

Konstruktivsko rješenje šesteroosne robotske ruke za pozicioniranje video kamere

Kremenjaš, David

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:106778>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

David Kremenjaš

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dragan Žeželj, dipl. ing.

Student:

David Kremenjaš

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Draganu Žeželju na korisnim savjetima, pruženoj pomoći i iznimnoj susretljivosti prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se obitelji na neizmornoj podršci i razumijevanju tijekom izrade ovog rada, ali i tijekom cjelokupnog dosadašnjeg studija.

Zahvaljujem se i prijateljima što su uz mene prošli najbolje i najgore trenutke i time mi uljepšali studiranje.

David Kremenjaš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **David Kremenjaš** JMBAG: 0035218251

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Konstrukcijsko rješenje šesteroosne robotske ruke za pozicioniranje video kamere**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design solution of a six-axis robotic arm for video camera positioning**

Opis zadatka:

Robotske ruke za pozicioniranje video kamera nisu rijetka pojava u profesionalnoj, ali niti u amaterskoj primjeni. Koriste se za posebne namjene kada ručno pozicioniranje ili upraba drona nisu primjenjive opcije.

Cilj zadatka je konstruiranje šesteroosne robotske ruke za pozicioniranje video kamere. Nosivost robotske ruke mora biti dovoljna za nošenje profesionalnih video kamera koje se koriste u ove svrhe, a dohvat mora biti dovoljan za snimanje čovjeka prosječne visine. Poželjno je razmotriti i mogućnost gibanja sklopa robotske ruke po vodilicama kako bi se postigao veći radni volumen. U svrhu poboljšavanja performansi, prilikom razvoja konstrukcije, u obzir uzeti mogućnost izrade pojedinih dijelova primjenom aditivne tehnologije 3D printanja, a oblik i svojstva postići primjenom topološke optimizacije.

U radu je potrebno:

- modelirati konstrukcijsko rješenje
- odrediti najnepovoljnije uvjete opterećenja i uključiti ih u jedan radni ciklus
- simulirati dinamiku prethodno odabranog radnog ciklusa
- na temelju dobivenih dinamičkih opterećenja provesti proračun čvrstoće te izvršiti topološku optimizaciju 3D printanih komponenti

Vrijednosti potrebne za proračun i odabir pojedinih komponenti usvojiti iz postojećih rješenja sličnih sustava, iskustvenih vrijednosti te u dogovoru s mentorom.

Računalni model odabranog rješenja uređaja izraditi u 3D CAD sustavu, cjelovito konstrukcijsko rješenje prikazati sklopnim crtežom, a dijelove odabrane u dogovoru s mentorom razraditi do razine radioničkih.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:


Predviđeni datumi obrane:

7. ožujka 2024.

9. svibnja 2024.

13. – 17. svibnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Dragan Žeželj

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc.  Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. Uvod.....	1
1.1 Unimate	3
1.2 Robotske ruke u moderno doba.....	5
1.3 Roboti u kinematografiji	7
1.3.1 Upravljanje pokretom (<i>Motion control</i>).....	7
2. Analiza postojećih uređaja na tržištu	9
2.1 Bolt.....	9
2.2 MIA	11
2.3 CRX 1810.....	13
2.4 Rocket Cinema Robot	15
2.5 Osvrt na analizu tržišta.....	16
3. Konstrukcijska razmatranja.....	17
3.1 Mogućnosti gibanja u ovisnosti o stupnjevima slobode gibanja.....	17
3.2 Aditivna proizvodnja.....	19
3.3 Sustavi za pogon i pozicioniranje.....	23
3.3.1 Servo motori.....	24
3.3.2 Stepper motori	25
3.3.3 Usporedba servo motora i stepper motora.....	27
3.3.4 Harmonijski prijenosnik.....	29
3.3.5 Cikloidni prijenosnik.....	31
3.3.6 Remenski prijenos	32
3.3.7 Ležajevi	33
4. Proračun	34
4.1 Dinamička analiza gibanja	34
4.2 Verifikacija dinamičke analize.....	36
4.3 Zglobovi 5 i 6	40
4.4 Zglob 4	44
4.5 Zglob 3	47
4.6 Zglob 2	50
4.7 Zglob 1	53
5. Linearno vođenje robotske ruke	56
5.1 Remenski prijenos	56
5.2 Kuglično vreteno	56
5.3 Linearni aktuatori	57
5.4 Zupčanički prijenos	57
6. Metoda konačnih elemenata.....	59

6.1 Heksaedarski konačni element	59
7. Topološka optimizacija	61
7.1 Optimizacija link-a 1	61
8. Konačan dizajn robotske ruke	67
9. ZAKLJUČAK	72
LITERATURA	73
PRILOZI.....	75

POPIS SLIKA

Slika 1. Leonardo Da Vinci-jev automatizirani vitez [1]	1
Slika 2. Scena iz predstave R.U.R. [2]	2
Slika 3. Unimate [4]	3
Slika 4. Unimate na Tonight Show-u [5]	4
Slika 5. Konfiguracijske strukture robotskih ruku [6].....	5
Slika 6. Kolaborativni robot (Cobot) [7].....	6
Slika 7. Snimanje scena iz Matrix-a (1) [8]	7
Slika 8. Snimanje scena iz Matrix-a (2) [9]	7
Slika 9. FIZ sustav [10].....	8
Slika 10. Robotska ruka Bolt [11].....	10
Slika 11. Bolt - doseg i krajnji položaji [11]	10
Slika 12. Robotska ruka MIA [12]	12
Slika 13. MIA - doseg i krajnji položaji [12]	12
Slika 14. Robotska ruka CRX 1810 [13].....	13
Slika 15. CRX 1810 - doseg i krajnji položaji [13].....	14
Slika 16. Robotska ruka Rocket Cinema Robot [14]	15
Slika 17. Rocket Cinema Robot - doseg i krajnji položaji [14]	15
Slika 18. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (1) [16]	21
Slika 19. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (2) [16]	21
Slika 20. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (3) [16]	21
Slika 21. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (4) [16]	21
Slika 22. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (5) [16]	22
Slika 23. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (6) [16]	22
Slika 24. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (7) [16]	22
Slika 25. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (8) [17]	22
Slika 26. Idealni prijenosnik bez zračnosti [18].....	23
Slika 27. Prijenosnik sa zračnošću [18]	23
Slika 28. Utjecaj pojedinih deformacija elemenata prijenosnika na kutni pomak [18]	24
Slika 29. Konstrukcija servo motora [19]	25
Slika 30. Dijagram petlji servo drive-a [20].....	25
Slika 31. Konstrukcija stepper motora [19]	26
Slika 32. Usporedba krivulje učinka s približno jednakim volumenom [22].....	28
Slika 33. Komponente harmonijskog prijenosnika [18].....	29
Slika 34. Karakteristika podatljivosti harmonijskog prijenosnika [18].....	29
Slika 35. Princip rada harmonijskog prijenosnika [18].....	30
Slika 36. Komponente cikloidnog prijenosnika [18]	31
Slika 37. Karakteristika podatljivosti cikloidnog prijenosnika [18]	31
Slika 38. Princip rada cikloidnog prijenosnika [18].....	32
Slika 39. Pojednostavljeni model robotske ruke	35
Slika 40. Pojednostavljeni model simulacije drugog zgloba.....	36
Slika 41. Položaj koordinate osi z motora 2	36
Slika 42. Masa link-a 1	36
Slika 43. Položaj koordinate z osi link-a 1	36
Slika 44. Masa link-a 2B	37
Slika 45. Položaj koordinate z osi link-a 2B	37
Slika 46. Masa link-a 2A.....	37
Slika 47. Položaj koordinate osi z link-a 2A	37
Slika 48. Masa link-a 3.....	37

Slika 49. Položaj koordinate osi z link-a 3	37
Slika 50. Masa kamere	37
Slika 51. Položaj koordinate osi z kamere	37
Slika 52. Moment u zglobu 2 za pojednostavljeni slučaj	38
Slika 53. Simbolični prikaz 5. i 6. zgloba	40
Slika 54. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMJV-A5A [23]	41
Slika 55. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosne omjere 30, 50 i 80 (1) [24]	41
Slika 56. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMJV-01A] [23]	41
Slika 57. Oznake krivulja stupnjeva djelovanja za pojedine brzine vrtnje [24].....	41
Slika 58. Dijagram izlaznih veličina zgloba 6.....	42
Slika 59. Dijagram izlaznih veličina zgloba 5.....	43
Slika 60. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMJV-02A [23]	45
Slika 61. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosne omjere 30, 50 i 80 (2) [24]	45
Slika 62. Dijagram izlaznih veličina zgloba 4.....	45
Slika 63. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMGV-13A [23]	47
Slika 64. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosni omjer 100 [24].....	47
Slika 65. Dijagram izlaznih veličina zgloba 3.....	48
Slika 66. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMGV-20A [23].....	51
Slika 67. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosne omjere 30,50 i 80 (3) [24].....	51
Slika 68. Dijagram izlaznih veličina zgloba 2.....	54
Slika 70. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosni omjer 100 [24].....	70
Slika 71. Dijagram izlaznih veličina zgloba 1.....	54
Slika 72. Vodilice robota s remenskim pogonom tvrtke Macron Dynamics [26].....	57
Slika 73. Vodilice s kugličnim vretenom tvrtke Newmark Systemn inc. [27].....	58
Slika 74. Linearni actuator [28].....	58
Slika 75. Sklop kotača i čeličnih tračnica [29].....	59
Slika 76. Linearni heksaedarski konačni element [31].....	61
Slika 77. Sile u zglobu 3.....	61
Slika 77. Sile u zglobu 3.....	63
Slika 78. Moment u zglobu 3.....	63
Slika 79. Opterećenje link-a 1 u Abaqus-u.....	64
Slika. 80 Mreža konačnih elemenata.....	64
Slika 81. Topološki optimirana geometrija u izometriji s raspodjelom naprežanja.....	65
Slika 82. Prikaz topološki optimirane geometrije u izometriji s raspodjelom pomaka.....	65
Slika 83. Prikaz topološki optimirane geometrije u zx ravnini.....	66
Slika 84. Prikaz topološki optimirane geometrije u xy ravnini.....	66
Slika 85. Robotska ruka u početnom položaju.....	68
Slika 86. Robotska ruka u horizontalnom položaju.....	69
Slika 87. Robotska ruka u vertikalnom položaju.....	70
Slika 88. Robotska ruka s prikazanim pogonima u zglobovima.....	71

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke karakteristike robotske ruke Bolt	11
Tablica 2. Tehničke karakteristike robotske ruke MIA.....	13
Tablica 3. Tehničke karakteristike robotske ruke CRX 1810	14
Tablica 4. Tehničke karakteristike robotske ruke Rocket Cinema Robot.....	16
Tablica 5. Usporedba strojne obrade i 3D printanja.....	19
Tablica 6. 3D Printeri	20
Tablica 7. Prednosti i nedostaci harmonijskog prijenosnika.....	30
Tablica 8. Prednosti i nedostaci cikloidnog prijenosnika.....	31
Tablica 9. Karakteristike konstruirane robotske ruke	71

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

DPL_RAD_01	Robotska ruka za pozicioniranje video kamere
DPL_RAD_01_01	Link 1

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
F_a	N	Aksijalna sila harmonijskog prijenosnika
F_{adop}	N	Dopušteno opterećenje servomotora u aksijalnom smjeru
i	-	Prijenosni omjer
m	kg	Masa
M_{analit}	Nm	Analitički izračunat moment u zglobu
M_{simul}	Nm	Moment u zglobu dobiven simulacijom gibanja
n	o/min	Brzina vrtnje
P	W	Snaga
R_e	N/mm^2	Granica tečenja
T	Nm	Moment u zglobu
z	mm	Koordinata težišta komponente robotske ruke
η	-	Stupanj djelovanja
μ	-	Faktor trenja harmonijskog prijenosnika
ω	rad/s	Kutna brzina

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je konstrukcija šesteroosne robotske ruke za pozicioniranje video kamere. U uvodnom dijelu rada ukratko je opisana povijest robota i robotskih ruku. Nakon uvoda, provedena je analiza tržišta robotskih ruku namijenjenih za snimanje kamerom, kako bi se dobile okvirne smjernice za razvoj ove robotske ruke. U nastavku su obrađene pojedine teme koje će imati utjecaj na razvoj robota, poput odabira vrste elektromotora, prijenosnika, ležajeva, materijala komponenti itd. Idući korak u radu je izrada početnog pojednostavljenog modela robotske ruke koji je poslužio za izradu dinamičkih simulacija gibanja napravljenih u programskom paketu ADAMS ®, a čiji rezultati su kasnije korišteni prilikom dimenzioniranja sustava. S dobivenim rezultatima simulacije, provedeni su proračuni snaga i momenata motora i prijenosnika. U završnom dijelu rada dan je kratki pregled izvedbi gibanja robota po linearnim vodilicama te je napravljena topološka optimizacija prvog link-a robotske ruke u programskom paketu Abaqus ®. Tehnička dokumentacija i 3D model robotske ruke su napravljeni u programskom paketu SolidWorks ®.

Ključne riječi: robotska ruka, servomotor, harmonijski prijenosnik, topološka optimizacija, simulacija dinamike

SUMMARY

The topic of this master's thesis is the construction of a six-axis robotic arm for positioning a video camera. In the introductory part of the thesis, a brief overview of the history of robots and robotic arms is provided. Following the introduction, a market analysis of robotic arms intended for camera recording was conducted to provide initial guidelines for the development of this robotic arm. Subsequently, various topics influencing the robot's development were addressed, such as the selection of motor type, transmission, bearings, component materials, etc. The next step in the work was the creation of an initial simplified model of the robotic arm, which served for the creation of dynamic motion simulations carried out in the ADAMS software package, the results of which were later used in system dimensioning. Based on the simulation results obtained, calculations of motor and transmission power and torque were performed. In the final part of the thesis, a brief overview of robot motion performances along linear guides was provided, and a topological optimization of the first link of the robotic arm was conducted using the Abaqus software package. Technical documentation and a 3D model of the robotic arm were created using the SolidWorks software package.

Key words: robotic arm, servomotor, harmonic drive, topology optimization, dynamic simulation

1. Uvod

"Stroj koji nalikuje živom biću u smislu nezavisnog gibanja i obavljanja kompleksnih radnji", ovo je definicija robota prema Merriam Webster-u najstarijem izdavaču rječnika u SAD-u. Iako se robot u smislu u kakvom ga danas poznajemo pojavljuje tek u 20. stoljeću, ljudi su stoljećima prije maštali i opisivali umjetna bića nalik ljudima. Još u starim legendama iz antike i Azije javljaju se ideje umjetnih sluga nalik čovjeku. Pravi primjer toga je priča iz Liezi-a, taoističkih tekstova nastalih u 4. stoljeću u Kini gdje se spominje majstor Yan Shi i njegov umjetni čovjek koji je napravljen kako bi impresionirao kralja Mu-a iz dinastije Zhou. Još jedan stariji primjer iz 4. stoljeća pr. Kr. dolazi iz Grčke gdje matematičar Arhita iz Terenta govori o umjetnom golubu pogonjenom na paru. U isto to vrijeme Aristotel je oko 322. godine pr. Kr u svojim političkim spisima govorio o mogućnosti da ropstvo postane suvišno u društvu ako bi sredstva rada bila u mogućnosti sama obavljati radnje na zapovijed čovjeka.

Nešto noviji primjer automatiziranog humanoida je djelo Leonarda da Vinci-a koji je oko 1495. godine napravio automatiziranog viteza.



Slika 1. Leonardo Da Vinci-jev automatizirani vitez [1]

Skice za ovog automatiziranog viteza su pronađene 1950. godine među njegovim crtežima. Leonardo je izložio humanoida na proslavi Ludovico-a Sforza na dvoru u Milanu 1495. godine. Vitez je mogao stajati, sjediti, podizati vizir i samostalno manevrirati svojim rukama te je imao anatomski ispravnu čeljust, a pokretao se pomoću mehanizma koji se sastojao od niza kolotura i užadi. Jasno je da je zbog nerazvijenosti tehnologije uloga ovakvih uređaja u prošlosti često bila u svrhu zabave a ne i praktičnost, što ipak zahtjeva puno veću razinu kompleksnosti i preciznosti. Iako su se s godinama stvarali mnogobrojni izumi, kao što je autonomni uređaj koji igra šah (samo završnicu s tri šahovske figure) kojeg je osmislio Leonardo Torres Quevedo godine 1912., naziv "robot" se koristi prvi puta tek 1921. godine u predstavi R.U.R (*Rossum's Universal Robots*) češkog pisca Karel Čapek-a. Predstava se ne usredotočuje detaljno na tehnologiju koja stoji iza nastanka ovih živih bića, ali ona svojim izgledom predočava suvremene ideje o robotima, bićima koja se mogu zamijeniti s ljudima. Ovi masovno proizvedeni radnici prikazani su kao učinkoviti, ali bez emocija, nesposobni za originalno

razmišljanje i ravnodušni prema samoodržanju. Pitanje je iskorištavaju li se roboti i kakve su posljedice ljudske ovisnosti o komodificiranom radu (osobito nakon što brojni posebno formulirani roboti postignu samosvijest i potaknu robote diljem svijeta da ustanu protiv ljudi). Iako je većina zadovoljna radom za ljude, na kraju pobuna uzrokuje izumiranje ljudske rase.



Slika 2. Scena iz predstave R.U.R. [2]

Usprkos tome što se ovaj naziv robot često povezuje s autorom ove predstave, Karel Čapek je priznao da je na ideju za ovaj izraz ipak došao njegov brat Josef Čapek. Podrijetlo ove riječi dolazi od češke riječi robota što znači rad.

Premda je riječ robot nastala 1921. godine, riječ robotika je prvi put korištena početkom 1940-ih, a osmislio ju je Isaac Asimov američki pisac i biokemičar. Isaac je osmislio i poznata tri zakona robotike čija je svrha bila učiniti čovjeka sigurnim u njegovoj interakciji s robotom. Zakoni su se prvi put pojavili 1942. u njegovoj kratkoj priči "Runaround" a nakon toga su postali iznimno utjecajni u znanstvenoj fantastici. Posljedično su zakoni postali i bitan dio budućih rasprava o tehnologiji, robotici i umjetnoj tehnologiji (AI). Zakoni su sljedeći [3]:

1. Robot ne smije naškoditi čovjeku ili svojom pasivnošću dopustiti da se čovjeku naškodi.
2. Robot mora slušati ljudske naredbe, osim kad su one u suprotnosti s prvim zakonom.
3. Robot treba štiti svoj integritet, osim kad je to u suprotnosti s prvim ili drugim zakonom.

1.1 Unimate

Iako nisu imale humanoidni oblik, strojevi s fleksibilnim pokretima i ponekim atributima sličnim ljudima su se počeli razvijati sredinom 20. stoljeća. Prvi programabilni industrijski robot je bio Unimate, elektronički upravljana i hidraulički pogonjena ruka koja je bila sposobna za uzastopno izvođenje proizvoljnih pokreta. Robot je izumio američki inženjer George Devol podnijevši patent (U.S. patent 2,988,237) 1954. godine, a razvila ga je tvrtka *Unimation Inc.* koju je osnovao, također američki inženjer, Joseph Engelberger 1956. godine.



Slika 3. Unimate [4]

Potaknut Asimov-ljevim trima zakonima robotike koji govore o sigurnosti ljudi, Engelberger se usredotočio na korištenje robota u sredinama koje su štetne za ljude. Sukladno tome, 1959. godine je po prvi put postavljen prototip *Unimate 001* na pokretnu traku u tvornici za tlačni lijev tvrtke General Motors u Trentonu, New Jersey. Već 1961., nakon što je *Condec Corp.* kupio *Unimation*, *Unimate 1900* serija postala je prva masovno proizvedena robotska ruka za automatizaciju u tvornicama. Zadatak robotske ruke je bilo uklanjanje i slaganje vrućih dijelova od tlačnog lijeva. Iste te godine, Engelberger je upoznao *Unimate 1900* sa širom javnosti preko *Tonigt Show*-a koji je vodio Johnny Carson. U prijenosu uživo iz studija NBC u New York-u, Engelberger je prikazao svijetu za što je sve sposoban ovaj robot, neki od trikova koje je izvodio su uključivali ubacivanje golf loptice u šalicu, točenje piva i dirigiranje bandom *Tonigt Show*-a.



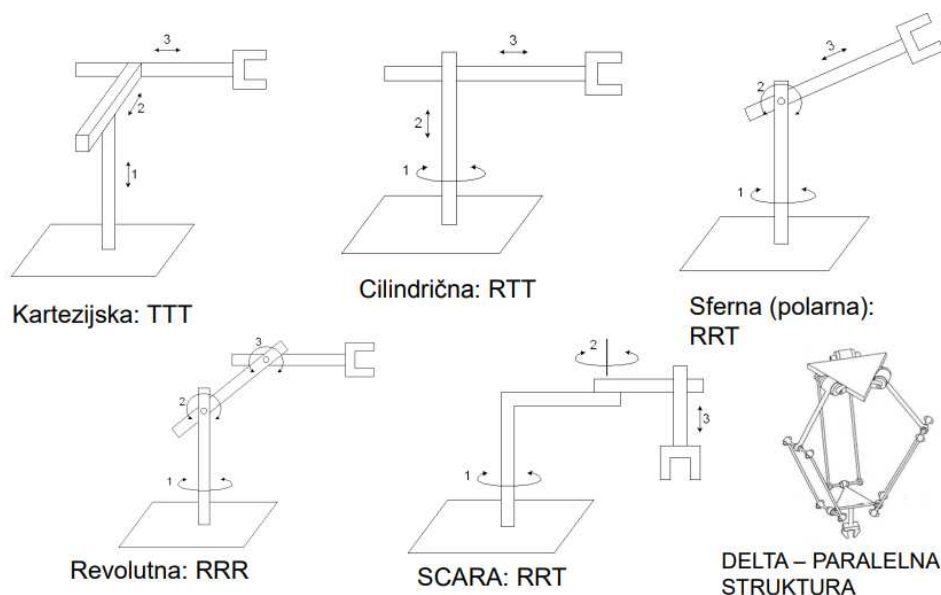
Slika 4. Unimate na Tonight Show-u [5]

U sljedećih nekoliko godina, Engelberger je proširio proizvodnju i na ostataka svijeta. U Europi je finskoj tvrtki *Nokia* dao dozvolu za proizvodnju *Unimate* robota u Skandinaviji i istočnoj Europi. Ubrzo nakon toga potpisan je i ugovor s *Kawasaki Heavy Industries*-om (danas *Kawasaki Robotics*) za proizvodnju i prodaju *Unimate* robota i u Aziji. S druge strane u SAD-u, *General Motors* je prestigao konkurenciju i postao najautomatiziranija tvornica automobila na svijetu. U ponovno izgrađenoj tvornici u Lordstown-u, ugradili su *Unimate* robote za točkasto zavarivanje i postizali su tada nevjerojatne rezultate jer su bili u mogućnosti obraditi 110 automobila po satu, što je više od dvostruko od tadašnjeg rekorda. Ipak, revolucija je brzo stigla i u Europu pa su tvrtke kao što su BMW, Volvo, Mercedes Benz i Fiat počele ugrađivati *Unimate* robote i u svoje tvornice za obavljanje ljudima teških poslova. Godine 2003. *Unimate* je primljen u *Robot Hall of Fame*.

1.2 Robotske ruke u moderno doba

Robotska ruka kakvu ju danas poznajemo je programabilan stroj koji se sastoji od više dijelova (linkova) koji su međusobno povezani zglobovima i na čijem kraju se nalazi *end effector*. Sve to zajedno omogućava robotu da oponaša gibanje ljudske ruke ali sa puno većom preciznošću, brzinom, efikasnošću i ponovljivošću. Danas su robotske ruke najprepoznatljiviji oblik robota a njihovo tržište bilježi ogroman porast. Industrije su prešle od pukog prihvatanja automatizacije do njezine potpune integracije u sve industrijske procese a jedan od glavnih razloga zašto su roboti nezamjenjivi u raznim sektorima industrije je upravo zahvaljujući njihovoj prilagodljivosti različitim zadacima u različitim okolinama. Industrije u kojima najčešće možemo susresti robote su: zrakoplovna industrija, automobilska industrija, prehrambena industrija, farmaceutska industrija, medicina i mnoge druge a najčešće se koriste u svrhu pakiranja, paletiziranja, zavarivanja, lakiranja, sastavljanja itd. Među najpoznatijim primjerima masovnog korištenja robota su Teslina gigatvornica, Amazonovi distribucijski centri/skladišta i BMW-ova tvornica u Spartanburgu, SAD. Trenutno postoji više različitih konfiguracijskih struktura robotskih ruku no ovdje ćemo nabrojati samo neke od postojećih vrsta. To su:

- Kartezijska struktura (TTT)
- Cilindrična struktura (RTT)
- Sferna struktura (RRT)
- Revolutna struktura (RRR)
- SCARA roboti (RRR – R(T))
- DELTA-paralelna struktura



Slika 5. Konfiguracijske strukture robotskih ruku [6]

Od samog početka razvoja *Unimate*-a, robotske ruke bile namijenjene za obavljanje teških poslova bez okruženja ljudi, no danas se ulažu veliki napor u razvoj cobota ili kolaborativnih robota. Kolaborativni robot je namijenjen za izravnu interakciju čovjeka i robota unutar zajedničkog prostora ili tamo gdje su ljudi i roboti u neposrednoj blizini. Primjena cobota je u suprotnosti s tradicionalnom primjenom industrijskih robota u kojima su roboti izolirani od

ljudskog kontakta. Sigurnost cobota najčešće se temelji na laganoj konstrukciji robota, zaobljenim rubovima, strogim ograničenjima brzine i sile i na senzorima koji osiguravaju sigurno ponašanje.



Slika 6. Kolaborativni robot (Cobot) [7]

IFR (*International Federation of Robotics*) definira 4 razine suradnje robota i čovjeka:

- Suživot: Čovjek i robot rade jedan pored drugog bez ograde, ali bez zajedničkog radnog prostora.
- Sekvencijalna suradnja: Čovjek i robot aktivni su u zajedničkom radnom prostoru, ali su njihovi pokreti sekvencijalni; ne rade na istoj komponenti u isto vrijeme.
- Suradnja: Robot i čovjek rade na istoj komponenti u isto vrijeme, a oboje su u pokretu.
- Aktivna suradnja: Robot u stvarnom vremenu reagira na kretanje čovjeka.

Ako pogledamo malo dalje, budućnost robotskih ruku zaista izgleda obećavajuće i uzbudljivo. Uparivanje strojnog učenja i umjetne inteligencije s robotima može služiti njihovom podučavanju u svrhu izvršavanja novih zadataka samostalno bez intervencije čovjeka što bi rezultiralo robotima koji su svestraniji ali i učinkovitiji od robota današnjice.

1.3 Roboti u kinematografiji

Kako u mnogim drugim industrijama tako i u kinematografiji, roboti postepeno preuzimaju ono što se tradicionalno smatra ljudskom vrlinom, a to je upravljanje i snimanje kamerom. I dalje je mozak operacije čovjek no snimanje posebno kreativnih reklama, video spotova i filmova nije bilo nikada lakše zahvaljujući robotima. Osim što skraćuju vrijeme snimanja kadrova zbog svoje iznimne ponovljivosti, robotska ruka omogućuje i snimanje kompliciranih kadrova koji bi prije bili fizički nemogući ili bi bili preskupi. Zanimljivi primjer komplicirane scene je iz filma *Matrix* gdje se u podzemnoj željeznici Neo bori protiv Mr. Smith-a. Ova kao i druge scene u filmu su bile revolucionarne u svoje vrijeme pa su sukladno tome i zahtijevale puno napora i znanja da se izvedu. Ova scena je snimljena pomoću 120 kamera koje su bile postavljene na stalke na način da čine zid u obliku kružnice.



Slika 7. Snimanje scena iz Matrix-a (1) [8]



Slika 8. Snimanje scena iz Matrix-a (2) [9]

Svaka kamera je imala točno određeno vrijeme paljenja, a položaj i kut kamere je bio određen pomoću lasera. Naknadno nakon snimanja, kako bi se postiglo glatko gibanje, kadar od svake pojedine kamere je morao biti spojen sa sljedećim kroz metodu zvanu "interpolacija" kako bi se stvorio novi međukadar. Sva ova skupa oprema, dugo vrijeme postavljanja i znanje koje je potrebno za napraviti ovakvo nešto složeno bi se danas u većoj ili manjoj mjeri moglo zamijeniti jednim robotom koji bi se mogao gibati po vodilicama ili tračnicama. S obzirom na povijest robotskih ruku, ovo je relativno nova primjena koja će u budućnosti zasigurno postati sve češća i pristupačnija.

1.3.1 Upravljanje pokretom (*Motion control*)

U modernoj filmskoj i televizijskoj produkciji tehnologija upravljanja pokretom koristi se za stvaranje dinamičnijih i vizualno zapanjujućih snimaka. Sustavi kontrole pokreta omogućuju operateru ili redatelju da precizno kontrolira pokrete i brzine kamere, stvarajući glatke i precizne snimke koje bi inače bilo teško ili nemoguće postići. *Motion control* sustav se sastoji od više komponenti a to su najčešće: kontroler, driver motora, motor i enkoder. Sustav funkcionira na način da kontroler kontrolira putanju i brzinu kretanja robota, šalje signal prema driver-u motora koji zatim pojačava taj isti signal i pokreće motor prema zadanim parametrima. Konačno, enkoder bilježe performanse i šalje povratnu informaciju kontroleru o promjeni u položaju ili brzini motora. Dodatno, u ovakvoj primjeni osim upravljanja robotom, potrebno je upravljati i *zoom*-om, fokusom i ekspozicijom same kamere. S obzirom da tijekom snimanja nije moguće direktno pristupiti kameri, moguće je koristiti FIZ sustav (*focus, iris and zoom*).



