sloja prelazi izvor infracrvene energije visoke snage pritom sinterirajući granule prekrivene vezivnim agensom te ostavljajući ostatak praha neprocesiranim [2].



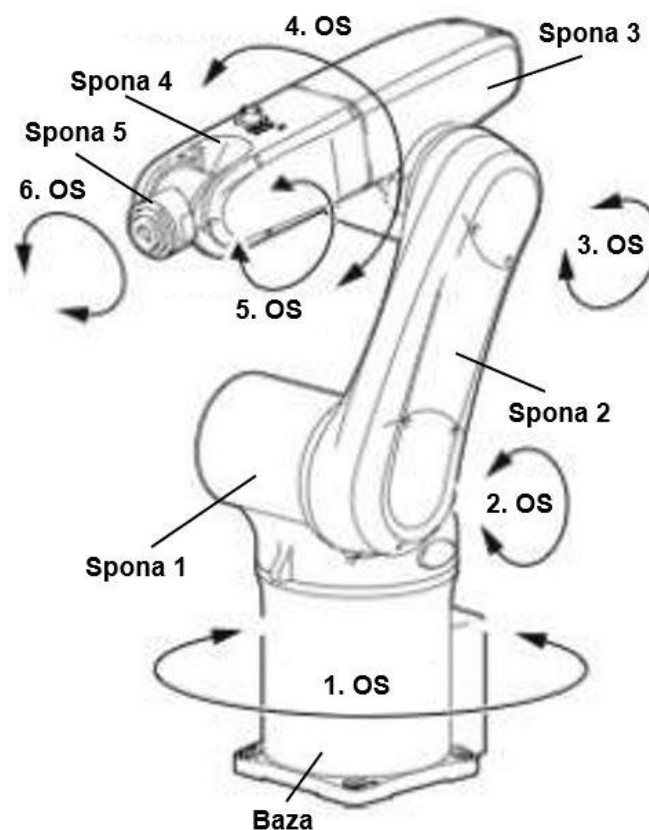
Slika 7. Proces izrade modela MJF metodom (iz vlastite arhive: 07.11.2021. 23:52)

Zbog vrlo sličnih procesa, MJF i SLS metode dijele slične prednosti i nedostatke nad ostalim aditivnim tehnologijama. Kvaliteta površine jednaka je u obje metode. Geometrijska točnost i mehanička svojstva nešto su bolja kod MJF metode no konačna struktura materijala je nešto gušća pa je i konačan model nešto teži.

3. Kreiranje koncepta i postavljanje uvjeta modeliranja

3.1. Artikulirana robotska ruka

Različite konfiguracije robotskih ruku može se svrstati u šest glavnih skupina, dakle kartezijski, cilindrični, polarni, SCARA, delta i artikulirani roboti. Kada se spominje robotska ruka prva pomisao ipak pada na model artikulirane robotske ruke iz razloga što ova konfiguracija u usporedbi na ostale pruža veću fleksibilnost te nekako najbliže oponaša kretanje ljudske ruke. Dizajneri umjetnih ruku smatraju da ljudska ruka ima dvadeset sedam stupnjeva slobode, uz dodatnih sedam stupnjeva slobode šake. Potpuno repliciranje ovih kretnji ipak bi bilo preskupo i komplicirano, također općenito je smatrano da je šest stupnjeva slobode gibanja dovoljno da robotska ruka izvede svaki potreban zadatak. Stoga se artikulirane robotske ruke izrađuju većinom sa 6 stupnjeva slobode no ovaj broj može biti manji ili veći ovisno o kompliciranosti zadatka i visini investicije. U ovom radu će se zato kao predložak za kreiranje koncepta koristiti upravo ustaljena izvedba artikulirane robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja.



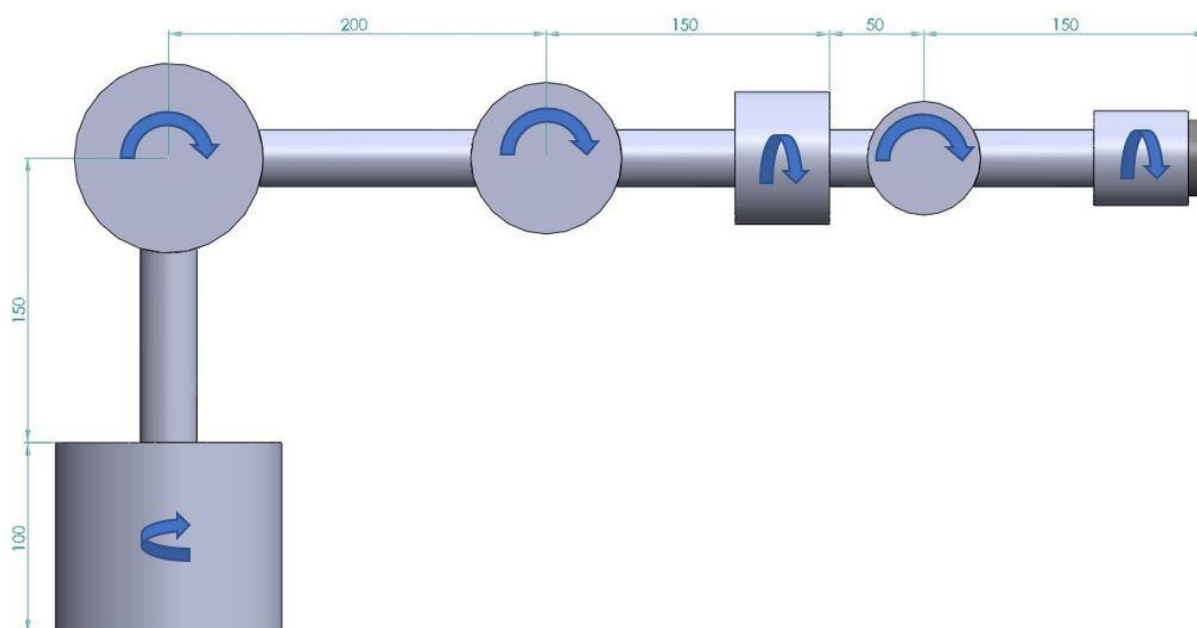
Slika 8. Artikulirana robotska ruka sa 6 stupnjeva slobode [3]

Dakle vodeći se prema Slici 8. modeliran prototip robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja sastojat će se od sedam glavnih segmenata, tj. baze, pet spona te prihvaća za krajnji efektor. Svaki

segment bit će povezan sa prethodnim preko prijenosnika snage i gibanja, što će svakom od njih omogućiti rotaciju oko jedne osi i to redom [5]:

- Baza je učvršćena na podlogu
- Rotacijom spone 1 oko vertikalne osi baze (1. os) rotira se robotska ruka
- Rotacijom spone 2 oko horizontalne osi spone 1 (2. os) dolazi do ekstenzije donje ruke robota prema naprijed ili nazad
- Rotacijom spone 3 oko horizontalne osi spone 2 (3. os) podiže, odnosno spušta se gornja ruka robota
- Rotacijom spone 4 oko osi vertikalne na horizontalnu os spone 2 (4. os) dolazi do rotacije gornje ruke robota
- Rotacijom spone 5 oko osi vertikalne na os spone 4 (5. os) podiže se ili spušta ručni zglob robota
- Rotacijom prihвата za krajnji efektor oko osi vertikalne na os spone 5 (6. os) rotira ručni zglob robota

Prema tome kreirana je prva shema robotske ruke, prikazana na Slici 9. Valja napomenuti da su dimenzije u ovom koraku određene samo orijentacijski, tj. težit će se postizanju ovog cilja, ali on će biti manjeg prioriteta od nekih drugih uvjeta te će se stoga ovi iznosi vjerojatno iterativno mijenjati prilikom modeliranja.



Slika 9. Shema modela robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja

(iz vlastite arhive: 14.11.2021. 00:29)

3.2. Moguće opcije aktuatora

Aktuatori su uređaji kojima se na pobudu upravljačkim signalom pomiču pokretni segmenti robotske ruke u željeni položaj. Dakle aktuatori pretvaraju određeni ulazni oblik energije u željeni izlazni oblik gibanja. Stoga ih se na taj način i kategorizira [6], prema ulaznom obliku energije:

- električni
- pneumatski
- hidraulični

te prema izlaznom obliku gibanja:

- linearni
- rotacijski

Kada se govori o zglobovima robotske ruke u tom slučaju ipak prevladava upotreba električnih aktuatora iz nekoliko razloga:

- nude najveću preciznost
- lako su povezivi te jednostavni za programiranje
- pružaju potpunu kontrolu brzine, pozicije i okretnog momenta
- proizvode manje buke

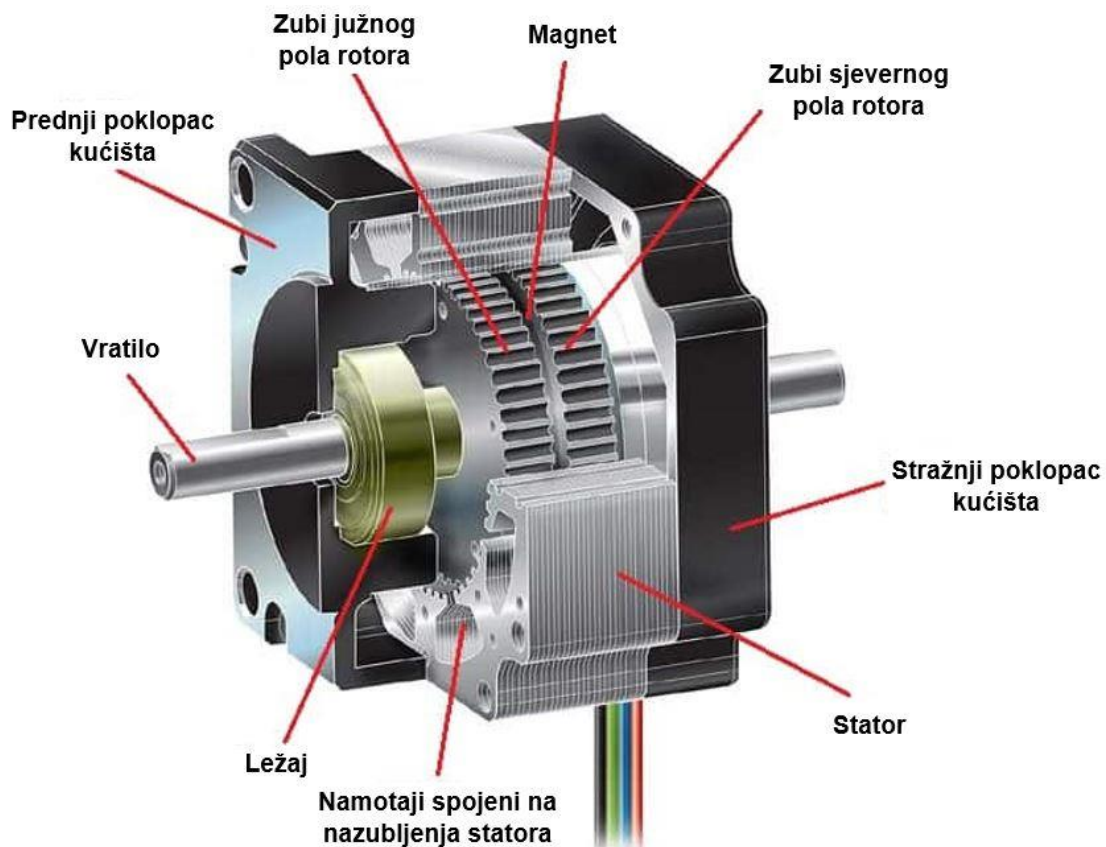
Kako u prijašnjem poglavlju navedeno kod artikulirane robotske ruke potrebna su rotacijska gibanja segmenata, pa se opcije aktuatora svode na:

- Koračne motore
- Servo motore

Svaki tip ovih aktuatora nosi neke prednosti i nedostatke, a konačan odabir ovisi o zahtijevanom okretnom momentu, brzini i ubrzanju te nosivosti, cijeni koštanja i dimenzijskim ograničenjima. Stoga radi boljeg razumijevanja konačnog odabira potrebno je najprije pobliže razmotriti karakteristike ovih aktuatora.

3.2.1. Koračni motori

Koračni motor je aktuator koji impulse električne energije pretvara u diskretne mehaničke pomake. Sastoji se od rotora na kojem se nalaze trajni magneti i statora sa većim brojem namotaja. Svaki trajni magnet prekriven je sa po jednim poklopcem na svakom od polova. Ovi poklopci na vanjskoj stijenci sadrže određen broj zubi te su međusobno kutno zamaknuti za polovicu koraka zuba. Namotaji statora spojeni su na vanjski obruč čiji su zubi orijentirani prema rotoru te je njihov ukupan broj za dva zuba manji od broja zubi jednog poklopca. Prolaskom struje kroz namotaje statora generira se raspodjela magnetskog toka u vanjskom obruču te uzrokuje interakciju sa distribuiranim magnetskim poljem rotora. Na taj način uzrokovana je potreba za novim poravnanjem zubi rotora i statora, odnosno kutnim primicanjem zubi različitih polova te odmicanjem zubi istih polova čime se dobiva inkrementalna rotacija rotora. Zbog vrlo velikog broja zubi, odnosno polova, dobiva se efekt kontinuirane i vrlo precizne kretnje.

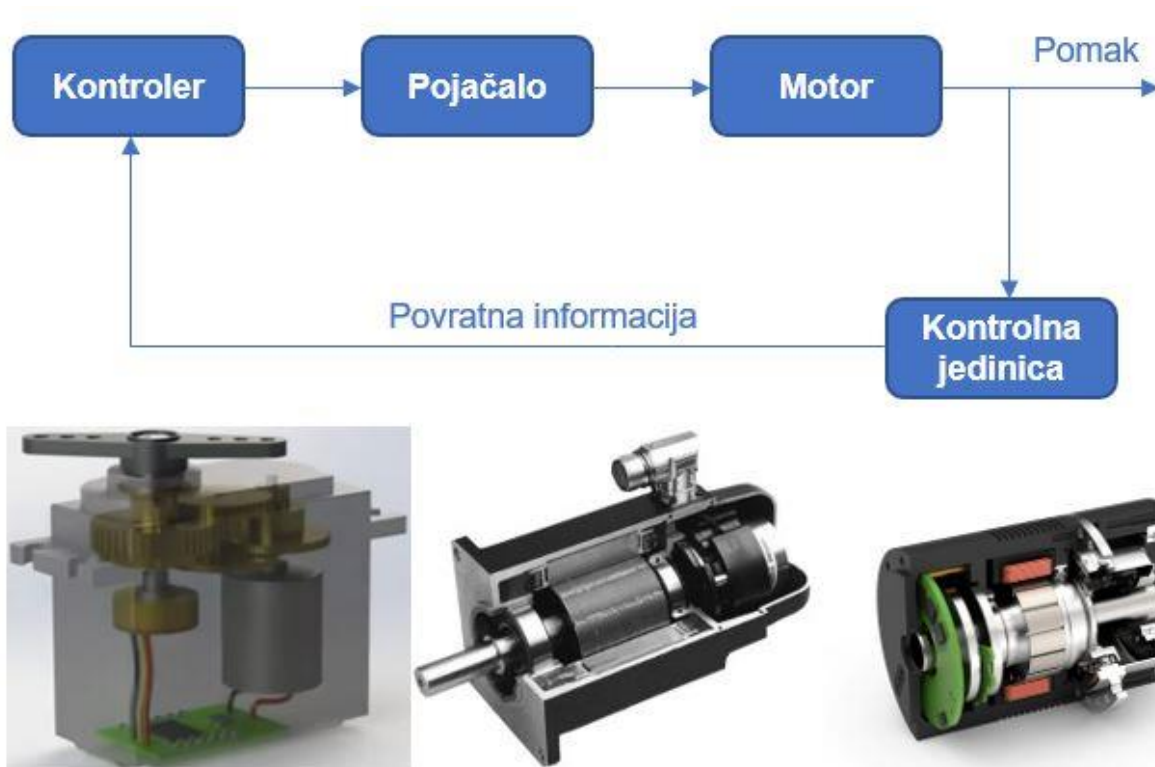


Slika 10. Konstrukcija koračnog motora [6]

Prednosti koje pružaju koračni motori su precizna kontrola kretnje, veliki okretni momenti pri malim brzinama, relativno su jeftini i široko dostupni te kompaktnih dimenzija. Ono što ograničava njihovu primjenu su gubitak okretnog momenta pri velikim brzinama do čak 80%, razvijanje visoke razine vibracija i velike količine topline prilikom rada.

3.2.2. Servo motori

Servo motori su aktuatori koji impulse električne energije pretvaraju u kontrolirani mehanički pomak. Dolaze u raznim izvedbama no svima je svojstveno to da rade u sistemu zatvorene petlje. Dakle kontrolna jedinica kontinuirano daje povratnu informaciju o položaju vratila, te kontroler na osnovu usporedbe dobivene informacije i željene pozicije šalje korekcijski signal motoru u cilju minimiziranja pogreške.



Slika 11. Shema servo motora te prikaz različitih izvedbi (iz vlastite arhive: 14.11.2021. 22:21)

Ovisno o izvedbi kao kontrolna jedinica koristi se potenciometar ili visokokvalitetan enkoder. Zbog manjeg broja polova servo motor postiže veće brzine vrtnje pa stoga često dolazi sa integriranim reduktorom, manje ili više složenosti, kako bi se dobilo rotacijsko gibanje većeg okretnog momenta i brzina primjerena danoj upotrebi. Servo motori generiraju slabiji okretni moment, no čak i pri velikom broju okretaja njegova vrijednost minimalno opada, što kako spomenuto nije slučaj kod koračnih motora. Uspoređujući performanse servo motori neosporno prednjače nad koračnim motorima. Ipak kada su budžet i prostor ograničeni koračni motor postaje vrlo konkurentan iz razloga što je za iste performanse servo motor mnogo skuplji te generalno većih gabarita.

