

Razvoj koncepta robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga

Uremović, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:235:576093>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Uremović

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Bojan Jerbić, dipl. ing.

Dr. sc. Bojan Šekoranja, mag. ing.

Student:

Domagoj Uremović

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem profesoru Jerbiću za zadatak iz vrlo atraktivnog područja i na cjelokupnoj pomoći prilikom izrade diplomskog rada, potom magistru Šekoranji na svim konzultacijama i savjetima, mojoj obitelji za podršku tijekom studija i mojoj dragoj Stelli.

Ovim putem želio bih napomenuti da sam, u slučaju daljnjeg razvoja projekta, na raspolaganju za bilo koji oblik suradnje.

Domagoj Uremović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DOMAGOJ UREMOVIĆ** Mat. br.: **0035194878**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **RAZVOJ KONCEPTA ROBOTSKOG ALATA ZA ROBOTSKU BIOPSIJU TUMORA MOZGA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF A ROBOTIC TOOL FOR BRAIN TUMOR BIOPSY**

Opis zadatka:

Cilj rada je analiza i razvoj koncepta robotskog alata za automatsko umetanje biopsijske sonde u kranijalni prostor pacijenta. Polazište za razvoj alata trebaju biti već postojeći instrumenti iz kliničke prakse. Prilikom razvoja koncepta voditi računa o specifičnim kliničkim zahtjevima, kao što su: zahtjevi točnosti, prostorni smještaj, zahtjevi u pogledu sterilizacije operativnih elemenata, prihvat standardnih instrumenata, modularnost, sukladnost s ostalom kirurškom opremom itd.

Razvijeni sustav treba osigurati sljedeće funkcionalnosti:

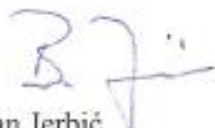
- minimalan translacijski pomak od 120mm u smjeru biopsije (proces odsjecanja tkiva izvodi kirurg ili robot),
- mogućnost mjerenja sile u aksijalnom smjeru,
- mogućnost sterilizacije,
- sučelje za biopsijske sonde promjera 2,6 mm ($\pm 0,2$ mm),
- maksimalna dopuštena masa alata: 5 kg,
- osjetljivost mjerenja sile do 0,05 N,
- linearna brzina minimalno u rasponu od 0,1 do 5 mm/s.

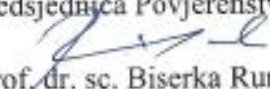
U radu navesti korištene izvore i literaturu te eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:
28. studenog 2019.

Predviđeni datum obrane:
04. prosinca 2019.
05. prosinca 2019.
06. prosinca 2019.

Zadatak zadao: 
prof. dr. sc. Bojan Jerbić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IX
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	X
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA.....	XI
SAŽETAK.....	XIII
SUMMARY	XIV
1. Uvod.....	1
2. Povijest robotike u medicini	2
2.1. Minimalno invazivni postupci	3
2.2. Roboti u primjeni.....	4
2.2.1. Roboti u neurokirurgiji.....	9
2.3. Prednosti i nedostaci.....	16
2.4. Medicinski roboti u Hrvatskoj.....	17
3. RONNA	18
3.1. RONNA G1 – G3	19
3.2. RONNA G4	20
4. Analiza funkcionalnosti alata za robotsku biopsiju	22
5. Konceptualna rješenja specifičnih zadataka i problematika robotskog alata.....	24
5.1. Linearni pogon, pomak i vođenje	26
5.1.1. Odabir kugličnog navojnog vretena	29
5.1.2. Sustav za linearno vođenje.....	39
5.1.3. Linearni aktuatori	40
5.2. Veza s robotskom rukom.....	43