Slika 9. FIZ sustav [10]

FIZ sustav se sastoji od upravljačke jedinice koja se spaja na kameru i tri elektromotora od kojih svaki ima zupčanik koji se zatim može uzubiti sa zupčanicima koji se nalaze na objektivu kamere a upravljaju upravo *zoom*, fokus i ekspoziciju. Ovakav sustav će se i u ovom radu uzeti u obzir te će se sve promjene koje ono donosi u vidu težine i dinamičkog momenta tromosti kamere biti uzete u obzir prilikom izrade simulacija dinamike.

2. Analiza postojećih uređaja na tržištu

U ovom poglavlju provest će se analiza tržišta robotskih ruku namijenjenih za nošenje i manipuliranje kamerom u svrhu snimanja glazbenih spotova, reklama i filmova. Cilj pretrage tržišta je dobiti okvirne vrijednosti koje postižu postojeći uređaji na tržištu kako bi se dobile smjernice za razvoj ove robotske ruke. Za svaki proizvod navest će se najbitniji parametri kao što su:

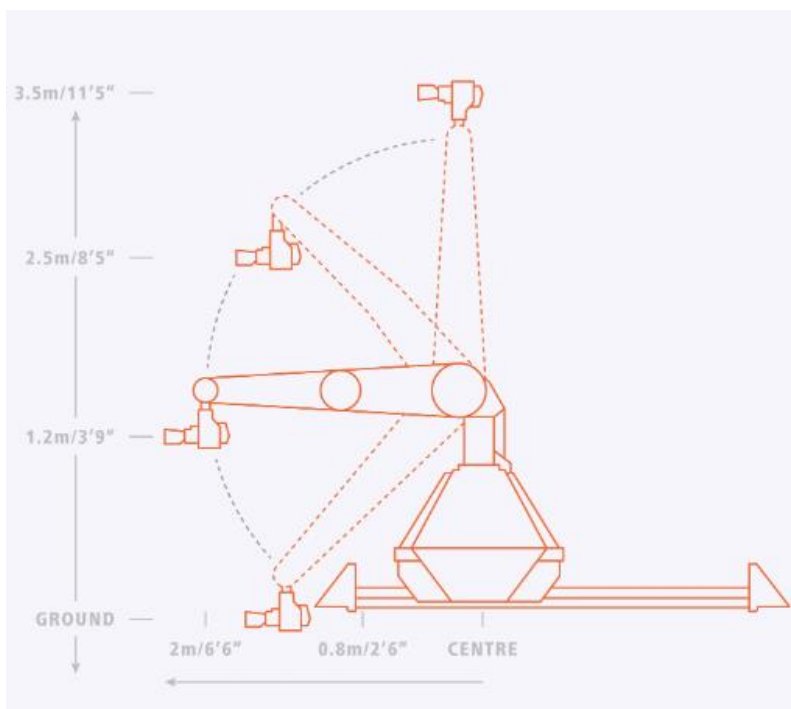
- Dohvat: najveća udaljenost *end effector*-a od centra baze robota
- Nosivost: najveća dopuštena masa *end effector*-a uz zadržavanje maksimalnih radnih karakteristika robota
- Maksimalna brzina kamere: maksimalna brzina koja se mjeri u težištu kamere a postignuta je kombinacijom gibanja zglobova
- Ukupna težina: ovdje se uzima u obzir masa samog robota zajedno s bazom
- Najviši i najniži položaj kamere: položaj težišta kamere koji se mjeri od razine poda
- Maksimalna brzina na stazi: maksimalna brzina koja se mjeri u težištu kamere a postignuta je kombinacijom gibanja zglobova i linearnim gibanjem po stazi (za *Bolt* je navedena brzina samo za linearno gibanje po stazi)
- Opseg pokreta: raspon pokreta zgloba koji je moguće izvesti od njegove minimalne do maksimalne vrijednosti
- Brzina rotacije: maksimalna brzina rotacije zgloba u zadanom opsegu pokreta

2.1 Bolt

Mark Roberts Motion Control (MRMC) razvija i proizvodi opremu za kontrolu pokreta za TV i filmsku industriju. Tvrtku, sa sjedištem u Sussexu u Ujedinjenom Kraljevstvu, osnovao je Mark Roberts 1966. godine, a 1999. je dobila oskara za doprinos industriji specijalnih efekata u igranim filmovima. Ovo je danas jedna od vodeći tvrtki za kontrolu pokreta (*Motion control*), automatizaciju i robotsko snimanje. Njihov šesteroosni robot *Bolt* daje dodatnu perspektivu snimanju filmova i reklama te je sposoban za izvođenje horizontalnih i vertikalnih pokreta brzinom od 2 m/s i rotaciji od 180°/s. U svrhu dodavanja dodatne dimenzije snimanju, robot je moguće postaviti na posebno konstruiranu stazu i postići brzine od 5 m/s. Dodatno uz robot *Bolt*, tvrtka ima na raspolaganju još 2 robota *Bolt X* i *Bolt Jr+*. U MRMC-u su također razvili i poseban softver za kontrolu pokreta imena *Flair* koji pruža iznimnu kontrolu nad kretanjem kamere te je u mogućnosti kontrolirati precizno do 500 osi kretanja.



Slika 10. Robotska ruka Bolt [11]



Slika 11. Bolt - doseg i krajnji položaji [11]

Tablica 1. Tehničke karakteristike robotske ruke Bolt

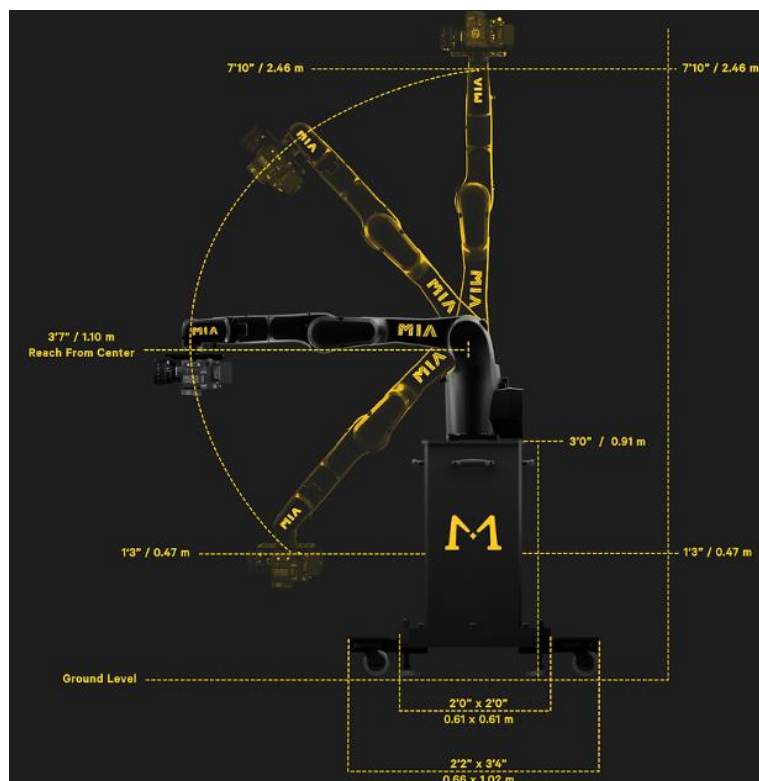
Bolt	
Dohvat	2 m
Nosivost	20 kg
Maksimalna brzina kamere	2 m/s
Ukupna težina	600 kg
Najviši položaj kamere	3,5 m
Najniži položaj kamere	0 m
Maksimalna brzina na stazi (samo za linearno gibanje)	5 m/s
1. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-160° / 240°/s
2. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-137° / 240°/s
3. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-150° / 300°/s
4. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-270° / 870°/s
5. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-120° / 350°/s
6. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-270° / 350°/s

2.2 MIA

Motorized Precision je američka tvrtka osnovana u Portland-u, Oregon, a specijalizirana je za razvoj i proizvodnju robota za specifične potrebe snimanja. Šesteroosni robot *MIA* je njihov najkompaktniji robot s dosegom od 1.1 m a idealan je za rad u užim prostorima i kada su transport i cijena prioritet. *Modular Track MK II* je njihovo rješenje za modularnu stazu koje služi za linearno vođenje robota. Ovo rješenje se razlikuje od bilo kojeg drugog na tržištu pa su sukladno tome osigurali patent US 11,493,834 B1 na temelju konstrukcije staze. Uz *MIA*-u, tvrtka ima još 4 robota: *Collosus*, *Kira*, *Vigo* i *Kino*. Kontrolu svojih robota ostvaruju pomoću vlastitog softvera MP Studio-a koji je karakterističan po svojoj jednostavnosti i intuitivnom dizajnu.



Slika 12. Robotska ruka MIA [12]



Slika 13. MIA - doseg i krajnji položaji [12]

Tablica 2. Tehničke karakteristike robotske ruke MIA

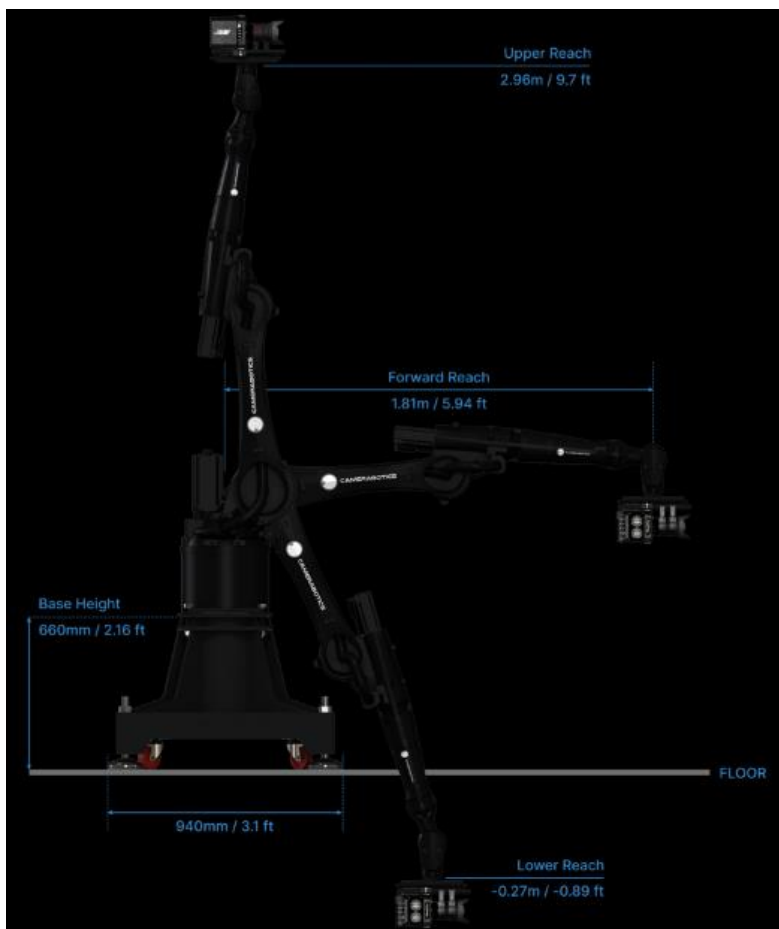
MIA	
Dohvat	1,1 m
Nosivost	10 kg
Maksimalna brzina kamere	3,2 m/s
Ukupna težina	423 kg
Najviši položaj kamere	2,46 m
Najniži položaj kamere	0,47 m
Maksimalna brzina na stazi (samo za linearno gibanje)	7,7 m/s
1. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-170° / 300°/s
2. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+45°/-190° / 225°/s
3. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+156°/-120° / 330°/s
4. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-185° / 360°/s
5. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-120° / 360°/s
6. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	∞° / 433°/s

2.3 CRX 1810

Camerabotics je još jedna tvrtka koja se bavi inovativnim rješenjima za potrebe snimanja i najtežih scena. Proizvod CRX1810 se sastoji od šesteroosne robotske ruke proizvođača KUKA, *Cybertech* KR20 R1810-2 uz koju dolazi i *Lensmaster*. *Lensmaster* je softver koji je posebno razvijen za robote u kinematografiji a odlikuje ga širok raspon naprednih značajki usmjerenih prema poboljšanju kontrole pokreta robota. Osim nosivosti od 20 kg i velikog raspona CRX1810 odlikuju ga i druge značajke prikazane u tablici.



Slika 14. Robotska ruka CRX 1810 [13]



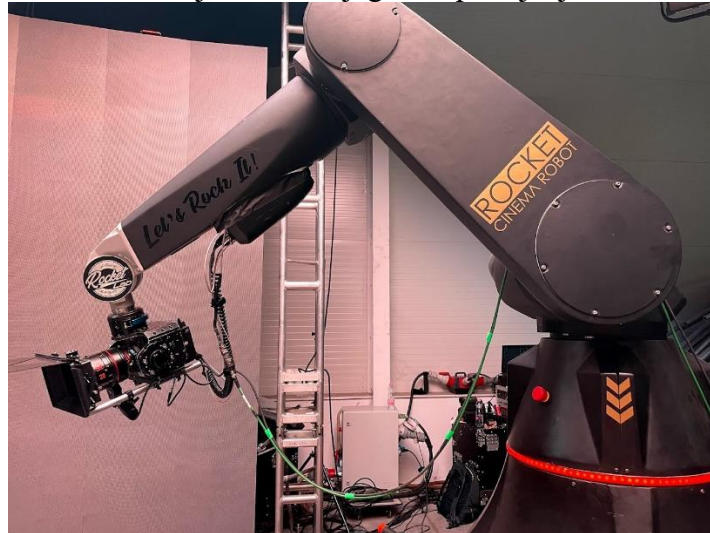
Slika 15. CRX 1810 - doseg i krajnji položaji [13]

Tablica 3. Tehničke karakteristike robotske ruke CRX 1810

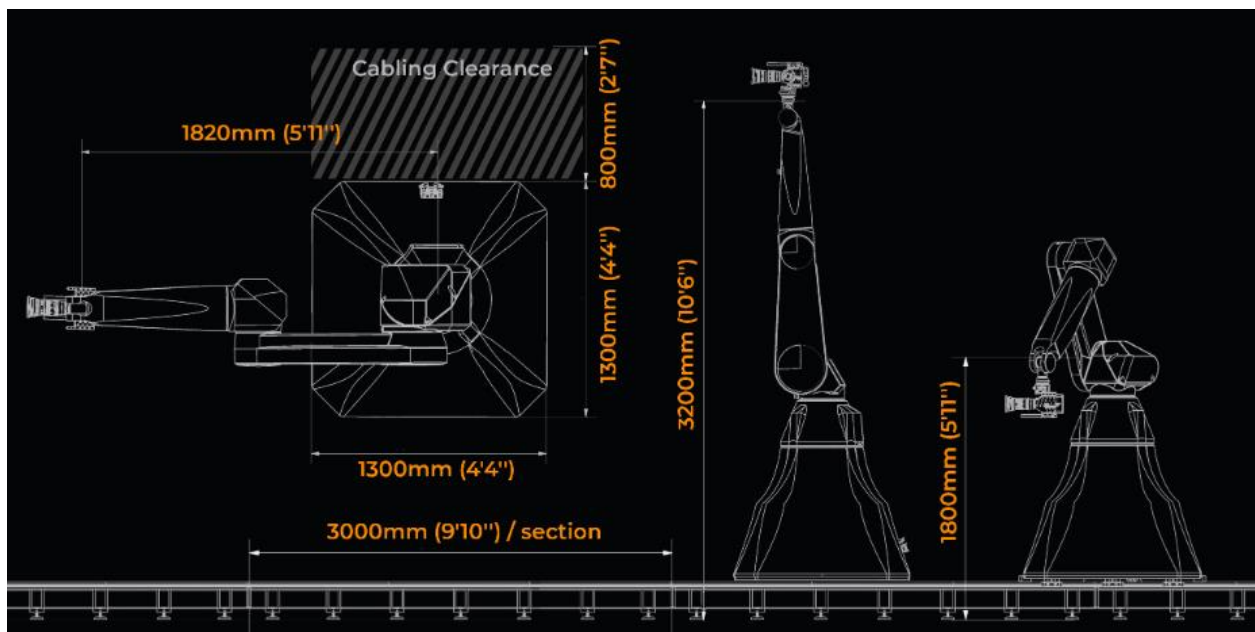
CRX 1810	
Dohvat	1,81 m
Nosivost	20 kg
Maksimalna brzina kamere	3,4 m/s
Ukupna težina	595 kg
Najviši položaj kamere	2,96 m
Najniži položaj kamere	-0,27 m
Maksimalna brzina na stazi (samo za linearno gibanje)	-
1. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+65°/-185° / 175°/s
2. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+45°/-190° / 210°/s
3. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+175°/-138° / 190°/s
4. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-350° / 430°/s
5. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-130° / 430°/s
6. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-350° / 630°/s

2.4 Rocket Cinema Robot

Rocket Lab je tvrtka koja se bavi projektima dizajniranja, stvaranja i korištenja vrhunske tehnologije u snimanju filmova. Njihovi proizvodi su *Rocket cinema robot*, *Rocket mini "stinger" cinebot* i njihov *Ignition* softver. Šesteroosnu robotsku ruku *Rocket cinema robot* odlikuje velika brzina rotacije zglobova, što je vidljivo iz tablice. Dodatno, robot je dostupan uz stazu koja dolazi u segmentima od 3 metra uz neograničenu ukupnu duljinu staze. Ovaj robot dolazi uz *Ignition* softver koji služi za njegovo upravljanje.



Slika 16. Robotska ruka Rocket Cinema Robot [14]



Slika 17. Rocket Cinema Robot - doseg i krajnji položaji [14]

Tablica 4. Tehničke karakteristike robotske ruke Rocket Cinema Robot

Rocket Cinema Robot	
Dohvat	3,2 m
Nosivost	14 kg
Maksimalna brzina kamere	-
Ukupna težina	800 kg
Najviši položaj kamere	3,2 m
Najniži položaj kamere	1,8 m
Maksimalna brzina na stazi (samo za linearno gibanje)	12,3 m/s
1. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-320° / 270°/s
2. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-275° / 270°/s
3. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-300° / 350°/s
4. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-540° / 500°/s
5. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-225° / 950°/s
6. zglob - opseg pokreta / brzina rotacije	+/-720° / 1200°/s

2.5 Osvrt na analizu tržišta

Prilikom analize tržišta navedena je jedna inačica od svakog proizvođača, no pregledom tržišta ustanovljeno je da tvrtke koje proizvode robotske ruke za upravljanje kamerom, imaju više varijanti rješenja različitog cjenovnog razreda koji sežu od kompaktnih robota za brzo postavljanje i lagani prijevoz do velikih robota s najboljim radnim karakteristikama. Razlika u robotskim rukama je u doseg, opteretivosti, brzini, težini itd. Ovdje naravno vrijedi da roboti koji imaju veći doseg, brzinu i opteretivost imaju i veću cijenu. Zanimljivo je da iako firme imaju robotske ruke različitih cjenovnih rangova, razlika u cijeni se ne postiže smanjivanjem stupnjeva slobode gibanja. Razlog tome je vjerojatno što je jedan od glavnih zahtjeva ovakvog proizvoda upravo fleksibilnost koja se dobije velikim brojem stupnjeva slobode gibanja (SSG). Nažalost, proizvođači ne daju detaljnije informacije o samoj konstrukciji robota pa je potrebno u nastavku, prilikom odabira, detaljnije opisati i usporediti neke od glavnih komponenti robotskog sustava. Kao što je već spomenuto u uvodnom poglavlju ovog rada, svaka navedena robotska ruka podržava FIZ sustav pa će se takvo rješenje zadržati i ovdje. Analizom tržišta nije pronađen primjer robotske ruke ovih razmjera koja je topološki optimirana i izrađena 3D printanjem, što znači da ovaj rad može sigurno poslužiti kao ideja za buduća rješenja ovakvih sustava.

3. Konstrukcijska razmatranja

Roboti u raznim oblicima su sve više zastupljeni u sve većem broju industrija pa se tako i sve češće koriste u komercijalne svrhe. Ovdje ćemo govoriti o robotskoj ruci koja služi za nošenje i manipuliranje kamerom. Prednosti ovakvog načina upravljanja kamerom je velika fleksibilnost pokreta koji inače ne bi bili izvedivi nekim manjim uređajima koji već postoje na tržištu (*Steadicam, Dolly Cam, slider, crane*, itd.). Postoji još i niz prednosti koje se javljaju a karakteristične su za robotizirane naprave: mirnoća hoda, brzina, ponovljivost, preciznost, sigurnost, itd. S obzirom na funkciju uređaja navest ćemo neke od zahtjeva:

- fleksibilnost pokreta
- brzina
- mirnoća hoda
- doseg
- preciznost
- relativno mala nosivost (teret je težina kamere)

3.1 Mogućnosti gibanja u ovisnosti o stupnjevima slobode gibanja

Prilikom konstruiranja robotske ruke potrebno je razjasniti koliki broj stupnjeva slobode gibanja (SSG) i koliki broj funkcija je uopće potreban da bi se ispunili svi zadani zahtjevi na robotsku ruku. Iz samog teksta zadatka je jasno da će se ovdje raditi o 6 stupnjeva slobode gibanja, ipak korisno je pokazati na koji način odabir konfiguracije i broj SSG-a utječu na funkcionalnost samog robota.

Već na samom početku nam je jasno da robotska ruka za ovakvu primjenu mora imati barem 3 stupnja slobode gibanja. 3 SSG su nam potrebna kako bi uopće mogli pozicionirati *end effector* (kameru) u bilo koju točku prostora unutar dosega ruke. Nadalje, potrebno je odabrati konfiguracijsku strukturu otvorenog kinematskog lanca koja se dobije kombinacijom osnovnih zglobova R (rotacija) i T (translacija). Navest će se prednosti i nedostaci nekoliko odgovarajućih konfiguracija i odabrat će se najbolja [6].

CILINDRIČNA STRUKTURA (RTT)

Prednosti:

- jednostavan kinematski model
- jednostavna vizualizacija
- pogodna kod hidrauličkog pogona – kod velikih snaga

Nedostaci:

- ograničen radni prstor
- teško brtvljenje kod povećanog zagađenja atmosfere
- preklapanje radnog prostora

SFERNA STRUKTURA (RRT)

Prednosti:

- pokriva veliki volume iz centralnog potpornja
- mogućnost dohvaćanja objekta ispod razine poda

Nedostaci:

- kompleksan kinematski model
- teškoće u vizualizaciji

- smanjen vertikalni doseg

REVOLUTNA STRUKTURA (RRR)

Prednosti:

- maksimalna fleksibilnost
- pokriva veliki volumen prema volumenu robota
- lagano brtvljenje zglobova
- pogodno za spajanje na electromotor
- mogućnost dohvata ispod razine poda.

Nedostaci:

- kompleksna kinematika
- teškoće kod vizualizacije
- otežana kontrola linearnog pomaka
- pad krutosti na velikim krakovima.

Usporedbom prednosti i nedostataka navedenih konfiguracijskih struktura, primjećujemo da bi odlučujući faktor mogla biti razina fleksibilnosti pojedine konfiguracije s obzirom da je to jedan od glavnih zahtjeva. Uzimajući u obzir omjer radnog i kolizijskog prostora kao najbolja konfiguracijska struktura se uzima revolutna struktura RRR. Možemo vidjeti da je po tom kriteriju cilindrična struktura najgora, dok je kod sferne strukture veliki problem smanjeni vertikalni doseg (veliki vertikalni doseg podrazumijeva još veći radijalni doseg – velike dimenzije).

Pad krutosti kod revolutne strukture će se probati riješiti topološkim optimiranjem komponenti robotske ruke na način da se uz primjenu odgovarajućeg materijala i oblika postigne što veća krutost uz što manju masu.

U svrhu potpunog ispunjavanja potencijala robotske ruke u obzir će se uzimati samo rotacijski zglobovi a ne i translacijski. Dodavanjem dodatnog rotacijskog zgloba dobivamo 4 SSG gdje zadnji zglob omogućava promjenu orijentacije *end effectora* oko jedne od tri osi. Ako dodamo još jedan rotacijski zglob, imamo 5 SSG i dobivamo mogućnost promjene orijentacije oko još jedne osi. Postavljanjem i zadnjeg 6. rotacijskog zgloba dobivamo 6 SSG i mogućnost promjene orijentacije *end effectora* i oko zadnje osi. Sa šest stupnjeva slobode gibanja omogućeno nam je pozicioniranje kamere bilo gdje u prostoru unutar dosega robotske ruke ali i promjena orijentacije oko sve tri osi. Drugim riječima robotska ruka može postići potpuno pozicioniranje unutar 360° oko svoje glavne centralne osi. Valja napomenuti da se s povećanjem broja stupnjeva slobode gibanja od 3 do 6 povećavaju mogućnosti ali i cijena izrade.

Ako se želi postići maksimalan potencijal kako bi se omogućilo snimanje i najtežih snimaka, logičan izbor je izabrati **6 stupnjeva slobode gibanja**. Povećavanjem SSG iznad 6 ne povećavaju se manipulacijske mogućnosti robotske ruke ali se povećava složenost konstrukcije i otežava kontroliranje i programiranje.

Iako dodavanje dodatnih SSG ima brojne nedostatke, dodavanjem 7. SSG može biti korisno ako se izvede na način da se robotska ruka postavi na tračnice kako bi se dobilo translacijsko gibanje cijele ruke u prostoru i na taj način drastično povećao radni prostor.

3.2 Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja ili 3D printanje je sve brže rastuća tehnologija koja najveću primjenu nalazi u avioindustriji, ali i sve više u autoindustriji i medicini. Svoju rastuću popularnost može zahvaliti brojnim prednostima koje ima u odnosu na tradicionalne metode izrade dijelova. Možda najočitija prednost tehnologije aditivne proizvodnje je mogućnost izrade kompleksne geometrije koja otvara vrata slobodnijem korištenju topološke optimizacije prilikom konstruiranja proizvoda. Upravo je to razlog zašto bi se prilikom konstrukcije ove robotske ruke koristile 3D printane komponente. Kao što je već spomenuto ranije u tekstu, zbog velikih krakova i pada krutosti, ideja je topološkim optimiranjem dobiti povaljan oblik komponenti za zadano opterećenje i korištenjem organske ili rešetkaste strukture izbjeci korištenje debelih stijenki i punih presjeka i time smanjiti masu.

Prema ISO/ASTM 52900 normi aditivna proizvodnja je podijeljena u 7 grupa:

- **Binder Jetting**
- **Direct Energy Deposition (DED)**
- **Material Extrusion**
- **Material Jetting**
- **Powder Bed Fusion (PBF)**
- **Sheet Lamination**
- **VAT Polymerization**

Svaka tehnologija ima svoju primjenu i materijale koje je moguće koristiti, no s obzirom na funkciju robotske ruke ovdje će se razmatrati samo tehnologije 3D printanja metala. Od navedenih grupa, najveću primjenu u 3D printanju metala ima *Powder Bed Fusion*, a najraširenije tehnologije su DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) i SLM (*Selective Laser Melting*). Kako bismo bili sigurni da je za ovaj zadatak aditivna proizvodnja ispravan korak, moramo usporediti prednosti i mane 3D printanja u odnosu na strojnu obradu (preciznije CNC obradu).

Tablica 5. Usporedba strojne obrade i 3D printanja

3D Printanje	
Prednosti	Nedostaci
Proizvodnja po narudžbi	Manjak izbora materijala
Proizvodnja kompleksne geometrije	Mala brzina izrade jednog dijela
Niski početni troškovi	Mala brzina izrade preko cca. 100 komada
Prilagodljivi dizajn	Manja točnost izrade
Brza izrada prototipova	Lošija ponovljivost
Jednostavno korištenje	Manja sveukupna kvaliteta proizvoda
Minimalni otpadni materijal	Manji gabariti dijelova
Brzina izrade serije do cca. 50-100 komada	Manja čvrstoća (pogotovo zamorna čvrstoća
Mogućnost izrade više različitih dijelova odjednom	Potreban post-processing

Usporedbom prednosti i mana aditivne proizvodnje dolazimo do zaključka da bi korištenje 3D printanih komponenti zaista moglo pomoći u razvoju proizvoda kao što je robotska ruka. Argument koji je presudio u korist aditivne proizvodnje je mogućnost izrade dijelova kompleksne geometrije. Uzimajući u obzir pretpostavku da se ovakvi proizvodi za ovakvu namjenu ne proizvode u velikim serijama to nam sve više 3D printanje izgleda kao ekonomičnije rješenje. No ipak, zbog velikog broja mana od kojih se dobar dio odnosi na mehanička svojstva i kvalitetu izrade jasno nam je da će nam biti potrebno više od jedne

proizvodne tehnologije. Strojna obrada će nam koristiti za dobivanje potrebnih tolerancija ključnih dimenzija i za odstranjivanje potpornih struktura. Pod post-processing spadaju i toplinske obrade koje će vrlo vjerojatno biti potrebne zbog zaostalih naprezanja koja nastaju uslijed same prirode ove tehnologije a to je zagrijavanje materijala na temperaturu tališta kako bi se slojevi mogli lijepiti.

Kao što je već navedeno, zanima nas samo 3D printanje metala, a kao moguće tehnologije ćemo razmotriti DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) i SLM (*Selective Laser Melting*). DMLS i SLM počivaju na sličnoj tehnologiji (*Powder Bed Fusion*) i imaju slične sposobnosti u pogledu izrade dijelova pa u ovom trenutku nećemo izabrati jednu od tehnologija i na taj način se ograničiti.