3.3. Mehanički prijenosnici snage i gibanja

Mehanički prijenosnici u robotici upotrebljavaju se kao posrednici između pomičnih segmenata, pri čemu mehaničku energiju i dinamiku, u ovom slučaju dobivenih iz nekog od prethodno opisanih električnih aktuatora, prilagođavaju potrebama određenog segmenta robotske ruke kako bi on na željeni način zauzeo zadani položaj. Dakle kod robotske ruke njihova primarna funkcija jeste reduciranje brzine gibanja te povećavanje izlaznog okretnog momenta, no u nekim izvedbama, kako vidljivo sa Slike 12. prijenosnici se također koriste kako bi omogućili prikladniji smještaj aktuatora radi optimalne distribucije mase ili bolje i lakše organizacije vodova.



Slika 12. Smještaj aktuatora zglobova 4,5 i 6 iza zgloba 3 u cilju optimirane distribucije mase odnosno povećanja nosivosti na primjeru robotske ruke Kuka KR 16KS [7]

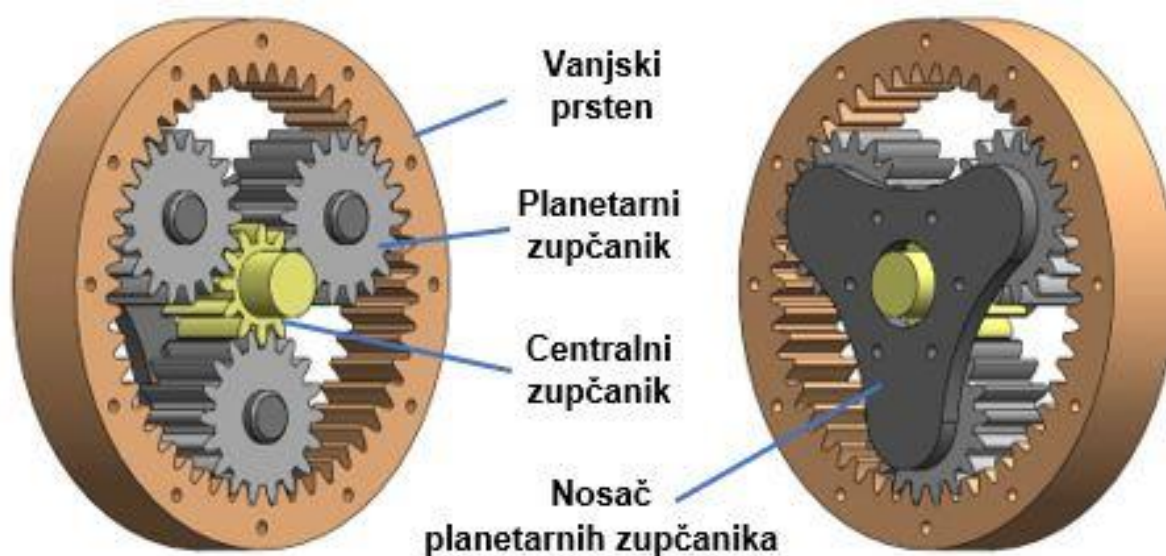
Mehaničke prijenosnike može se kategorizirati na [8]:

- Zupčane
- Vijčane
- Remene
- Tareničke
- Lančane

Princip rada, prednosti i nedostaci potencijalnih solucija mehaničkih prijenosnika za model robotske ruke u ovom radu razmotrit će se u nastavku.

3.3.1. Planetarni reduktor

Planetarni reduktor je vrsta zupčanog prijenosnika koji se sastoji od tri različita zupčanika, tj. centralnog, planetarnog i vanjskog prstena sa unutarnjim ozubljenjem, pri čemu planetarni zupčanik osim oko svoje osi, rotira i oko osi centralnog zupčanika [9]. Ovisno o tome na koju kombinaciju zupčanika su spojeni pogonsko i gonjeno vratilo dobivaju se i različiti omjeri ulaznog i izlaznog momenta. Također planetarni reduktor može biti izveden sa nekoliko stupnjeva prijenosa što omogućuje postizanje vrlo visokih omjera. Kod planetarnih reduktora koriste se zupčanici sa evolventnim profilom boka zuba te oni mogu biti ravni, kosi ili strelasti.



Slika 13. Primjer planetarnog zupčanika sa jednim stupnjem prijenosa i ravnim zubima
(iz vlastite arhive: 18.11.2021. 14:50)

Ovaj tip reduktora često se upotrebljava iz nekoliko razloga:

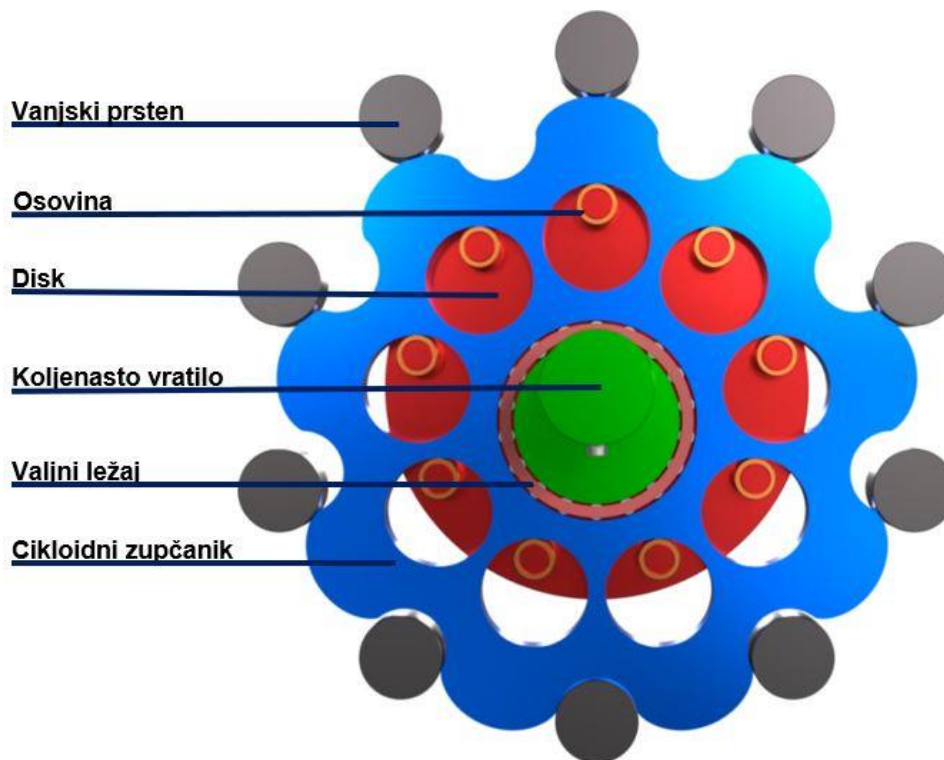
- Pogodan je za spajanje na elektromotore u kompaktnoj cilindričnoj izvedbi
- Omogućuje visok prijenosni omjer u jednom stupnju
- Pruža mogućnost raznih prijenosnih omjera kombiniranjem više stupnjeva planetarnog prijenosa
- Visok stupanj iskorištenja

No mehanizam planetarnog reduktora ima i neke mane kao:

- Kompliciranost konstrukcije
- Zahtijevana visoka kvaliteta izrade
- Povećana mogućnost kvara zbog većeg broja komponenti
- Cijena održavanja

3.3.2. Cikloidni reduktor

Cikloidni reduktor je specijalna vrsta zupčanog prijenosnika koji se u osnovi sastoji od koljenastog vratila, cikloidnog zupčanika, vanjskog prstena sa unutarnjim ozubljenjem te diska sa osovinama. Princip rada ovog zupčanika bazira se na ekscentričnom rotiranju cikloidnog zupčanika oko centra osi koljenastog vratila naizmjeničnom interakcijom izbočenih zubi cikloidnog zupčanika i unutarnjih zubi prstena gdje je broj zubi cikloidnog zupčanika za jedan manji od broja zubi na vanjskom prstenu. Pri čemu disk sa osovinama pretvara ovo gibanje natrag u rotaciju oko centralne osi na izlazu, no sa reduciranim brojem okretaja i većim okretnim momentom. Kod cikloidnih reduktora sa samo jednim cikloidnim zupčanicom dolazi do neuravnoteženog djelovanja sila, kako bi se ovo izbjeglo često se primjenjuju dva cikloidna zupčanika zamaknuti za 180°. Također nerijetko se između glavnih komponenti u dodiru ugrađuju valjni ležajevi čime se smanjuje trenje i trošenje.

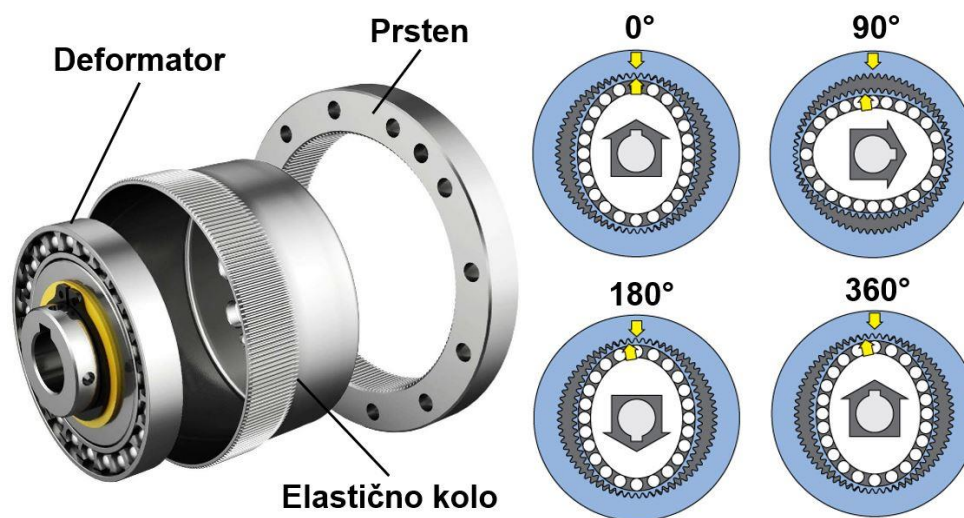


Slika 14. Koncept izvedbe cikloidnog reduktora [9]

Cikloidni reduktori koriste se poradi mogućnosti dobivanja visokih prijenosnih omjera u vrlo kompaktnoj izvedbi. Osim toga ovaj tip prijenosnika ima vrlo dobru torzijsku krutost, otporan je na udarna opterećenja te ukoliko kvalitetno izrađen, stvara minimalan do nikakav mrtvi hod. Svojstva cikloidnog reduktora čine ga odličnim izborom kod primjene za teška opterećenja i uvjete rada. Njegova primjena izbjegava se ponajviše radi potrebe za preciznom izradom i montažom, te kada je dodatna težina nepoželjna, iz razloga što su cikloidni reduktori nešto teži u odnosu na neke druge izvedbe.

3.3.3. Harmonijski reduktor

Harmonijski reduktor noviji je oblik zupčanog prijenosnika bez zračnosti, odnosno mrtvog hoda, prvi put uspješno upotrijebljen 1964. godine. Sastoji se od triju glavnih komponenti, dakle elastičnog kola sa vanjskim ozubljenjem, krutog prstena s unutrašnjim ozubljenjem te deformatora. Deformator je specijalni tip vratila sa valjnim ležajem elipsoidnog oblika te je na njega navučeno elastično kolo. Rotacijom deformatora, u dvije zone na oba kraja velike osi elipse, dolazi do naizmjenične interakcije izbočenih zubi elastičnog kola sa zubima krutog prstena, pri čemu je broj zubi elastičnog kola najčešće za jedan ili dva manji, te se na taj način postiže redukcija okretaja i povećanje okretnog momenta.



Slika 15. Građa i princip rada harmonijskog reduktora [10]

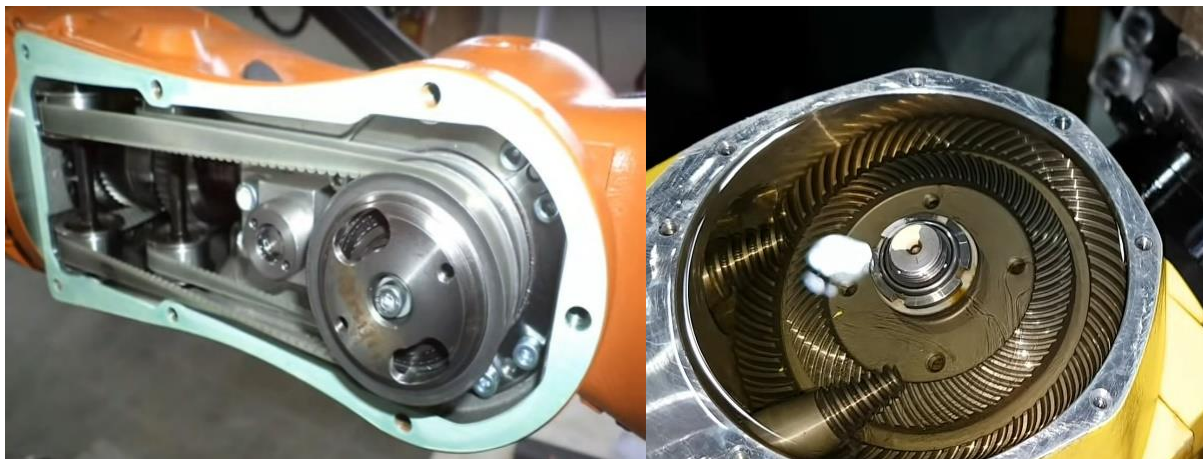
U usporedbi sa prethodno spomenutim vrstama prijenosnika, harmonijski reduktori imaju brojne prednosti, ali i neke nedostatke. Glavne prednosti uključuju:

- Visok izlazni okretni moment
- Izvrsna točnost pozicioniranja i ponovljivost
- Izostanak mrtvog hoda
- Dobra torzijska krutost
- Kompaktan dizajn
- Manji broj komponenti
- Manja masa

Međutim zbog potrebe za visokom elastičnosti kola te istovremenom nelinearnom krutosti u željenim smjerovima harmonijski reduktor zahtijeva upotrebu materijala vrlo iznimnih mehaničkih svojstava te kvalitetnu izradu komponenti.

3.3.4. Prijenos zupčastim remenom

Kod robotske ruke remeni prijenosnici koriste se najčešće u njenim zadnjim segmentima, jer su znatno laganiji te omogućuju prikladniji smještaj aktuatora, vidljivo na Slici 12. Remeni prijenosnik sastoji se od dvije ili više cilindričnih remenica te remena. Prema vrsti remena dijele se na prijenosnike sa plosnatim, klinastim i zupčastim remenom, no od spomenutih samo zupčasti remen primjenjiv je kao prijenosnik snage i gibanja kod robotske ruke. Ovo je iz razloga što jedino zupčasti remen snagu i gibanje prenosi oblikom a ne trenjem, čime izostaje efekt puzanja remena te je time omogućen konstantan prijenosni omjer pa se postiže sinkronost između aktuatora i pomičnog segmenta. Nedostaci ovog tipa prijenosa su cijena i mogućnost oštećenja remena, elastičnost pri djelovanju sile čime nastaje mrtvi hod, potrebno vrlo točno predzatezanje kako bi se oštećenja prilikom rada i mrtvi hod minimizirali, te dodatno opterećenje ležajeva i vratila uzrokovano predzatezanjem.



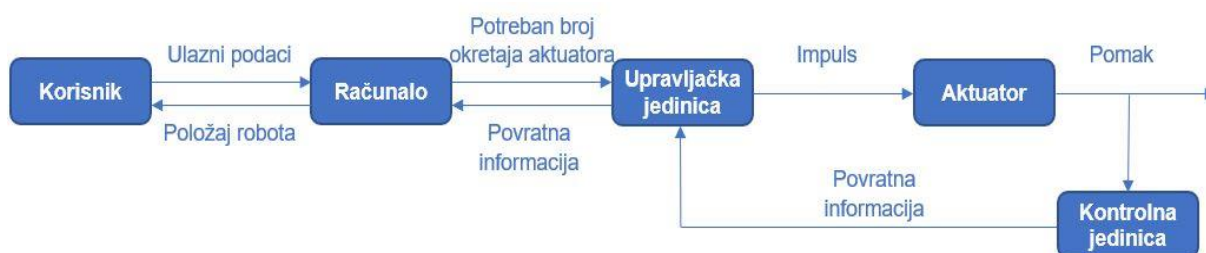
Slika 16. Prijenos zupčastim remenom (lijevo) i hipoidni prijenos (desno) [11]

3.3.5. Hipoidni prijenos

Hipoidni prijenos je vrsta zupčastog prijenosa koji se, kako vidljivo sa Slike 16. također primarno koristi da bi se izbjeglo pozicioniranje aktuatora direktno na os zgloba robotske ruke. Omogućuje prijenos većih momenata nego prijenos zupčastim remenom, ravnomjernije prenosi moment od spiralnih i ravnih zupčanika, te proizvodi manje buke. Hipoidni prijenos ima i nekoliko nedostataka zbog čega se primjenjuje samo za specifične aplikacije. Ponajprije zahtjeva složenu i preciznu izradu što sa sobom vuče visoke troškove izrade. Zbog savijenih zubi ovaj tip prijenosa osjetljiv je na trošenje. Kako bi se ono minimaliziralo poželjno je da prijenosnik bude utopljen u ulju pri čemu zbog gušće postavljenih zubi postoji opasnost oštećenja pri i najmanjem onečišćenju u ulju.