5.2.1.	Statička analiza naprezanja	48
5.3.	Manipulacija i umetanje sonde	56
5.3.1.	Prednje uležištenje.....	57
5.3.2.	Stražnje uležištenje.....	62
5.4.	Mjerenje sile	74
5.5.	Vakuum	78
5.6.	Odsijecanje tkiva	83
5.7.	Materijali	93
6.	Sklopne varijante kao međukoraci u procesu razvoja konceptualnog rješenja.....	95
6.1.	Prva varijanta koncepta robotskog alata	95
6.2.	Druga varijanta koncepta robotskog alata	98
6.3.	Treća varijanta koncepta robotskog alata	100
6.4.	Četvrta varijanta koncepta robotskog alata	102
7.	Analiza rješenja.....	108
7.1.	Tolerancijska analiza četvrte varijante sklopa.....	108
7.2.	Analiza mase.....	118
7.3.	Statička analiza naprezanja.....	120
8.	Zaključak.....	122
LITERATURA.....		124
PRILOZI.....		130

POPIS SLIKA

Slika 1. Prva postava <i>Da Vinci</i> sustav [3]	3
Slika 2. Prva postava <i>Zeus</i> sustava [3]	3
Slika 3. <i>Da Vinci</i> - moderna verzija [6].....	5
Slika 4. <i>Monarch</i> [10]	6
Slika 5. <i>Mazor X</i>	7
Slika 6. <i>Flex Robotic System</i> [13]	8
Slika 7. <i>TCAT</i> [17]	9
Slika 8. <i>SurgiScope</i> [19].....	10
Slika 9. <i>NeuroMate</i> sustav (a) ISS-jeva starija inačica (b) Novi dizajn tvrtke <i>Renishaw</i> [23]	11
Slika 10. <i>ROSA</i> [29]	15
Slika 11. Povijesni razvoj <i>RONNA G⁴</i> sustava: <i>RONNA G1</i> (2010), <i>RONNA G2</i> (2011), <i>RONNA G3</i> (2016), <i>RONNA G⁴</i> (2017) [33].....	20
Slika 12. Trenutna verzija <i>RONNA G4</i> sustava u dvoručnoj konfiguraciji.....	21
Slika 13. Prva konceptualna ideja	24
Slika 14. Druga konceptualna ideja.....	25
Slika 15. Primjer kugličnog navojnog vretena [36]	29
Slika 16. Preporuka proizvođača za odabir razreda kvalitete kod odabira vretena.....	31
Slika 17. Prikaz odabira razreda točnosti za vreteno.....	31
Slika 18. Maksimalna greška i fluktuacija vretena.....	31
Slika 19. Odabir oznake zračnosti vretena	31
Slika 20. Odabir mogućih promjera vretena	32
Slika 21. Prikaz standardnog koraka navoja za odabrani promjer vretena	32
Slika 22. 2D prikaz odabranog vretena i pripadajuća tablica sa specifikacijama	37
Slika 23. Izgled i način vezanja spojke matice i radnog stola alata [35].....	39
Slika 24. Linearne vodilice a) Okruglog profila b) Profilne vodilice s klizačima [36].....	40
Slika 25. Primjer linearnog aktuatora tvrtke <i>HIWIN</i> [37]	40
Slika 26. Specifikacije i tehnička dokumentacija odabranog linearnog aktuatora <i>RCP3-SA2BR</i> ..	42
Slika 27. <i>Schunkova</i> prirubnica <i>HWS 040</i> a) <i>HWK 40 "Y"</i> b) <i>HWK 40 "X"</i>	43
Slika 28. Tlocrt spojne ploče <i>Schunkove</i> prirubnice i linearnog aktuatora	44
Slika 29. Druga iteracija spojne ploče linearnog aktuatora i <i>Schunkove</i> prirubnice a) Pogled odozgora b) Bočni pogled c) Pogled od ispod	44