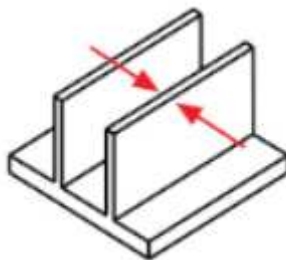
Bitan ograničavajući faktor kod ovih metoda 3D printanja je skroman izbor materijala u odnosu na strojnu obradu. Velika većina danas korištenih legura ne mogu se koristiti na ovaj način jer taljenje i dinamika skrućivanja tijekom procesa 3D printanja dovode do nepovoljne mikrostrukture s krupnim zrnima i periodičkim pukotinama [15]. No ipak, danas postoje neke legure koje su u širokoj primjeni, a jedne od najbitnijih korištenih legura su AlSi10Mg, TiAl6V4, CoCr, Inconel 718, Stainless Steel 316 itd. Od navedenih materijala aluminij ima najmanju gustoću tj. najmanju specifičnu težinu pa bi iz tog razloga legura **AlSi10Mg** bila dobar izbor za materijal 3D printanih komponenti, a uz to ima i nisko talište. Nizak modul elastičnosti (krutost) bi se nadomjestio oblikom komponenti. Još jedan ograničavajući faktor je volumen dijelova koji se mogu izraditi aditivnom proizvodnjom. Pregledom tržišta, možemo pronaći robotske ruke koje u ispruženom stanju dostižu i preko 3 metra visine što bi značilo da u ovom slučaju 3D printani dijelovi mogu biti jako veliki (i preko pola metra). Kako bismo bili sigurni kolike dimenzije dijelova se uopće mogu printati, u nastavku su navedeni neki od najvećih 3D printera na tržištu.

Tablica 6. 3D Printeri

3 D Printer	Radni volumen
Concept Laser Machines X line 2000R (DMLS)	800x400x500 mm ³
The NXG XII 600 (SLM)	600x600x600 mm ³
SLM 800 (SLM)	500x280x850 mm ³
EOS M 400	400x400x400 mm ³
EP-M650 Metal3D Printer (PBF)	655x655x800 mm ³
HBD E500 (SLM)	430x520x520 mm ³

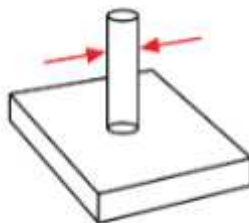
Prilikom konstruiranja metalnih dijelova za 3D printanje postoji niz preporuka za dizajn koje će, ako ih se bude slijedilo, pomoći u postizanju bolje kvalitete dijela, površinske hrapavosti i točnosti dimenzija. Neke studije pokazuju da mehanička svojstva ovise o samom 3D printeru (laserskom sustavu), no smjernice izlistane u nastavku vrijede u općem slučaju te ih je korisno primijeniti.

1. Izbjegavati jako tanke stijenke (do $\approx 0,4$ mm)



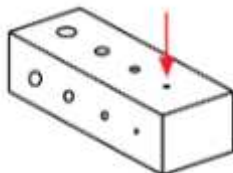
Slika 18. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (1) [16]

2. Minimalan promjer valjka $\approx 0,1$ mm



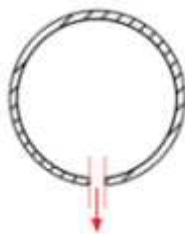
Slika 19. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (2) [16]

3. Rupe veće od $\approx 0,5$ mm kako ne bi izgubile koncentričnost



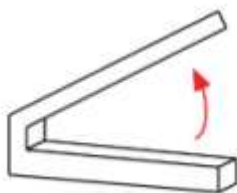
Slika 20. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (3) [16]

4. Korištenje rupa za odstranjivanje neotopljenog praha kod šupljih elemenata



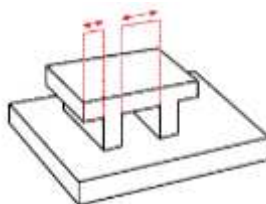
Slika 21. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (4) [16]

5. Izbjegavati prepuste koji su pod kutem manjim od 45° u odnosu na horizontalnu ravninu



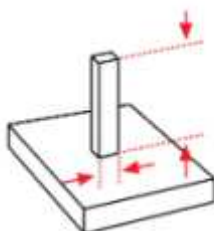
Slika 22. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (5) [16]

6. Izbjegavati horizontalne konzolne površine



Slika 23. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (6) [16]

7. Maksimalan omjer između visine i duljine ili širine je 8:1



Slika 24. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (7) [16]

8. Kvadratne rupe ojačavati lukovima

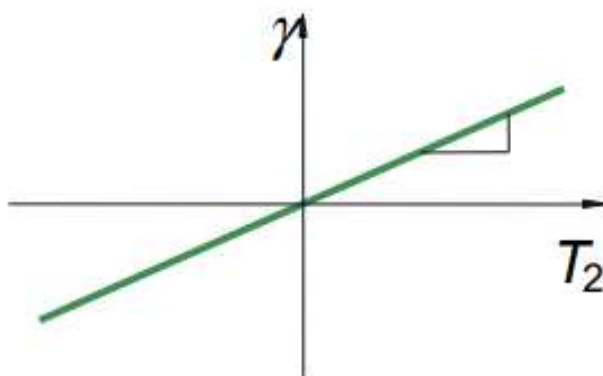


Slika 25. Smjernica za oblikovanje 3D printanih dijelova (8) [17]

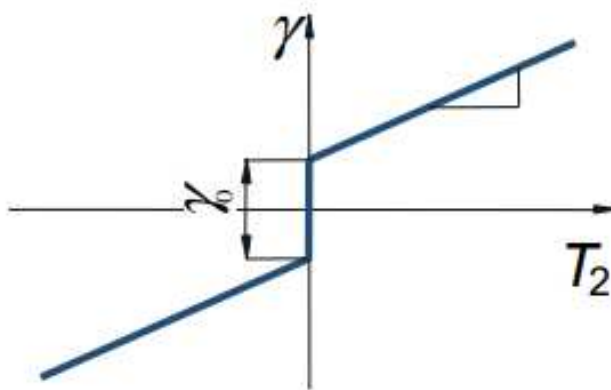
3.3 Sustavi za pogon i pozicioniranje

Sustavi za pogon i pozicioniranje igraju bitnu ulogu u projektiranju robotskih sustava jer pravilan odabir pogonskih elemenata direktno utječe na uspješnost konstrukcije. Stepper motori i servo motori bitan su dio današnjih mehatroničkih sustava te nam je cilj u ovom poglavlju navesti prednosti i mane jednih i drugih i na temelju te analize odabrati optimalno rješenje.

Elektromotori imaju karakteristiku relativno velikog iznosa izlazne brzine vrtnje i malog iznosa okretnog momenta. Zbog toga što nam je kompaktnost pogona bitna, manji elektromotor će imati još veći omjer brzine vrtnje i okretnog momenta pa nam je jasno da će nam biti potrebna neka vrsta prijenosnika. Jedan od najbitnijih zahtjeva, iako postoje i drugi bitni, nam je mirnoća hoda robotske ruke odnosno velika krutost mehanizma, što je jasan znak da nam treba prijenosnik sa malom zračnošću ili potpuno bez zračnosti. U nastavku su prikazani dijagrami ovisnosti kutne deformacije o opterećenju.



Slika 26. Idealni prijenosnik bez zračnosti [18]



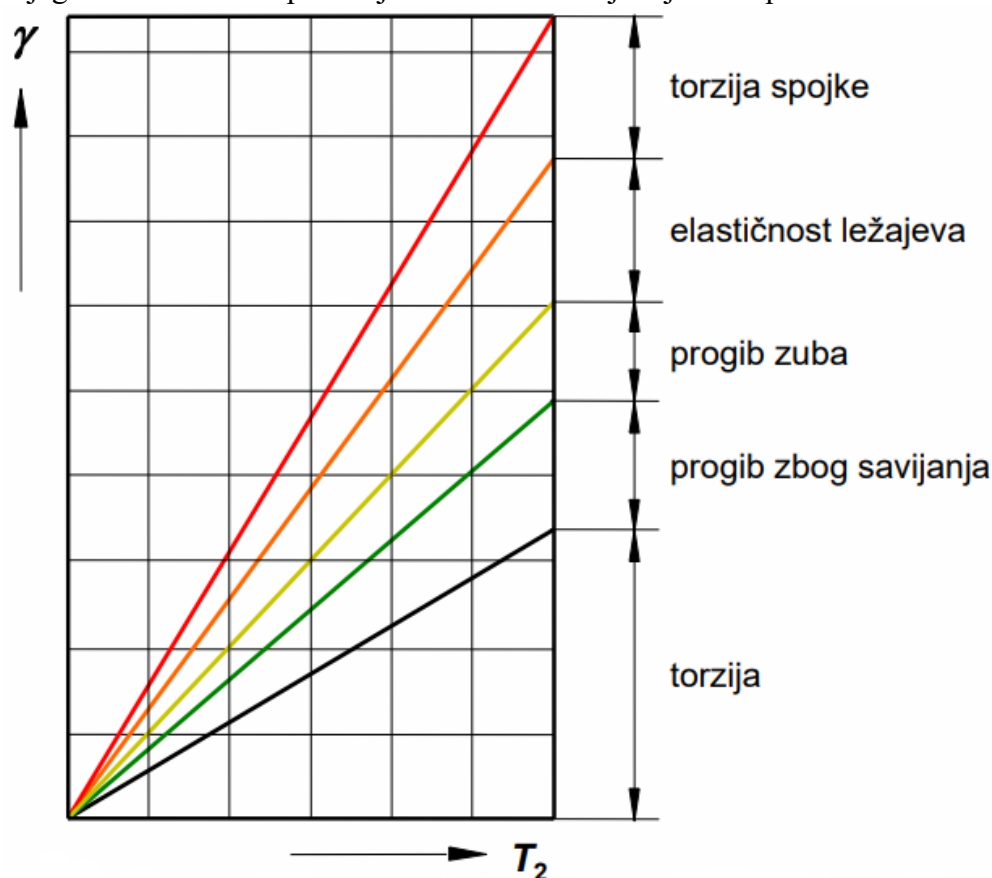
Slika 27. Prijenosnik sa zračnošću [18]

Na ukupnu zračnost osim samog prijenosničkog para bitno utječu:

- ležajevi
- elastične deformacije elemenata prijenosnika
- veze vratila i glavina
- zamašne mase itd.

Na ove utjecaje će se detaljnije obratiti pozornost prilikom konstrukcijske razrade.

Sljedeći dijagram kvalitativno pokazuje kako deformacije utječu na pomake konstrukcije.

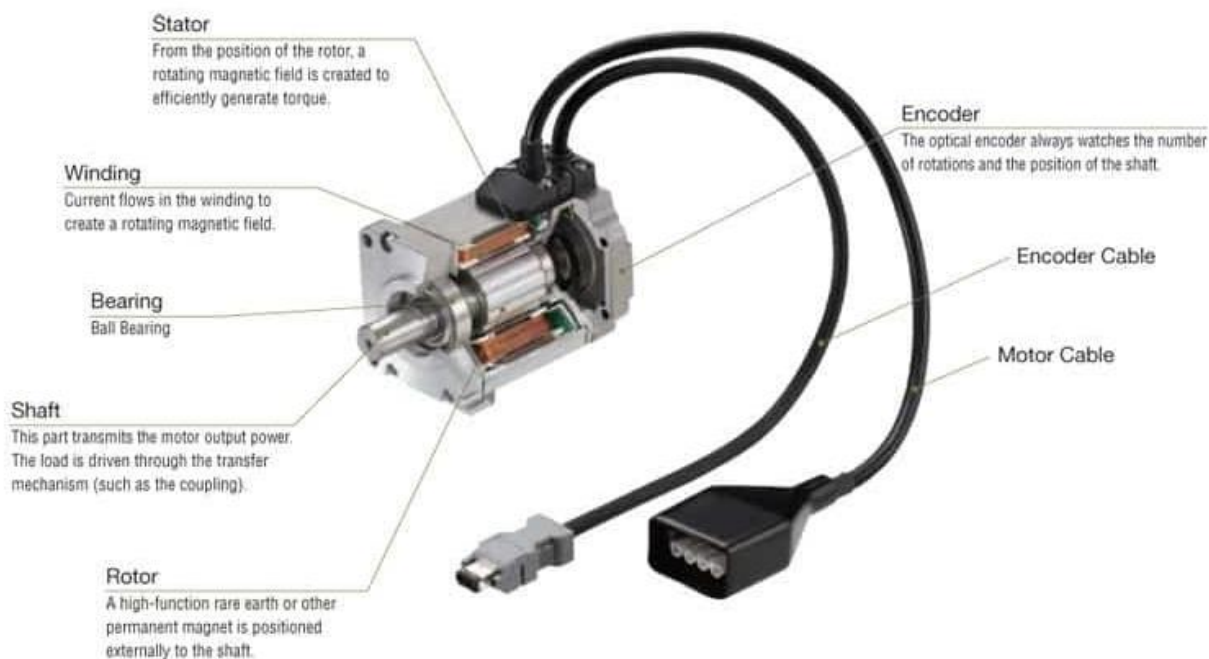


Slika 28. Utjecaj pojedinih deformacija elemenata prijenosnika na kutni pomak [18]

Kod većine industrijskih robota koriste se dva relativno nekonvencionalna prijenosnika gibanja koji nisu česti u drugi industrijama, a to su *Harmonic Drive* i *Cyclo Drive*. Ove dvije vrste prijenosnika ćemo detaljnije razmotriti pa ćemo navesti njihove prednosti i nedostatke.

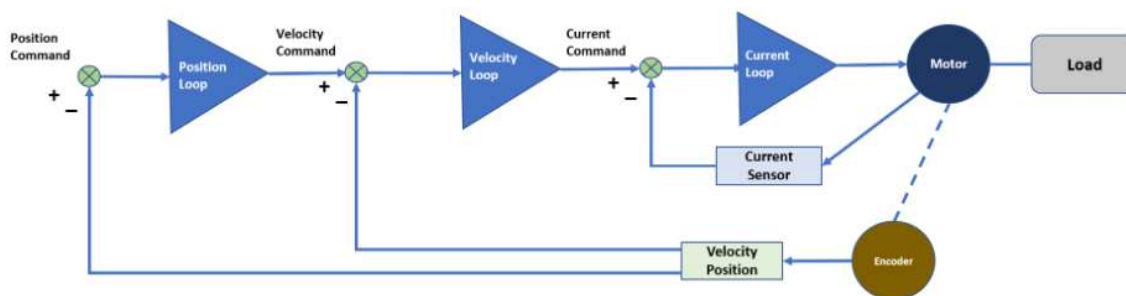
3.3.1 Servo motori

Servo motor je elektromehanički uređaj koji na temelju jačine ulazne struje i napona daje izlazni okretni moment i brzinu. Ovi motori su sposobni za preciznu kontrolu momenta, brzine i ubrzanja a sve zahvaljujući povezanosti s upravljačkim sustavom pomoću zatvorene petlje. Uz motor je vezan i uređaj (npr. potencijometar, rezolver, encoder itd.) koji daje povratnu informaciju servo kontroleru o izlaznim parametrima motora koji zatim podešava te parametre ovisno o željama operatera. Dvije najčešće vrste servo motora su AC i DC servo motori. AC servomotori mogu podnijeti veće strujne udare pa se češće koriste u većim industrijskim uređajima dok su DC servo motori prikladniji za manje teške primjene. Dodatno, kod ove vrste motora, izlazna brzina je određena frekvencijom napona i brojem magnetnih polova. Servo motori se najčešće primjenjuju u robotici, automatskim sustavima, vozilima CNC strojevima itd.



Slika 29. Konstrukcija servo motora [19]

Na prethodnoj slici prikazana je konstrukcija servo motora. Motor se sastoji od statorskog namota koji je namotan na nepomični dio motora i rotorskog ili armaturnog namota koji je namotan na rotirajući dio motora. Kao i kod ostalih motora tu je još i osovina koja je oslonjena na dva ležaja koji joj omogućavaju rotaciju. Uz to, uz motor dolazi i enkoder koji sadrži senzor za određivanje brzine motora. U naprednijim servo sustavima, ugrađene su višestruke petlje podešene za optimalnu izvedbu kako bi se osigurala precizna kontrola kretanja. Sustav se sastoji od petlji struje, brzine i položaja koje koriste precizne elemente povratne sprege. Svaka petlja signalizira sljedećoj petlji i nadzire odgovarajuće povratne elemente kako bi se izvršile korekcije u stvarnom vremenu koje odgovaraju zadanim parametrima. Na sljedećoj slici su prikazane navedene petlje.



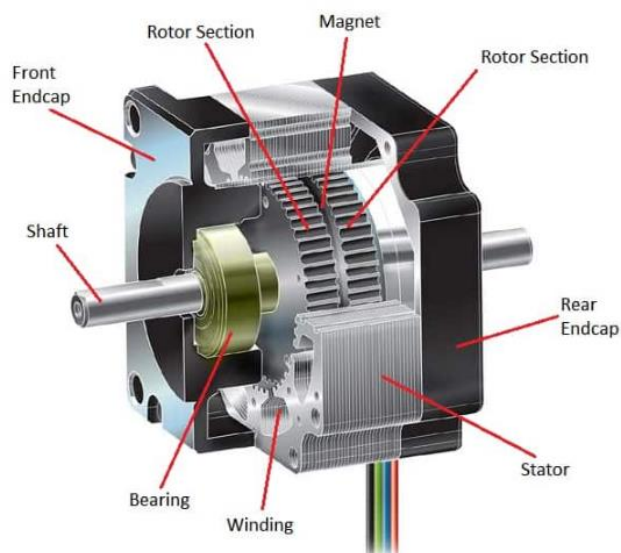
Slika 30. Dijagram petlji servo drive-a [20]

3.3.2 Stepper motori

Stepper ili koračni motor je dvofazni istosmjerni električni motor bez četica koji se kreće pod preciznim kutovima (najčešće $1,8^\circ$) ili koracima na način da pretvara niz električnih impulsa u rotacijsko gibanje. Koračni motori se sastoje od dva namota (2 faze) napajanih istosmjernom strujom. Kada se struja u jednom namotu obrne, osovina motora se pomiče za jedan korak. Izmjenjivanjem struje u svakom namotu, položaj i brzina motora se lako i precizno kontroliraju, što koračni motor čini iznimno korisnim za mnoge različite primjene kontrole gibanja. Ovi

motori neće proizvoditi kontinuirano gibanje iz kontinuiranog ulaznog napona no ako se električni impulsi izvode u određenom specifičnom slijedu motor će se vrtjeti kontinuirano. Koračni motor proizvodi izlazni moment uslijed međudjelovanja magnetskog polja u rotoru i statoru. Jačina magnetskog polja proporcionalna je količini struje koja se primjenjuje na namote kao i količini zavoja u namotima.

Postoje tri vrste ovih motora: hibridni motori, motori s permanentnim magnetom i motori s promjenjivom otpornošću. Ovakvi motori se koriste u velikom broju primjena kao što su: 3D printeri, CNC strojevi, medicinska oprema, robotika itd.



Slika 31. Konstrukcija stepper motora [19]

Na prethodnoj slici prikazana je konstrukcija stepper motora.

Stepper motor sastoji se od trajnog magneta u koji se nalazi između dvije polovice rotora (uzrokujući aksijalni polaritet), smještenog u kućište statora gdje statorske zavojnice čine različite faze motora. Rotor je spojen na osovinu motora, koja daje izlaznu rotaciju i okretni moment motora kada se na namote motora primijene impulsi napona i struje. Ležajevi s obje strane rotora su postavljeni u svoje predviđene prostore na prednjem i stražnjem poklopcu, što omogućuje koncentričnost rotora unutar statora.

Stepper driver-i su dostupni u širokom rasponu napona i struja. Učinkovitost motora uvelike ovisi o struji i naponu koje daje pogon. Izrazi puni korak, polu-korak i "mikrokorak" obično se koriste kada se priča o koračnim motorima. Koračni motor koji ima korak od $1,8^\circ$ ima 200 diskretnih položaja u punom okretaju od 360° . Budući da 360° podijeljeno s 200 iznosi $1,8^\circ$, osovina motora će se zakrenuti za $1,8^\circ$ svaki put kada se motoru naredi jedan korak - poznat kao puni korak. Izraz "pola koraka" označava kut koraka od $0,9^\circ$ (polovica punog koraka od $1,8^\circ$) koji se postiže tehnikom prebacivanja koja naizmjenično primjenjuje pozitivnu struju, nikakvu struju i negativnu struju na svaki namot uzastopce. Postoji još i "mikrokorak" koji je nešto složeniji te se ovdje neće razmatrati.

3.3.3 Usporedba servo motora i stepper motora

Za pravilnu evaluaciju prednosti i mana, a time i ispravan odabir motora potrebno je jasno odrediti zahtjeve koji se traže od pogona. U nastavku slijedi usporedba stepper i servo motora.

CIJENA

Općenito gledano, stepper motori mogu biti poprilično jeftiniji od servo motora otprilike iste nazivne snage. Glavni razlog za to je što servo motori moraju imati uređaj koji služi za slanje povratnih informacija odnosno encoder. Posljedično, stepper motori imaju puno manje kablova i lakšu integraciju u uređaj.

JEDNOSTAVNOST KORIŠTENJA

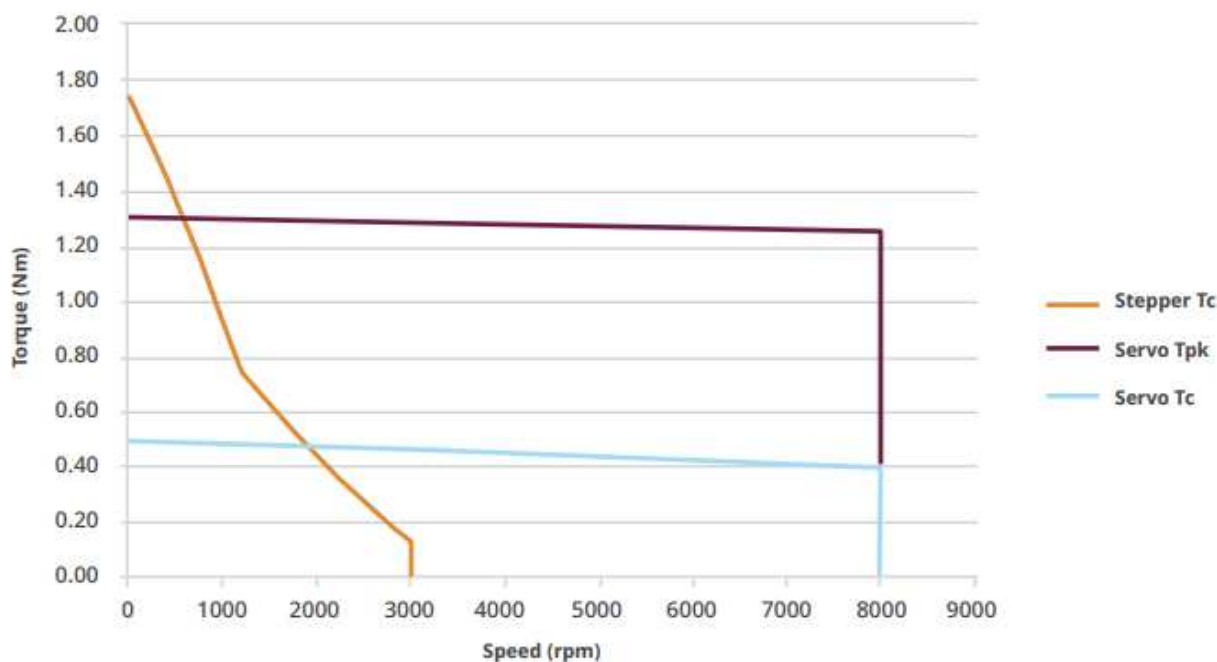
Stepper motori rade u konfiguraciji otvorene petlje i kao što je već navedeno ne trebaju uređaj za slanje povratne informacije (encoder) koji zahtjeva dodatne napore oko ožičenja, konfiguriranja i nadzora. Umjesto toga mogu se upravljati jednostavno pomoću PLC-a. S druge strane servo motori zahtijevaju podešavanje kojim korisnik optimizira algoritme i elektroniku za kontrolu okretnog momenta, brzine i položaja motora. Drugim riječima, podešavanje servo motora je kontinuirano modificiranje izlaznih signala kako bi se dobilo što točnije i glatkije gibanje.

Ipak, tehnologija servo sustava je uznapredovala pa danas imamo servo sustave koji automatski konfiguriraju motor, drive-ove, povratnu informaciju i sami se podešavaju, a potrebno je samo malo naknadno fino podešavanje i kontrola.

OKRETNI MOMENT, BRZINA VRTNJE I UBRZANJE

Okretni moment stepper motora pri nižim brzinama vrtnje (do 1000 o/min) je poprilično robustan, što znači da je primjenjiv kod namjena koje zahtijevaju veći teret ali pri nižim brzinama vrtnje i kod manjih ubrzanja. Uzimajući to u obzir, ovi motori, pogotovo s predimenzioniranim rotorom, mogu izvoditi precizne kretanje s većim opterećenjem pri nižim brzinama i bez upotrebe prijenosnika. Glavni nedostatak ove karakteristike je što teret mora biti dovoljno dobro definiran i mora biti relativno statičan. Još jedna prednost stepper motora je zakretni moment držanja [21] koji dolazi do izražaja kada je potrebno držati teret prilikom mirovanja uređaja. Kod većih brzina (iznad 1500 o/min) i kod većih tereta stepper motori gube svoju sposobnost odnosno moment. To je posebno uočljivo kod dinamičkih opterećenja, velikih ubrzanja i promjena smjera, gdje se motor ne može nositi s teretom te dolazi do preskakanja koraka ili do zastoja. Ovo može dovesti do čestih zastoja, do oštećivanja okoline ili do oštećivanja samog robota. Stepper motori, po svojoj prirodi, su uvijek pod naponom punom strujom koja teče kroz namote statora čak i kada se motor ne vrti, što znači da su podložni većem zagrijavanju i većoj potrošnji energije.

Za razliku od stepper motora, servo motori su sposobni ostvariti veće brzine vrtnje i u mogućnosti su postići veće okretno momente na puno većem rasponu brzina. Servo motori sposobni su pružiti kratke nalete dodatnog okretnog momenta u velikom dijelu spektra brzina te su pogodni za primjenu kod dinamičkih opterećenja i kod savladavanja većih inercijskih sila prilikom ubrzanja. Iako su servo motori napravljeni za rad pri višim brzinama, uz pravilnu pripremu, mogu precizno raditi i pri jako niskim brzinama vrtnje. Slika na sljedećoj stranici predstavlja karakteristiku stepper i servo motora.



Slika 32. Usporedba krivulje učinka s približno jednakim volumenom [22]

Kao zaključak, servo motori su bolji za dinamička opterećenja i za svladavanje inercijskih sila prilikom ubrzavanja, dok su stepper motori dobri za držanje tereta ali su ograničeni samo na statička opterećenja. Stepper motori ostvaruju veliki moment pri manjim brzinama vrtnje dok servo motori ostvaruju malo manji moment pri nižim brzinama ali zadržavaju moment i pri višim brzinama vrtnje.

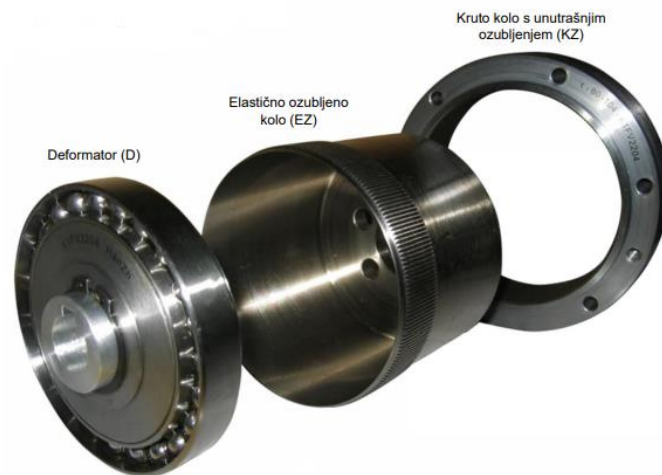
TOČNOST

Iako su stepper motori u pravilu precizni, kada dođu na rub svojih sposobnosti uvijek postoji mogućnost da se preskoči korak. U tim situacijama ne postoji indikacija od motora da se greška dogodila tako da može proći dosta vremena prije nego što se ona primijeti. Gubitak koraka rezultat je najčešće velike inercije prilikom ubrzanja ili pojave prevelikog trenja. Dodatak koraka posljedica je velike inercije prilikom usporenja. Razvojem tehnologije danas postoje drive-ovi koji poboljšavaju neke od nedostataka stepper motora. Kod servo motora zbog korištenja encoder-a greške u pozicioniranju ne mogu proći nezapaženo. Servo drive-ovi imaju prednost da kad greška položaja pređe određeni limit, servo drive u tom trenutku zaustavlja motor kako ne bi došlo do nepredviđenih situacija ili oštećenja. Suprotno od stepper motora, servo motor nikad ne miruje kad je uključen zbog konstantnog ispravljanja greške zatvorene petlje, tijekom kojeg koristi energiju samo za potrebe održavanja naređenog položaja. Stalno promjenjiva greška petlje položaja uzrokuje da se izlazno vratilo motora stalno pomiče naprijed-nazad. Takva pojava zove se "hunting" i predstavlja jedan od nedostataka servo motora.

Predviđeni rad robotske ruke tijekom snimanja i najzahtjevnijih snimaka podrazumijeva velika ubrzanja, usporenja i promjene smjera robotske ruke, što znači i opterećenje velikim inercijskim silama. Analizom navedenih prednosti i mana stepper i servo motora procjenjujemo da bi za ovakvu namjenu bili primjereniji servo motori. Prednosti stepper motora kao što su jednostavnost korištenja, manja cijena i bolje karakteristike pri manjim brzinama i ubrzanjima, mogu nam koristiti ukoliko se budu razmatrale inačice robotske ruke s blažim zahtjevima i sa nižom cijenom, no o tome će biti više priče kasnije u tekstu.