3.4. Koncept upravljanja robotskom rukom

Kako bi robotska ruka funkcionirala na željeni način te točno pratila zadane naredbe potreban je upravljački sustav kojim će se upravljati rad svakog pojedinačnog aktuatora. U okviru ovog rada neće se izraditi potpuni sustav za upravljanje robotskom rukom, već će se kreirati koncept u cilju odabira potrebnih komponenti te njihove integracije u model robotske ruke. Pri tome izostavit će se izrada programa i upravljačkog sučelja no osigurat će se mogućnost kasnije „open source“ nadogradnje projekta. Dakle prema shemi sa Slike 17. za upravljanje aktuatorom robotske ruke potrebno je računalo, upravljačka jedinica i kontrolna jedinica.



Slika 17. Shema upravljačkog sustava (iz vlastite arhive: 20.11.2021. 20:25)

Prema tome princip rada upravljačkog sustava:

- Unos komandi na grafičkom sučelju
- Računalo preko inverzne kinematike dobiva potrebne rotacije svakog zgloba
- Informacije se šalju upravljačkoj jedinici
- Upravljačka jedinica generira potrebne električne impulse za pokretanje aktuatora
- Kontrolna jedinica mjeri pomake aktuatora i moguća odstupanja te šalje povratnu informaciju upravljačkoj jedinici
- U slučaju odstupanja upravljačka jedinica generira dodatan niz signala potrebnog za zauzimanje traženog položaja robotske ruke
- Istovremeno upravljačka jedinica povratne informacije prosljeđuje računalu koje nakon transformacije direktnom kinematikom podatke o položaju robotske ruke i njenog krajnjeg efektoru daje korisniku

3.5. Koncept i uvjeti modeliranja

Promatranjem trendova tržišta i podataka dobivenih iz prethodnih poglavlja kreiran je koncept i postavljeni su kriteriji koje model mora zadovoljiti. Prema tome promatrajući dostupne robotske ruke popularnih startup kompanija², koje istodobno osim kao edukacijski model mogu poslužiti i za obavljanje laganijih poslova komparacijom su određena dva glavna kriterija:

- Nosivost: 0,5 kg
- Cijena: ~ 1000 €

Također odlučeno je da se sve komponente moraju moći izraditi pristupačnim aditivnim tehnologijama pa su time određene i maksimalne dimenzije komponenti:

- Max prostorni volumen komponente: 200x200x300 mm

Kod odabira aktuatora i komponenti upravljačkog sustava prioritet je stavljen na cijenu koštanja. Ona je pri istom okretnom momentu i točnosti višestruko manja za koračne motore pa je odabrano:

- Aktuatori: Nema17 koračni motori
- Upravljanje: MKS Servo 42a driver za Nema17 motore

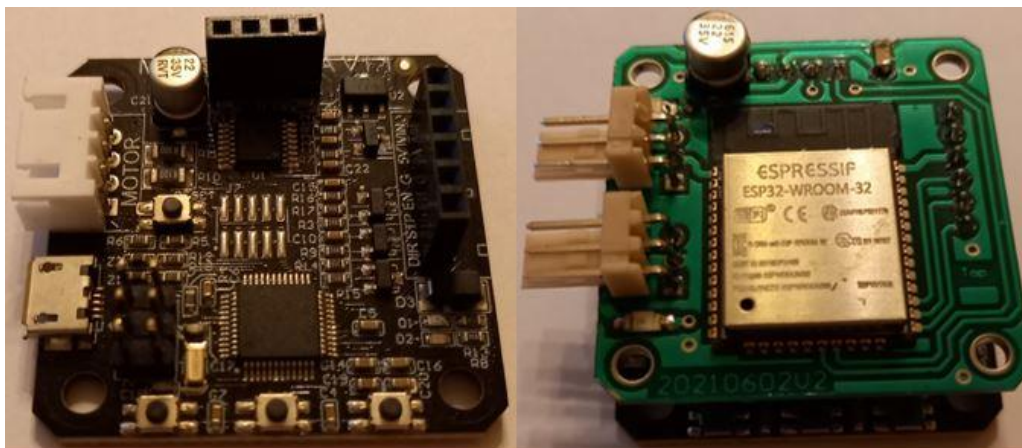
Okretni moment Nema17 koračnih motora ne bi bio dovoljan za rad robotske ruke uz prethodno zadanu nosivost te je stoga potrebno odabrati i način redukcije. Ovdje je prioritet stavljen na omjer okretnog momenta, kompaktne dimenzije i ponovljivost. Prema tome u užu izbor ulaze harmonijski i cikloidni reduktor. Trenutačni trend kod artikuliranih ruku jeste upotreba cikloidnih reduktora u donjim zglobovima radi njihove krutosti te harmonijskih reduktora u gornjim zglobovima radi manje mase. Ovdje ipak treba imati na umu da je za harmonijski reduktor potrebno izraditi elastično kolo iznimnih mehaničkih svojstava, što je podosta riskantno koristeći cijenom prihvatljive aditivne tehnologije. Dakle odabrana je sigurnija varijanta:

- Mehanički prijenos snage i gibanja: Cikloidni reduktor

Odabrana pločica za upravljanje koračnim motorom montira se na poleđinu svakog od njih, kako bi ona obavila potreban rad do nje je potrebno dovesti dva izvora napajanja od 5 V i 12 V te tri signala enable, direction i step. Također na donjoj plohi pločice ugrađen je magnetni enkoder koji prati pomake koračnog motora te ih prikazuje na, ukoliko montiran, LCD ekranu. U cilju izbjegavanja neurednih i debelih vodova te dobivanja željene zatvorene petlje upravljačkog sustava kreirana je dodatna tiskana pločica sa ugrađenim modulom za WiFi konekciju sa

² DOBOT Magician, Niryo Ned, INNFO5 Gluon

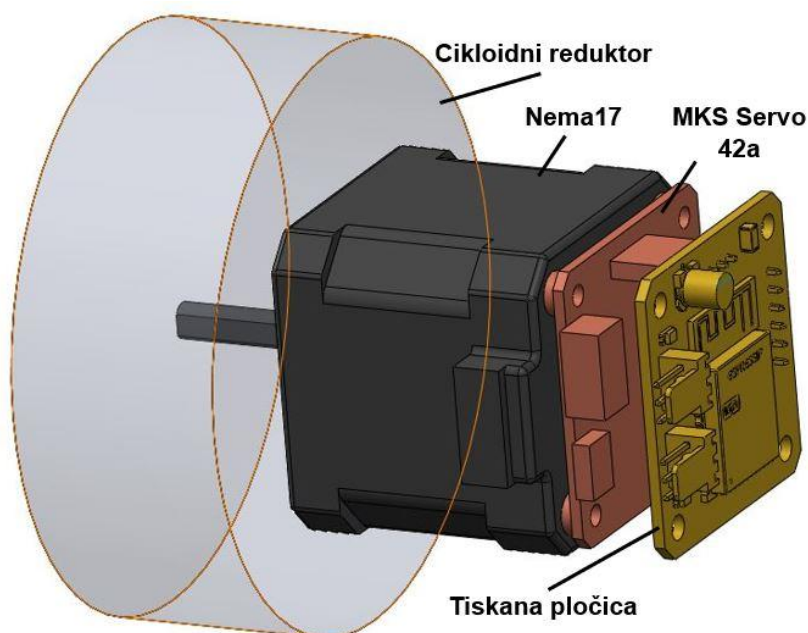
računalom [12]. Ona se montira na izlazne i ulazne konektore upravljačke pločice te je nakon toga do svakog zgloba potrebno dovesti samo vodove za napajanje, pri čemu su svi aktuatori spojeni u seriju.



Slika 18. MKS Servo 42a (lijevo) i dodatna tiskana pločica (desno)

(iz vlastite arhive: 23.11.2021. 18:48)

Dakle kombinacijom sheme robotske ruke sa Slike 9. i grubim modelom aktuatorskog modula zgloba dobiva se koncept željene robotske ruke kojim se kreće u modeliranje prototipa.



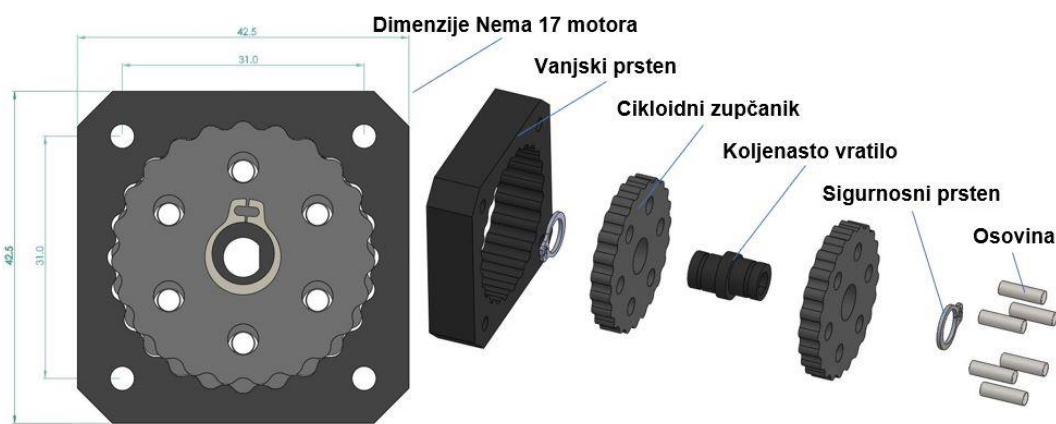
Slika 19. Koncept aktuatorskog modula zgloba robotske ruke

(iz vlastite arhive: 23.11.2021. 19:07)

4. Modeliranje robotske ruke

4.1. Cikloidni reduktor

Modeliranje započinje iz prethodno kreiranog koncepta. Najprije se modelira zglob oko osi 6 robotske ruke pošto su jedino za njega poznata sva opterećenja. Ona u ovom slučaju nisu pretjerano velika iz razloga što krajnji efektor leži na osi njegove rotacije pa je i sam potreban okretni moment malen. Stoga odabire se što manji Nema17 motor i na njegove dimenzije modelira se cikloidni reduktor radi smanjena broja okretaja u cilju što finijeg upravljanja. Vidljivo prema Slici 20. modeliran je reduktor sastavljen od osnovnih elemenata opisanih u poglavlju 3.3.2.



Slika 20. Početni model cikloidnog reduktora (iz vlastite arhive: 27.11.2021. 14:08)

U sljedećoj iteraciji model reduktora nadograđuje se primjenom kugličnih ležajeva te preciznih cilindričnih zatika radi smanjenja trenja između međusobno pomičnih komponenti, čime se osigurava manje trošenje površine komponenti te mirniji rad. Dakle kuglični ležajevi ugrađuju se između koljenastog vratila i oba zupčanika te zupčanika i osovina, a umjesto ozubljenja vanjskog prstena izrađena su ležišta za cilindrične zatike radijusa jednakog radijusu ozubljenja prvobitnog modela.



Slika 21. Model cikloidnog reduktora šestog zgloba robotske ruke

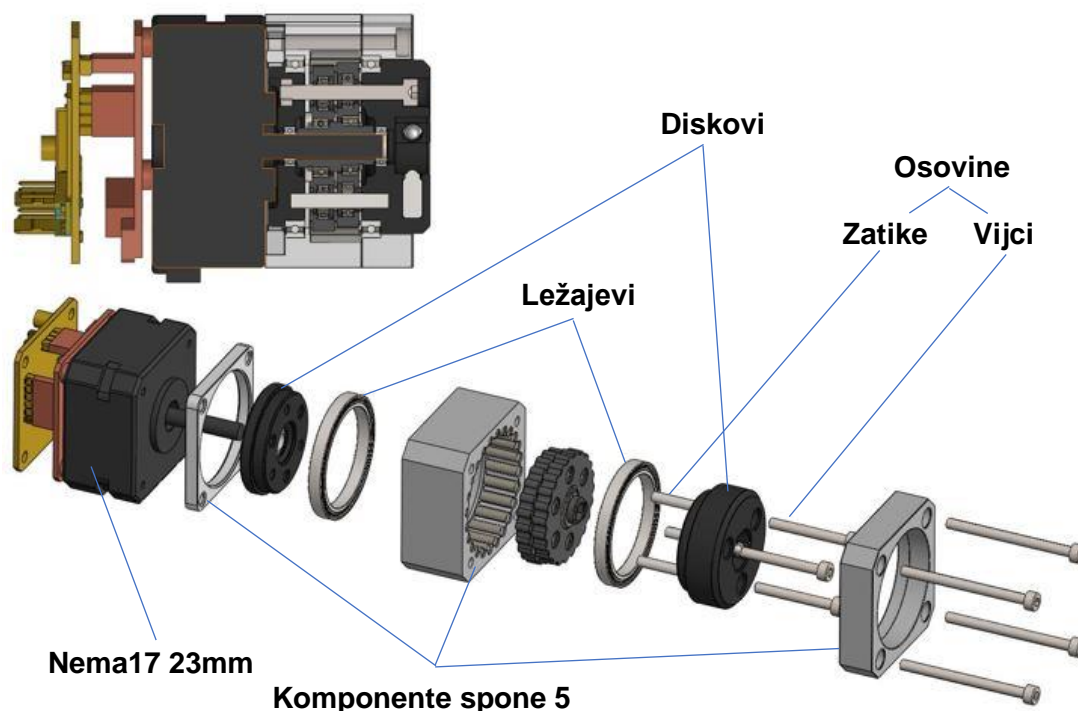
(iz vlastite arhive: 27.11.2021. 14:52)

4.2. Zglob robotske ruke

U ovom koraku kompletira se zglob između prihvata za krajnji efektor i spona 5. U tom slučaju dvije su glavne opcije izvedbe, tj. mora se osigurati montaža motora na sponu 5, pri čemu se vratilo motora montira na koljenasto vratilo reduktora, pa ostaje pitanje na koju komponentu reduktora se vežu spona 5 i prihvat krajnjeg efektor:

- Opcija 1: Spona 5 modelira se na vanjski prsten, a prihvat kao disk sa osovinama
- Opcija 2: Prihvat krajnjeg efektor modelira se na vanjski prsten, a spona 5 kao disk sa osovinama

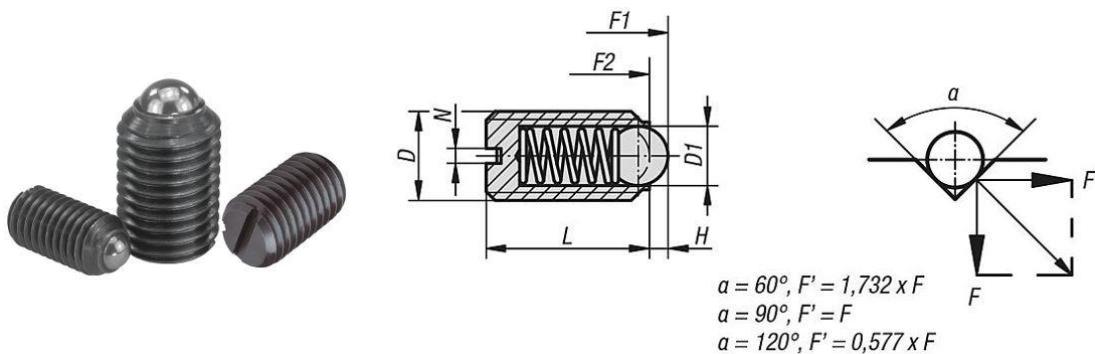
Odabrana je prva opcija te je dobiveni rezultat vidljiv na slici 22. Dakle na model reduktora dodaju se diskovi koji nose osovine reduktora, pri čemu je jedan od diskova modeliran na način da ujedno posluži i kao prihvat za krajnji efektor. Od ukupno šest potrebnih osovina, za tri se koriste precizne cilindrične zatike, a za ostatak su odabrani vijci kako bi se dva diska spojila u jednu cjelinu. Između tog sklopa i vanjskog prstena montiraju se kuglični ležajevi koji prihvaćaju aksijalna i radijalna opterećenja te centriraju prihvat krajnjeg efektor sa šestom osi robotske ruke.