Slika 30. Treća iteracija spojne ploče linearnog aktuatora i Schunkove prirubnice a) Pogled odozgora b) Izometrija c) Bočni pogled.....	45
Slika 31. Shematski prikaz konfiguracije robota lakat gore – dolje [38]	46
Slika 32. Četvrta iteracija spojne ploče linearnog aktuatora i Schunkove prirubnice a) Pogled odozgora b) Bočni pogled c) Pogled od ispod	47
Slika 33. Druga iteracija vrata spojne ploče a) Izometrija b) Bočni pogled	47
Slika 34. Sklop nosive konstrukcije	48
Slika 35. Postavke statičke analize naprezanja prikazanih na modelu.....	49
Slika 36. Postavke mreže konačnih elemenata statičke simulacije naprezanja za <i>Design Study</i> analizu	50
Slika 37. Postavke analize <i>Design Study</i>	51
Slika 38. Materijal korišten u simulaciji	52
Slika 39. Postavke statičke analize naprezanja s korigiranim vrijednostima modela a) Prikaz postavki na modelu b) Prikaz postavki na prirubnici c) „Drvo“ simulacijskih postavki	54
Slika 40. Postavke mreže konačnih elemenata s korigiranim vrijednostima modela	54
Slika 41. a) Statička analiza naprezanja modela s korigiranim vrijednostima b) Naprezanja veća od 2.3 MPa nosive konstrukcije	55
Slika 42. Prikaz koncentracije naprezanja statičke analize modela s korigiranim vrijednostima iz dva pogleda	55
Slika 43. Prikaz maksimalnog progiba nosive konstrukcije.....	56
Slika 44. Prva iteracija prednjeg držača a) Izometrija b) Izometrija iz drugog pogleda c) Pogled sprijeda d) Pogled sprijeda u presjeku e) Bočni pogled	58
Slika 45. Klizač druge iteracije vrata a) Pogled sprijeda b) Izometrija čahure b) Bočni pogled presjeka spoja vrata, klizača i kape vrata druge iteracije prednjeg držača	58
Slika 46. Druga iteracija vrata konstrukcije a) Izometrija b) Pogled sprijeda c) Pogled straga d) Bočni pogled e) Bočni pogled u presjeku f) Izometrija u presjeku.....	59
Slika 47. . a) Izometrija vrha vrata prve razvojne iteracija b) Izometrija klizača vrata alata.....	59
Slika 48. Treća iteracija razvoja prednjeg držača sonde a) Izometrija b) Izometrija s prozirnim klizačem c) Pogled sprijeda s prozirnim klizačem d) Bočni pogled s prozirnim klizačem	60
Slika 49. Magnetni klizač a) Izometrija b) Izometrija s prozirnim klizačem c) Silnice generiranog magnetnog polja [39]	60

Slika 50. Četvrta iteracija prednjeg držača a) Izometrija b) Pogled sprijeda c) Pogled sprijeda prozirnog sklopa d) Bočni pogled e) Prikaz umetanja opružnog klipa prilikom montiranja	62
Slika 51. Klizač prednjeg držača konstruiran s dvije čeljusti a) Izometrija odmaknutog pomičnog dijela s otključanim trnom b) Pogled sprijeda odmaknutog pomičnog dijela c) Zaključavanje pozicije trnom d) Pogled sprijeda sastavljenog klizača	62
Slika 52. a) Izometrija druge iteracije stražnjeg držača b) Poprečni presjek druge iteracije stražnjeg držača	63
Slika 53. Izometrija prve iteracije stražnjeg držača	64
Slika 54. a) Klizna čahura stražnjeg držača b) Klizna čahura stražnjeg držača u presjeku	64
Slika 55. Četvrta iteracija stražnjeg držača alata a) Izometrija b) Izometrija s prozirnim stolom	65
Slika 56. Podnožje stola četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Bočni pogled c) Pogled odozgor d) Pogled odozdol	65
Slika 57. Četvrta iteracija stražnjeg držača alata a) Izometrija iz drugog pogleda b) Pogled odozgor c) Spoj kvadratnog prstena i spojnog elementa senzora sile	66
Slika 58. Nosivi stol četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Izometrija – pogled odozdol c) Pogled odozdol d) Pogled odozgor	66
Slika 59. Kvadratni prsten sonde četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Pogled sprijeda c) Druga izometrija.....	67
Slika 60. Spojni element senzora sile četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Pogled odozdol c) Pogled straga d) Pogled sprijeda	68
Slika 61. Četvrta iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Izometrija iz drugog pogleda	69
Slika 62. Četvrta iteracije stražnjeg držača a) Izometrija s prozirnim nosivim stolom b) Odnos kvadratne matice i nosivog stola	69
Slika 63. Četvrta iteracija stražnjeg držača a) Pogled odozgor b) Pogled sprijeda c) Pogled odozdol d) Pogled straga.....	69
Slika 64. Spojna ploča četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Prozirna izometrija c) Pogled odozgor d) Pogled odozdol	71
Slika 65. Potisnik spojne ploče četvrte iteracije stražnjeg držača a) Prednji utor potisnika s utorom za oprugu b) Sklop spojne ploče, potisnika i opruge c) Sklop s prozirnou spojnom pločom d) Drugi pogled sklopa s prozirnou spojnom pločom e) Bočni pogled	71
Slika 66. Shema dimenzija za odabir opruge [40]	71
Slika 67. Odabrana tlačna opruga 32/3/5 tvrtke <i>Hennlich</i> [40].....	72