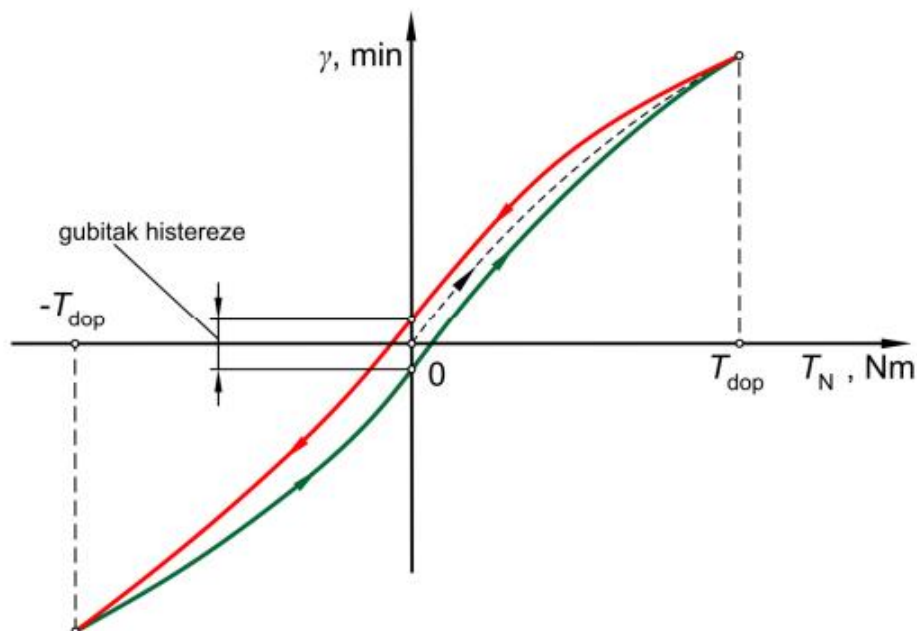
3.3.4 Harmonijski prijenosnik

Harmonijski prijenosnici predstavljaju, u načelu, novi oblik prijenosnika snage i gibanja, a 1955. godine je C. Walton Musser prijavio patent za tada još nepoznati oblik prijenosnika. Tipičan komercijalni prijenosni omjer je u rasponu od $i=50$ do $i=320$ a stupanj djelovanja može dosegnuti i do 90%. Izlazni moment kreće se od 3,6 Nm pa sve do 10000 Nm za najveće izvedbe ovih prijenosnika. Na slici 33. su prikazane komponente harmonijskog prijenosnika.



Slika 33. Komponente harmonijskog prijenosnika [18]

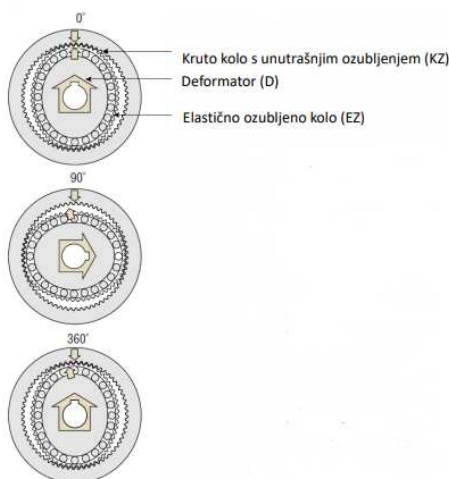
Na slici 34 možemo vidjeti kako se karakteristika podatljivosti (recipročna vrijednost krutosti) harmonijskog prijenosnika približava idealnoj karakteristici.



Slika 34. Karakterisitka podatljivosti harmonijskog prijenosnika [18]

Princip rada

Zakretanjem deformatora prema prethodnoj slici u smjeru kazaljke na satu, elastično ozubljeno kolo zakreće se u suprotnom smjeru dok je pri tom kruto kolo s unutrašnjim ozubljenjem fiksirano. Moguće su i izvedbe gdje je elastično kolo mirujuće dok se kruto kolo giba. Za jedan puni okret deformatora elastično ozubljeno kolo zakrene se za razliku broja zubi krutog kola i broja zubi elastičnog kola.



Slika 35. Princip rada harmonijskog prijenosnika [18]

Tablica 7 prikazuje neke prednosti i nedostatke ove vrste prijenosnika.

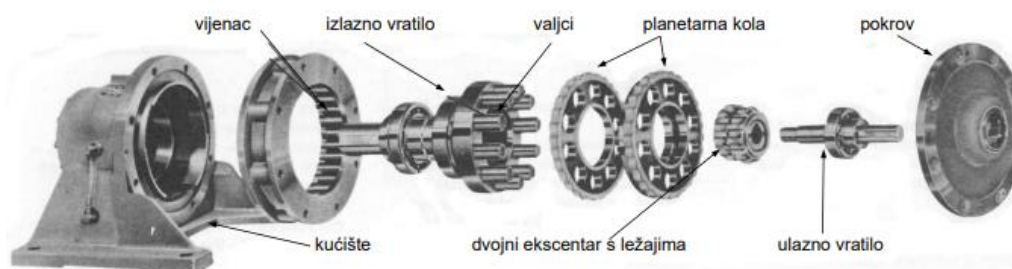
Tablica 7. Prednosti i nedostaci harmonijskog prijenosnika

<i>Harmonic Drive</i>	
Prednosti	Nedostaci
Mogućnost prijenosa velikih obodnih sila	Velika podatljivost
Koncentrični oblik	Greške u kinematici
Mala težina i kompaktna konstrukcija	Rezonantne vibracije
Relativno veliki stupanj iskoristivosti	Nelinearnost
Mogućnost reverzibilnog pogona	Slabo poznavanje
Nema zračnosti zubi u zahvatu	

3.3.5 Cikloidni prijenosnik

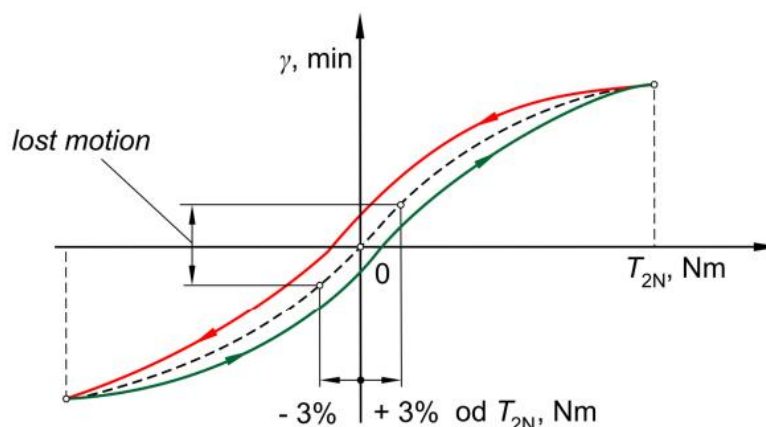
Ciklo prijenosnik izmislio je Lorenz Braren 1926. godine. 1931. godine je osnovana tvrtka *Cyclo GmbH* (današnji Sumitomo) u Munchenu te je započela prva proizvodnja ciklo prijenosnika. Prema načinu djelovanja ovi prijenosnici su zapravo planetarni prijenosnici tipa 1U, odnosno 1I prema

njemačkoj notaciji, gdje "I" predstavlja "Innen" (unutar). kod ciklo prijenosnika zubi nisu evolventni nego cikloidni. Slika 35 prikazuje komponente cikloidnog prijenosnika.



Slika 36. Komponente cikloidnog prijenosnika [18]

Sljedeća slika prikazuje karakteristiku podatljivosti cikloidnog prijenosnika.



Slika 37. Karakteristika podatljivosti cikloidnog prijenosnika [18]

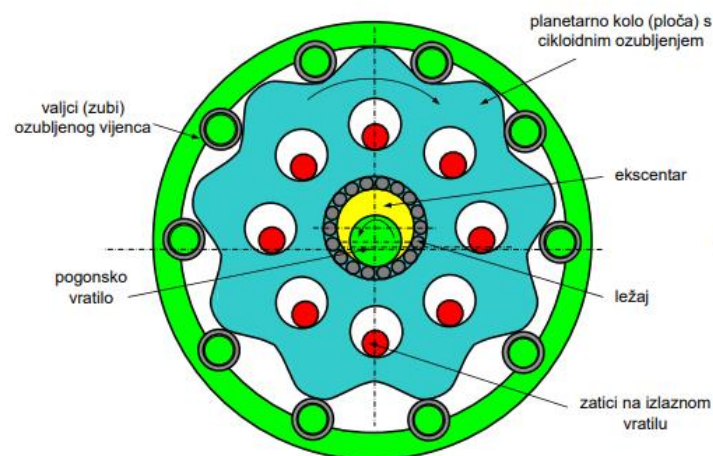
Tablica 8 prikazuje neke prednosti i nedostatke ove vrste prijenosnika.

Tablica 8. Prednosti i nedostaci cikloidnog prijenosnika

Cyclo Drive	
Prednosti	Nedostaci
Veliki prijenosni omjeri po jednom stupnju	Izrada ozubljenja
Visoki stupanj korisnog djelovanja	Izrada ekscentra
Manji moment tromosti mase	Otežana montaža
Mogućnost kratkotrajnog opterećenja	Kontrola mjernih veličina
Dugi životni vijek i jednostavno održavanje	Nemogućnost primjene kod manjih prijenosnih omjera (min 6:1)
Osnovno simetričan oblik prijenosnika	

Princip rada

Ovaj prijenosnik djeluje na način da se rotacijom ekscentra planetarno kolo valja po unutarnje obodu vijenca s valjcima. Planetarno kolo tada vrši dvije rotacije, rotacija oko osi pogonskog vratila u smjeru njegove vrtnje te rotaciju oko vlastite osi suprotno smjeru gibanja pogonskog vratila. Suma tih dvaju gibanja daje krivulju koju nazivamo cikloidom. Vrtnjom planetarnog kola, zubi kola zahvaćaju vodeće valjke jednog po jednog, zbog čega se ono okreće u suprotnom smjeru te s manjom brzinom vrtnje od pogonskog vratila. Svaki puni okret pogonskog vratila okreće planetarno kolo za jedan zub unatrag. Cikloidni prijenosnik je moguće izraditi s jednim, no uobičajena je izrada s dva ili tri planetarna kola koja su kao i ekscentar zakrenuti za kut od 180° odnosno 120° . Princip rada je prikazan na slici 36.



Slika 38. Princip rada cikloidnog prijenosnika [18]

Izvedba s više planetarnih kola omogućava:

- upotrebu zatika manjeg promjera na izlaznom vratilu s obzirom da se višestruko povećava broj zatika u zahvatu pa se i opterećenje shodno tome smanjuje
- uravnoteženje mase
- izrada manjeg ozubljenja.

3.3.6 Remenski prijenos

Remenski prijenos za zupčastim remenom se često koristi u konstrukciji robotskih ruku za prijenos snage i gibanja između različitih osi ali isto tako i za redukciju ili multiplikaciju okretnog momenta i brzine. Ovakav prijenos se koristi kada nije moguća koaksijalna izvedba elektromotora i osi rotacije. Upravo je to razlog što će se u ovom radu koristiti zupčasti remen za rotaciju 5. i 6. zgloba. Zbog velikog kraka na kojem se nalaze zadnja dva zgloba i posljedičnog pada krutosti, poželjno je da robot na tom dijelu ima manje dimenzije. Korištenjem remenskog prijenosa za prijenos gibanja i toka snage moguće je razdvojiti elektromotor od prijenosnika i povoljnije ih rasporediti s obzirom na ograničenost prostora. Iako je zupčasti remenski prijenos zbog skuplje izrade remena i remenica skuplji od plosnatog ili klinastog remenskog prijenosa, prijenos gibanja se vrši primarno pomoću veze oblikom što omogućava precizan prijenos i kod velike brzine pokreta jer ne dolazi do proklizavanja. Uz to,

zupčasti remen ima veću efikasnost i prenosi veću gustoću snage pa je sukladno tome moguće korištenje manjeg remena i manjih remenica što pozitivno utječe na masu konstrukcije.

3.3.7 Ležajevi

Ležajevi igraju bitnu ulogu u pogledu kontrole pokreta kod zahtjevnih gibanja koja se ostvaruju robotskim rukama a rezultat su rotacije više osi od jednom. Shodno tome, potrebno je obratiti pozornost na odabir pravilnih ležajeva koji će ispunjavati sve potrebne uvjete za kompaktnošću i preciznošću. Jedno od mogućih rješenja za zglobove robota su ležajevi s tankim poprečnim presjekom koje odlikuje mala masa, male dimenzije poprečnog presjeka u odnosu na promjer, smanjeno trenje i precizan rad. Za razliku od uobičajenih valjnih ležajeva, ovi ležajevi za istu serija ležaja imaju jednaku veličinu poprečnog presjeka za sve veličine unutarnjeg promjera. Osim ležajeva koji će se ugrađivati u zglobove robota, potrebno je i odabrati ležajeve koji će se koristiti kod remenskog i zupčaničkog prijenosa. U tu svrhu će se koristiti ležajevi sa smanjenom zračnošću koji imaju zračnost manju od nominalne i označavaju se dopunskom oznakom C1 ili C2.

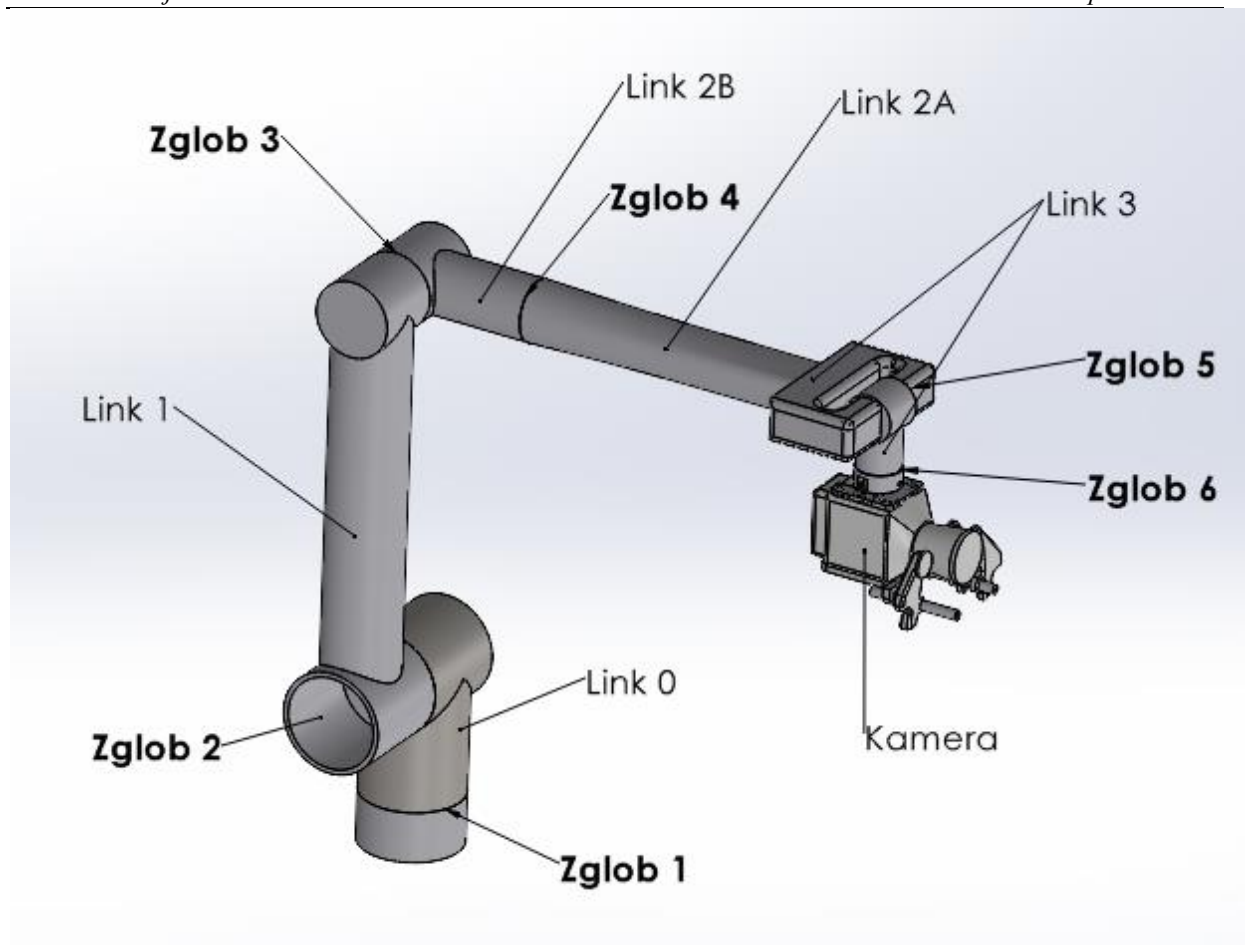
4. Proračun

Proračun robotske ruke u ovom radu će se svesti isključivo na proračun servomotora i harmonijskih prijenosnika. Proračun čvrstoće komponenti se neće provoditi pod pretpostavkom da su kritične komponente ionako predimenzionirane. Dodatan razlog je što se zbog samog izgleda robotske ruke, komponente koje su najviše opterećene, ne zadovoljavaju pretpostavke koje su potrebne za provođenje analitičkog proračuna upravo zbog svoje geometrije. Robotske ruke koje služe za pozicioniranje video kamere karakterizira povremeno, kratkotrajno gibanje s ponekim većim ubrzanjima. Zbog toga će se prilikom provjere izlaznih karakteristika motora promatrati područje isprekidanog rada. Proračun će krenuti od 6. zgloba prema prvom, upravo kako je tekao i proces konstruiranja. Opterećenja zglobova su dobivena izradom dinamičke simulacije gibanja u programskom paketu *ADAMS*®. Prilikom izrade simulacija, nosivost robota, odnosno težina sklopa kamere je 12 kg. Naravno, s povećanjem navedene mase, smanjuju se mogućnosti robota dok se sa smanjenjem mase mogućnosti povećavaju. Masa je uzeta približno i iznosa je dovoljnog da se mogu koristiti kamere, objektiv, FIZ motori i ostala popratna oprema koja se najčešće koristi u ovu svrhu. U nastavku slijedi objašnjenje procesa simulacije i njezina verifikacija.

4.1 Dinamička analiza gibanja

Kod mehanizama složenih poput robotske ruke, opterećenja koja se javljaju je najčešće vrlo teško ili ipak nemoguće dobiti analitičkim proračunom. Posljednje vrijedi pogotovo kada se radi o složenim gibanjima koja se javljaju prilikom snimanja složenim snimaka. Gibanja će se u programskom paketu opisivati pomoću ugrađenih STEP5 funkcija koje u ovom slučaju imaju oblik $(time, x_0, h_0, x_1, h_1)$. Vrijednosti x_0 i x_1 označavaju početni i krajnji trenutaka a vrijednosti h_0 i h_1 početni i krajnji položaj. Za početak je bilo potrebno napraviti pojednostavljeni model robotske ruke s približnim dimenzijama i približnim masama komponenti. Nakon provođenja simulacija, rezultati te prve simulacije su se uzeli kao opterećenja po kojima se dimenzionirao završni proizvod. Inače ovakav pristup zahtjeva provođenje više iteracija u svrhu dobivanja optimalnih vrijednosti. U općenitom slučaju, za početak se pretpostavljaju veće težine i nepovoljnija opterećenja, zatim se na temelju tih vrijednosti dimenzionira prva detaljnija inačica proizvoda koja po mogućnosti ima manju masu. Manja masa robota znači i veću nosivost ili veću manipulacijsku sposobnost u pogledu brzina i ubrzanja. Nakon ove prve iteracije provode se dodatne iteracije po uzoru na prvu u svrhu dobivanja što lakše konstrukcije sa što većim sposobnostima. Zbog opsega posla kojeg podrazumijeva ovaj pristup, ovdje se ipak neće provoditi više iteracija.

Početni model robota po čijim dimenzijama će se raditi simulacija je prikazan na sljedećoj slici.



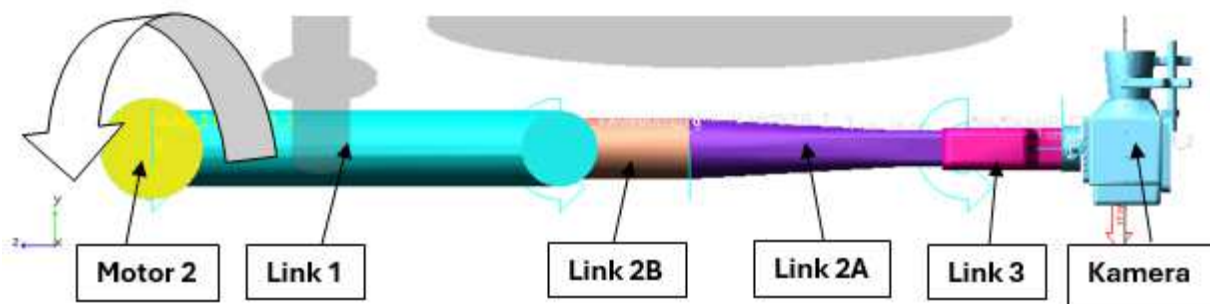
Slika 39. Pojednostavljeni model robotske ruke

Valja napomenuti da iako ova numeracija zglobova vrijedi u cijelom radu, nazivi komponenti su ovdje uzeti simbolično i koriste se samo u simulaciji.

Kako bi se osiguralo da svaki zglob može izvesti puni opseg pokreta napravljene su simulacije najnepovoljnijeg slučaja sa svaki od zglobova. U sljedećem poglavlju će se pokazati primjer takvog slučaja na drugom zgloboju na kojem će se provesti i verifikacija simulacija u *ADAMS*-u. Nakon što se odabrao najnepovoljniji položaj robota za pojedini zglob, mijenjanjem parametara STEP funkcija se dobivaju željene brzine i ubrzanja. Ciljane brzine i ubrzanja su uzete na temelju karakteristika robota na tržištu. Zbog složenosti problema, uzete vrijednosti su ipak nešto skromnije nego kod proizvoda na tržištu. Dobivene maksimalne vrijednosti snage, momenta i kutne brzine u zglobovima su uzete kako bi se odredio radni ciklus u kojem se postižu upravo takve vrijednosti. Tek izradom radnog ciklusa se mogu vidjeti prave sposobnosti robota. Gibanjem više zglobova odjednom, što je i najveća prednost ovakvog robota, može značiti da će se zglobovi gibati u istom smjeru što dovodi do zbrajanja njihovih relativnih brzina, uzrokujući veća ubrzanja i time veća inercijska opterećenja. Ovo može značiti da se neće moći u svakom slučaju postići maksimalne brzine pojedinih zglobova koje su određene u pojednostavljenom, „najnepovoljnijem“ slučaju. Prilikom određivanja maksimalnih opterećenja u zglobovima, nepovoljno su djelovali i momenti držanja koji se javljaju kada zglob miruje iako se ostatak ruke giba kroz prostor. Moment držanja je to veći što se smjer inercijske sile uslijed gibanja ruke više poklapa sa smjerom rotacije tog zgloba. U simulacijama se pokazalo da ovi momenti nisu beznačajni i ponekad mogu predstavljati i maksimalnu vrijednost momenta u zgloboju za određeni ciklus.

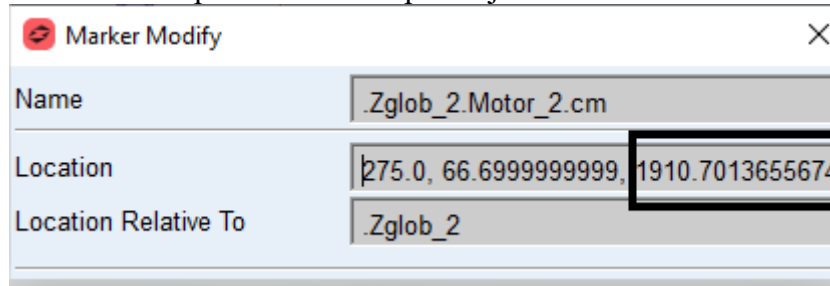
4.2 Verifikacija dinamičke analize

Kako bismo bili sigurni da nam simulacija daje vrijednosti koje imaju fizikalno smisla, potrebno je napraviti ručni proračun onoga što se da jednostavno opisati. Sljedeća slika prikazuje prethodno spomenuti pojednostavljeni model za simulaciju opterećenja u drugom zglobu.

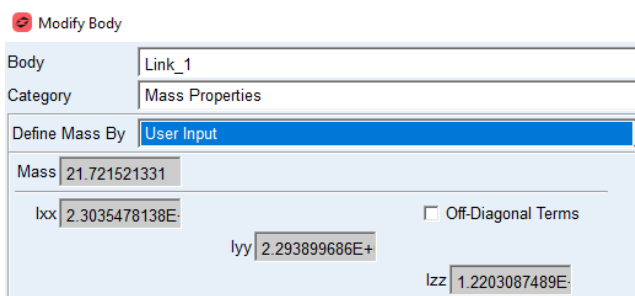


Slika 40. Pojednostavljeni model simulacije drugog zgloba

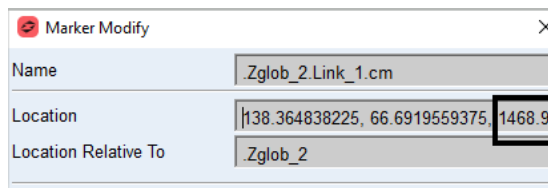
Slučaj na slici prikazuje rotaciju linkova 1, 2B, 2A, 3 i kamere oko osi motora 2 u smjeru obrnutom od smjera kazaljke na satu. S obzirom da je gibanje opisano sa STEP funkcijom, najveća akceleracija će se javiti odmah iza nulte sekunde i doći će u nulu na sredini simulacije u trenutku kada se postigne maksimalna brzina. Odmah iza toga nastupa usporenje i konačno zaustavljanje. U nultoj sekundi, prije ubrzanja, javlja se statički problem u kojem motor 2 drži sve linkove i kamere i time sprječava njihovu rotaciju u suprotnom smjeru. Moment u motoru 2 se može opisati jednostavnim izrazom gdje se računa suma momenata težina pojedinih komponenti oko osi motora. Težina određene komponente je umnožak njezine mase i gravitacijskog ubrzanja a djeluje u težištu svake od komponenti. Krak na kojem djeluje težina pojedinog dijela će se računati razlikom iznosa koordinate osi z motora i promatranog dijela robota. Prije proračuna će se prikazati mase i položaji koordinate z težišta svih dijelova.



Slika 41. Položaj koordinate osi z motora 2



Slika 42. Masa link-a 1



Slika 43. Položaj koordinate z osi link-a 1

Modify Body

Body: Link_2B

Category: Mass Properties

Define Mass By: User Input

Mass: 6.7976665002

lxx: 9.5556797946E- Off-Diagonal Terms

lyy: 9.5397550666E-

lzz: 2.3036847113E-

Slika 44. Masa link-a 2B

Marker Modify

Name: .Zglob_2.Link_2B.cm

Location: |-5.4673894775, 66.7001380795, 1004.38

Location Relative To: .Zglob_2

Slika 45. Položaj koordinate z osi link-a 2B

Modify Body

Body: Link_2A

Category: Mass Properties

Define Mass By: User Input

Mass: 9.7121552071

lxx: 3.0319903062E- Off-Diagonal Terms

lyy: 2.9834395958E-

lzz: 2.0695032664E-

Slika 46. Masa link-a 2A

Marker Modify

Name: .Zglob_2.Link_2A.cm

Location: |3.4618877229E-03, 66.4901381349, 539

Location Relative To: .Zglob_2

Slika 47. Položaj koordinate osi z link-a 2A

Modify Body

Body: Link_3

Category: Mass Properties

Define Mass By: User Input

Mass: 4.8133493694

lxx: 6.0660947117E- Off-Diagonal Terms

lyy: 4.6886659364E-

lzz: 2.0543535599E-

Slika 48. Masa link-a 3

Marker Modify

Name: .Zglob_2.Link_3.cm

Location: |0.9480255669, 66.7000191326, 252.752

Location Relative To: .Zglob_2

Slika 49. Položaj koordinate osi z link-a 3

Modify Body

Body: Kamera

Category: Mass Properties

Define Mass By: User Input

Mass: 11.8772440475

lxx: 1.045976574E+ Off-Diagonal Terms

lyy: 9.8867248777E-

lzz: 4.7901496388E-

Slika 50. Masa kamere

Marker Modify

Name: .Zglob_2.Kamera.cm

Location: |-2.4877465155, 94.009084371, -7.02380

Location Relative To: .Zglob_2

Slika 51. Položaj koordinate osi z kamere

Analitički izračunati moment u zglobu 2 se računa prema sljedećem izrazu:

$$M_{analit} = (m_{l1} \cdot (z_{m2} - z_{l1}) + m_{l2A} \cdot (z_{m2} - z_{l2A}) + m_{l2B} \cdot (z_{m2} - z_{l2B}) + m_{l3} \cdot (z_{m2} - z_{l3})) + m_k \cdot (z_{m2} - z_k) \cdot g. \quad (4.1)$$

Gdje je:

$m_{l1} = 21,7$ kg - masa link-a 1,

$m_{l2B} = 6,8$ kg - masa link-a 2B,

$m_{l2A} = 9,71$ kg - masa link-a 2A,

$m_{l3} = 4,81$ kg - masa link-a 3,

$m_k = 11,87$ kg - masa kamere,

$z_{m2} = 1911$ mm - koordinata osi z motora 2,

$z_{l1} = 1469$ mm - koordinata osi z link-a 1,

$z_{l2B} = 1004$ mm - koordinata osi z link-a 2B,

$z_{l2A} = 539$ mm - koordinata osi z link-a 2A,

$z_{l3} = 253$ mm - koordinata osi z link-a 3,

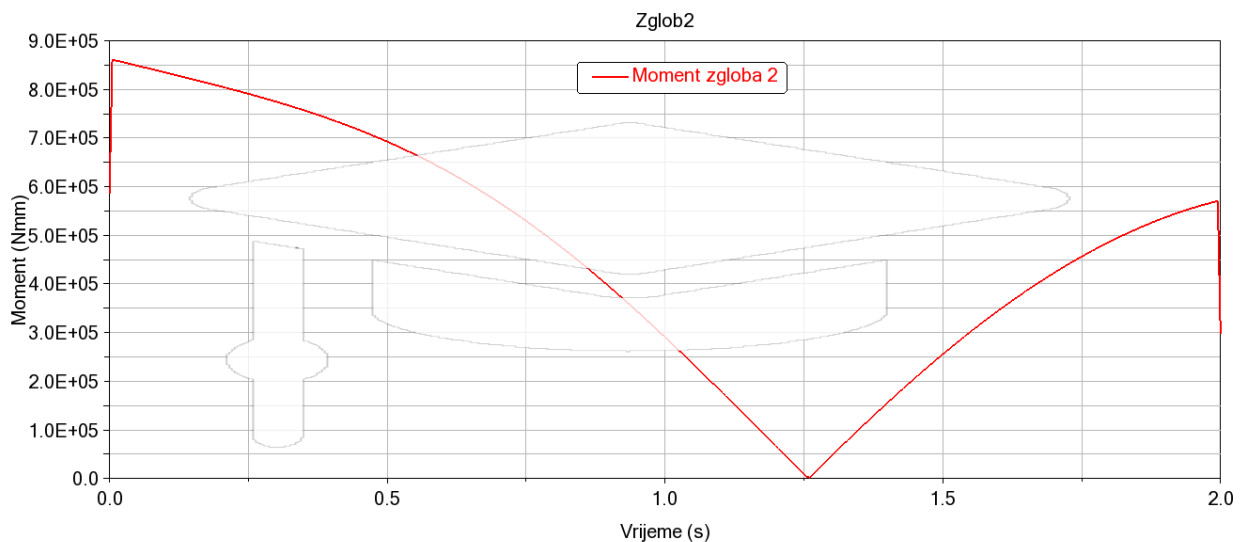
$z_k = -7$ mm - koordinata osi z kamere.