Slika 22. Model zgloba robotske ruke (iz vlastite arhive: 27.11.2021. 16:39)

4.3. Prihvat krajnjeg efektor

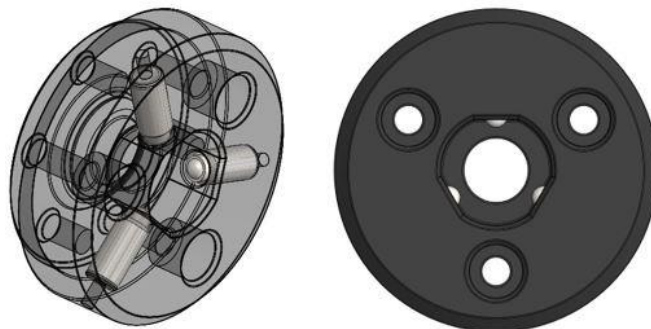
Kod prethodno modeliranog zgloba dobiven je približan oblik prihvata krajnjeg efektor, time su definirane prolazne rupe i upuštenja za vijke, slijepe rupe za zatike i dodirne površine ležaja. Ono što preostaje je dizajniranje mehanizma za precizno pozicioniranje i stezanje krajnjeg efektor. U tu svrhu odlučeno je koristiti vijke sa opružnim mehanizmom indeksiranja i složeniji oblik provrta. Dakle odabran je artikl iz standardne ponude proizvođača Norelem te se on upušta u slijepe rupe unutar provrta kako bi centrirao krajnji efektor te mu onemogućio aksijalni pomak, dok mu oblik provrta onemogućuje rotaciju.



$$D = M4 \quad D1 = 2,5 \text{ mm} \quad L = 9 \text{ mm} \quad H = 0,8 \text{ mm} \quad F1 = 12 \text{ N} \quad F2 = 22 \text{ N}$$

Slika 23. Prikaz odabranog vijka sa opružnim mehanizmom indeksiranja te njegove karakteristike [13]

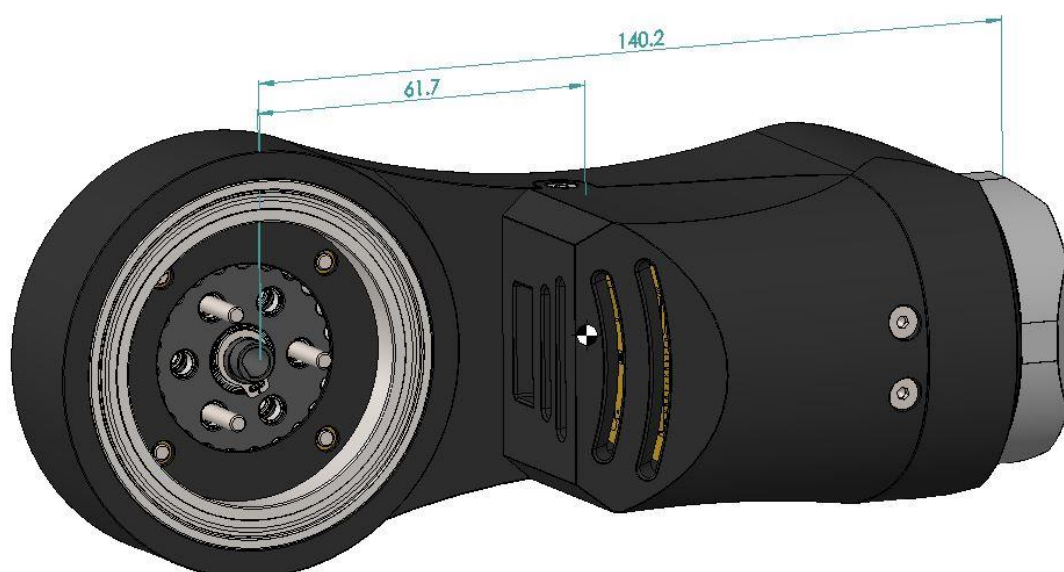
Prema tome koristeći tri navedena vijka dobiva se maksimalno dopušteno aksijalno opterećenje od 36 N, što je prihvatljivo uz uvjet maksimalne nosivosti robotske ruke od 0,5 kg i pretpostavljenu težinu krajnjeg efektor od 0,2 kg. Za izvlačenje, odnosno promjenu krajnjeg efektor potrebna je sila od 66 N, tj. sila približno jednaka podizanju tereta od 7 kg, što je moguće ostvariti kod svake fizički zdrave osobe.



Slika 24. Model prihvata krajnjeg efektor (iz vlastite arhive: 27.11.2021. 18:23)

4.4. Spona robotske ruke

Iz vanjskog prstena reduktora daljnjim procesom modeliranja dizajnirana je spona koja služi kao poveznica na sljedeći zglob robota, tj. zglob oko osi 5. U samom početku iz grubo pretpostavljenih dimenzija i mase spona 5, predviđeno je da će primjena jednakog Nema17 motora i cikloidnog reduktora u sljedećem zglobu biti dovoljna za normalan rad robotske ruke. Ova tvrdnja provjerit će se pri završetku modeliranja spona 5, te ukoliko bude potrebno i iterativno izmijeniti. Sastavom svih dosad modeliranih dijelova i potrebnih standardnih dijelova dobiva se konačan sklop ručnog zgloba robota te se iz njega dobiva središte i iznos mase.



Slika 25. Sklop ručnog zgloba robota (iz vlastite arhive: 27.11.2021. 23:07)

Dakle za potrebu provjere potrebnog okretnog momenta na zglobu osi 5 koristimo sljedeće ulazne podatke:

Gustoća materijala: 1020 kg/m^3

Masa ručnog zgloba: $0,55 \text{ kg}$

Masa tereta: $0,5 \text{ kg}$

Masa krajnjeg efektora: $0,2 \text{ kg}$

Udaljenost centra mase ručnog zgloba od osi 5: $61,7 \text{ mm}$

Udaljenost centra mase krajnjeg efektora i tereta od osi 5: 240 mm

$$\text{Potreban okretni moment} \geq [(0,55 * 61,7 * 10^{-3}) + (0,7 * 240 * 10^{-3})] * 9,81$$

$$\text{Potreban okretni moment} \geq 1,98 \text{ Nm}$$

Da bi se dobio izlazni okretni moment na zglobu potrebni su redom ulazni podaci:

Okretni moment koračnog motora: 0,14 Nm (M_m)

Broj zubi cikloidnog zupčanika: 23 (Z_z)

Broj zubi vanjskog prstena: 24 (Z_p)

Efikasnost: 0,9 (η)

Komponenta na koju je pričvršćen motor: Vanjski prsten ili disk sa osovinama

Vidljivo sa slike 22. i slike 26. uviđa se razlika smještaja koračnog motora. On je na zglobu osi 6 pričvršćen na sponu 5 ili vanjski prsten cikloidnog reduktora, a na zglobu osi 5 na unutarnji disk sa osovinama cikloidnog reduktora koji je zapravo komponenta sljedećeg sklopa, tj. gornje ruke robota. Dakle iz ovog razloga iako su odabrani jednaki koračni motori i modelirani cikloidni prijenosnici jednakih dimenzija, zbog različitog smještaja koračnog motora sam izračun izlaznog okretnog momenta je nešto drugačiji, pa stoga vrijedi:

$$M_6 = M_m * \left(\frac{Z_z}{Z_p - Z_z} \right) * \eta = 0,14 * \left(\frac{23}{24 - 23} \right) * 0,9$$

$$M_6 = 2,90 \text{ Nm}$$

$$M_5 = M_m * \left(\frac{Z_p}{Z_p - Z_z} \right) * \eta = 0,14 * \left(\frac{24}{24 - 23} \right) * 0,9$$

$$M_5 = 3,02 \text{ Nm}$$

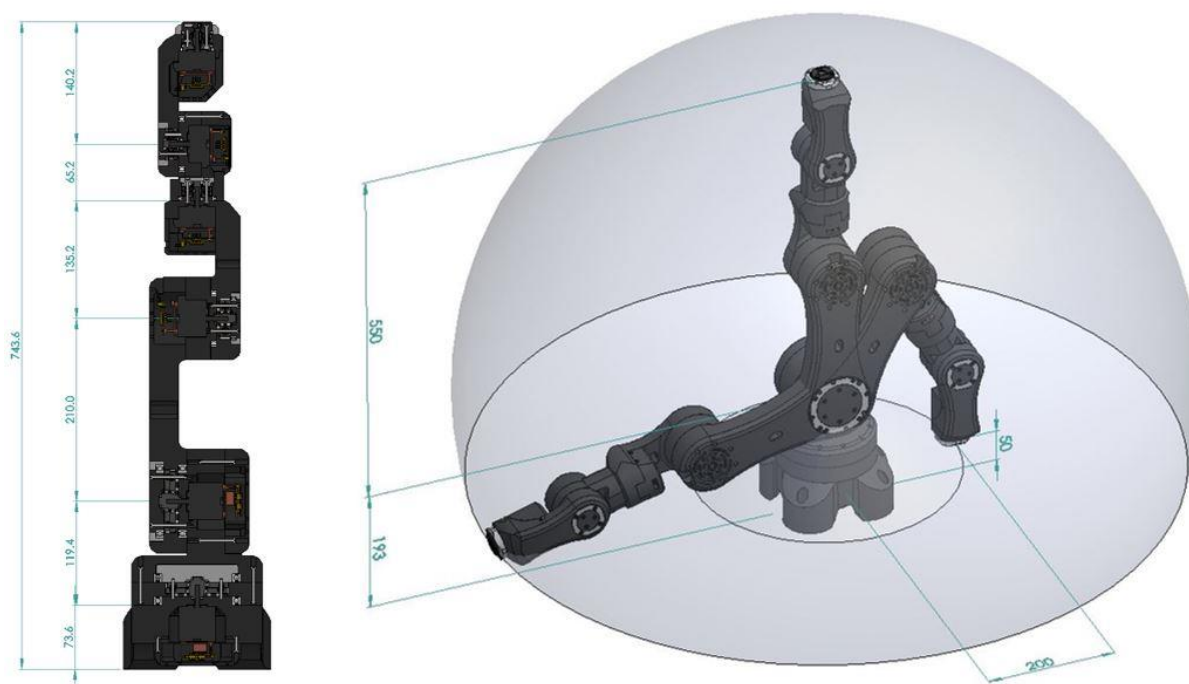
Zaključno dobiveni okretni model na zglobu oko osi 5 zadovoljava uvjet potrebnog okretnog momenta za pomicanje ručnog zgloba robota pod zadanim opterećenjem. U procesu daljnjeg modeliranja robotske ruke dodavanjem novih spona i zglobova, istim principom izračunavaju se potrebni i dobiveni okretni momenti te se sukladno dobivenim rezultatima, ukoliko potrebno iterativno biraju veći Nema17 motori jačeg okretnog momenta ili modeliraju cikloidni reduktori sa većim brojem zubi na zupčaniku i vanjskom prstenu.

4.5. Model robotske ruke

U prijašnjim poglavljima opisanom metodom nakon nekoliko iteracija dobiven je kompletan model robotske ruke, a njegov dizajn i karakteristike prikazani su u nastavku.



Slika 26. Renderirani model robotske ruke (iz vlastite arhive: 15.09.2021. 21:58)



Slika 27. Presjek modela robotske ruke sa prikazanim razmacima između zglobova (lijevo) i radni prostor robotske ruke (desno) (iz vlastite arhive: 28.11.2021. 02:14)

Sklop	Ukupna masa [g]	Masa 3D printanih pozicija [g]	Broj 3D printanih pozicija
Prihvat	14	10	1
Spona 5	514	268	9
Spona 4	411	225	6
Spona 3	690	437	7
Spona 2	1508	948	7
Spona 1	1920	1347	7
Baza	1930	1438	6
Ukupno:	6987	4673	43

Tablica 1. Specifikacije glavnih sklopova modela robotske ruke

Zglob	Nema17 dimenzije [mm]	Masa motora [g]	Okretni moment motora [Nm]	Prijenosni omjer reduktora	Izlazni okretni moment [Nm]
1	42x42x23	130	0,14	23:1	2,9
2	42x42x23	130	0,14	24:1	3,0
3	42x42x23	130	0,14	24:1	3,0
4	42x42x34	220	0,26	30:1	7,0
5	42x42x40	280	0,40	50:1	18,0
6	42x42x40	280	0,40	50:1	18,0

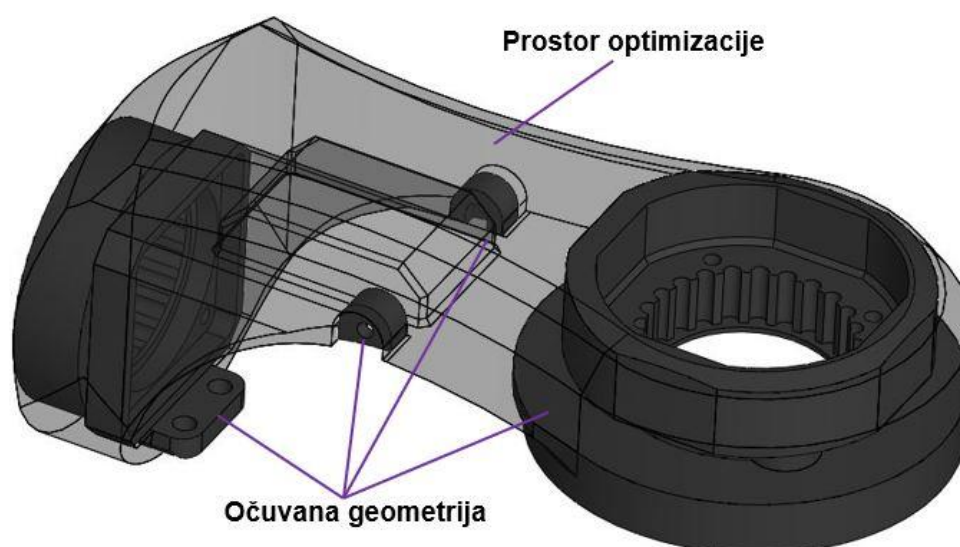
Tablica 2. Karakteristike aktuatorskih modula

5. Optimizacija modela primjenom generativnog dizajna

Generativni dizajn je proces ispitivanja alternativnih oblika geometrije pri kojem korisnik definira parametre poput performanse, prostornih zahtjeva, mehaničkih svojstva materijala, metode proizvodnje, ciljane mase; unutar određenog softvera koji na temelju ulaznih podataka nudi moguća rješenja. Danas postoje mnogi softveri za primjenu generativnog dizajna i svaki od njih nudi nekoliko pristupa generativnom dizajnu. U svrhu optimizacije dobivenog modela robotske ruke u nastavku će se pobliže sagledati dvije metode u dva različita softvera pri čemu svaka od odabranih metoda nudi neke zanimljive mogućnosti:

- nTopology: Lightweighting
- Altair Inspire: Topology optimisation

Kao i kod procesa modeliranja krenut će se od spona 5 pošto su za nju poznata sva opterećenja, dok se ulazni uvjeti mijenjaju za sve naredne nosive komponente u odnosu na dobivenu promjenu mase prethodnim optimiranjem. Kako bi se dobili što bolji rezultati optimizacije potrebno je što točnije definirati ulazne parametre te će se iz tog razloga prethodno dobiven model spona 5 doraditi u Solidworks-u na način da će se željena komponenta raščlaniti na više solidnih tijela.



Slika 28. Podjela modela na više solidnih tijela (iz vlastite arhive: 29.11.2021. 21:36)

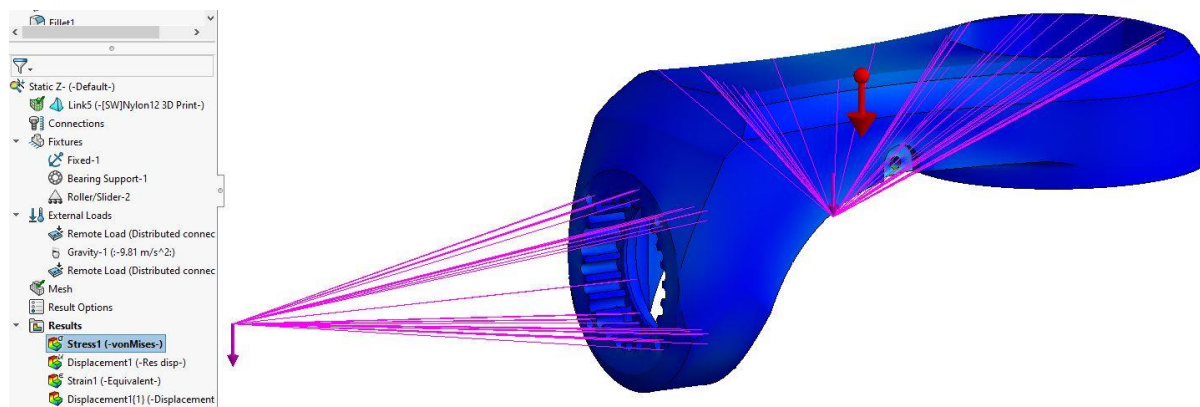
Ovim korakom odredio se volumen modela kod kojeg promjena geometrije nije poželjna iz razloga što su to dodirne plohe na ostale pozicije sklopa. Također odredio se volumen u kojem softver smije djelovati, jer bi geometrija izvan tog prostora mogla izazvati neželjene kolizije prilikom rada robotske ruke.

Prije no što se krene u optimizaciju u Solidworks-u je izvedena simulacija naprezanja po Von Misesu za različite orijentacije spona 5 u prostoru kako bi se dobile referentne vrijednosti kojima će se kontrolirati rezultati dobiveni pri optimizaciji spomenutim programima.