Slika 68. Nosivi stol četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Prozirna izometrija c) Pogled odozgor d) Pogled odozdol	72
Slika 69. Kvadratni prsten četvrte iteracije stražnjeg držača a) Prozirna izometrija b) Pogled sprijeda c) Pogled s boka d) Vrh pripadajućeg opružnog klipa	73
Slika 70. Spojni element senzora sile i kvadratni prsten sonde četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Pogled sprijeda c) Izometrija iz drugog pogleda s prozirnim kvadratnim prstenom d) Pogled odozgora na spojni element senzora sile	74
Slika 71. TAS60W senzor sile tvrtke <i>HT SENSOR TECHNOLOGY CO.</i> [42]	75
Slika 72. NANO 17 senzor sile tvrtke <i>ATI Industrial Automation</i> [43].....	76
Slika 73. Tehnička dokumentacija senzora sile NANO 17 tvrtke <i>ATI Industrial Automation</i>	77
Slika 74. Kirurška sonda	78
Slika 75. Spoj unutarnjeg i vanjskog dijela sonde u prikazu s prozirnim vanjskim dijelom sonde	78
Slika 76. Prikaz rada vakuum generatora [44]	79
Slika 77. Vakuum generator JS-40UM tvrtke <i>Vaccon</i> [44]	80
Slika 78. Tehnička dokumentacija vakuum generatora JS-40UM tvrtke <i>Vaccon</i> [44].....	80
Slika 79. Ravni konektor, za plastične cijevi vanjskog promjera 4 mm, M5 x 0.8 mm [49].....	81
Slika 80. Tehnička dokumentacija ravnog konektora sa Slika 79.....	81
Slika 81. Konektor s laktom, za plastične cijevi vanjskog promjera 4 mm, M5 x 0.8 mm [49]....	81
Slika 82. Tehnička dokumentacija konektora s laktom sa slike 81.....	82
Slika 83. Slika vakuum konektora s dva muška izdanka s orebrenjem i nasjedanjem brtvom	82
Slika 84. Gumena brtva 9262K511 tvrtke <i>McMASTER-CARR</i> [49].....	82
Slika 85. Konstruirani konektor po uzoru na onaj prikazan na slici 83. a) Izometrija b) Prozirna izometrija c) Spoj konektora i sonde.....	83
Slika 86. Koncept prihvata unutarnje sonde za unos zakreta s omogućenim prolaskom vakuumske cjevčice.....	84
Slika 87. Prva iteracija razvoja odsijecanja tkiva a) Izometrija sa steznom glavom b) Izometrija sa steznom glavom - drugi pogled c) Bočni pogled s prozirnom stezom glavom.....	85
Slika 88. Stezna glava prve iteracije sustava za odsijecanje tkiva	85
Slika 89. Konektor stezne glave i vakuum ventila sa sondom	85
Slika 90. Rotacijski vakuum ventil prve iteracije sustava za odsijecanje tkiva	85
Slika 91. Zglobna glava tvrtke <i>IGUS</i> [50].....	87