$g = 9,81$ m/s² - gravitacijsko ubrzanje.

Uvrštavanjem ovih vrijednosti u jednadžbu 4.1 dobivamo analitički izračunati moment u zglobu 2.

$$M_{analit} = (21,7 \cdot (1911 - 1469) + 6,8 \cdot (1911 - 1004) + 9,71 \cdot (1911 - 539) + 4,81 \cdot (1911 - 253)) + 11,87 \cdot (1911 + 7) \cdot 9,81 = 586\,861 \text{ Nmm.} \quad (4.2)$$

Vrijednost momenta dobivenog simulacijom očitavamo iz sljedećeg dijagrama.



Slika 52. Moment u zglobu 2 za pojednostavljeni slučaj

$$M_{simul} = 586\,710 \text{ Nmm.}$$

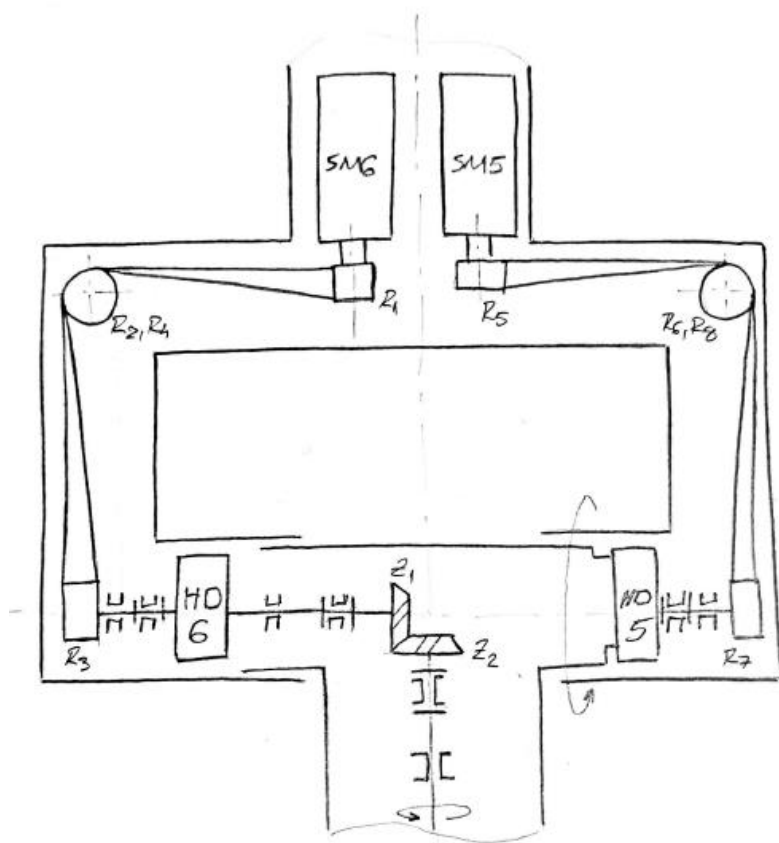
Greška simulacije se izračunava na sljedeći način:

$$Greška = 1 - \frac{M_{analit}}{M_{simul}} = 1 - \frac{586861}{586710} = 0,026 \%. \quad (4.3)$$

Iz prethodnog rezultata vidimo da je greška jako mala stoga rezultate simulacije možemo smatrati valjanima.

4.3 Zglobovi 5 i 6

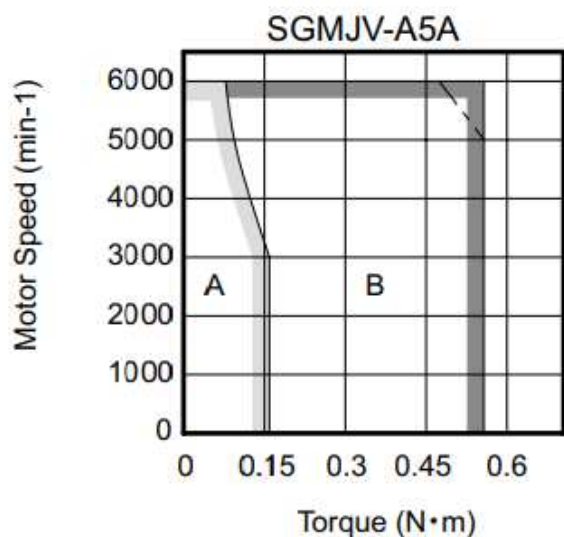
Prijenos snage i gibanja za zglobove 5 i 6 je konstruiran drugačije nego što je to izvedeno u ostalim zglobovima robota a razlog za to su ograničena mase i dimenzije s obzirom na duljinu kraka na kojoj se nalaze. U ovom slučaju je izrazito bitno smanjiti masu konstrukcije koja se nalazi na većem kraku na način da se motori koji nose veliki dio mase smjeste bliže postolju robota. U tom slučaju, snaga bi se prenosila remenskim i zupčastim prijenosom. Na slici 53 je prikazan tok snage kroz 5. i 6. zglob. Snaga se za 6. zglob preko servomotora SM6 prenosi pomoću zupčastog remenskog prijenosa (remenice R1, R2, R3 i R4) i dovodi do harmonijskog prijenosnika HD6 (*Harmonic Drive*) koji vrši redukciju brzine. Snaga se na kraju zakreće za 90 stupnjeva uz pomoć dva stožnika sa zakrivljenim zubima (Z1 i Z2). Zakrivljeni zubi su izabrani zbog većeg stupnja prekrivanja koji za posljedicu imaju mirniji i tiši rad što je u svrhu snimanja posebno bitno. Tok snage za 5. zglob je izveden slično (remenice R5, R6, R7 i R8), s razlikom što tok snage staje s harmonijskim prijenosnikom HD5.



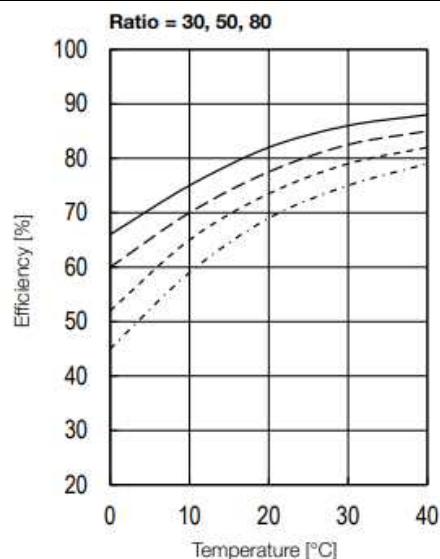
Slika 53. Simbolični prikaz 5. i 6. zgloba

Svi motori koji se koriste u ovoj robotskoj ruci su od proizvođača *Yaskawa*, a servomotori odabrani za 5. i 6. zglob su SGMJV-01AxA2C, odnosno SGMJV-A5AxA2C. Korišteni harmonijski prijenosnici su od proizvođača *Harmonic Drive*. Za 5. zglob se koristi CSG-45-80-2A-SP a za 6. CSG-14-50-2A-SP.

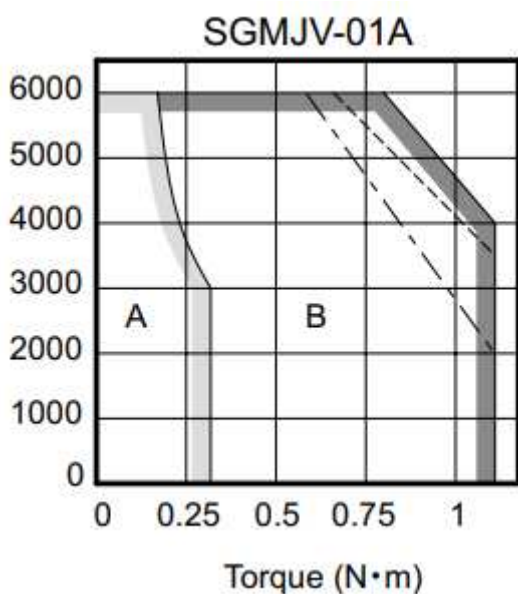
Za proračun su nam potrebne vrijednosti stupnja djelovanja harmonijskog prijenosnika i izlazne veličine elektromotora. Dijagrami spomenutih vrijednosti su prikazani u nastavku.



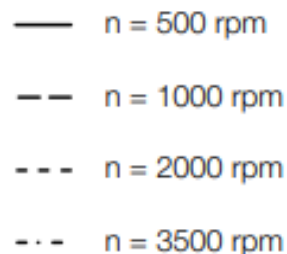
Slika 54. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMJV-A5A [23]



Slika 55. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosne omjere 30, 50 i 80 (1) [24]



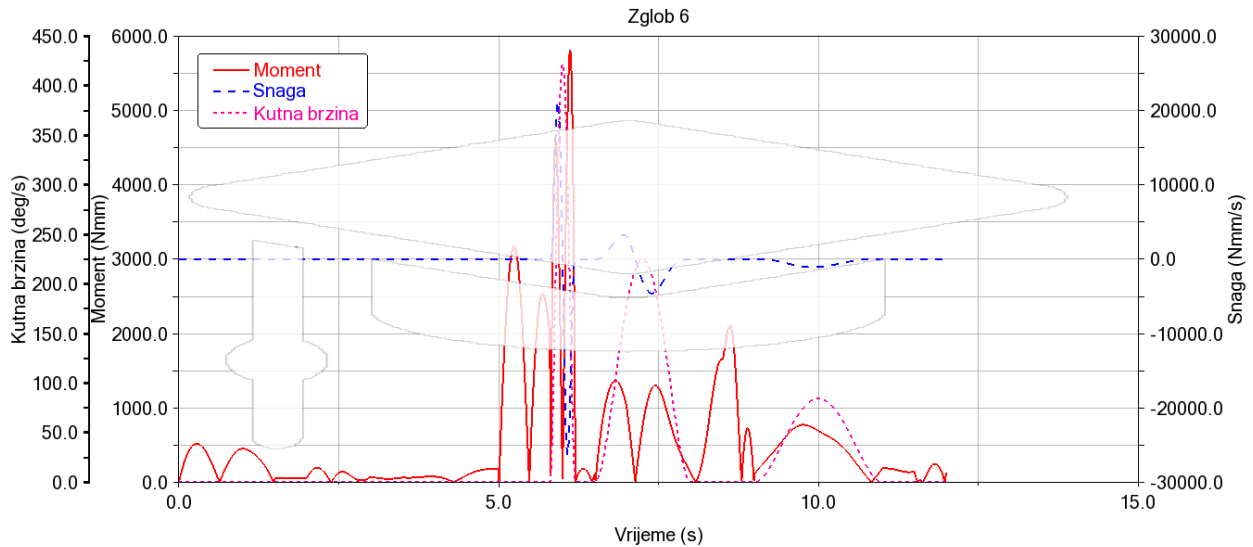
Slika 56. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMJV-01A] [23]



Slika 57. Oznake krivulja stupnjeva djelovanja za pojedine brzine vrtnje [24]

U dijagramima karakteristike motora slovom A je označeno područje kontinuiranog rada dok je slovom B označeno područje isprekidanog rada.

Kao što je spomenuto na početku ovog poglavlja, simulacija dinamike gibanja je provedena u programskom paketu *ADAMS*, a vrijednosti dobivene su prikazane na sljedećoj slici.



Slika 58. Dijagram izlaznih veličina zgloba 6

U nastavku slijedi proračun toka snage 6. zgloba i provjera izlaznih vrijednosti servomotora.

$\eta_{R1234} = \eta_{R5678} = 0,98$ -stupanj djelovanja zupčatog remenskog prijenosa,

$\eta_{z12} = 0,98$ - stupanj djelovanja stožnika za zakrivljenim zubima,

$\eta_{HD6} = 0,70$ - stupanj djelovanja harmonijskog prijenosnika CSG-14-50-2A-SP,

$T_{R_HD6} = 23$ Nm - granica za ponavljaju vršnu vrijednost momenta prijenosnika 6. zgloba,

$\eta_{HD5} = 0,71$ - stupanj djelovanja harmonijskog prijenosnika CSG-45-80-2A-SP,

$T_{R_HD5} = 30$ Nm - granica za ponavljaju vršnu vrijednost momenta prijenosnika 5. zgloba,

$\eta_L = 0,99$ - stupanj djelovanja za par valjnih ležajeva,

$P_{i6} = 27$ W - snaga na izlazu iz zgloba 6,

$P_{SM6} = 50$ W - snaga motora SGMJV-A5AxA2C,

$T_{i6} = 6$ Nm - moment na izlazu iz zgloba 6,

$n_{i6} = 70$ o/min - brzina vrtnje na izlazu iz zgloba 6,

$n_{SM6} = 6000$ o/min - maksimalna brzina vrtnje motora SM6,

$P_{i5} = 47$ W - snaga na izlazu iz zgloba 5,

$P_{SM5} = 100$ W - snaga motora SGMJV-01AxA2C,

$T_{i5} = 25$ Nm - moment na izlazu iz zgloba 5,

$n_{i5} = 38$ o/min - brzina vrtnje na izlazu iz zgloba,

$n_{SM5} = 6000$ o/min - maksimalna brzina vrtnje motora SM5,

$i_{HD6} = 50$ - prijenosni omjer prijenosnika CSG-14-50-2A-SP,

$i_{HD5} = 80$ - prijenosni omjer prijenosnika CSG-45-80-2A-SP,

$i_{R1234} = i_{5678} = i_{z12} = 1$ - prijenosni omjeri remenskog i zupčastog prijenosa.

Potrebna snaga koju servomotor SM6 treba proizvesti se računa prema izrazu:

$$P_{potr_SM6} = \frac{P_{i6}}{\eta_L^3 \cdot \eta_{z12} \cdot \eta_{HD6} \cdot \eta_{R1234}} = \frac{27}{0,99^3 \cdot 0,98 \cdot 0,70 \cdot 0,98} = 41,4 \text{ W}, \quad (4.4)$$

$$P_{potr_SM6} = 36,7 \text{ W} < P_{SM6} = 50 \text{ W}. \quad (4.5)$$

Potrebni moment na izlazu iz motora je jednaka:

$$T_{potr_SM6} = \frac{T_{i6}}{\eta_L^3 \cdot \eta_{z12} \cdot \eta_{HD6} \cdot \eta_{R1234} \cdot i_{HD6} \cdot i_{R1234} \cdot i_{5678} \cdot i_{z12}}, \quad (4.6)$$

$$T_{potr_SM6} = \frac{6}{0,99^3 \cdot 0,98 \cdot 0,70 \cdot 0,98 \cdot 50} = 0,183 \text{ Nm}.$$

Izračunom potrebnog momenta motora vidimo da vrijednost ulazu unutar područja isprekidanog rada za servomotor SGMJV-A5AxA2C.

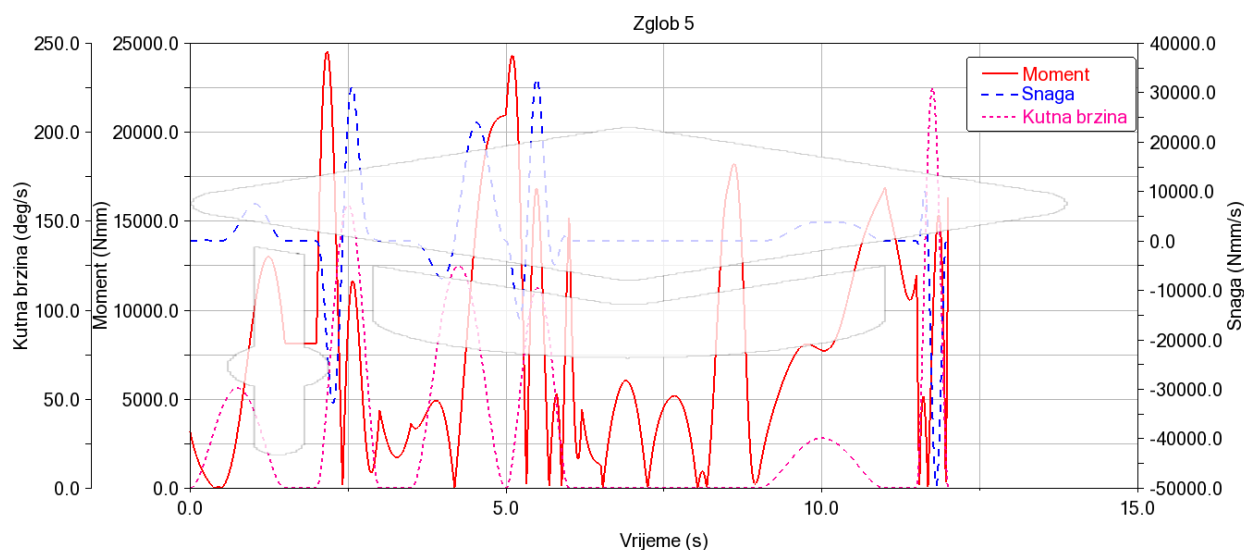
Potrebna brzina vrtnje na vratilu servomotora SM6 iznosi:

$$n_{potr_SM6} = n_{i6} \cdot i_{HD6} = 70 \cdot 50 = 3500 \text{ o/min} < n_{SM6} \quad (4.7)$$

Nakon provjere motora provjerava se i moment na izlazu iz prijenosnika prema sljedećem izrazu:

$$T_{HD6} = \frac{T_{i6}}{\eta_L^2 \cdot \eta_{z12}} = \frac{6}{0,99^2 \cdot 0,98} = 6,25 \text{ Nm} < T_{R_HD6} \quad (4.8)$$

Sljedeće na redu je proračun toka snage za 5. zglob. Izlazne veličine za zglob 5 su sljedeće:



Slika 59. Dijagram izlaznih veličina zgloba 5

Potrebna snaga koju servomotor SM5 treba proizvesti se računa prema izrazu:

$$P_{potr_SM5} = \frac{P_{i5}}{\eta_L^2 \cdot \eta_{HD5} \cdot \eta_{R5678}} = \frac{47}{0,993 \cdot 0,71 \cdot 0,98} = 68,9 \text{ W}, \quad (4.9)$$

$$P_{potr_SM5} = 68,9 \text{ W} < P_{SM6} = 100 \text{ W}. \quad (4.10)$$

Potrebni moment na izlazu iz motora je jednaka:

$$T_{potr_SM5} = \frac{T_{i5}}{\eta_L^2 \cdot \eta_{HD5} \cdot \eta_{R5678} \cdot i_{HD5} \cdot i_{5678}}, \quad (4.11)$$

$$T_{potr_SM5} = \frac{25}{0,992 \cdot 0,70 \cdot 0,98 \cdot 80} = 0,465 \text{ Nm}.$$

Izračunom potrebnog momenta motora vidimo da vrijednost ulazu unutar područja isprekidanog rada za servomotor SGMJV-01Ax2C.

Potrebna brzina vrtnje na vratilu servomotora SM5 iznosi:

$$n_{potr_SM5} = n_{i5} \cdot i_{HD5} = 38 \cdot 50 = 1900 \frac{\text{o}}{\text{min}} < n_{SM5}. \quad (4.12)$$

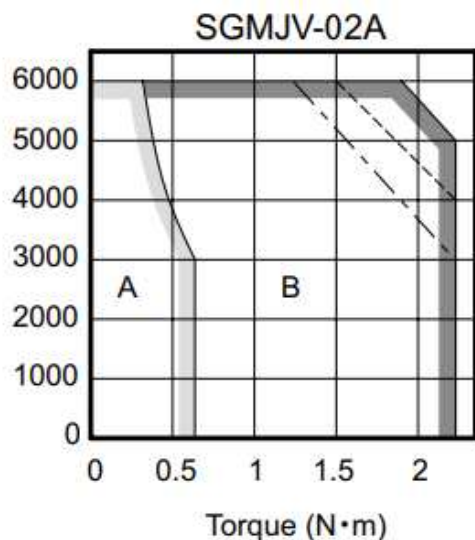
Sve vrijednosti za zglobove 5 i 6 ZADOVOLJAVAJU.

4.4 Zglob 4

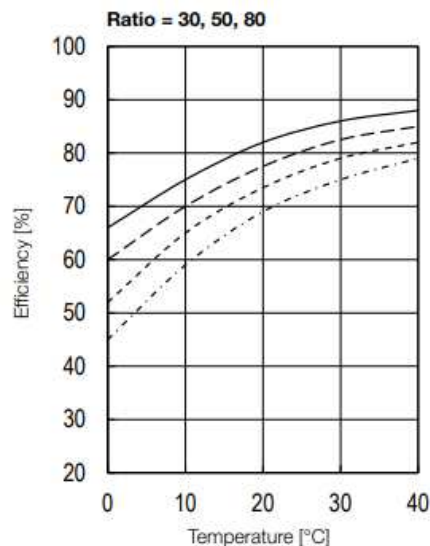
Od prvog do četvrtog zgloba servomotor se spaja direktno na deformator harmonijskog prijenosnika, kruto kolo ostaje čvrsto vezano za mirujući dio zgloba a elastično kolo služi kao izlaz snage pa je spojeno na rotirajući dio.

Servomotor i prijenosnik koji se koriste su SGMJV-02Ax2AC odnosno CSG-17-80-2A-SP.

Stupanj djelovanja prijenosnika i karakteristika motora su prikazane sljedećim dijagramima.

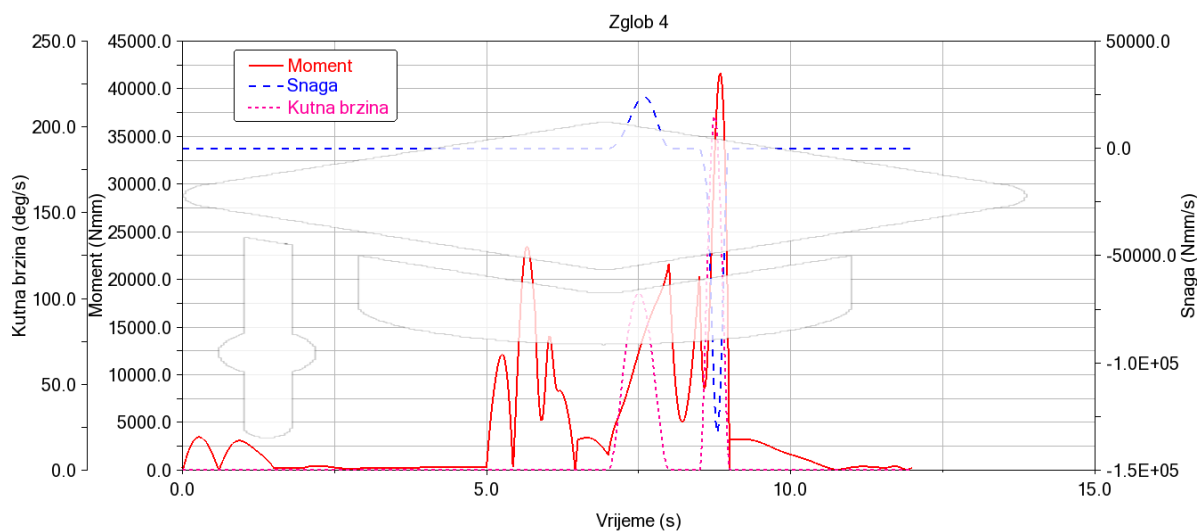


Slika 60. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMJV-02A [23]



Slika 61. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosne omjere 30, 50 i 80 (2) [24]

Dobivene vrijednosti snage, momenta i kutne brzine za zglob 4 su prikazane na slici 62.



Slika 62. Dijagram izlaznih veličina zgloba 4

Izlazne vrijednosti očitane sa slike 62 su:

$P_{i4} = 132 \text{ W}$ - snaga na izlazu iz zgloba 4,

$T_{i4} = 41,4 \text{ Nm}$ - moment na izlazu iz zgloba 4,

$\omega_{i4} = 206 \text{ }^\circ/\text{s}$ - kutna brzina i brzina vrtnje na izlazu iz zgloba 4,

$i_{HD4} = 80$ - prijenosni omjer prijenosnika CSG-17-80-2A-SP,

$\eta_{HD4} = 0,72$ - stupanj djelovanja harmonijskog prijenosnika CSG-17-80-2A-SP,

$\eta_L = 0,99$ - stupanj djelovanja za par valjnih ležajeva,

$P_{SM4} = 200 \text{ W}$ - snaga motora SGMJV-02Ax2AC,

$T_{R_HD4} = 56 \text{ Nm}$ - granica za ponavljaju vršnu vrijednost momenta prijenosnika 4. zgloba,

$n_{SM4} = 6000 \text{ o/min}$ - maksimalna brzina vrtnje motora SM4,

$F_{adop4} = 74 \text{ N}$ - dopušteno aksijalno opterećenje servomotora SM4,

$\mu = 0,07$ - faktor trenja harmonijskog prijenosnika.

Za početak je korisno pretvoriti kutnu brzinu u brzinu vrtnje:

$$n_{i4} = \frac{\omega_{i4}}{6} = \frac{206}{6} = 34,3 \text{ o/min.} \quad (4.13)$$

Potrebna snaga koju servomotor SM4 treba proizvesti se računa prema izrazu:

$$P_{potr_SM4} = \frac{P_{i4}}{\eta_L \cdot \eta_{HD4}} = \frac{132}{0,99 \cdot 0,72} = 185,2 \text{ W,} \quad (4.14)$$

$$P_{potr_SM4} = 185,2 \text{ W} < P_{SM4} = 50 \text{ W.} \quad (4.15)$$

Potrebni moment na izlazu iz motora je jednaka:

$$T_{potr_SM4} = \frac{T_{i4}}{\eta_L \cdot \eta_{HD4} \cdot i_{HD4}}, \quad (4.16)$$

$$T_{potr_SM4} = \frac{41,4}{0,99 \cdot 0,72 \cdot 80} = 0,726 \text{ Nm.}$$

Izračunom potrebnog momenta motora vidimo da vrijednost ulazu unutar područja isprekidanog rada za servomotor SGMJV-02Ax2AC.

Potrebna brzina vrtnje na vratilu servomotora SM4 iznosi:

$$n_{potr_SM4} = n_{i4} \cdot i_{HD4} = 34,3 \cdot 80 = 2744 \text{ o/min} < n_{SM4} \quad (4.17)$$

Nakon provjere motora provjerava se i moment na izlazu iz prijenosnika prema sljedećem izrazu:

$$T_{HD4} = \frac{T_{i4}}{\eta_L} = \frac{41,4}{0,99} = 41,8 \text{ Nm} < T_{R_HD4} \quad (4.18)$$

Moment prijenosnika ZADOVOLJAVA.

Deformator harmonijskog prijenosnika tijekom rada generira aksijalnu silu pa je zbog izravnog spajanja servomotora na prijenosnik bitno provjeriti zadovoljava li nosivost vratila elektromotora u aksijalnom smjeru.

Navedena sila prijenosnika se računa prema izrazu:

$$F_{a_HD4} = 2 \cdot \frac{T_{HD4}}{17 \cdot 0,00254} \cdot \mu \cdot \tan 20^\circ \quad (4.19)$$

$$F_{a_{HD4}} = 2 \cdot \frac{41,8}{17 \cdot 0,00254} \cdot 0,07 \cdot \tan 20^\circ = 49,3 \text{ N} < F_{adop4}$$

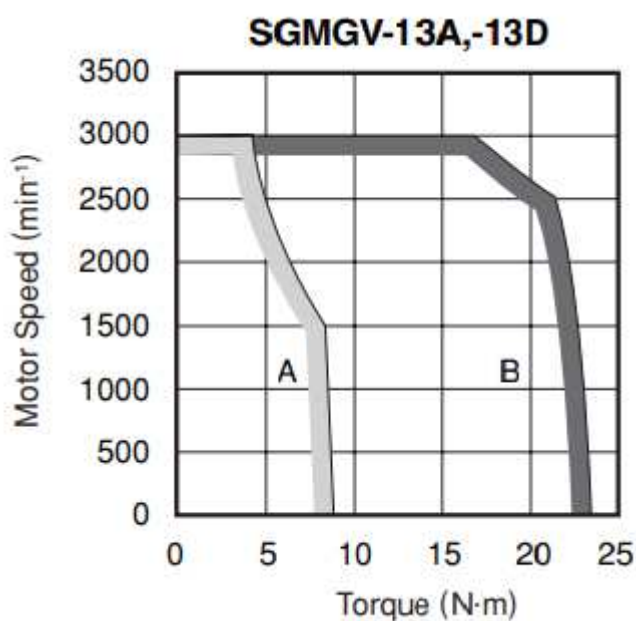
Iz priloženog je vidljivo da nosivost ZADOVOLJAVA ali da se nikako ne smije zanemariti prilikom odabira elektromotora.