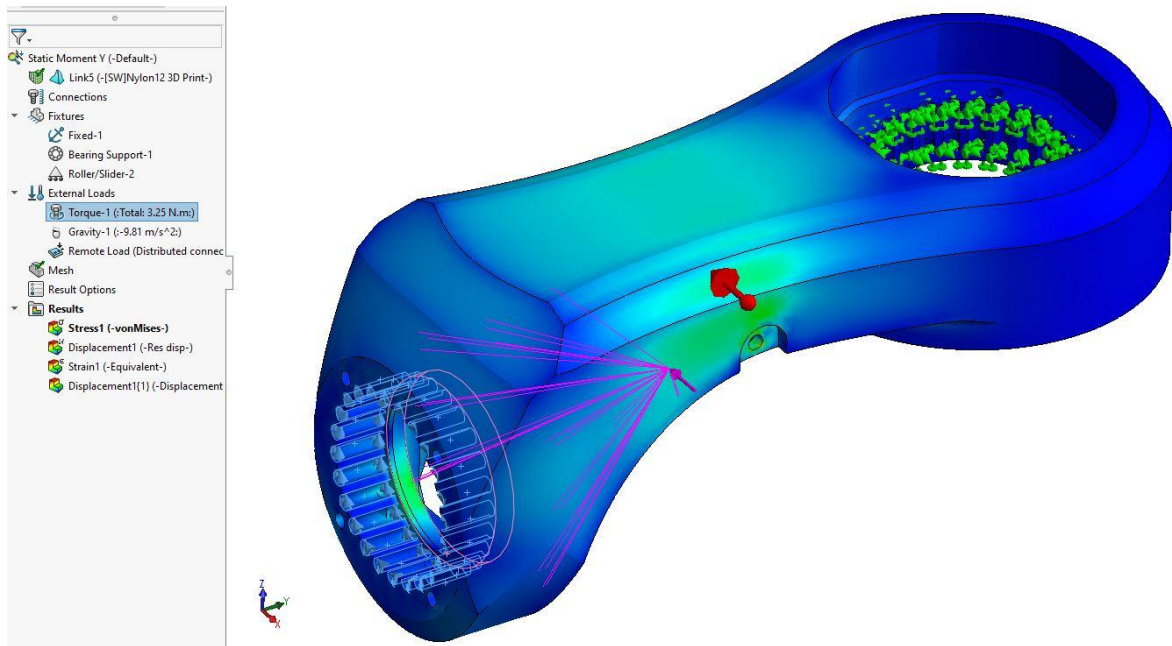
Kao ulazni podaci definirani su:

- Opterećenje tereta i krajnjeg efektora
 - Masa: 0,7 kg
 - Krak djelovanja sile: 240 mm
- Opterećenje ostalih pozicija sklopa ručnog zgloba
 - Masa: 0,33 kg
 - Krak djelovanja sile: 65 mm
- Smjer i ubrzanje gravitacijske sile
- Površine djelovanja opterećenja
- Fiksirane površine

Kreirana su tri slučaja u kojem svako od navedenih opterećenja djeluje u X, Y, i Z smjeru koordinatnog sustava, te četvrti slučaj u kojem je pretpostavljeno da dolazi do opterećenja izazvanog djelovanjem okretnog momenta pri čemu je njegov iznos jednak najvećem mogućem iznosu okretnog momenta zgloba oko osi 6.



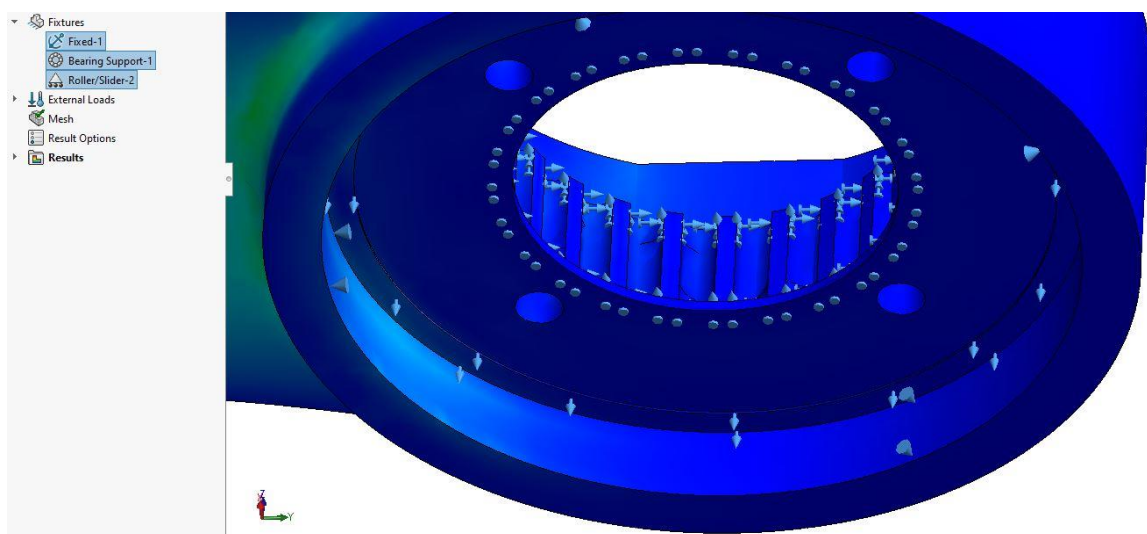
Slika 29. Definiranje opterećenja u smjeru osi Z (iz vlastite arhive: 29.11.2021. 22:22)



Slika 30. Definiranje opterećenja prilikom djelovanja maksimalnog okretnog momenta
(iz vlastite arhive: 29.11.2021. 22:36)

U sva četiri slučaja opterećenja djeluju na kontaktne površine zgloba oko osi 6, dok su kao oslonci definirane kontaktne površine zgloba oko osi 5. Pri čemu vrijedi:

- Površine ozubljenja prstena definirana su kao uklještenja
- Površine u dodiru sa kugličnim ležajem definirane su kao
 - Ležajni oslonac čime je ograničen radijalni pomak
 - Klizni ležaj koji ograničava aksijalni pomak



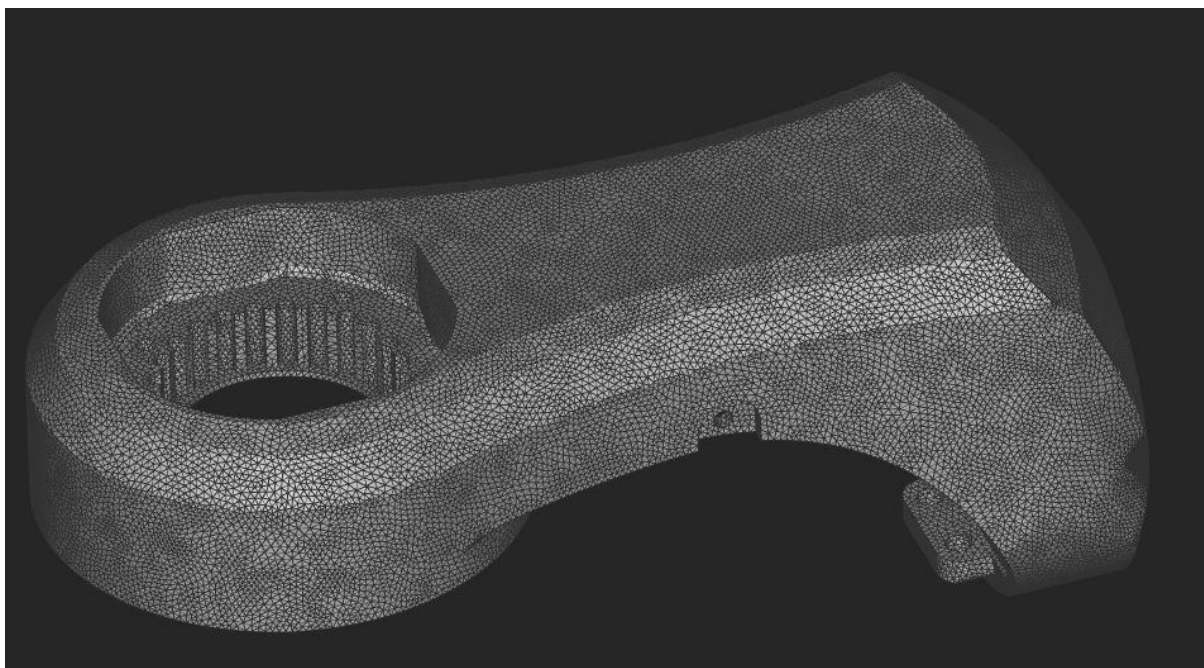
Slika 31. Definirani oslonci spona 5 (iz vlastite arhive: 29.11.2021. 22:54)

Usporedni rezultati za sva četiri slučaja priloženi su kao Prilog 1.

5.1. nTopology - Lightweighting metoda

Kada se govori od FDM metodi aditivnih tehnologija svi programi za pripremu ispisa nude opciju ispisa poroznih modela na način da se definira debljina stijenke ljuske te oblik, dimenzije i postotak ispune. Neki od vodećih programa nude i mogućnost promjenjivih navedenih parametara u odnosu na printani sloj ili definirano područje modela. Svi ti parametri definirani su od strane korisnika prema nekim preporučenim standardima ili iskustvu. Ono što nTopology Lightweighting metodu razlikuje od ovakvog pristupa 3D ispisu je mogućnost kreiranja ljuske i ispune promjenjivih parametara u definiranom rasponu sukladno rezultatima dobivenim iz simulacije naprezanja prema Von Misesu. Time se pomoću ove metode postiže optimalna raspodjela mase duž cijelog modela.

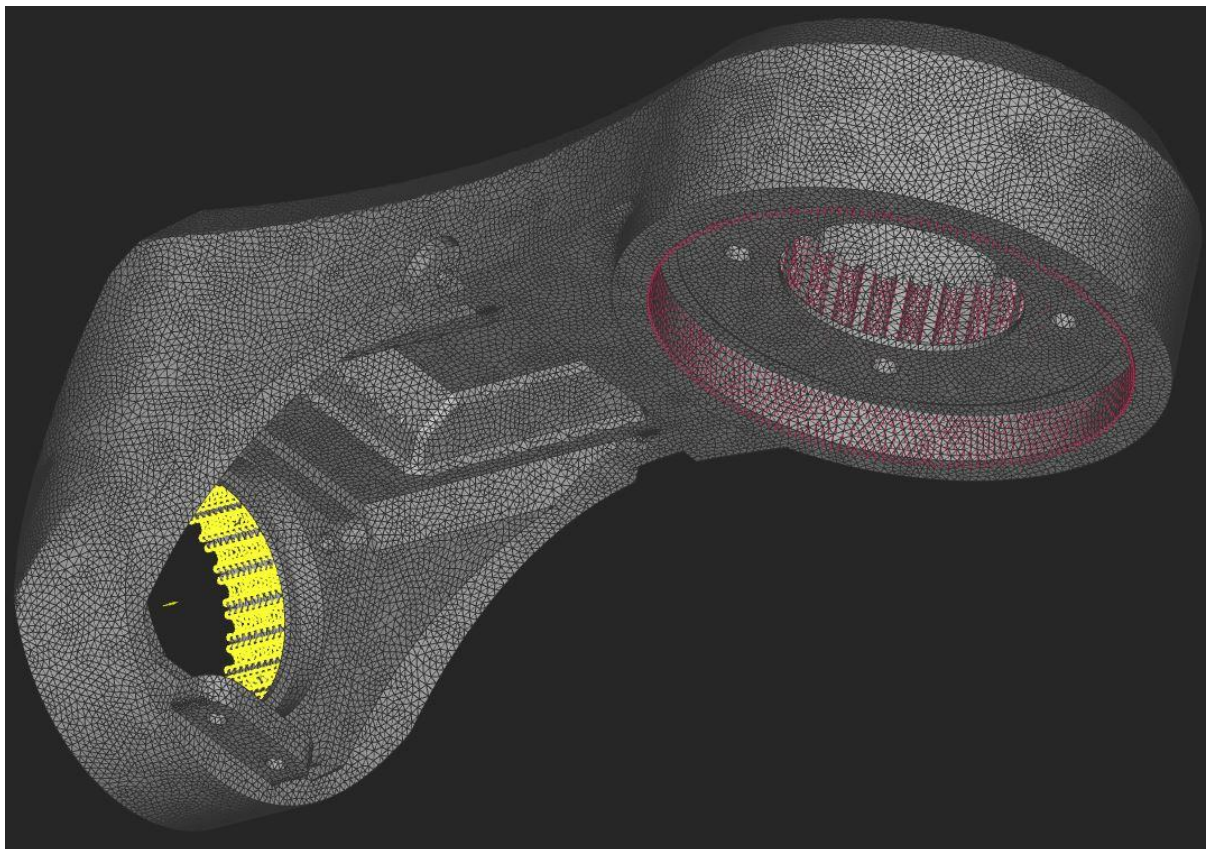
Proces optimizacije započinje unosom modela kreiranog u Solidworks-u te generiranjem FE modela³.



Slike 32. FE model sponse 5 (iz vlastite arhive: 29.11.2021. 23:58)

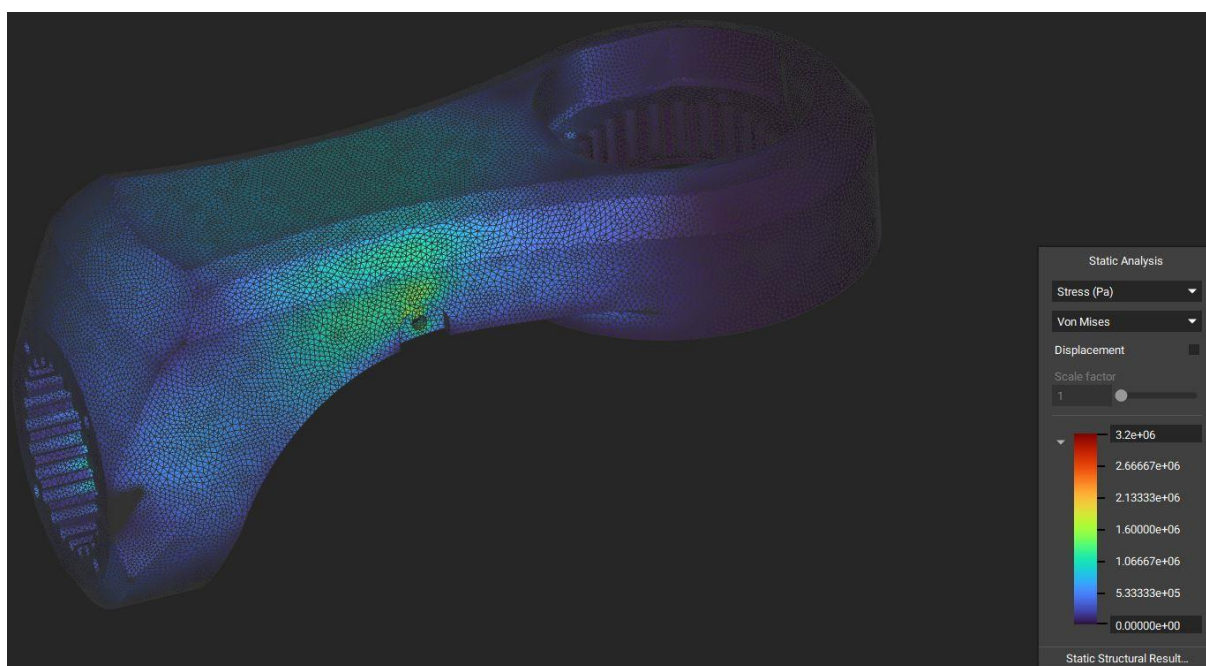
U sljedećem koraku kao i u Solidworks-u na očuvanoj geometriji definiraju se površine na koje djeluje opterećenje ili koje su u dodiru sa nekim tipom oslonca. Također definira se vrsta, smjer i iznos opterećenja, gdje se u ovom slučaju uzima slučaj sa maksimalnim okretnim momentom zgloba oko osi 6 iz razloga što je komparacijom rezultata dobivenih u Solidworks-u za taj slučaj zabilježeno najveće naprezanje.

³ Finite element model – model konačnih elemenata



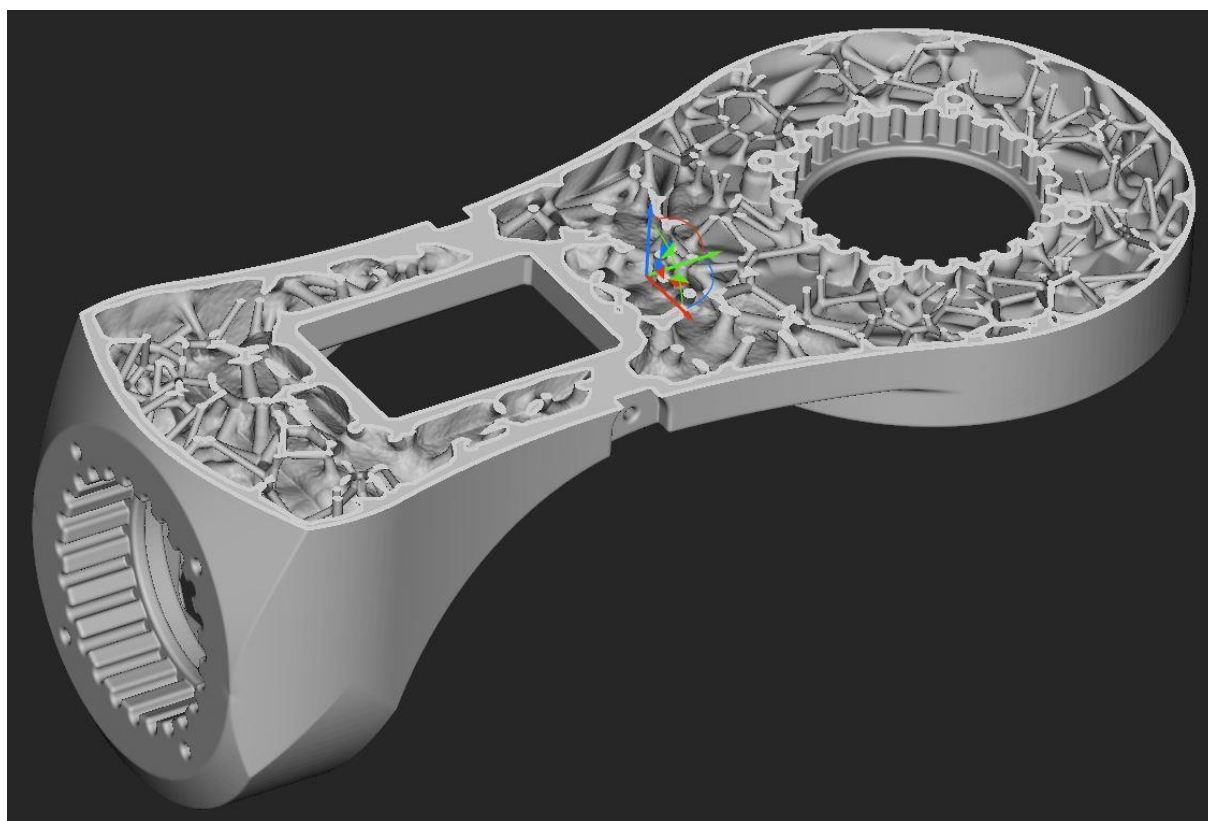
Slika 33. Definirana opterećenja i oslonci (iz vlastite arhive: 30.11.2021. 00:11)

Prema očekivanju dobiveni rezultati naprezanja približno su jednaki rezultatima vidljivim u Prilogu 1.