Slika 92. Zglobna glava s proširenim kuglastim elementom tvrtke <i>QAI</i> [51]	87
Slika 93. Prikaz nepovoljnog položaja aktuatora pri korištenju zglobne glave	87
Slika 94. Ženski element koljenastog zgloba s pripadajućim svornjakom tvrtke <i>IGUS</i> [50]	88
Slika 95. Dvostruko koljenasti zglobni spojnik a) Izometrija b) Pogled odozgor c) Pogled sprijeda	88
Slika 96. Svornjak (DIN 1436) sa sigurnosnom pločicom (DIN 6799).....	88
Slika 97. Spojni element prstena i zgloba a) Izometrija b) Bočni pogled c) Pogled sprijeda	88
Slika 98. Kružni prsten unutarnje sonde za odsijecanje tkiva a) Izometrija b) Pogled sprijeda c) Prozirna izometrija d) Pogled sprijeda - prozirno	89
Slika 99. Odabrani linearni aktuator za odsijecanje tkiva XLA - 1, slike izometrije [55]	90
Slika 100. Tehničke specifikacije odabranog linearnog aktuatora XLA-1 tvrtke <i>Xeryon</i> [55].....	91
Slika 101. Tehnička dokumentacija odabranog linearnog aktuatora XLA-1 tvrtke <i>Xeryon</i> [55] ..	92
Slika 102. Sklop sustava za odsijecanje tkiva a) Izometrija u inicijalnoj poziciji b) Izometrija u završnoj poziciji (nakon odsijecanja) c) Pogled sprijeda d) Pogled odozgor.....	92
Slika 103. Mehanička svojstva čelika 1.4460 (X3CrNiMoN27-5-2).....	94
Slika 104. Mehanička svojstva aluminijske slitine 6061-T6.....	94
Slika 105. Prva varijanta koncepta robotskog alata	95
Slika 106. Oznake dijelova prve varijante koncepta robotskog alata	96
Slika 107. Druga varijanta koncepta robotskog alata.....	99
Slika 108. Druga varijanta koncepta robotskog alata – tlocrt	99
Slika 109. Treća varijanta koncepta robotskog alata.....	101
Slika 110. Četvrta varijanta koncepta robotskog alata	103
Slika 111. Detaljni prikaz stražnjeg uležištenja sa sustavom za odsijecanje tkiva četvrte iteracije koncepta robotskog alata	103
Slika 112. Detaljni prikaz prednjeg uležištenja četvrte iteracije koncepta robotskog alata	104
Slika 113. Razvijeni pogled na četvrtu varijantu koncepta robotskog alata a) Cijeli sklop b) Nosiva konstrukcija i stražnje uležištenje sa sustavima za vakuum i odsijecanje tkiva.....	107
Slika 114. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Vrata spojne ploče	108
Slika 115. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Spojne ploče	109
Slika 116. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Podnožja nosivog stola.....	109
Slika 117. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Nosivog stola.....	109
Slika 118. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Vrata prednjeg držača.....	110