4.5 Zglob 3

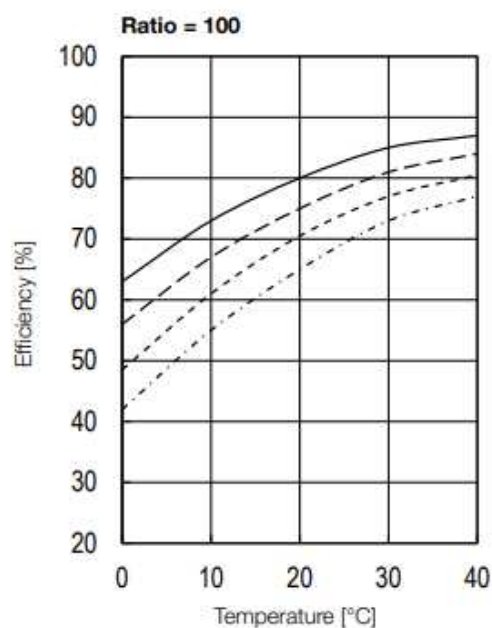
Konstrukcija zadnja četiri zgloba je skoro identična pa će i proračun ostalih zglobova biti analogan onom pokazanom za zglob četiri.

Servomotor i prijenosnik koji se koriste su SGMGV-13Ax2AC odnosno CSG-32-100-2A-SP.

Stupanj djelovanja prijenosnika i karakteristika motora su prikazane sljedećim dijagramima.

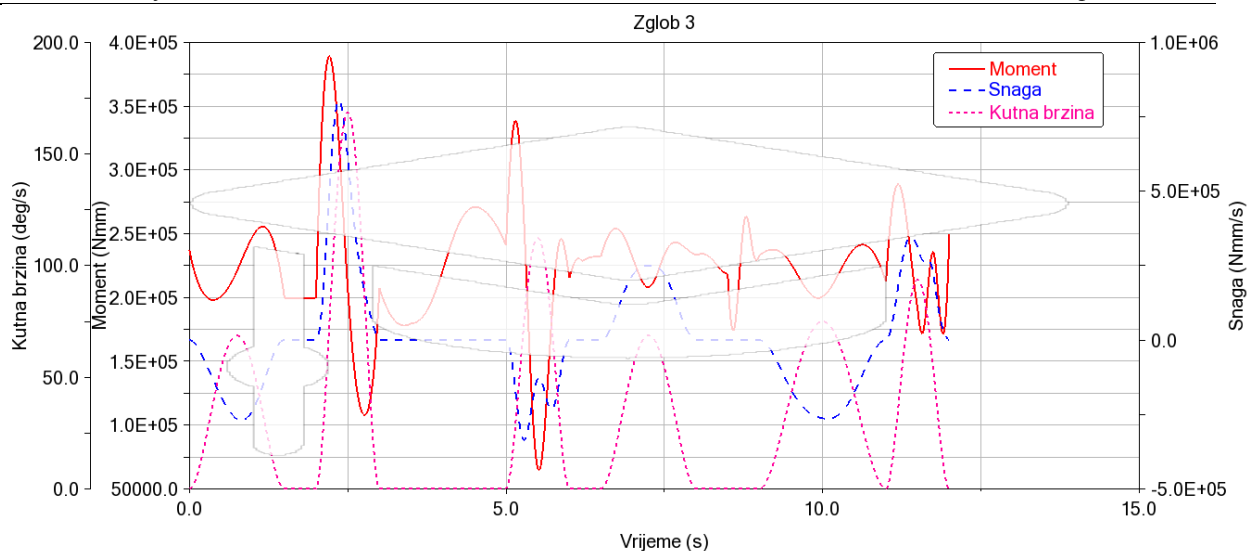


Slika 63. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMGV-13A [23]



Slika 64. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosni omjer 100 [24]

Vrijednosti koje se postižu u trećem zglobu su prikazane u sljedećem dijagramu.



Slika 65. Dijagram izlaznih veličina zgloba 3

Izlazne vrijednosti očitane iz slike 65 su:

$P_{i3} = 805 \text{ W}$ - snaga na izlazu iz zgloba 3,

$T_{i3} = 389 \text{ Nm}$ - moment na izlazu iz zgloba 3,

$\omega_{i3} = 169 \text{ }^\circ/\text{s}$ - kutna brzina i brzina vrtnje na izlazu iz zgloba 3,

$i_{HD3} = 100$ - prijenosni omjer prijenosnika CSG-32-100-2A-SP,

$\eta_{HD3} = 0,67$ - stupanj djelovanja harmonijskog prijenosnika CSG-32-100-2A-SP,

$\eta_L = 0,99$ - stupanj djelovanja za par valjnih ležajeva,

$P_{SM3} = 1300 \text{ W}$ - snaga motora SGMGV-13Ax2AC,

$T_{R,HD3} = 433 \text{ Nm}$ - granica za ponavljaju vršnu vrijednost momenta prijenosnika 3. zgloba,

$n_{SM3} = 3000 \text{ o/min}$ - maksimalna brzina vrtnje motora SM3,

$F_{adop3} = 343 \text{ N}$ - dopušteno aksijalno opterećenje servomotora SM3,

$\mu = 0,07$ - faktor trenja harmonijskog prijenosnika.

Brzinu vrtnje dobivamo iz izraza:

$$n_{i3} = \frac{\omega_{i3}}{6} = \frac{169}{6} = 28,2 \text{ o/min.} \quad (4.20)$$

Potrebna snaga koju servomotor SM3 treba proizvesti se računa prema izrazu:

$$P_{potr_SM3} = \frac{P_{i3}}{\eta_L \cdot \eta_{HD3}} = \frac{805}{0,99 \cdot 0,67} = 1214 \text{ W,} \quad (4.21)$$

$$P_{potr_SM3} = 1214 \text{ W} < P_{SM3} = 1300 \text{ W.} \quad (4.22)$$

Potrebni moment na izlazu iz motora je jednaka:

$$T_{potr_SM3} = \frac{T_{i3}}{\eta_L \cdot \eta_{HD3} \cdot i_{HD3}}, \quad (4.23)$$

$$T_{potr_SM3} = \frac{289}{0,99 \cdot 0,67 \cdot 100} = 4,35 \text{ Nm.}$$

Izračunom potrebnog momenta motora vidimo da vrijednost ulazu unutar područja kontinuiranog rada za servomotor SGMGV-13AxA2C.

Potrebna brzina vrtnje na vratilu servomotora SM3 iznosi:

$$n_{potr_SM3} = n_{i3} \cdot i_{HD3} = 28,2 \cdot 100 = 2820 \text{ o/min} < n_{SM3} \quad (4.24)$$

Nakon provjere motora provjerava se i moment na izlazu iz prijenosnika prema sljedećem izrazu:

$$T_{HD3} = \frac{T_{i3}}{\eta_L} = \frac{389}{0,99} = 393 \text{ Nm} < T_{R_HD3} \quad (4.25)$$

Moment prijenosnika ZADOVOLJAVA.

Aksijalna sila harmonijskog prijenosnika se računa prema izrazu:

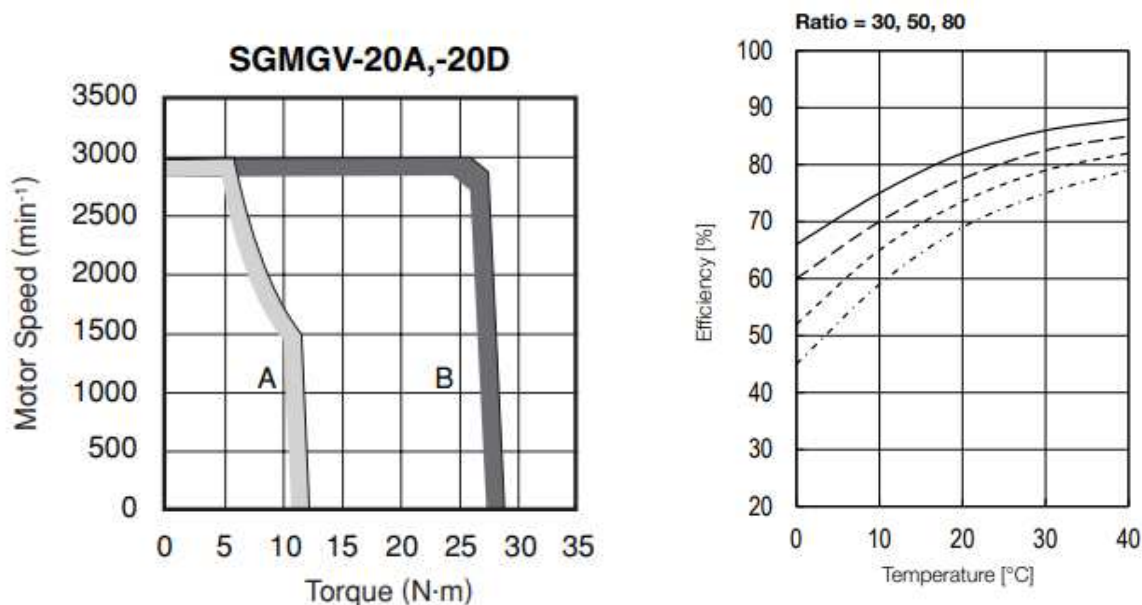
$$F_{a_HD3} = 2 \cdot \frac{T_{HD3}}{32 \cdot 0,00254} \cdot \mu \cdot \tan 20^\circ \quad (4.26)$$

$$F_{a_HD3} = 2 \cdot \frac{393}{32 \cdot 0,00254} \cdot 0,07 \cdot \tan 20^\circ = 246 \text{ N} < F_{adop3}.$$

Aksijalna nosivost servomotora SGMGV-13A-A2C ZADVOLJAVA.

4.6 Zglob 2

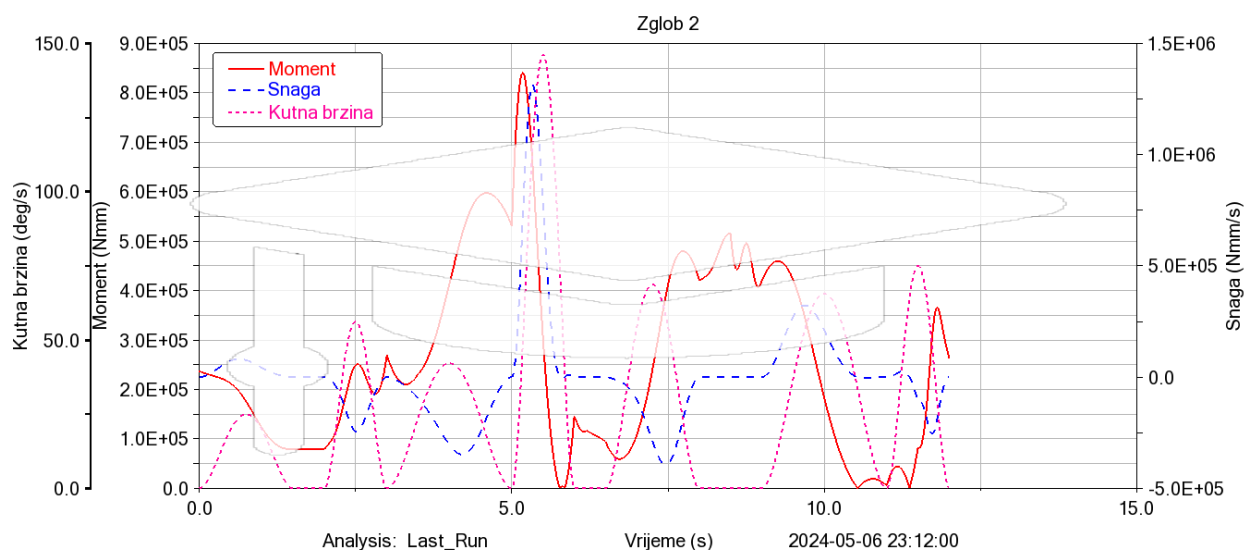
Servomotor i prijenosnik koji se koriste su SGMGV-20Ax2AC odnosno CSG-45-80-2A-SP. Stupanj djelovanja prijenosnika i karakteristika motora su prikazane sljedećim dijagramima.



Slika 66. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMGV-20A [23]

Slika 67. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosne omjere 30,50 i 80 (3) [24]

Vrijednosti koje se postižu u trećem zglobu su prikazane u sljedećem dijagramu.



Slika 68. Dijagram izlaznih veličina zgloba 2

Najveće vrijednosti opterećenja se javljaju upravo u drugom zglobu. To je bilo jasno za očekivati s obzirom na udaljenost osi rotacije od *end effectora*.

Izlazne vrijednosti očitane su sa prethodne slike:

$P_{i2} = 1314 \text{ W}$ - snaga na izlazu iz zgloba 2,

$T_{i2} = 840 \text{ Nm}$ - moment na izlazu iz zgloba 2,

$\omega_{i2} = 146 \text{ }^\circ/\text{s}$ - kutna brzina i brzina vrtnje na izlazu iz zgloba 2,

$i_{HD2} = 80$ - prijenosni omjer prijenosnika CSG-45-80-2A-SP,

$\eta_{HD2} = 0,74$ - stupanj djelovanja harmonijskog prijenosnika CSG-45-80-2A-SP,

$\eta_L = 0,99$ - stupanj djelovanja za par valjnih ležajeva,

$P_{SM2} = 1800 \text{ W}$ - snaga motora SGMGV-20Ax2AC,

$T_{R,HD2} = 918 \text{ Nm}$ - granica za ponavljaju vršnu vrijednost momenta prijenosnika 2. zgloba,

$n_{SM2} = 3000 \text{ o/min}$ - maksimalna brzina vrtnje motora SM2,

$F_{adop2} = 392 \text{ N}$ - dopušteno aksijalno opterećenje servomotora SM2,

$\mu = 0,07$ - faktor trenja harmonijskog prijenosnika.

Brzinu vrtnje dobivamo iz izraza:

$$n_{i2} = \frac{\omega_{i2}}{6} = \frac{146}{6} = 24,3 \text{ o/min.} \quad (4.27)$$

Potrebna snaga koju servomotor SM2 treba proizvesti se računa prema izrazu:

$$P_{potr_SM2} = \frac{P_{i2}}{\eta_L \cdot \eta_{HD2}} = \frac{1314}{0,99 \cdot 0,73} = 1793 \text{ W,} \quad (4.28)$$

$$P_{potr_SM2} = 1793 \text{ W} < P_{SM2} = 1800 \text{ W.} \quad (4.29)$$

Potrebni moment na izlazu iz motora je jednaka:

$$T_{potr_SM2} = \frac{T_{i2}}{\eta_L \cdot \eta_{HD2} \cdot i_{HD2}}, \quad (4.30)$$

$$T_{potr_SM2} = \frac{840}{0,99 \cdot 0,74 \cdot 80} = 14,3 \text{ Nm.}$$

Izračunom potrebnog momenta motora vidimo da vrijednost ulazu unutar područja isprekidanog rada za servomotor SGMGV-20Ax2AC.

Potrebna brzina vrtnje na vratilu servomotora SM2 iznosi:

$$n_{potr_SM2} = n_{i2} \cdot i_{HD2} = 28,2 \cdot 100 = 2820 \text{ o/min} < n_{SM2} \quad (4.31)$$

Nakon provjere motora provjerava se i moment na izlazu iz prijenosnika prema sljedećem izrazu:

$$T_{HD2} = \frac{T_{i2}}{\eta_L} = \frac{840}{0,99} = 848 \text{ Nm} < T_{R,HD2} \quad (4.32)$$

Moment prijenosnika ZADOVOLJAVA.

Aksijalna sila harmonijskog prijenosnika se računa prema izrazu:

$$F_{a_{HD2}} = 2 \cdot \frac{T_{HD2}}{45 \cdot 0,00254} \cdot \mu \cdot \tan 20^\circ \quad (4.33)$$

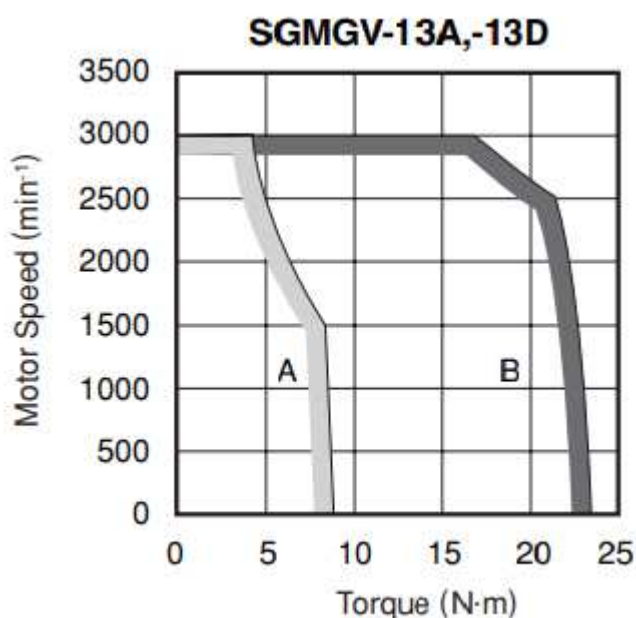
$$F_{a_{HD2}} = 2 \cdot \frac{393}{32 \cdot 0,00254} \cdot 0,07 \cdot \tan 20^\circ = 374 \text{ N} < F_{adop2}.$$

Aksijalna nosivost servomotora SGMGV-20A-A2C ZADVOLJAVA.

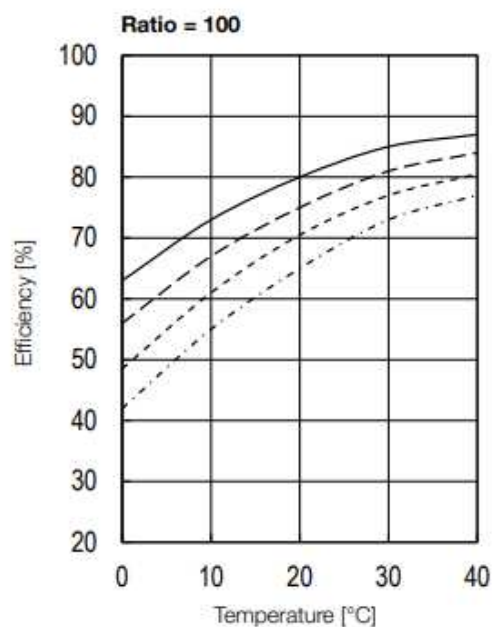
4.7 Zglob 1

Servomotor i prijenosnik koji se koriste su SGMGV-13Ax2AC odnosno CSG-32-100-2A-SP.

Stupanj djelovanja prijenosnika i karakteristika motora su prikazane sljedećim dijagramima.

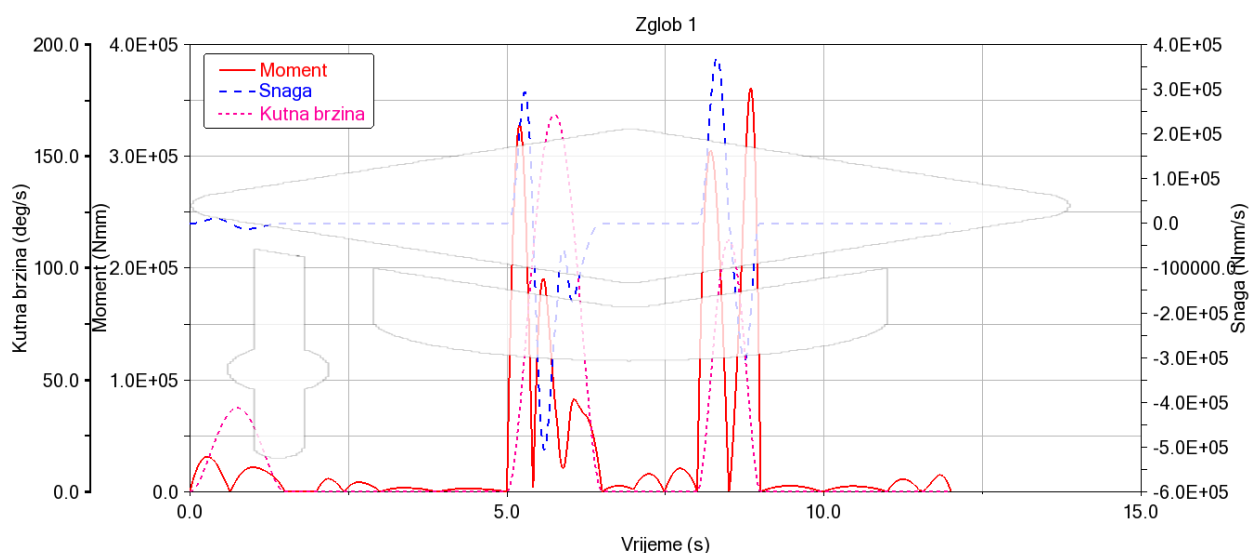


Slika 69. Karakteristika momenta i brzine vrtnje motora SGMGV-13A [23]



Slika 70. Stupanj djelovanja za harmonijski prijenosnik za prijenosni omjer 100 [24]

Vrijednosti koje se postižu u trećem zglobu su prikazane u sljedećem dijagramu.



Slika 71. Dijagram izlaznih veličina zgloba 1

Iako se zglob 1 nalazi na jednakoj udaljenosti od end effectora kao i zglob 2, vrijednosti su puno manje zbog različite osi rotacije. Os rotacije zgloba 2 je puno nepovoljnija iz razloga što

se gibanje odvija u pravcu djelovanja gravitacije. Općenito, zglobovi koji imaju gibanje u smjeru djelovanja gravitacije (zglobovi 2, 3 i 5) imaju veće opterećenje s obzirom na udaljenost od kamere od zglobova koji rotiraju oko drugih osi (zglobovi 1, 4 i 6)

Izlazne vrijednosti očitane sa slike 18 su:

$P_{i1} = 510 \text{ W}$ - snaga na izlazu iz zgloba 1,

$T_{i1} = 353 \text{ Nm}$ - moment na izlazu iz zgloba 1,

$\omega_{i1} = 169 \text{ }^\circ/\text{s}$ - kutna brzina i brzina vrtnje na izlazu iz zgloba 1,

$i_{HD1} = 100$ - prijenosni omjer prijenosnika CSG-32-100-2A-SP,

$\eta_{HD1} = 0,67$ - stupanj djelovanja harmonijskog prijenosnika CSG-32-100-2A-SP,

$\eta_L = 0,99$ - stupanj djelovanja za par valjnih ležajeva,

$P_{SM1} = 1300 \text{ W}$ - snaga motora SGMGV-13Ax2AC,

$T_{R,HD1} = 433 \text{ Nm}$ - granica za ponavljanu vršnu vrijednost momenta prijenosnika 1. zgloba,

$n_{SM1} = 3000 \text{ o/min}$ - maksimalna brzina vrtnje motora SM1,

$F_{adop1} = 343 \text{ N}$ - dopušteno aksijalno opterećenje servomotora SM1,

$\mu = 0,07$ - faktor trenja harmonijskog prijenosnika.

Brzinu vrtnje dobivamo iz izraza:

$$n_{i1} = \frac{\omega_{i1}}{6} = \frac{169}{6} = 28,2 \text{ o/min.} \quad (4.34)$$

Potrebna snaga koju servomotor SM3 treba proizvesti se računa prema izrazu:

$$P_{potr_SM1} = \frac{P_{i1}}{\eta_L \cdot \eta_{HD1}} = \frac{510}{0,99 \cdot 0,67} = 769 \text{ W,} \quad (4.35)$$

$$P_{potr_SM1} = 769 \text{ W} < P_{SM1} = 1300 \text{ W.} \quad (4.36)$$

Potrebni moment na izlazu iz motora je jednaka:

$$T_{potr_SM1} = \frac{T_{i1}}{\eta_L \cdot \eta_{HD1} \cdot i_{HD1}}, \quad (4.37)$$

$$T_{potr_SM1} = \frac{351}{0,99 \cdot 0,67 \cdot 100} = 5,29 \text{ Nm.}$$

Izračunom potrebnog momenta motora vidimo da vrijednost ulazu unutar područja kontinuiranog rada za servomotor SGMGV-13Ax2AC.

Potrebna brzina vrtnje na vratilu servomotora SM1 iznosi:

$$n_{potr_SM1} = n_{i1} \cdot i_{HD1} = 28,2 \cdot 100 = 2820 \text{ o/min} < n_{SM1} \quad (4.38)$$

Nakon provjere motora provjerava se i moment na izlazu iz prijenosnika prema sljedećem izrazu:

$$T_{HD1} = \frac{T_{i1}}{\eta_L} = \frac{351}{0,99} = 355 \text{ Nm} < T_{R_{HD1}} \quad (4.39)$$

Moment prijenosnika ZADOVOLJAVA.

Aksijalna sila harmonijskog prijenosnika se računa prema izrazu:

$$F_{a_{HD1}} = 2 \cdot \frac{T_{HD1}}{32 \cdot 0,00254} \cdot \mu \cdot \tan 20^\circ \quad (4.40)$$

$$F_{a_{HD1}} = 2 \cdot \frac{355}{32 \cdot 0,00254} \cdot 0,07 \cdot \tan 20^\circ = 222 \text{ N} < F_{adop1}$$

Aksijalna nosivost servomotora SGMGV-13AxA2C ZADVOLJAVA.

5. Linearno vođenje robotske ruke

Postavljanje šesteroosone robotske ruke na vodilice u svrhu linearnog gibanja kroz prostor danas nije ništa novo te se često može pronaći u automatiziranim tvornicama i skladištima. Dodavanje sedmog stupnja slobode gibanja u obliku translacije kroz prostor može uvelike povećati radni prostor robota. Kao i kod prethodnih zglobova, ova prednost dolazi u obzir samo ako se ispunjavaju kriteriji brzine, preciznosti a posebno sigurnosti. U nastavku će se navesti neka moguća rješenja pogona linearnog gibanja robota.

5.1 Remenski prijenos

Roboti sa sedam stupnjeva slobode gibanja koji prolaze srednje udaljenosti često koriste motore uparene sa remenskim prijenosom. To su relativno jednostavni sustavi koji koriste motorom pokretane remenice za stvaranje napetosti u remenu u svrhu naglog ubrzanja. Ipak, što se udaljenost linearnog gibanja povećava mogu se pojaviti problemi s opuštanjem remena ako sustav ne može održavati napetost duž cijele dužine. Naime, ovdje se ne radi o problemu nosivosti remenskog prijenosa već o riziku gubitka pokreta zbog podatljivosti remena [25].



Slika 72. Vodilice robota s remenskim pogonom tvrtke Macron Dynamics [26]

5.2 Kuglično vreteno

Sustav s kugličnim vretenom rješava problem vibracija koja se javljaju remenskim prijenosom. Ovakav pogon općenito radi dobro do dužina od 6 metara. Kod dužih prijenosa i većih brzina, vretena se savijaju pogotovo ako ne dobivaju dovoljno potpore od uležištenja. Pri kritičnim brzinama (funkcija promjera, cilindričnosti, poravnanja i nepodržane dužine vretena) rotacija pobuđuje prirodnu frekvenciju vretena što ograničava maksimalnu brzinu vrtnje. Zbog savijanja, vretena često moraju imati predimenzionirani promjer a dodatan problem predstavlja brtvljenje protiv nečistoća



Slika 73. Vodilice s kugličnim vretenom tvrtke Newmark Systemn inc. [27]

5.3 Linearni aktuatori

Linearni aktuatori se najčešće koriste do duljine hoda od 4 m. Većina takvih sustava također uključuje najmoderniju elektroniku, apsolutne enkodere i upravljanje pokretom za praćenje osi, čak i nakon grešaka ili gašenja. Glavna prednost linearnih aktuatora je preciznost pokreta no mana im je nosivost pa se češće koriste u mirnijim uvjetima rada. Povećanje opteretivosti linearnih aktuatora se postiže korištenjem većeg broja ionako skupih permanentnih magneta.



Slika 74. Linearni actuator [28]

5.4 Zupčanički prijenos

Ova izvedba linearnog gibanja je komercijalno najčešća. Postižu se dužine i do 15 m a kontrola ovog linearnog sedmog stupnja slobode gibanja je integrirana kao matematički spojena os unutar kontrolera robota što eliminira potrebu za dodatnim upravljačem . Preciznost se postiže

uparivanjem servomotora bez četkica s prijenosnikom. Gibanje se zatim prenosi na zupčanik i zupčastu letvu s kosim zubima. Kosi zubi se koriste zbog većeg stupnja prekrivanja što rezultira mirnijim radom.

Ovaj sustav se često koristi s površinski otvrdnutim čeličnim tračnicama koja se spajaju na sklop kotača. Navedeni sklop kotača i tračnica je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 75. Sklop kotača i čeličnih tračnica [29]

Detaljnijim pregledom tržišta ustanovljeno je da proizvođači robotskih ruku koje se koriste za snimanje u komercijalne svrhe najčešće koriste upravo rješenje sa zupčanicima. To je i logično s obzirom na prednosti i mane prethodno opisanih rješenja. Za razliku od industrijskih robota koji se pretežito nalaze na jednoj lokaciji, ovi roboti se često sele s jednog mjesta snimanja na drugo. Ovaj uvjet postavlja zahtjev za modularnim tračnicama koja će se moći u kratkom vremenu sastaviti i rastaviti a nisu ograničena duljinom.