Slika 34. Rezultati simulacije naprezanja prema Von Misesu dobiveni u nTopology-u
(iz vlastite arhive: 30.11.2021. 00:14)

Dakle dobivena je prostorna mapa sa iznosima naprezanja te iznos minimalnog i maksimalnog naprezanja. Na ove iznose definira se minimalna i maksimalna debljina stijenke ljuske te minimalni i maksimalni parametri dimenzija odabranog tipa ispune. Sa ovim podacima softver generira model pri kojem linearno povećava ili smanjuje parametre unutar definiranih vrijednosti sukladno prostornoj mapi naprezanja. U ovom slučaju odabrana je ispuna Voronoi rešetkom te je sa Slike 35. lako uočljivo zadebljanje ljuske i rešetke u područjima većeg naprezanja.



*Slika 35. Presjek optimiranog modela spona 5 nTopology Lightweighting metodom
(iz vlastite arhive: 30.11.2021. 00:58)*

Kako na početku spomenuto ova metoda optimizacije zanimljiva je i primjerena kada se govori o FDM metodi ispisa, no kada se bolje promotri nije toliko efikasna za primjenu kod SLA, SLS ili MJF metode iz razloga što je kod ovih metoda potrebno iz dobivenih šupljina naknadno ispuhati prašak ili iscijediti tekuću smolu. Ovo zahtjeva dizajniranje dobro promišljenih otvora na modelu što može dodatno odužiti kompletan proces, a to je svakako poželjno izbjeći. Iz ovog razloga promotrit će se povoljnija vrsta optimizacije za sve navedene metode aditivnih tehnologija.

5.2. Altair Inspire - metoda topološke optimizacije

Topološka optimizacija je matematička metoda kojom se prostorno optimira distribucija mase unutar zadane domene sa točno definiranim ograničenjima. Drugim riječima to je proces koji optimira raspored i strukturu materijala unutar definiranog prostora za definirani skup pravila koje određuje korisnik. Dakle kako bi se izvršio proces optimiranja ovom metodom potrebno je definirati sljedeće ulazne parametre:

- Mehanička svojstva materijala
- Prostor optimizacije
- Očuvana geometrija
- Opterećenja
- Oslonci

U svrhu optimiranja robotske ruke ovdje je kao materijal odabran poliamid PA12 te njegova svojstva nakon ispisa SLS metodom:

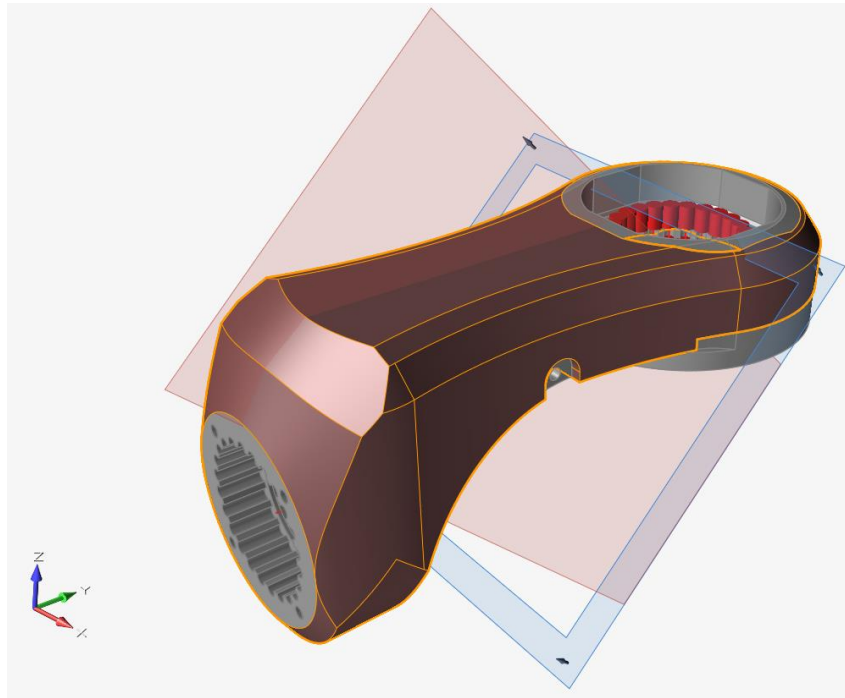
- Youngov modul elastičnosti: 1700 MPa
- Poissonov koeficijent: 0,41
- Gustoća: 930 kg/m³
- Granica popuštanja: 50 MPa

Prostor optimizacije i očuvana geometrija određena je prema prethodnoj raščlambi modela u Solidworks-u na nekoliko solidnih tijela prema Slici 28. te su slučajevi opterećenja i oslonci također definirani jednako kao i kod dosad prikazanih simulacija.

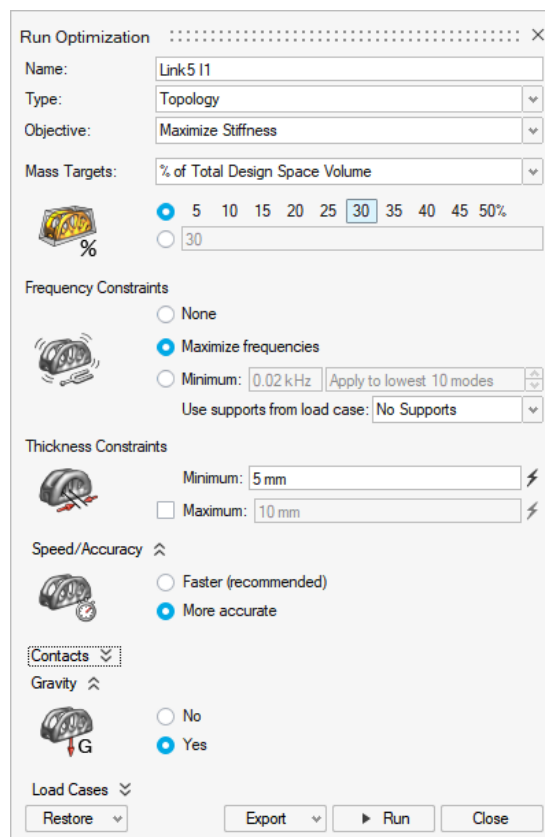


Slika 36. Definirana opterećenja i oslonci za slučaj djelovanja maksimalnog okretnog momenta
(iz vlastite arhive: 01.12.2021. 00:16)

Također postavljani su uvjeti optimizacije kao simetričnost u odnosu na YZ ravninu, smjer izvlačenja od 45° u odnosu na XY ravninu oko X osi prikazano na slici 37. i željeni ciljevi optimizacije prikazano na slici 38.

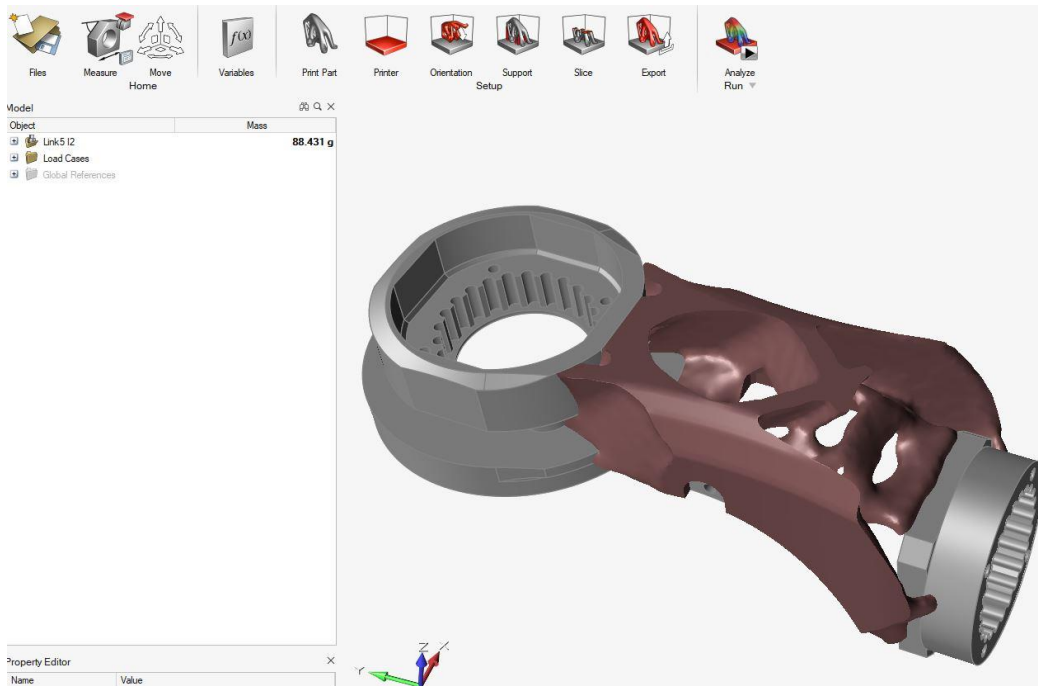


Slika 37. Postavljeni uvjeti optimizacije (iz vlastite arhive: 01.12.2021. 00:52)



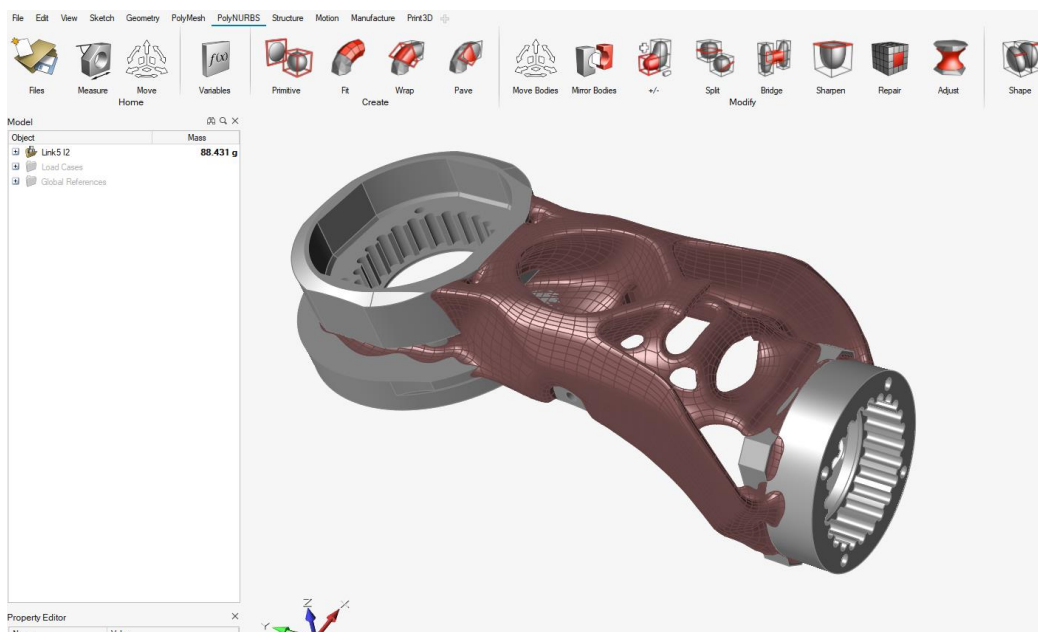
Slika 38. Željeni ciljevi optimizacije (iz vlastite arhive: 01.12.2021. 01:00)

Softver CAD model pretvara u FE model te vrši optimizaciju, a dobiveni rezultat može se u sljedećem koraku pripremiti za 3D ispis.



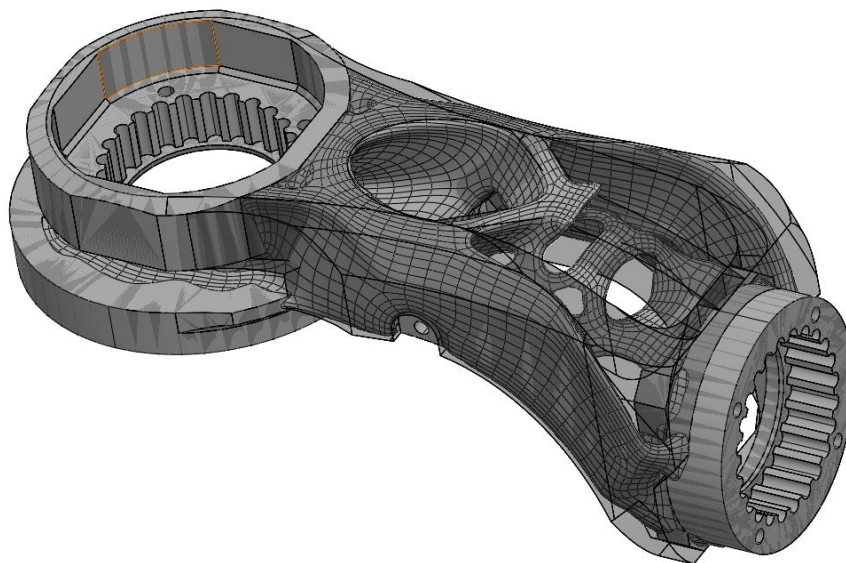
Slika 39. Generirani model metodom topološke optimizacije
(iz vlastite arhive: 01.12.2021. 01:09)

Ispis modela u ovom obliku ipak je rijetko poželjan te je naknadna obrada modela puno češći slučaj, stoga Altair ovdje nudi opciju generiranja PolyNURBS modela te skup alata za modificiranje njegove geometrije.

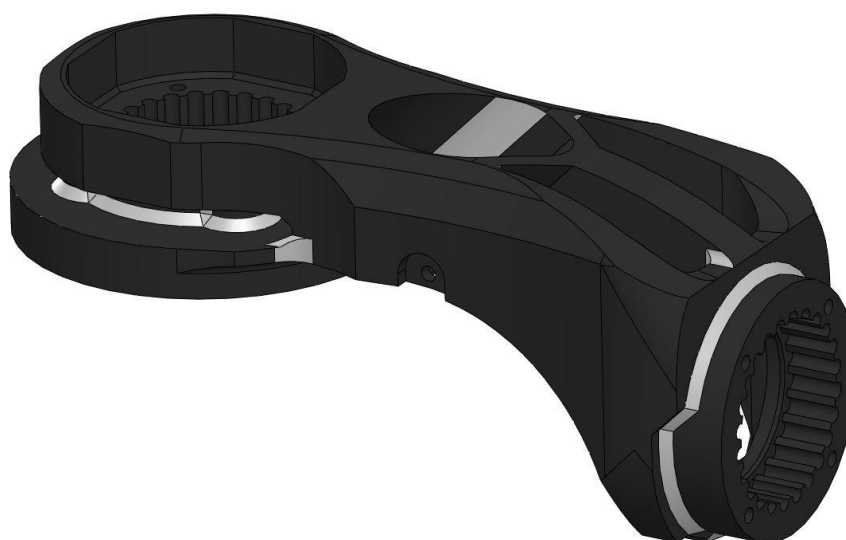


Slika 40. PolyNURBS model optimirane spone 5 (iz vlastite arhive: 01.12.2021. 01:35)

Ako je korisnik vješt u direktnom modeliranju onda je ovo u principu optimalna metoda naknadne dorade modela no ukoliko korisnik preferira parametrijsko modeliranje tada je model potrebno spremi kao grafičku datoteku u primjerice .STL ili .OBJ formatu, otvoriti je u nekom od CAD softvera i njome se poslužiti kao nekom vrstom prostorne sheme. Tako i u ovom slučaju model je na opisan način prebačen u Solidworks, kreiran je novi sklop u kojem su početni model spone 5 i optimirani model postavljeni jedan preko drugog te je iterativnim procesom izmjene početnog modela i komparacije sa optimiranim modelom dobiven CAD model približno jednake geometrije.