Slika 119. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Fiksne čeljusti klizača prednjeg uležištenja.....	110
Slika 120. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Klizne čeljusti klizača prednjeg uležištenja.....	110
Slika 121. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Potisnika	110
Slika 122. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Spojnog elementa senzora.....	111
Slika 123. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Kvadratnog prstena sonde	111
Slika 124. Prikaz elemenata sklopa četvrte varijante alata koji svojom geometrijom utječu na vođenje i pozicioniranje vrha sonde.....	112
Slika 125. Minimalni i maksimalni pomak vrha alata u smjeru apscise tolerancijske analize s linearnim pomakom od 120 mm	113
Slika 126. Rezultati tolerancijske analize za pomak u smjeru apscise.....	114
Slika 127. Minimalni i maksimalni pomak vrha alata u smjeru ordinate tolerancijske analize s linearnim pomakom od 120 mm	114
Slika 128. Rezultati tolerancijske analize za pomak u smjeru ordinate	114
Slika 129. Prikaz čimbenika i njihov značaj na ukupni pomak vrha sonde u smjeru apscise.....	116
Slika 130. Prikaz čimbenika i njihov značaj na ukupni pomak vrha sonde u smjeru ordinate. ...	116
Slika 131. Preciznost pozicioniranja vrha sonde u smjeru apscise dobivena u analizi s postavljenim geometrijskim tolerancijama od 0.01 mm za sve čimbenike s utjecajem do 1.5%.....	117
Slika 132. Preciznost pozicioniranja vrha sonde u smjeru apscise dobivena u analizi s postavljenim geometrijskim tolerancijama od 0.005 mm za sve čimbenike s utjecajem do 1.5%.....	117
Slika 133. Preciznost pozicioniranja vrha sonde u smjeru ordinate dobivena u analizi s postavljenim geometrijskim tolerancijama od 0.005 mm za sve čimbenike s utjecajem do 1.5% u smjeru apscise	117
Slika 134. Statička analiza naprezanja modela s korigiranim vrijednostima	120
Slika 135. Naprezanja veća od 1 MPa nosive konstrukcije	121
Slika 136. Prikaz maksimalnog progiba konstrukcije opterećenog sa silom mase od 5.78 N	121

POPIS TABLICA

Tablica 1. Različitosti između čovjeka i robota	17
Tablica 2. Preciznost robotskog sustava <i>RONNA G3</i> [32].....	19
Tablica 3. Početni okvirni uvjeti za odabir kugličnog navojnog vretena	30
Tablica 4. Varijante rezolucije enkodera i brzine vrtnje motora.....	33
Tablica 5. Usporedba modela vretena u kombinaciji s pripadajućim maticama.....	36
Tablica 6. Usporedba modela linearnih aktuatora.....	41
Tablica 7. Najboljih 20 rezultata <i>Design Studyja</i>	52
Tablica 8. Mjerno područje i rezolucija senzora sile NANO 17 tvrtke <i>ATI Industrial Automation</i>	76
Tablica 9. Tehničke specifikacije senzora sile NANO 17 tvrtke <i>ATI Industrial Automation</i>	77
Tablica 10. Usporedba vakuum generatora.....	79
Tablica 11. Usporedba linearnih aktuatora	89
Tablica 12. ISO tolerancija dosjeda	112
Tablica 13. Mase standardiziranih dijelova i ostalim elemenata koji se proizvode	118
Tablica 14. Mase nestandardnih dijelova	119

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

DU_DIPL_01	Vrat spojne ploče
DU_DIPL_02	Spojna ploča
DU_DIPL_03	Vrat prednjeg držača
DU_DIPL_04	Klizna čeljust prednjeg držača
DU_DIPL_05	Fiksna čeljust prednjeg držača
DU_DIPL_06	Podnožje nosivog stola
DU_DIPL_07	Nosivi stol
DU_DIPL_08	Spojni element senzora sile
DU_DIPL_09	Kvadratni prsten sonde
DU_DIPL_10	Kružni prsten sonde
DU_DIPL_11	Dvostruki koljenasti zglob
DU_DIPL_12	Vakuum konektor sonde
DU_DIPL_13	Potisnik
DU_DIPL_14	Spojni element kružnog prstena
DU_DIPL_15	Nosiva konstrukcija
DU_DIPL_16	Prednji držač
DU_DIPL_17	Stražnji držač
DU_DIPL_18	Sustav za odsijecanje tkiva
DU_DIPL_19	Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
m_1	kg	Masa stola
m_2	kg	Radna masa
l_s	mm	Radna duljina
v_{max}	m/s	Najveća brzina gibanja
t_1	s	Vrijeme ubrzanja
t_3	s	Vrijeme usporavanja
N	min ⁻¹	Broj izmjeničnog kretanja u minuti
S	mm/pulse	Minimalni korak
J_m	kgm ²	Moment inercije motora
A	-	Faktor redukcije
μ	-	Faktor trenja vodilica
F	N	Sila trenja na površini gibanja
ω	min ⁻¹	Brzina vrtnje motora
p	mm	Korak navoja
α	m/s ²	Akceleracija
g	m/s ²	Akceleracija sile teže
F_{a_1}	N	Sila prilikom ubrzavanja unaprijed
F_{a_2}	N	Sila prilikom jednolikog gibanja unaprijed
F_{a_3}	N	Sila prilikom usporavanja unaprijed
F_{a_4}	N	Sila prilikom ubrzavanja unazad
F_{a_5}	N	Sila prilikom jednolikog gibanja unazad
F_{a_6}	N	Sila prilikom usporavanja unazad
F_{amax}	N	Maksimalna sila koja se pojavljuje u sustavu
η_1	-	Faktor uležištenja
η_2	-	Faktor uležištenja
d_1	mm	Unutarnji promjer vretena
l_a	mm	Udaljenost između dvije ravnine uležištenja
P_1	N	Dopušteno opterećenje pri izvicanju
P_2	N	Dopušteno tlačno i vlačno opterećenje
BCD = D	mm	Vanjski promjer vretena
C_a	kN	Osnovni dinamički koeficijent naprezanja
C_{0a}	kN	Inicijalni statički koeficijent naprezanja