6. Metoda konačnih elemenata

Napredak tehnologije u današnje vrijeme potiče inženjere da provode kompleksne i skupocjene projekte koji imaju nikad strože zahtjeve na pouzdanost i sigurnost. Za pravilno razumijevanje, stručnjacima su potrebni matematički modeli koji im omogućuju simuliranje složenih fizikalnih sustava. Inženjerske discipline poput mehanike deformabilnih tijela, mehanike fluida, termodinamike, elektromagnetizma itd., koriste se za opisivanje fizikalnih problema u obliku parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Danas, metoda konačnih elemenata postala je jedna od najčešće korištenih metoda za numeričko rješavanje takvih jednadžbi. Metoda se temelji na sljedećim trima principa [30]:

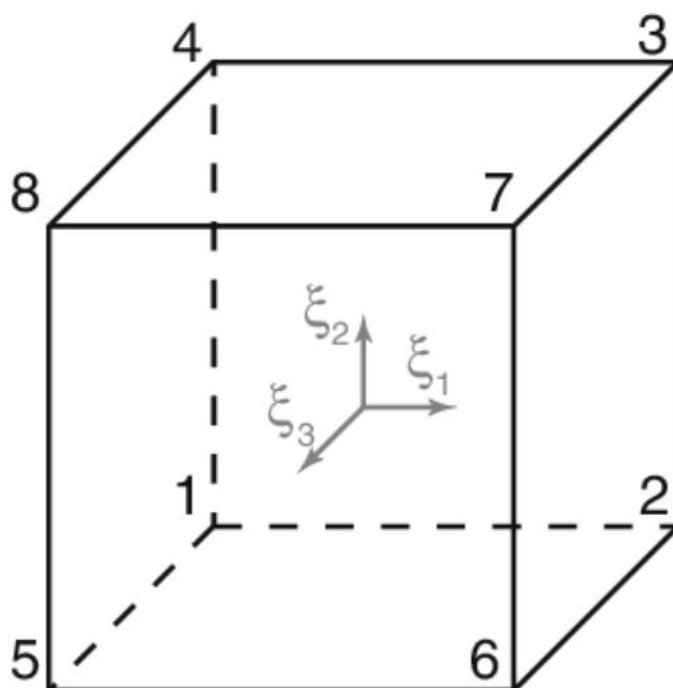
- inženjerskim disciplinama koje opisuju fizikalne zakone (parcijalne diferencijalne jednadžbe)
- numeričke metode za razradu i rješavanje algebarskih jednadžbi
- računalni alati za efikasno provođenje potrebnih izračuna na računalu

Osnovna ideja metode je diskretizacija kontinuuma koji se sastoji od beskonačnog broja stupnjeva slobode gibanja dijeljenjem na manje elemente koje zovemo konačnim elementima. Konačni elementi imaju konačan broj stupnjeva slobode gibanja a spajaju se u jednu cjelinu preko čvorova koji se nalaze na rubovima elemenata.

Metoda konačnih elemenata danas ima široku upotrebu u industrijama kao što su zrakoplovna, svemirska, automobilska, građevinska itd. Postoje brojni programski paketi koji su bazirani na metodi konačnih elemenata poput *Abaqus*-a, *Ansys*-a, *FreeFEM*-a, *COMSOL*, *NASTRAN* itd.

6.1 Heksaedarski konačni element

U svrhu provođenja topološke optimizacije potrebno je odabrati vrstu konačnog elementa s kojim će se opisati geometrija optimirane komponente. Za ovaj slučaj će se odabrati linearni heksaedarski element s reduciranom integracijom oznake C3D8R. Elementi s reduciranom integracijom (slovo R u oznaci elementa) imaju manje točaka integracije pa stoga i simulacija traje kraće. Isto tako, odabiru se linearni elementi, a ne kvadratni jer kvadratni elementi zahtijevaju više računalnih resursa i duže trajanje simulacija.



Slika 76. Linearni heksaedarski konačni element [31]

Razlog za ovaj odabir je jednostavna geometrija na kojoj će se raditi optimizacija pa će biti relativno jednostavno postaviti dobru strukturiranu mrežu elemenata s malim brojem distordiranih konačnih elemenata. Logičan izbor bi bio i odabir tetraedarskih elemenata, ali u općenitom slučaju vrijedi da rezultati koje daje strukturirana mreža linearnih heksaedarskih elemenata brže konvergira i daje preciznije rezultate od mreže načinjene od linearnih tetraedarskih elemenata [32].

7. Topološka optimizacija

Topološka optimizacija je danas već dobro poznato polje koje ne obuhvaća samo primjene vezane uz strukturalni dizajn već se koristi i u elektromagnetizmu i mehanici fluida. Dvije glavne značajke koje razlikuju topološku optimizaciju od drugih optimizacija, kao npr. optimizacije oblika (*Shape optimization*) i optimizacije veličine (*Size optimization*) su [32]:

- elastično svojstvo materijala, kao funkcija gustoće, može varirati u cijeloj domeni.
- materijal može biti trajno odstranjen iz domene dizajna.

Svrha topološke optimizacije je generiranje optimalne raspodjele materijala za zadani slučaj rubnih uvjeta i opterećenja u svrhu povećanja svojstava komponenti. Konvencionalna formulacija optimizacije topologije koristi metodu konačnih elemenata (FEM - *Finite Element Method*) za procjenu izvedbe dizajna. Dizajn je optimiziran pomoću tehnika matematičkog programiranja koje se temelje na gradijentu, kao što su algoritam kriterija optimalnosti (*Optimality criteria algorithm*) i metoda pomicanja asimptota (*Moving asymptotes*) ili algoritama koji se ne temelje na gradijentu, kao što su genetski algoritmi (*Genetic algorithms*)

7.1 Optimizacija link-a 1

Topološka optimizacija komponenti robota može imati veliki utjecaj na brzinu i nosivost robotske ruke. Cilj je optimalnom raspodjelom materijala određene komponente smanjiti masu, ali uz zadržavanje krutosti i time rasteretiti ostatak zglobova. Opravdanje za korištenje organskih struktura, koje su često proizvod topološke optimizacije, je mogućnost izrade dijelova postupkom aditivne proizvodnje. U ovom radu će se napraviti optimizacija prvog linka robotske ruke. Prvi link je komponenta sa najvećom masom ali i najvećim dimenzijama te će biti zanimljivo vidjeti kolika ušteda mase je moguća.

Optimizacija će se izvršiti u programskom paketu *Abaqus*.

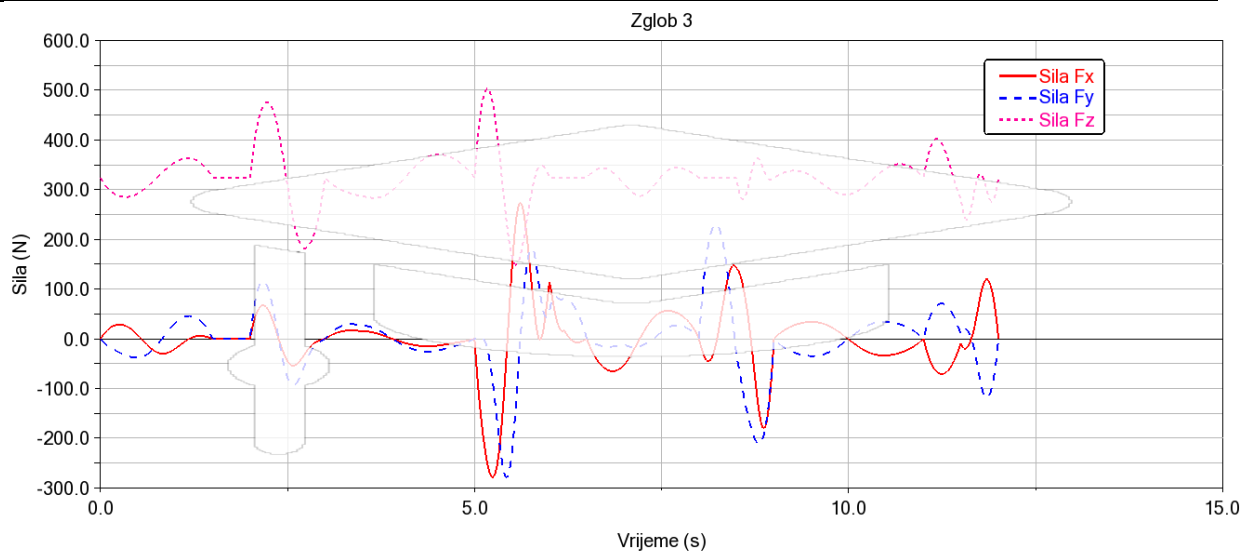
Materijal koji će se koristiti je AlSi₁₀Mg. Iako se 3D printanjem ne postižu komponente sa izotropnim svojstvima, ovdje će se zbog jednostavnosti postavljanja simulacije pretpostaviti upravo to. Uz to, svojstva materijala 3D printane komponente ovise o orijentaciji komponente u printeru, a to u ovom trenutku nije moguće znati. Svojstva legure aluminija se uzimaju sljedeća:

$E = 70 \text{ GPa}$ - modul elastičnosti,

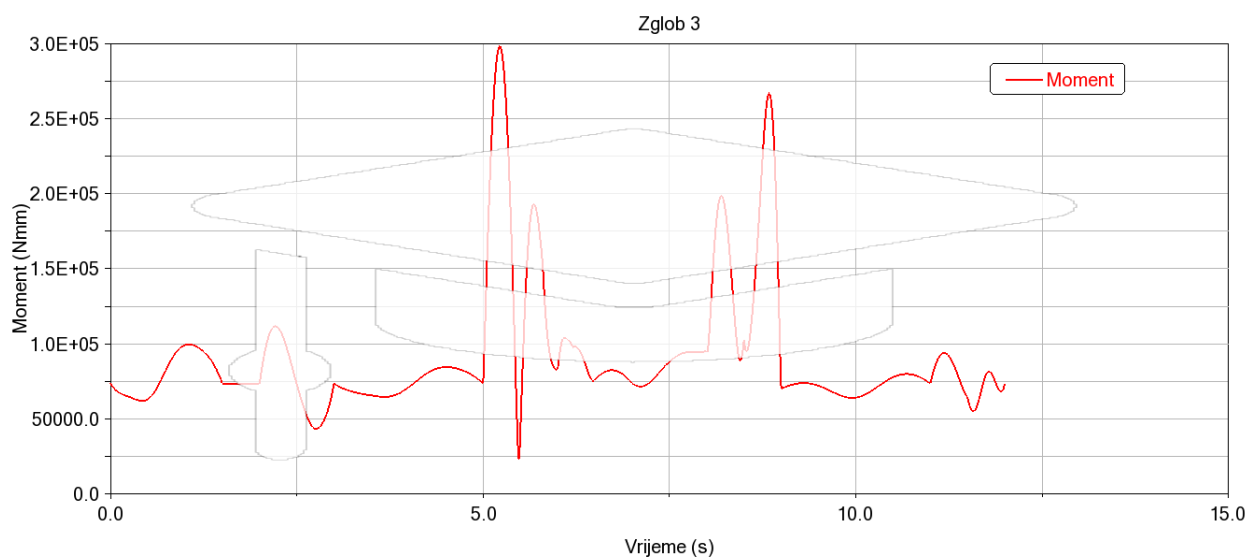
$\nu = 0,33$ - Poissonov faktor,

$R_e = 182 \text{ MPa}$ - granica tečenja nakon toplinske obrade.

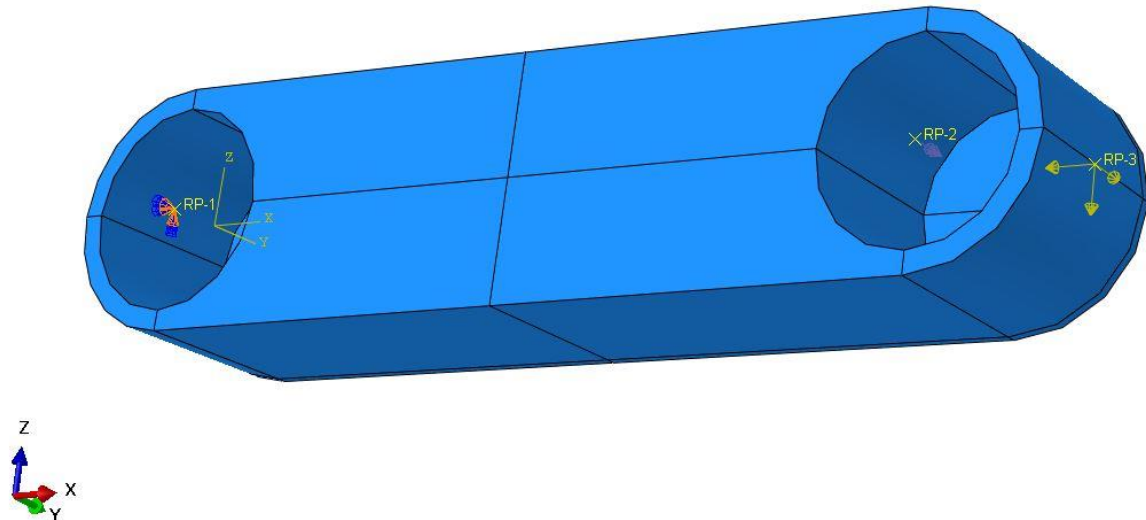
Opterećenje pojednostavljenog modela link-a 1 se uzima iz dinamičke simulacije napravljene u ADAMS-u. Zbog sigurnosti su uzeta maksimalna opterećenja iako se opterećenja kao takva ne javljaju točno u istoj sekundi. Sile su prikazane u sljedećem dijagramu,

**Slika 77. Sile u zglobu 3**

Moment u zglobu je sljedeći.

**Slika 78. Moment u zglobu 3**

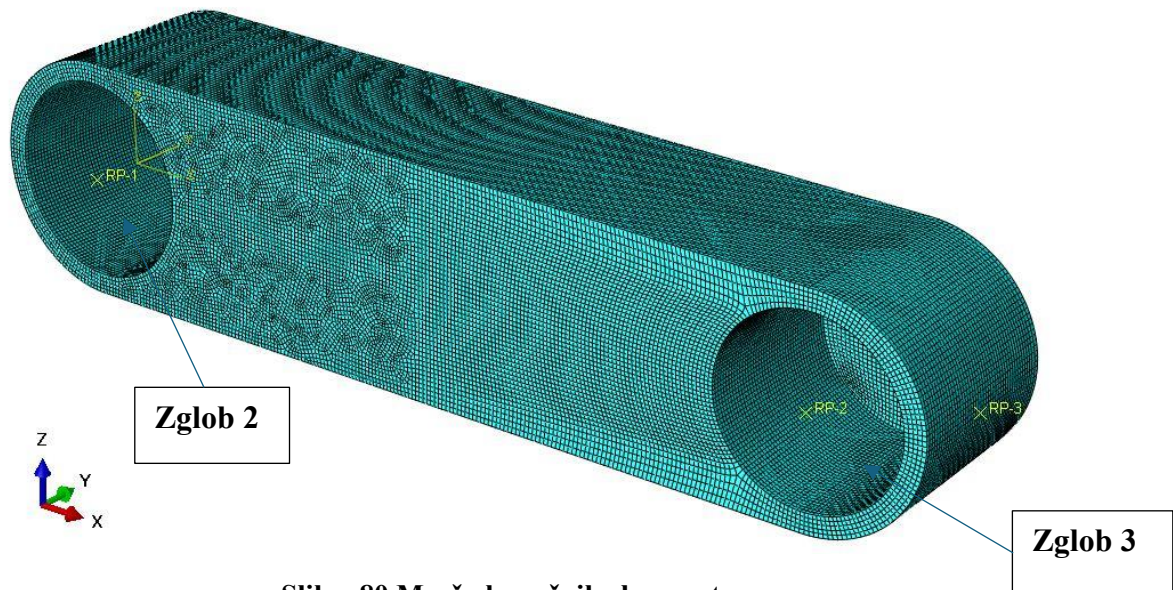
Prema ovim opterećenjima se postavljaju sile u *Abaqus*-u.



Slika 79. Opterećenje link-a 1 u Abaqus-u

U točki RP 1 je postavljen rubni uvjet gdje su zabranjeni svi pomaci i rotacije oko svih osi. U točki RP 2 je postavljen moment, a u RP 3 sile.

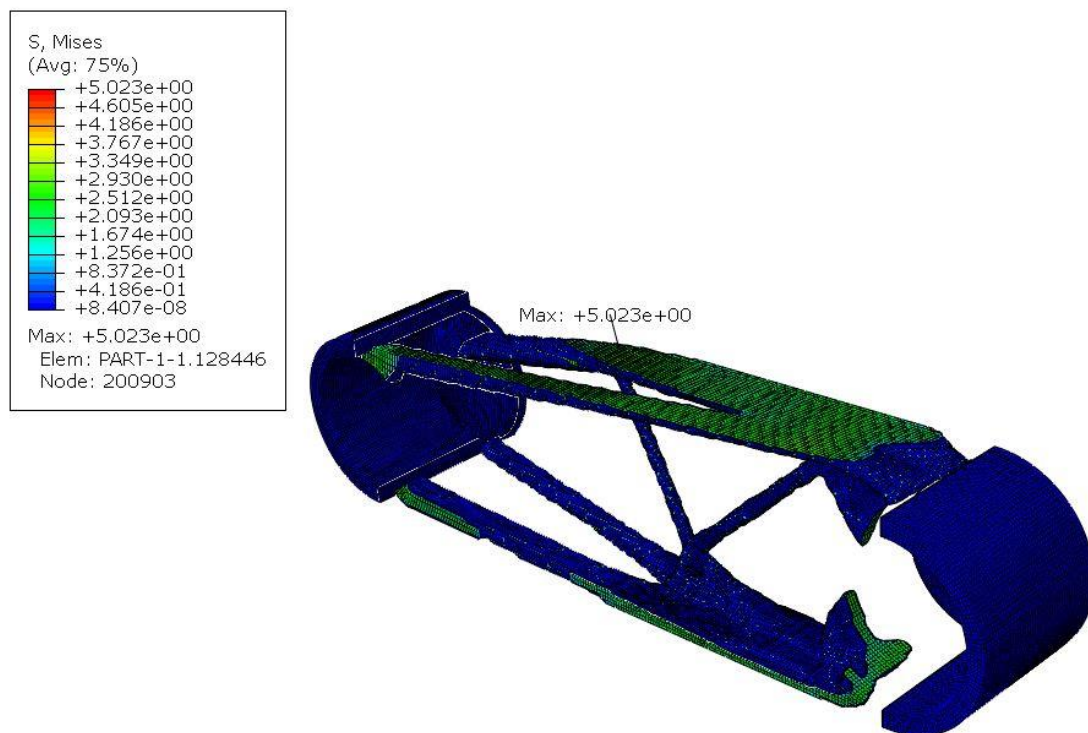
Nakon zadavanja opterećenja potrebno je, kako je navedeno ranije, generirati mrežu linearnih heksaedarskih konačnih elemenata s reduciranom integracijom.



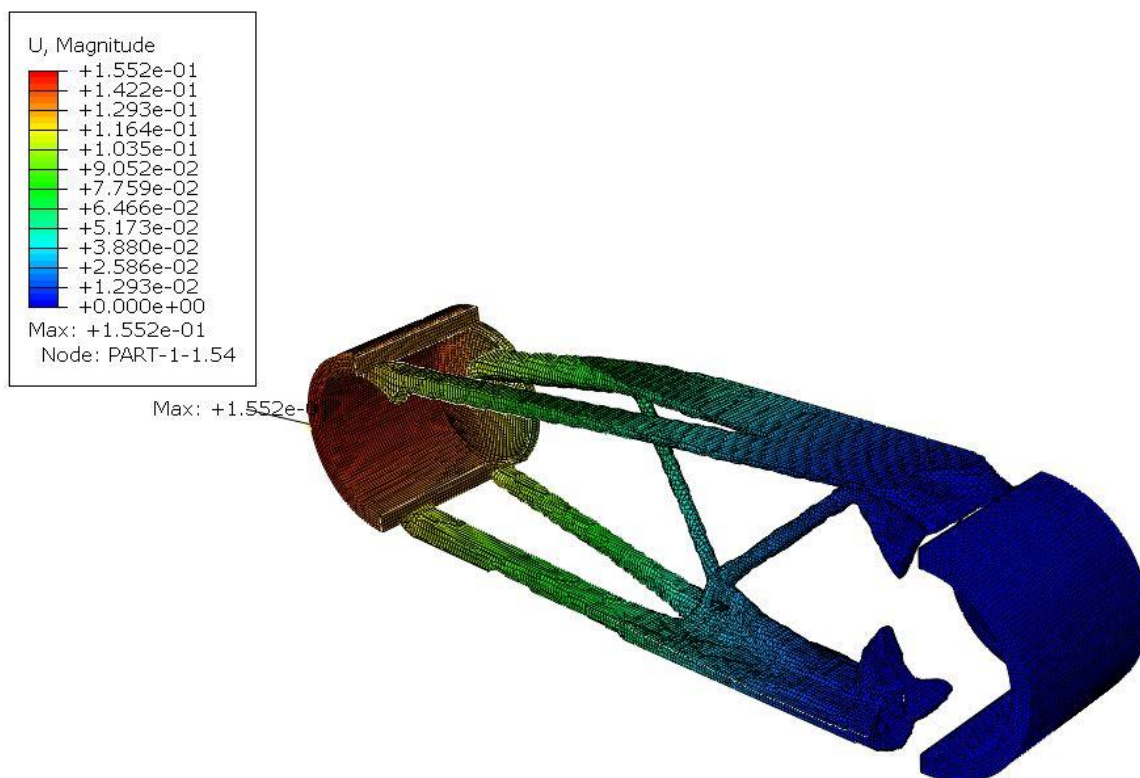
Slika. 80 Mreža konačnih elemenata

Mreža se sastoji od 450 tisuća konačnih elemenata.

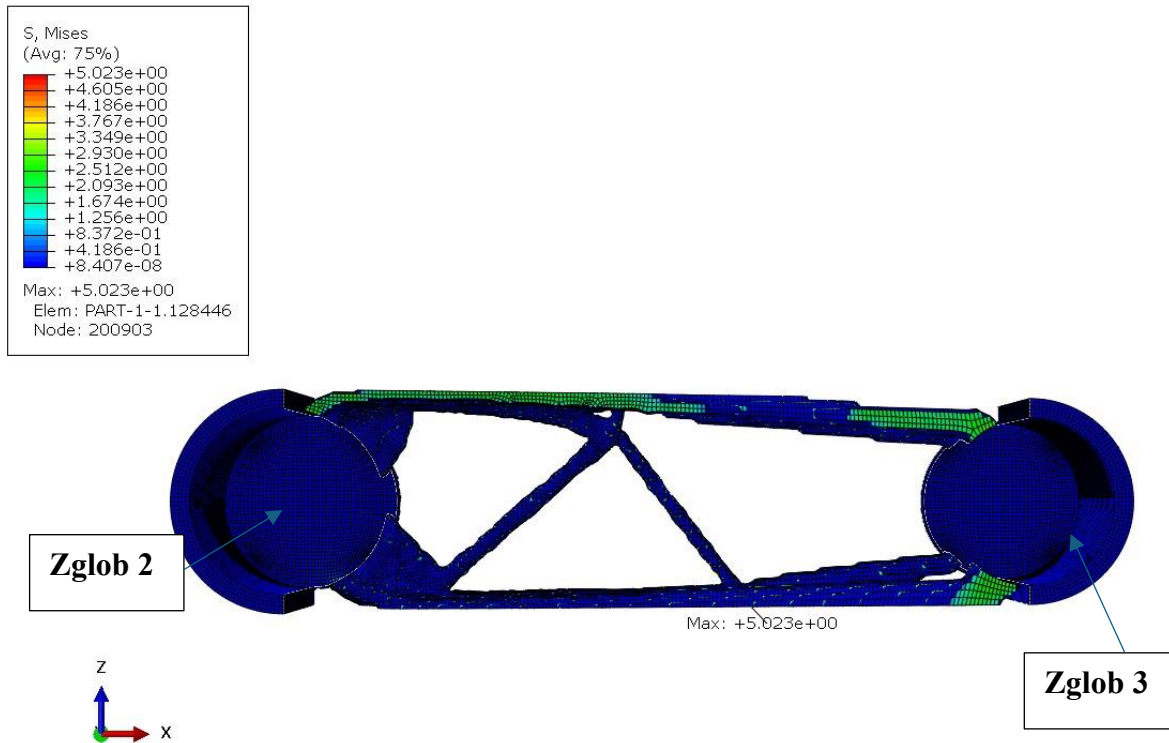
Za optimizaciju se odabire *Condition-based optimization* algoritam sa maksimalno 100 ciklusa. Cilj optimizacije je minimiziranje podatljivosti tj. energije deformiranja uz smanjenje mase i zadržavanje krutosti. U sljedećih par slika su prikazani rezultati optimirane geometrije.



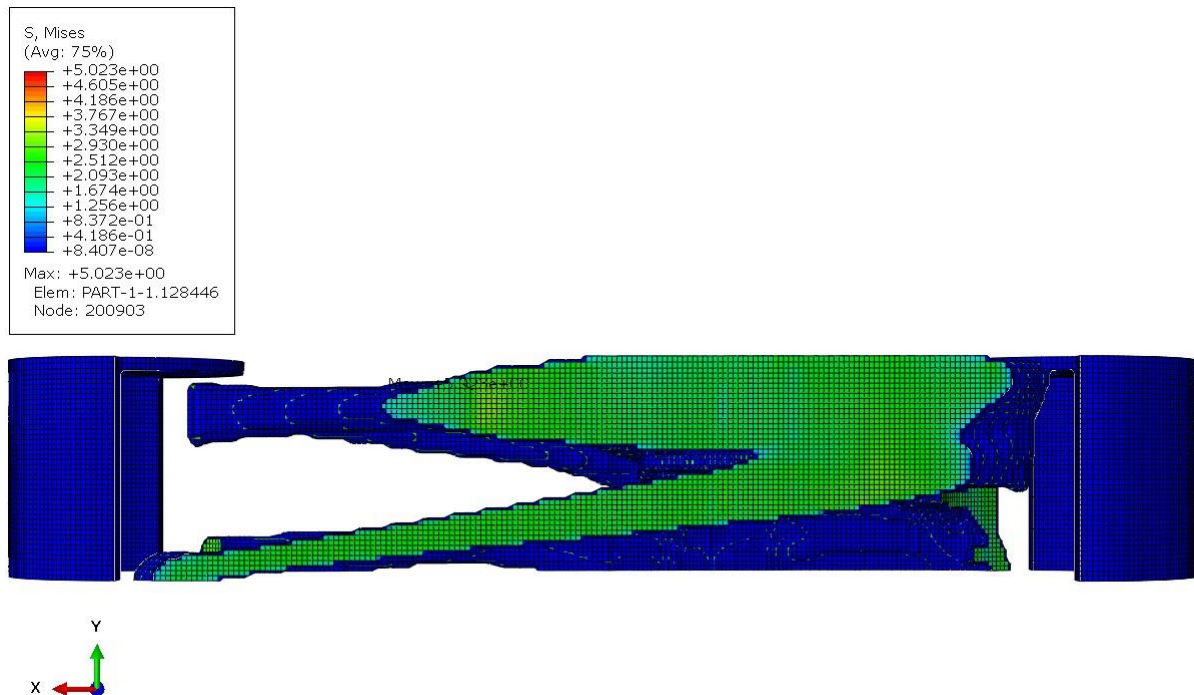
Slika 81. Topološki optimirana geometrija u izometriji s raspodelom naprezanja



Slika 82. Prikaz topološki optimirane geometrije u izometriji s raspodelom pomaka



Slika 83. Prikaz topološki optimirane geometrije u zx ravni



Slika 84. Prikaz topološki optimirane geometrije u xy ravni

Topološka optimizacija je provedena za maksimalne sile koja se javljaju u simuliranom radnom ciklusu pa je jasno da opterećenja djeluju samo u jednom od moguća dva smjera. Za gibanje u suprotnom smjeru bi se promijenio i smjer sila, što bi dovelo i do promjene u obliku optimirane geometrije. Za slučaj sila i momenta u suprotnom smjeru, geometrija bi bila približno

simetrična ovoj u odnosu na zx ravninu. Ovo znači da je prikazana geometrija optimalna samo za jedan smjer opterećenja, ali ne i za suprotni smjer. Ispravan način za rješavanje ovog problema bi bila izrada više slučajeva opterećenja (*Load cases*) u *Abaqusu*-u, na temelju kojih bi se onda provela daljnja optimizacija, no zbog opsega posla koji to podrazumijeva, to se ovdje neće provoditi

Topološkom optimizacijom link-a 1 je smanjena masa sa 17,8 kg na 13,5 kg. U slučaju detaljnije razrade optimizacije, moguće je potencijalno dodatno smanjenje mase. Nakon provođenja simulacije potrebno je urediti optimiranu geometriju u jednom od CAD-alata i zatim provesti strukturalnu simulaciju naprezanja s novom uređenom geometrijom.

8. Konačan dizajn robotske ruke

Nakon izrade pojednostavljenog modela, izrade dinamičke simulacije i provedbe proračuna snage i momenta u zglobovima, dolazimo do konačnog dizajna robotske ruke za pozicioniranje kamere.

U nastavku će se prikazati nekoliko slika dizajna robotske ruke.



Slika 85. Robotska ruka u početnom položaju



Slika 86. Robotska ruka u horizontalnom položaju



Slika 87. Robotska ruka u vertikalnom položaju



Slika 88. Robotska ruka s prikazanim pogonima u zglobovima

Robotska ruka se nalazi na postolju koje stoji na nogama podesive visine. Dovoljnim smanjenjem visine nogu, robot s postoljem se oslanja na kotačiće, koji služe za vožnju robota do pozicije na kojoj će biti tijekom snimanja. Robot ne smije biti na kotačima prilikom snimanja, a potrebno je dodati i utege u postolje kako se robotska ruke ne bi prevrnulo uslijed gibanja.

Sljedeća tablica pokazuje specifikacije robotske ruke koje su dobivene simulacijom radnog ciklusa. Ovo potencijalno nisu maksimalni iznosi jer se nisu obuhvatile sve mogućnosti gibanja. Rezultati vrijede za nošenje sklopa kamere od 12 kg. Povećanjem ili smanjenjem težine sklopa se mijenjaju i karakteristike robota.

Tablica 9. Karakteristike konstruirane robotske ruke

Karakteristike robotske ruke	
Nosivost	12 kg
Dohvat	1,998 m
Masa robotske ruke	104 kg
Masa robotske ruke s postoljem	292 kg
Najviši položaj kamere	3,2 m
1. zglob - brzina rotacije	169 °/s
2. zglob - brzina rotacije	146 °/s
3. zglob - brzina rotacije	169 °/s
4. zglob - brzina rotacije	206 °/s
5. zglob - brzina rotacije	228 °/s
6. zglob - brzina rotacije	420 °/s

Usporedbom robotske ruke konstruirane u ovom diplomskom radu s onima na tržištu, možemo vidjeti da su karakteristike ovog robota ipak skromnije što je bilo i za očekivati s obzirom na opseg koji podrazumijeva diplomski rad. Provođenjem dodatnih iteracija, i iskorištavanjem punog potencijala servomotora i harmonijskih prijenosnika, moguće je postići i bolje karakteristike robota.