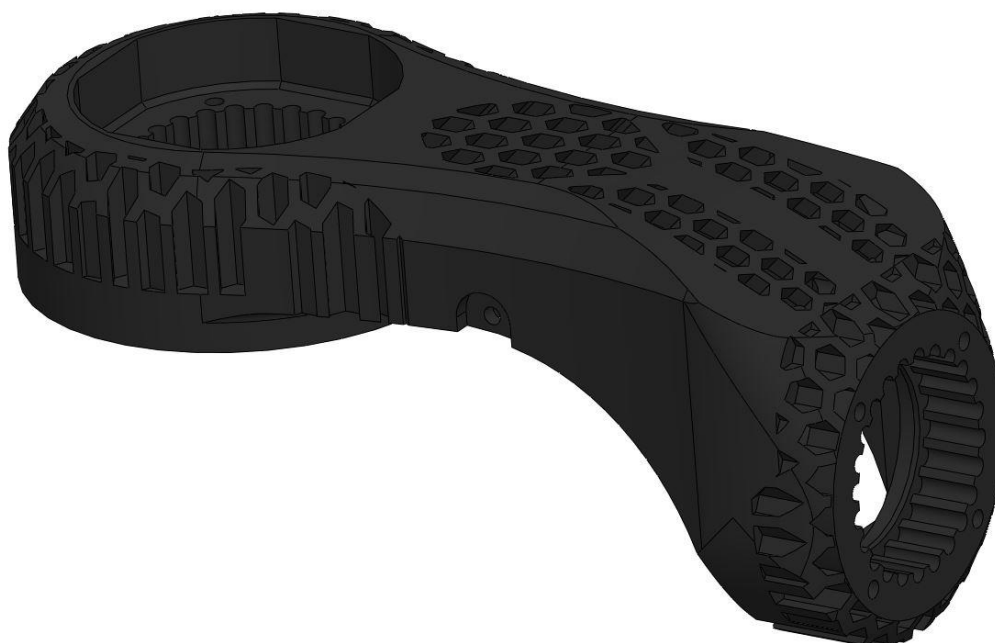
*Slika 41. Usporedna vizualizacija PolyNURBS i izmijenjenog CAD modela
(iz vlastite arhive: 01.12.2021. 02:00)*



*Slika 42. Optimizirani model spone 5 nakon naknadne doradne parametrijskim modeliranjem
(iz vlastite arhive: 01.12.2021. 02:07)*

5.3. Optimirani model robotske ruke

Iz aspekta optimiranja performansi modela ovime je završen proces topološkog optimiranja. U slučaju optimiranja robotske ruke, u ovom primjeru spona 5, želja je bila zadržati prethodno dizajnirane konture te je u sljedećem koraku napravljen kompromis između performansa i dizajna. Dakle odstranjen volumen prilikom procesa optimizacije u sljedećem koraku zamijenjen je heksagonskom mrežom te je dio tako modificiranog volumena vraćen i time je dobiven model prikazan na slici 43. Cjeloviti pregled toka izmjene modela prilikom optimizacije prikazan je u Prilogu 2.



Slika 43. Finalni model spona 5 (iz vlastite arhive: 01.12.2021. 02:21)

Nadalje prikazanom metodom topološke optimizacije optimirani su modeli Spona 4, Spona 3 i Spona 2 iz razloga jer je smatrano da su to komponente sklopa o kojima najviše ovisi performans modelirane robotske ruke. Naknadno modeli ostalih komponenata izmijenjeni su kako bi dizajnom odgovarali optimiziranim modelima, a da pritom zadrže svoju prvobitnu funkciju. Modeli Spone 1 i Baze pritom su u nekim područjima optimizirani Lightweighting metodom gdje je također odabrana heksagonalna mreža te tako dobivena nešto manja masa. Finalni rezultati optimizacije robotske ruke prikazani si u nastavku.



Slika 44. Model robotske ruke nakon optimizacije (lijevo) i nakon finalnog redizajna (desno)
(iz vlastite arhive: 01.12.2021. 22:31)

Sklop	Masa početnog modela [g]	Masa optimiranog modela [g]	Masa finalnog modela [g]
Prihvat	14	14	14
Spona 5	514	434	441
Spona 4	411	340	365
Spona 3	690	520	567
Spona 2	1508	1182	1237
Spona 1	1920	1809	1802
Baza	1930	1715	1710
Ukupno:	6987	6014	6136

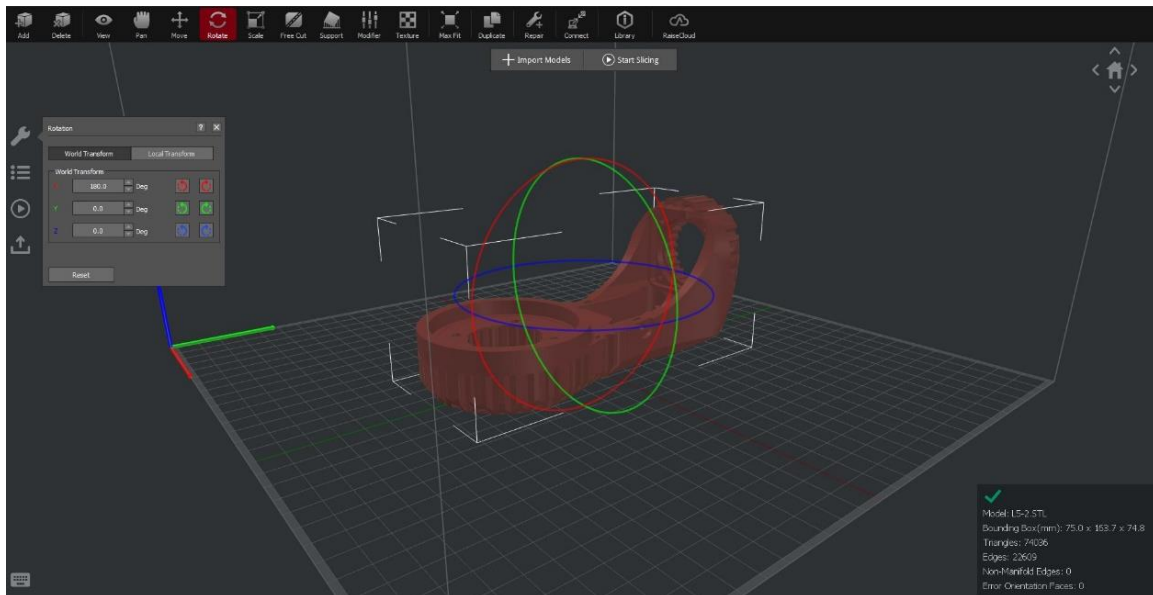
Tablica 3. Komparacija ukupne mase glavnih sklopova modela robotske ruke

Sklop	Masa početnog modela [g]	Masa optimiranog modela [g]	Masa finalnog modela [g]
Prihvat	10	10	10
Spona 5	268	188	195
Spona 4	225	154	179
Spona 3	437	267	314
Spona 2	948	622	677
Spona 1	1347	1236	1229
Baza	1438	1223	1218
Ukupno:	4673	3700	3822

Tablica 4. Komparacija masa 3D printanih pozicija po glavnom sklopu modela robotkse ruke

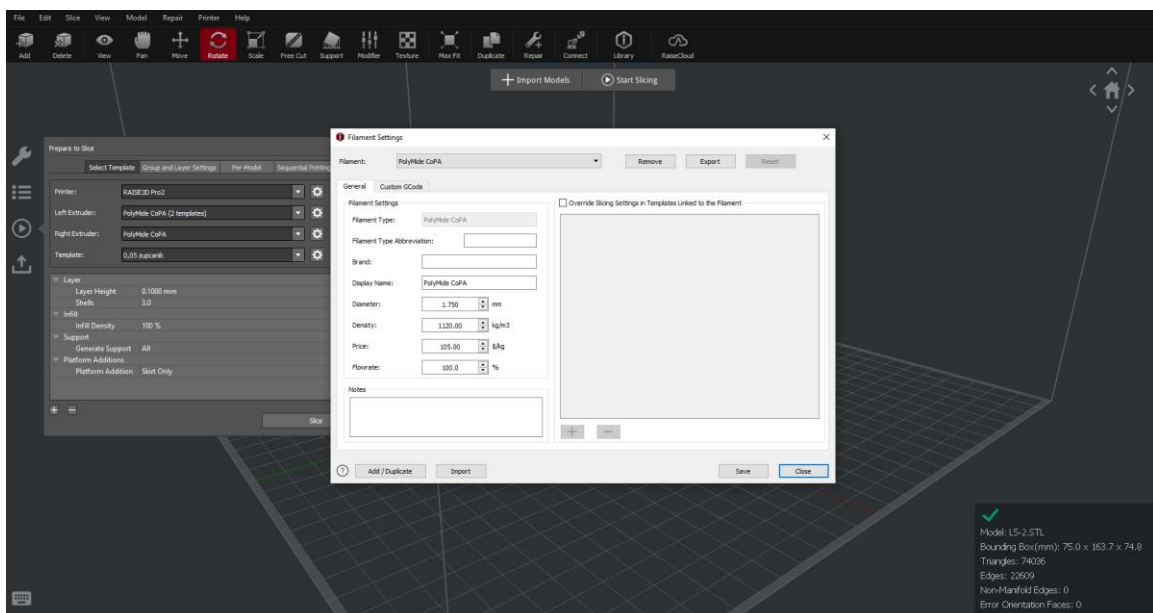
6. 3D ispis i cijena izrade

Za 3D ispis CAD modele komponenti najprije je potrebno spremi u vrstu datoteke kompatibilnu sa slicer softverom, u ovom slučaju u svrhu FDM metode ispisa odabran je program ideaMaker te su modeli spremljeni u obliku .STL datoteke. Učitani je model i postavljen na radnu podlogu u željenoj orijentaciji ispisa.



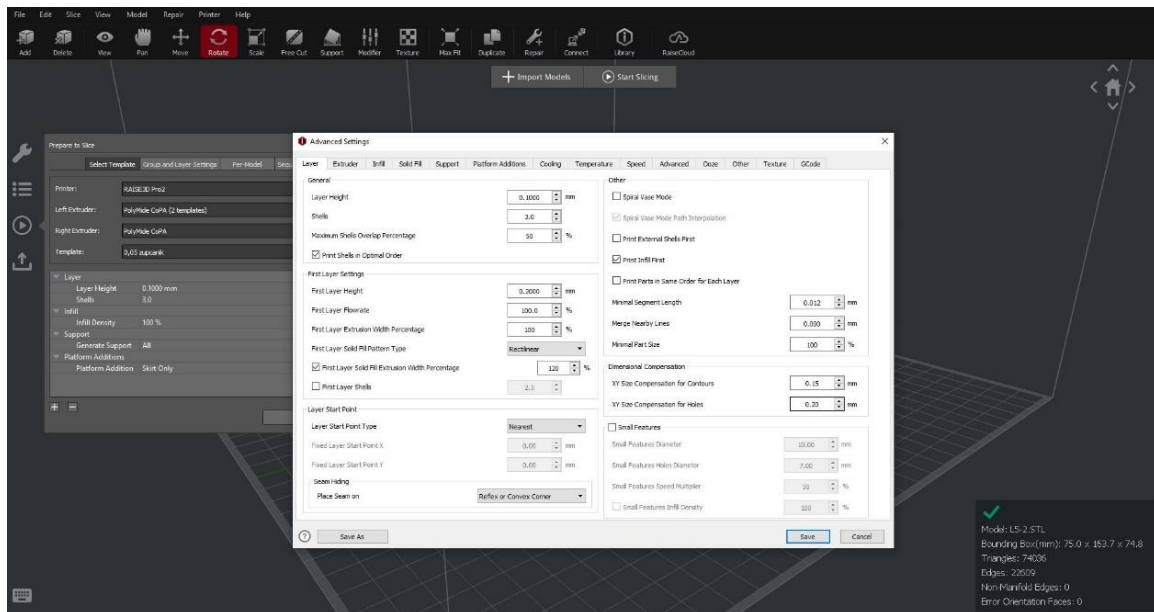
Slika 45. Pozicioniranje i orijentacija modela za 3D ispis (iz vlastite arhive: 02.12.2021. 22:57)

Odabire se vrsta filameta te se unose njegova svojstva sukladno tehničkim specifikacijama dobavljača.



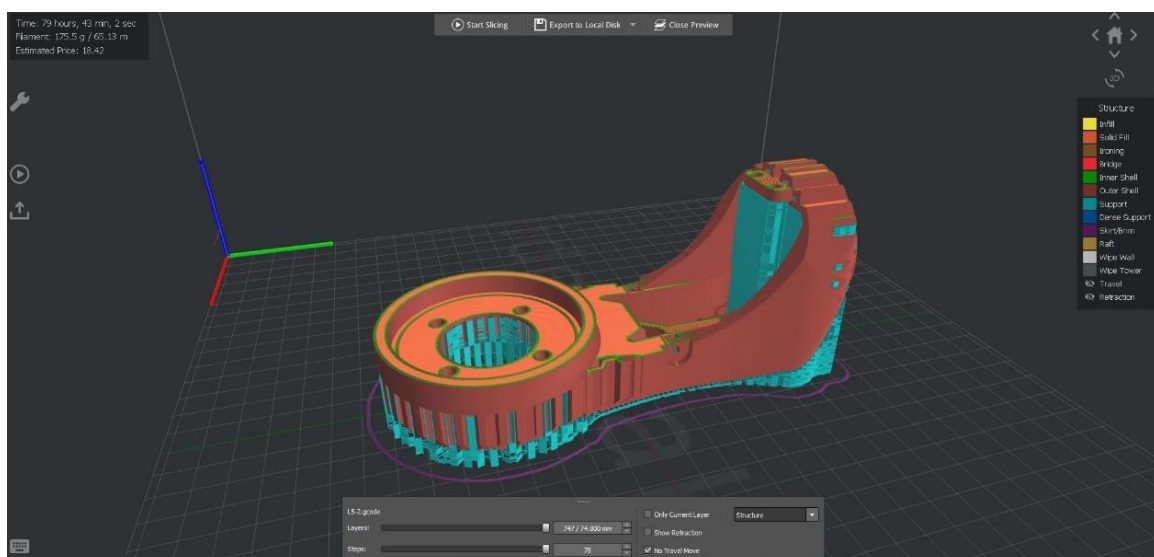
Slika 46. Odabir filameta (iz vlastite arhive: 02.12.2021. 23:00)

Određuju se parametri 3D ispisa poput visine sloja, debljina stijenke, postotak ispune, oblik ispune, radne temperature mlaznice i radne podloge, kompenzacija dimenzija, brzina ekstrudiranja te oblik, orijentacija i gustoća potpora.



Slika 47. Sučelje za podešavanje parametara 3D ispisa (iz vlastite arhive: 02.12.2021. 23:07)

Softver reže model na slojeve nakon čega korisniku daje vizualni prikaz 3D ispisa te procijenjeno vrijeme i cijenu izrade.



Slika 48. Pretpregled 3D ispisa modela (iz vlastite arhive: 02.12.2021. 22:50)

Kako bi se obrazložili dobiveni rezultati, prvo se razmatra odabir materijala. Najpopularniji materijali za širu primjenu FDM ispisa su PLA i ABS. PLA iz razloga što nudi dobra mehanička svojstva, male deformacije prilikom ispisa te dobru kvalitetu površine ipak u ovo slučaju PLA nije optimalan odabir iz razloga što se koračni motori prilikom rada zagrijavaju do temperature na kojoj PLA počinje mekšati te bi to moglo izazvati neželjene deformacije komponenti robotske ruke. ABS nudi nešto slabija mehanička svojstva, ali je mnogo otporniji na temperaturno popuštanje, iz ovog razloga kada se radi sa tim filamentom radne temperature mlaznice i podloge su puno veće pa dolazi do znatnih deformacija ukoliko su uske tolerancije poželjne. Stoga kao optimalno rješenje u slučaju FDM ispisa robotske ruke smatra se upotreba ASA filameta koji ima približno jednaku otpornost na temperaturno popuštanje kao ABS te kvalitetu i preciznost ispisa približno jednaku PLA filamentu. Kao alternativno rješenje također se može odabrati filament Polymide CoPa čime bi se dobila najbolja mehanička svojstva i dugotrajnost modela no u tom slučaju zahtijevane su vrlo fine postavke 3D ispisa. Vrijeme trajanja ispisa najviše ovisi o visini sloja, u ovom slučaju smatrano je da je 0,1 mm dovoljna rezolucija kako bi se dobila potrebna preciznost. Za bolju kvalitetu može se odabrati i visina sloja od 0,05 mm, ali tada raste vrijeme ispisa i troškovi. Proporcionalno tome oni se smanjuju u slučaju odabira veće vrijednosti visine sloja no dobivena rezolucija ispisa mogla bi umanjiti performanse rada robotske ruke. Dakle u konačnici dobiva se vrijeme ispisa od 80 sati, te cijena ispisa modela spone 5 od 18,5 € ukoliko je odabran filament Polymide CoPa, odnosno 10 € za ASA filament.

U svrhu komparacije i lakše kalkulacije cijene izrade, model spone 5 učitao je na stranice tvrtke FAMA3D te je dobivena ponuda za ispis modela MJF metodom uz cijenu od 44,5 €. Ovom metodom ispisa dobio bi se model robotske ruke najboljih mehaničkih svojstava i vrlo preciznih dimenzija te minimalnog vremena izrade, no cijena ispisa robotske ruke bila bi dva do četiri puta viša nego primjenom FDM metode. Nadalje uzeta je ponuda i za ostale modele komponenti robotske ruke (Prilog 3.) te je iz toga proporcionalno pretpostavljena i cijena izrade FDM metodom.