9. ZAKLJUČAK

Ideja ovog rada je bila razvoj i konstrukcija robotske ruke koja će imati karakteristike specifične za potrebe snimanja zahtjevnih snimaka, poput niske mase, velikih ubrzanja, velikih brzina itd. Bitna stavka prilikom konstruiranja robota je izrada simulacija, jer pravilno postavljena simulacija predstavlja dobar temelj za konstrukcijsku razradu. I bez provođenja više iteracija u svrhu postizanja optimalnih karakteristika, simulacije dinamike gibanja su se ispostavile dosta zahtjevnima. Glavni razlog tome je veliki broj mogućih kombinacija gibanja, koje je teško predvidjeti zbog velikog broja gibajućih elemenata. Bitan aspekt konstrukcije je ispravan odabir ključnih komponenti robota kao što su elektromotori i prijenosnici. Upravo iz tog razloga, napravljena je opširnija analiza često korištenih pogonskih elemenata robota. U radu je stavljen naglasak na konstrukcijsku izvedbu, a mogućnosti 3D printanja i topološke optimizacije nisu detaljno razrađene zbog opsega diplomskog rada. Ostavljen je prostor da se nekim idućim radom dublje zagrebe u problematiku topološkog optimiranja komponenti robota i njihove realizacije 3D printanjem. Bilo bi zanimljivo vidjeti, do kojih granica se može ići s optimizacijom budući da se i ovdje pokazalo moguće znatno smanjenje mase robota. Također, ukratko je opisana i mogućnost linearnog gibanja robota kroz prostor uz pomoć vodilica. Ovo rješenje drastično povećava radni prostor robota pa je i ovo korisna tema za neka daljnja razmatranja. Na kraju rada, dane su postignute karakteristike robotske ruke koje su ipak skromnije od onih koje se javljaju na postojećim proizvodima na tržištu. Ovo je očekivano s obzirom na to da se radi o iznimno kompleksnom sustavu koji je obrađen u okvirima diplomskog rada. Unatoč tome, postignute karakteristike su dovoljne za korištenje robota u navedene svrhe što je i bio cilj ovog zadatka. Izrada ovog rada je zahtijevala znanja iz različitih područja strojarstva, ali i određenu dozu kreativnosti prilikom koncipiranja i detaljiranja konstrukcije, što daje osjećaj zadovoljstva na kraju ovakvog projekta.

LITERATURA

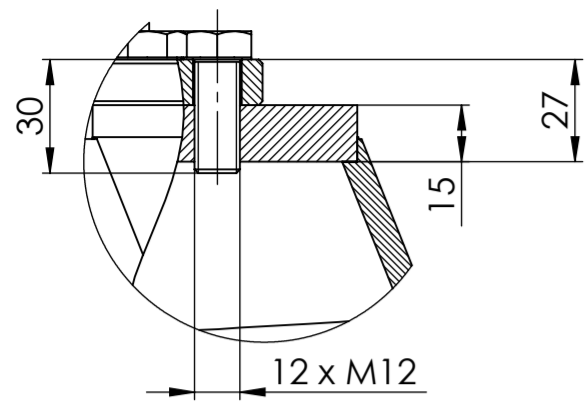
- [1] »Brewminate: A Bold Blend Of News and Ideas,« [Mrežno]. Available: <https://brewminate.com/automata-the-long-history-of-robots-in-the-ancient-medieval-and-modern-worlds/>. [Pokušaj pristupa 08. 03. 2024.].
- [2] »The Economist,« [Mrežno]. Available: <https://www.economist.com/prospero/2021/01/22/rur-foreshadowed-fears-about-artificial-intelligence>. [Pokušaj pristupa 08. 03. 2024.].
- [3] »Wikipedija,« [Mrežno]. Available: https://hr.wikipedia.org/wiki/Tri_zakona_robotike. [Pokušaj pristupa 08. 03. 2024.].
- [4] »Robots Guide,« [Mrežno]. Available: <https://robotsguide.com/robots/unimate>. [Pokušaj pristupa 08. 03. 2024.].
- [5] »The Atlantic,« [Mrežno]. Available: <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2011/08/unimate-robot-on-johnny-carsons-tonight-show-1966/469779/>. [Pokušaj pristupa 08. 03. 2024.].
- [6] Z. Domitran, »Predavanja iz kolegija "Konstrukcijski elementi robota«.
- [7] »Metron Automation,« [Mrežno]. Available: <https://metron.ba/kolaborativni-roboti/>. [Pokušaj pristupa 09. 03. 2024.].
- [8] »New World Designs,« [Mrežno]. Available: <https://www.newworlddesigns.co.uk/creating-the-matrix-bullet-time-effect/>. [Pokušaj pristupa 09. 03. 2024.].
- [9] »Esquire,« [Mrežno]. Available: <https://www.esquire.com/entertainment/movies/g26990672/the-matrix-behind-the-scenes-photos/>. [Pokušaj pristupa 09. 03. 2024.].
- [10] »SISU Cinema Robotics,« [Mrežno]. Available: <https://www.sisucinemarobotics.com/>. [Pokušaj pristupa 09. 03. 2024.].
- [11] »Mark Roberts Motion Control,« [Mrežno]. Available: <https://www.mrmoco.com/motion-control/bolt/>. [Pokušaj pristupa 18. 03. 2024.].
- [12] »Motorized Precision,« [Mrežno]. Available: <https://www.motorizedprecision.com/mia>. [Pokušaj pristupa 18. 03. 2024.].
- [13] »Camerabotics,« [Mrežno]. Available: <https://camerabotics.com/crx1810/>. [Pokušaj pristupa 20. 03. 2024.].
- [14] »Rocket Lab,« [Mrežno]. Available: <https://www.rocketlab.hu/rocketcinemarobot>. [Pokušaj pristupa 22. 03. 2024.].
- [15] B. D. Y. J. M. H. J. A. M. T. A. S. T. M. P. John H. Martin, »3D printing of high-strength aluminium alloys,« *Nature*, 21. 09. 2017..
- [16] »Protolabs Network,« [Mrežno]. Available: <https://www.hubs.com/guides/metal-3d-printing/>. [Pokušaj pristupa 30. 03. 2024.].
- [17] »Star Rapid,« [Mrežno]. Available: <https://www.starrapid.com/blog/the-top-7-design-tips-for-3d-metal-printing/>. [Pokušaj pristupa 30. 03. 2024.].
- [18] I. Galić, »Predavanja iz kolegija "Mehaničke konstrukcije"«.
- [19] »ISL Products,« [Mrežno]. Available: <https://islproducts.com/design-note/servo-motor-fundamentals/>. [Pokušaj pristupa 05. 04. 2024.].

- [20] »Kollmorgen,« [Mrežno]. Available: <https://www.kollmorgen.com/en-us/blogs/how-servo-motors-work>. [Pokušaj pristupa 05. 04. 2024.].
- [21] G. Guajardo, »Stepper vs. Servo: Which is Better Served with My Electric Cylinder?,« 8., 8., 2012..
- [22] H. Gill, »Stepper Motor or Servo Motor: Which Should It Be?«.
- [23] »Yaskawa,« [Mrežno]. Available: <https://www.yaskawa.com/delegate/getAttachment?documentId=YEA-KAEPS80000042&cmd=documents&openNewTab=true&documentName=YEA-KAEPS80000042K.pdf>. [Pokušaj pristupa 15. 04. 2024.].
- [24] »Harmonic Drive,« [Mrežno]. Available: https://harmonicdrive.de/fileadmin/Downloads/Getriebe_Katalog/Harmonic_Drive_Gears_EN_1053522.pdf?_gl=1*1j5i1kd*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjwncWvBhD_ARIsAEb2HW-9ZUSf5LLM1bM7iM_BH-9jd_ZQZXA3GzADUDZqBpLvG_rqK4dVI8EaAnfsEALw_wcB. [Pokušaj pristupa 20. 04. 2024.].
- [25] L. Eitel, »Linear Motion Tips,« [Mrežno]. Available: <https://www.linearmotiontips.com/designing-linear-motion-tracks-robotic-positioning/>. [Pokušaj pristupa 29. 04. 2024.].
- [26] »Macron Dynamics,« [Mrežno]. Available: <https://www.macrodynamics.com/products/mra-rtu-0/>. [Pokušaj pristupa 25. 04. 2024.].
- [27] »Newmark Systems,« [Mrežno]. Available: <https://www.newmarksystems.com/linear-positioners/nb8-series-linear-stage/>. [Pokušaj pristupa 26. 04. 2024.].
- [28] »Newmark Systems,« [Mrežno]. Available: <https://www.newmarksystems.com/linear-positioners/lms-series-linear-motor-stage/>. [Pokušaj pristupa 26. 04. 2024.].
- [29] »Rollon,« [Mrežno]. Available: <https://www.rollon.com/usa/en/family/linear-guides/miniroller-rail/>. [Pokušaj pristupa 26. 04. 2024.].
- [30] G. T. E. L. Gouri Dhatt, Finite Element Method.
- [31] A. T. Kai Liu, »ResearchGate,« 19. 03. 2014.. [Mrežno]. Available: https://www.researchgate.net/publication/271414552_An_efficient_3D_topology_optimization_code_written_in_Matlab. [Pokušaj pristupa 30. 04. 2024.].
- [32] Y. H. X. G. J. D. D. Z. D. P. Teseo Schneider, »A Large-Scale Comparison of Tetrahedral and Hexahedral Elements for,« *ACM*, 03. 2022..
- [33] M. V. C. A. R. A. P. M. Osvaldo M. Querin, Topology Design Methods for Structural Optimisation.

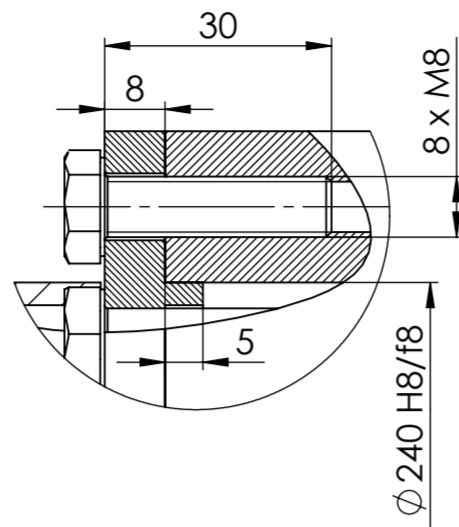
PRILOZI

I. Tehnička dokumentacija

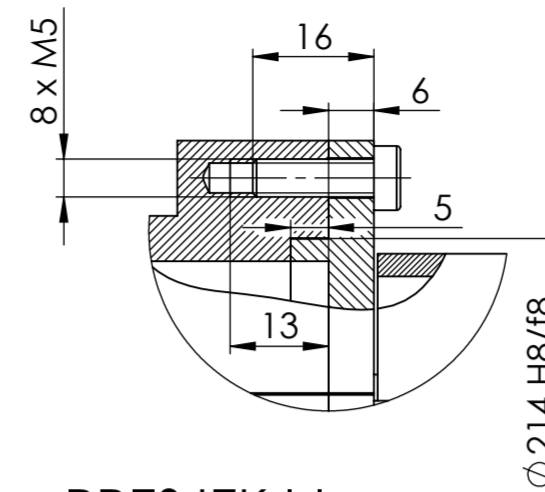
DETALJ A
MJERILO 2:1



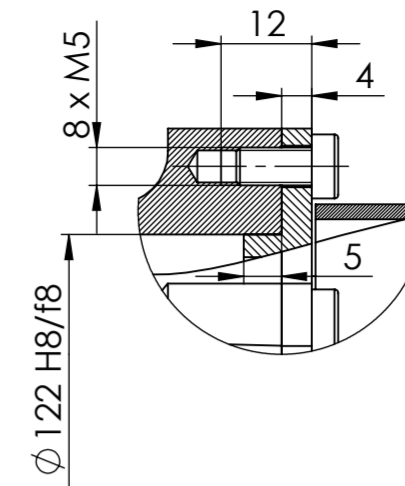
DETAIL B
MJERILO 5:1



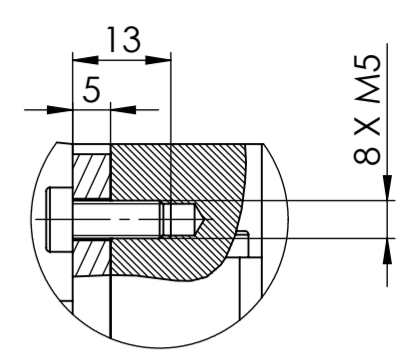
DETALJ C
MJERILO 5:1



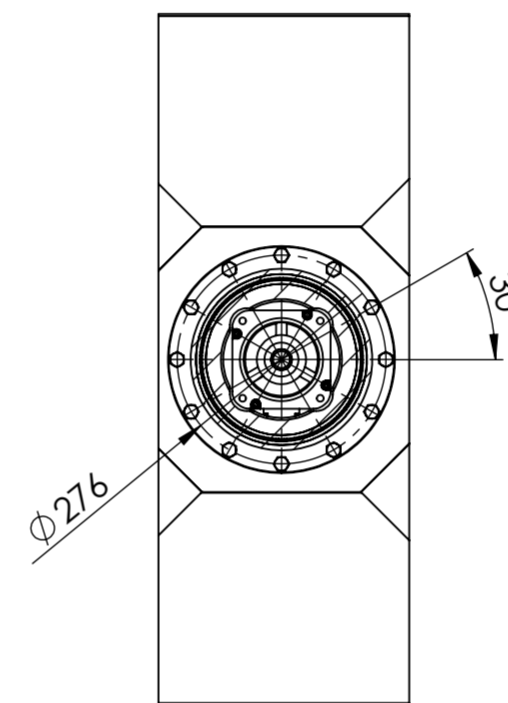
DETALJ D
MJERILO 5:1



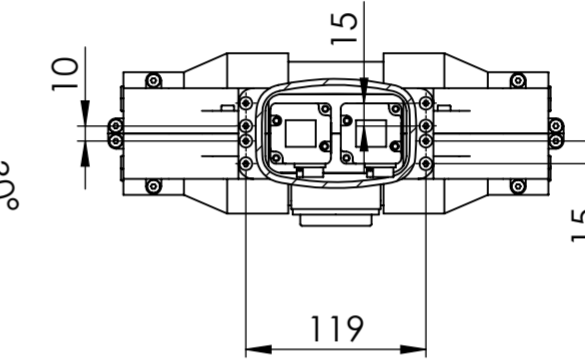
DETALJ E
MJERILO 1:1



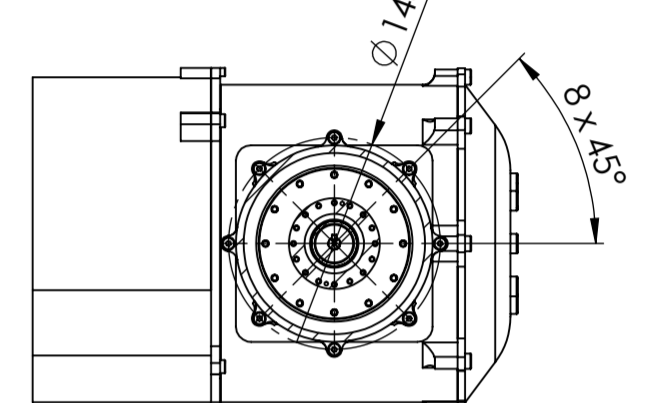
PRESJEK I-I
MJERILO 1:1



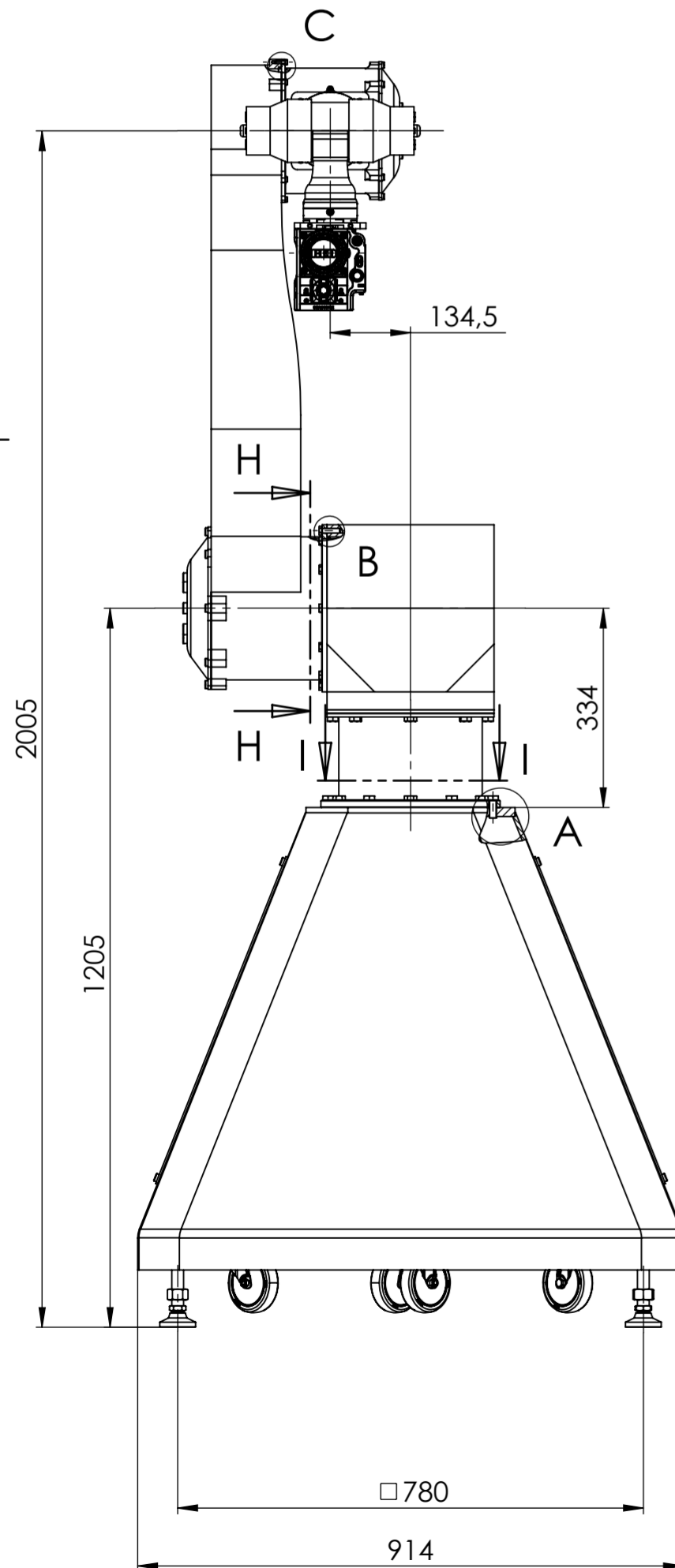
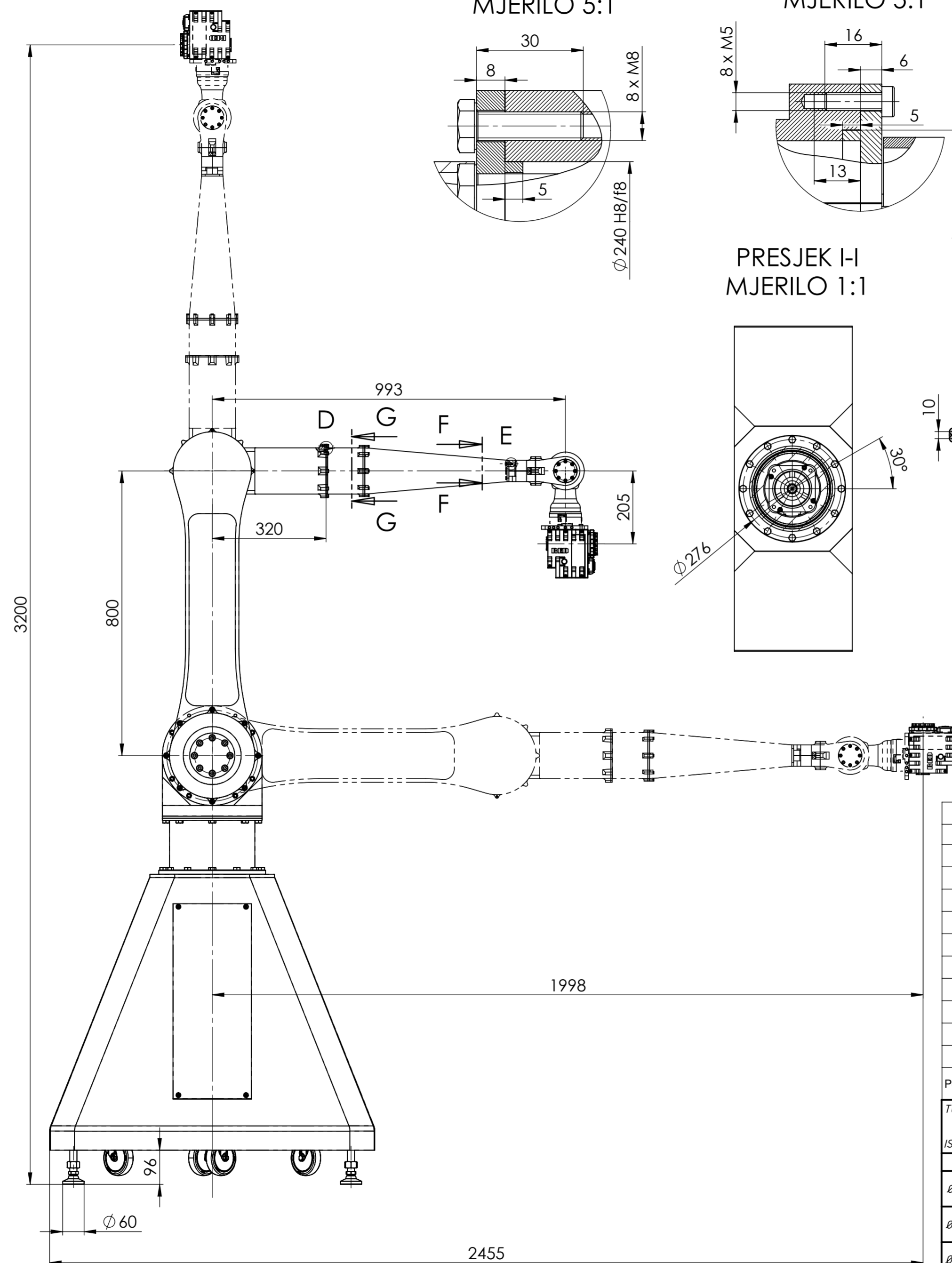
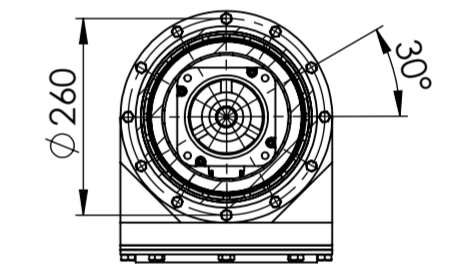
PRESJEK F-F
MJERILO 2:1



PRESJEK G-G
MJERILO 2:1



PRESJEK H-H
MJERILO 1:1



Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije	Masa (kg)
12	Vijak M6x20	4	DIN 7984	12.9	n7a	
11	Kamera	1	n/a	n/a	n/a	12
10	Vijak M5x12	8	DIN 7984	12.9	n/a	2.99
9	Vijak M5x10	8	DIN 7984	12.9	n/a	2.71
8	Vijak M5x16	8	DIN 7984	12.9	n/a	3.57
7	Zglob 5 i 6	1	n/a	n/a	319x301x168	4,97
6	Zglob 4	1	n/a	n/a	603xx140x140	4,8
5	Zglob 3	1	n/a	n/a	440x313x240	18,8
4	Zglob 2	1	n/a	n/a	1060x356x280	37,2
3	Vijak M12x30	12	DIN EN 24017	12.9	n/a	
2	Zglob 1	1	n/a	n/a	618x300x300	34,4
1	Postolje	1	n/a	n/a	914x914x775	187

TOLERANCIJE SLOBODNIH MJERA ISO 2768-T1

TOLERANCIJE OBLIKA I POLOŽAJA ISO 2768-T2

Niti jedan dio ovog nacrtja ne smije se umnožiti, pohraniti ili prenijeti u bilo kakvom obliku ili na bilo koji način bez pismenog dopuštenja vlasnika.

FSB Zagreb

ISO-TOL.	Datum	Ime i prezime	Potpis
Ø122 H8/f8	Konstruirao 09.05.2024.	David Kremenjaš	
	Crtao 09.05.2024.	David Kremenjaš	
Ø214 H8/f8	Pregledao 09.05.2024.	Dragan Žeželj	
	Odobrio 09.05.2024.	Dragan Žeželj	
Ø240 h8/f8	Materijal:	Masa: 292 kg	
	Napomena:		

Mjerilo: 1:10

R. N. broj: n/a

Program broj: n/a

Naziv: Robotska ruka za pozicioniranje video kamere

Sklopni crtež:

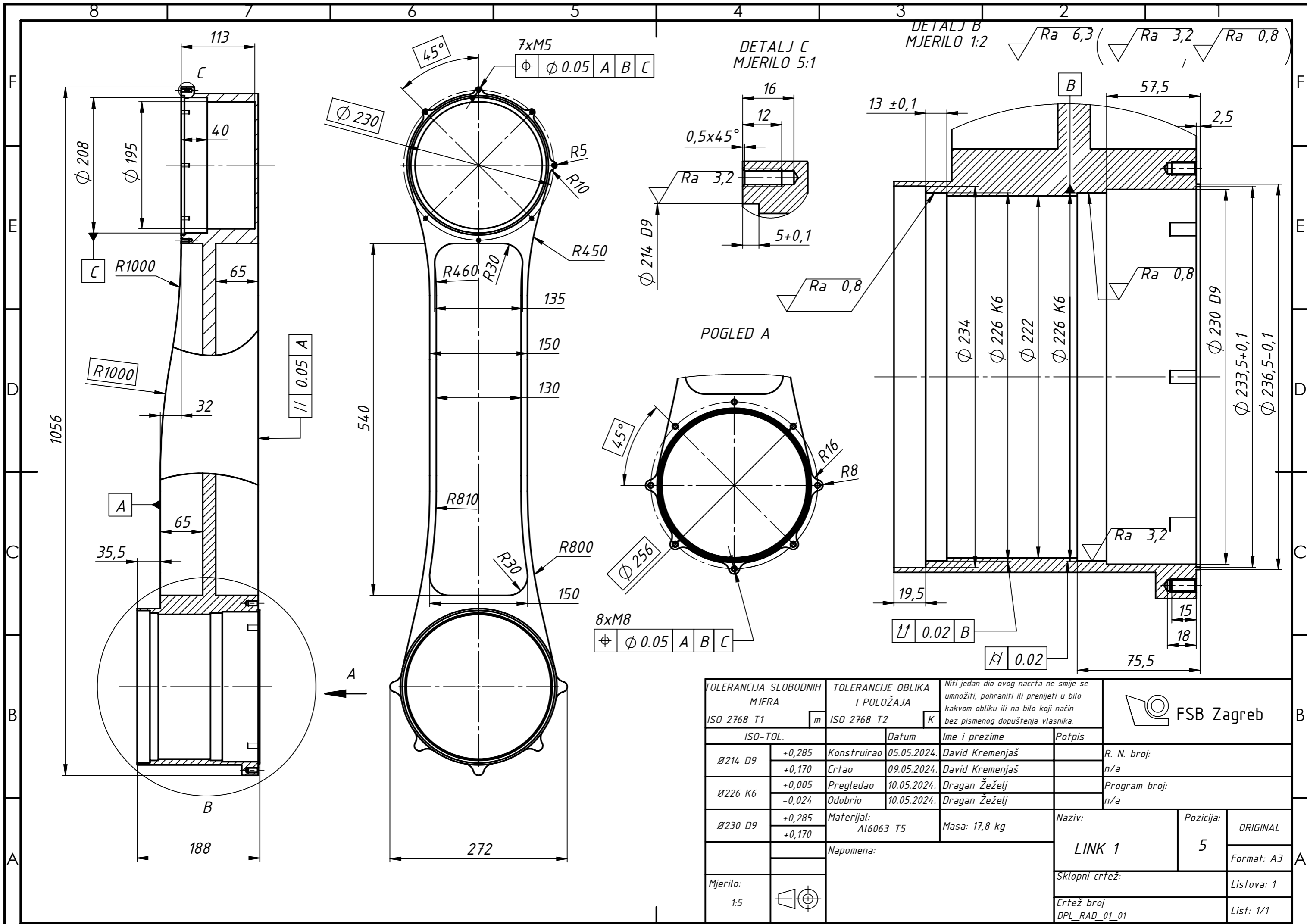
Crtež broj: DPL_RAD_01

Pozicija: ORIGINAL

Format: A2

Listova: 1

List: 1/1



TOLERANCIJA SLOBODNIH MJERA		TOLERANCIJE OBLIKA I POLOŽAJA		Niti jedan dio ovog nacрта ne smije se umnožiti, pohraniti ili prenijeti u bilo kakvom obliku ili na bilo koji način bez pismenog dopuštenja vlasnika.		FSB Zagreb	
ISO 2768-T1		ISO 2768-T2		Datum	Ime i prezime	Potpis	
$\emptyset 214$ D9	+0,285	Konstruirao	05.05.2024.	David Kremenjaš	R. N. broj:		
	+0,170	Crtao	09.05.2024.	David Kremenjaš	n/a		
$\emptyset 226$ K6	+0,005	Pregledao	10.05.2024.	Dragan Žeželj	Program broj:		
	-0,024	Odobrio	10.05.2024.	Dragan Žeželj	n/a		
$\emptyset 230$ D9	+0,285	Materijal:	Al6063-T5	Masa: 17,8 kg	Naziv:		Pozicija:
	+0,170	Napomena:		LINK 1		5	ORIGINAL
Mjerilo:	1:5			Sklopni crtež:		Listova: 1	
				Crtež broj:		List: 1/1	
				DPL_RAD_01_01			