	MJF	FDM – Polymide CoPa	FDM-ASA
Cijena 3D ispisa [€]	~1215 €	~486 €	~304 €

Tablica 5. Procijenjena cijena 3D ispisa robotke ruke

Komponente robotske ruke	Cijena [€]
Elektroničke komponente	90
Aktuatori	60
Kuglični ležajevi	150
Vijčani elementi	10
Precizne zatike	30
3D ispis	1215/490/310
Ukupno:	1555/830/650

Tablica 6. Ukupna cijena izrade robotske ruke

7. Zaključak

Širenjem znanja i otvaranjem patenata proizvodi i tehnologije primjereni za velike industrije šire svoje područje upotrebe na mlade inženjere, studente i učenike te sve pojedince voljne stjecanja novih saznanja. Ovo je izričito vidljivo na primjeru aditivnih tehnologija i 3D printera, pa je i samim time danas na tržištu dostupan širok spektar opreme čime je popunjen sveukupan raspon pružane kvalitete i zahtijevane cijene ulaganja. Jednaka tendencija vidljiva je i kod primjene artikuliranih robotskih ruku, uz razliku što je tržište prezasićeno high-end opremom te vrlo jeftinom edukacijskom opremom dok se prostor spektra između tih dviju skupina tek popunjava. U ovom radu pokušalo se kreirati robotsku ruku koja bi zauzela svoje mjesto upravo u tom području uz iznimne robotske ruke pojedinih startup kompanija i open source projekata. Stoga je u radu prikazan proces modeliranja robotske ruke kojom bi se pružio optimalan kompromis između cijene, kvalitete i funkcionalnosti. Objasnjen je tok niza odabira pri čemu svaka ponuđena mogućnost pruža neke prednosti i nedostatke, a svaki odabir na neki način diktira konačan ishod projekta. Također dani su primjeri metoda i alata za optimizaciju kako bi se utjecaj nedostataka umanjio. U konačnici model je kreiran na način da krajnjem korisniku ponudi mogućnost ograničenog alterniranja kvalitete prema dostupnom budžetu ili osobnoj preferenciji. Idealno ono što slijedi nakon ovog rada je izrada prototipa te analiza sveukupnog procesa modeliranja i rada robotske ruke, te nakraju definiranje mogućih poboljšanja i kreiranje sljedeće verzije.

03.12.2021. *Kuhar*
Mihael Kuhar

Literatura

- [1] <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-sales-rise-again> (03.12.2021.)
- [2] https://www.linkedin.com/learning/additive-manufacturing-for-business?trk=course_title&upsellOrderOrigin=default_guest_learning (03.12.2021.)
- [3] Dynamic Simulation and Motion Load Analysis of Six Dof Articulated Robotic Arm, Khin Soe Nwe, Wai Phyo Maung, Mandalay Technology University, 2018.
- [4] Design and Development of a Competitive Low-Cost Robot Arm with Four Degrees of Freedom, Elfasakhany, Yanez, Baylon, Salgado, Taif University, 2011.
- [5] <https://www.howtorobot.com/expert-insight/industrial-robot-types-and-their-different-uses> (03.12.2021.)
- [6] <https://robocademy.com/2020/04/13/how-to-choose-an-actuator-for-your-robot/> (03.12.2021.)
- [7] <http://www.xpert-meca.com/> (03.12.2021.)
- [8] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/13-MehanickiPrijenosnici.pdf> (03.12.2021.)
- [9] <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/how-does-a-cycloidal-gear-drive-work/> (03.12.2021.)
- [10] <https://www.harmonicdrive.net/> (03.12.2021.)
- [11] <https://roboticsbook.com/gears-inside-the-wrist-of-industrial-robot/> (03.12.2021.)
- [12] <https://mqtt.org/> (03.12.2021.)
- [13] <https://www.norelem.com/hr/en/Products/Product-overview.html> (03.12.2021.)
- [14] <https://www.stratasys.com/materials> (03.12.2021.)
- [15] <https://ntopology.com/> (03.12.2021.)
- [16] <https://www.altair.com/inspire/> (03.12.2021.)

Popis slika

- Slika 1. Godišnja instalacija jedinica industrijskih robota prema internacionalnoj federaciji robotike (Izvor: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-sales-rise-again>)
- Slika 2. Područja primjene aditivnih tehnologija
- Slika 3. Kategorizacija aditivnih tehnologija prema ASTM
- Slika 4. Proces izrade modela SLA metodom
- Slika 5. Proces izrade modela FDM metodom
- Slika 6. Proces izrade modela SLS metodom
- Slika 7. Proces izrade modela MJF metodom
- Slika 8. Artikulirana robotska ruka sa 6 stupnjeva slobode (Izvor: Dynamic Simulation and Motion Load Analysis of Six Dof Articulated Robotic Arm, Khin Soe Nwe, Wai Phyo Maung, Mandalay Technology University, 2018.)
- Slika 9. Shema modela robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja
- Slika 10. Konstrukcija koračnog motora (Izvor: <https://robocademy.com/2020/04/13/how-to-choose-an-actuator-for-your-robot/>)
- Slika 11. Shema servo motora te prikaz različitih izvedbi
- Slika 12. Smještaj aktuatora zglobova 4,5 i 6 iza zgloba 3 u cilju optimirane distribucije mase odnosno povećanja nosivosti na primjeru robotske ruke Kuka KR 16KS (Izvor: <http://www.xpert-meca.com/>)
- Slika 13. Primjer planetarnog zupčanika sa jednim stupnjem prijenosa i ravnim zubima
- Slika 14. Koncept izvedbe cikloidnog reduktora (Izvor: <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/how-does-a-cycloidal-gear-drive-work/>)
- Slika 15. Građa i princip rada harmonijskog reduktora (Izvor: <https://www.harmonicdrive.net/>)
- Slika 16. Prijenos zupčastim remenom (lijevo) i hipoidni prijenos (desno) (Izvor: <https://roboticsbook.com/gears-inside-the-wrist-of-industrial-robot/>)
- Slika 17. Shema upravljačkog sustava
- Slika 18. MKS Servo 42a (lijevo) i dodatna tiskana pločica (desno)
- Slika 19. Koncept aktuatorskog modula zgloba robotske ruke
- Slika 20. Početni model cikloidnog reduktora
- Slika 21. Model cikloidnog reduktora šestog zgloba robotske ruke
- Slika 22. Model zgloba robotske ruke
- Slika 23. Prikaz odabranog vijka sa opružnim mehanizmom indeksiranja te njegove karakteristike (Izvor: <https://www.norelem.com/hr/en/Products/Product-overview.html>)
- Slika 24. Model prihvata krajnjeg efektora

- Slika 25. Sklop ručnog zgloba robota
- Slika 26. Renderirani model robotske ruke
- Slika 27. Presjek modela robotske ruke sa prikazanim razmacima između zglobova (lijevo) i radni prostor robotske ruke (desno)
- Slika 28. Podjela modela na više solidnih tijela
- Slika 29. Definiranje opterećenja u smjeru osi Z
- Slika 30. Definiranje opterećenja prilikom djelovanja maksimalnog okretnog momenta
- Slika 31. Definirani oslonci spone 5
- Slika 32. FE model spone 5
- Slika 33. Definirana opterećenja i oslonci
- Slika 34. Rezultati simulacije naprazanja prema Von Misesu dobiveni u nTopology-u
- Slika 35. Presjek optimiranog modela spone 5 nTopology Lightweighting metodom
- Slika 36. Definirana opterećenja i oslonci za slučaj djelovanja maksimalnog okretnog momenta
- Slika 37. Postavljeni uvjeti optimizacije
- Slika 38. Željeni ciljevi optimizacije
- Slika 39. Generirani model metodom topološke optimizacije
- Slika 40. PolyNURBS model optimirane spone 5
- Slika 41. Usporedna vizualizacija PolyNURBS i izmijenjenog CAD modela
- Slika 42. Optimizirani model spone 5 nakon naknadne doradne parametrijskim modeliranjem
- Slika 43. Finalni model spone 5
- Slika 44. Model robotske ruke nakon optimizacije (lijevo) i nakon finalnog redizajna (desno)
- Slika 45. Pozicioniranje i orijentacija modela za 3D ispis
- Slika 46. Odabir filameta
- Slika 47. Sučelje za podešavanje parametara 3D ispisa
- Slika 48. Pretpregled 3D ispisa modela

Popis tablica

Tablica 1. Specifikacije glavnih sklopova modela robotske ruke

Tablica 2. Karakteristike aktuatorskih modula

Tablica 3. Komparacija ukupne mase glavnih sklopova modela robotske ruke

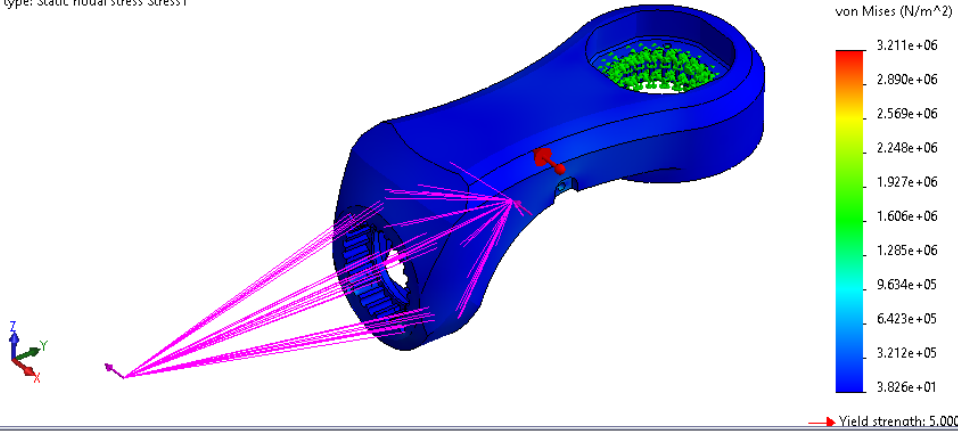
Tablica 4. Komparacija masa 3D printanih pozicija po glavnom sklopu modela robotkse ruke

Tablica 5. Procijenjena cijena 3D ispisa robotke ruke

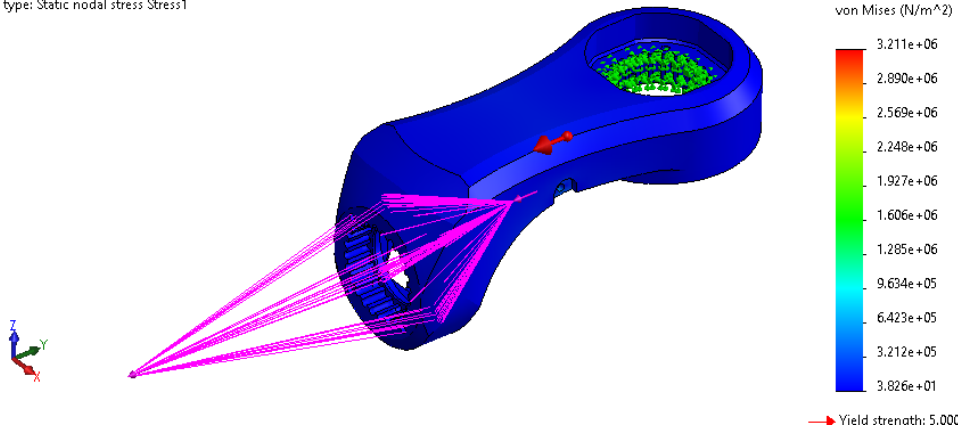
Tablica 6. Ukupna cijena izrade robotske ruke

Prilog 1.

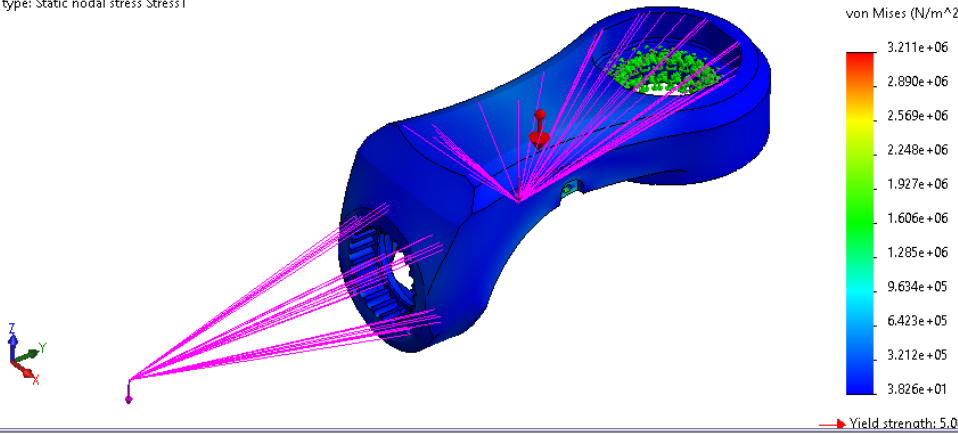
Model name: Link5
Study name: Static X-(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1



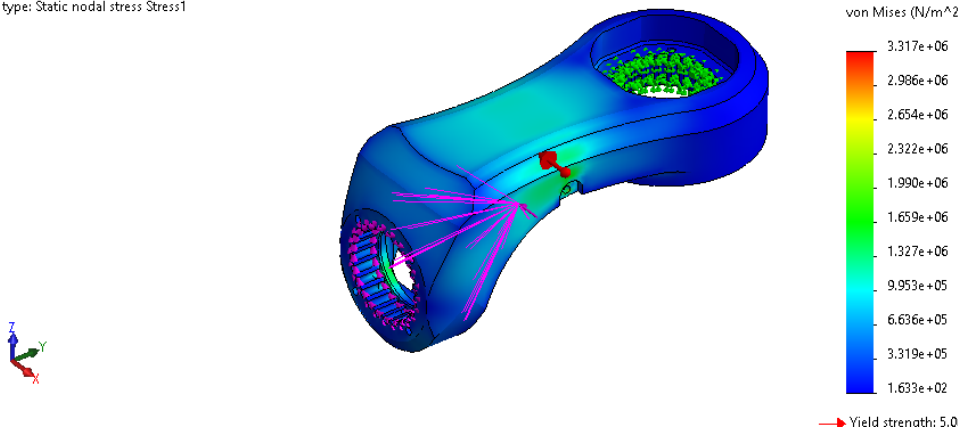
Model name: Link5
Study name: Static Y-(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1



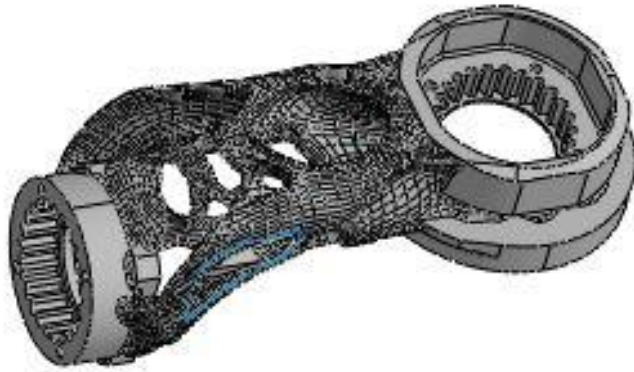
Model name: Link5
Study name: Static Z-(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1












Model name: Link5
Study name: Static Moment Y(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
















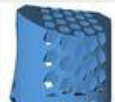




Prilog 2.



















Prilog 3.

	<p>File: B1.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>295,96 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 329,84 295,96</p>
	<p>File: B2.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>82,72 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 94,04 82,72</p>
	<p>File: B3.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>33,57 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 37,30 33,57</p>
	<p>File: B4.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>14,44 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 16,04 14,44</p>
	<p>File: L1-1.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>235,15 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 264,38 235,15</p>
	<p>File: L1-2.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>24,44 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 27,16 24,44</p>
	<p>File: L2-1.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>144,43 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 160,40 144,43</p>
	<p>File: L2-2.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>11,48 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 12,76 11,48</p>
	<p>File: L3-1.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>37,98 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 42,30 37,98</p>

✕		<p>File: L3-2-STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	86,31	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>	95,00 86,31
✕		<p>File: L3-3-STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>	5,00 4,50
✕		<p>File: L3-4-STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>	5,00 4,50
✕		<p>File: L3-5-STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	5,45	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>	5,00 5,45
✕		<p>File: L4-1-STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	32,42	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>	36,00 32,42
✕		<p>File: L4-2-STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>	5,00 4,50
✕		<p>File: L5-1-STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	17,48	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>	19,40 17,48
✕		<p>File: L5-2-STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	44,55	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>	40,50 44,55
✕		<p>File: L5-3-STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/>	5,00 4,50

	<p>File: LS-4.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: LS-5.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: LS-6.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: LS-7.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: LS-8.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>7,96 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 8,94 7,96</p>
	<p>File: TH.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: C11.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: C12.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>5,15 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,72 5,15</p>
	<p>File: C13.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>5,15 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,72 5,15</p>

	<p>File: C21.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50
	<p>File: C22.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	5,15 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,70 5,15
	<p>File: C23.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	5,15 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,70 5,15
	<p>File: C31.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50
	<p>File: C32.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50
	<p>File: C33.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50
	<p>File: C41.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50
	<p>File: C42.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50
	<p>File: C43.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50

	<p>File: C51.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: C52.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: C53.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: C61.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: C62.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: C63.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>4,50 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 5,00 4,50</p>
	<p>File: L2-3.STL Material: Nylon PA12 Classic Color: Grey (raw) Print settings: Standard Economy File Check: no, i don't need this service Fix Orientation: No Vapor Fuse: No Produced in 7 working days NOTE:</p>	<p>16,75 <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> 48,64 16,75</p>
<p>Discount Code <input type="text" value="Put your Discount Code..."/> <input type="button" value="Apply Discount Code"/> <input type="button" value="Update Cart"/> <input type="button" value="Empty Cart"/></p>		

SELECT DELIVERY ADDRESS

Delivery to invoicing address Delivery to alternative

CART

Subtotal 1.215,18 €



Sveučilište
Sjever



SVUČILIŠTE
SIEVER

IZJAVA O AUTORSTVU I SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, _____ Mihael Kuhar _____ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom _____ Prototipno modeliranje robotske ruke _____ (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

_____ Kuhar _____
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, _____ Mihael Kuhar _____ (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom _____ Prototipno modeliranje robotske ruke _____ (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

_____ Kuhar _____
(vlastoručni potpis)