K_l	$N/\mu m$	Krutost ležaja
K_s	$N/\mu m$	Aksijalna krutost kugličnog navojnog vretena
K_n	$N/\mu m$	Aksijalna krutost matice
A	mm^2	Površina poprečnog presjeka vretena
K_b	$N/\mu m$	Aksijalna krutost ležaja
δ	μm	Elastični pomak u aksijalnom smjeru
f_s		Statički faktor sigurnosti
K	$N/\mu m$	Krutost vretena
F_a	N	Primijenjeno aksijalno opterećenje
K_H	$N/\mu m$	Aksijalna krutost spojke matice i radog stola
E		Yangov modul

SAŽETAK

U ovom radu predstavljen je pregled primjene robota u medicini te specifično u neurokirurgiji. Prikazan je RONNA sustav, razvijan na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u suradnji s Kliničkom bolnicom Dubrava u Zagrebu, za koji se razvija koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga.

Nakon analize funkcionalnosti željenog robotskog alata, kroz rad je prikazan iterativni razvoj pojedinih dijelova koji zasebno ili u kombinaciji pomažu u ispunjavanju pojedinih funkcija. Konstrukcijska rješenja specifičnih zadataka, koje za zadovoljenje funkcija moraju biti ispunjene, razvijale su se slijedno pazeći na valjani međudnos dijelova. Svako konstrukcijsko rješenje prikazano je kroz faze kojima su se nadogradnjom kroz četiri ciklusa zadovoljile sve funkcionalnosti.

Na kraju su prikazane varijante koncepta robotskog alata kroz iste cikluse u kojima su se razvijali i elementi cijelog sustava. Zadnja prikazana varijanta rezultat je konstrukcijskog razvoja i dobivena rješenja, zajedno sa standardnim i postojećim elementima sa tržišta, ispunjavaju sve funkcionalnosti robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga. Uz konstrukcijski funkcionalno rješenje prikazan je i kritički osvrt s tolerancijskom analizom konstrukcije.

Ključne riječi: robotski alat, razvojni koncept, neurokirurgija, biopsijska sonda, RONNA

SUMMARY

This paper presents an overview of the use of robots in medicine and specifically in neurosurgery. The RONNA system, which has been developed at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in collaboration with the University Hospital Dubrava in Zagreb, is presented, for which the concept of a robotic tool for brain tumor biopsy is being developed.

After analyzing the functionality of the desired robotic tool, an iterative development of an individual parts is shown through the paper, which, individually or in combination, helps to fulfill certain functions. Given design solutions of specific problems, which must be fulfilled in order to maintain their functions, have been developed sequentially, with the valid interrelationship of parts. Each design solution is presented through phases that have been upgraded through four cycles to satisfy all functionalities.

Finally, variants of the concept of a robotic tool are presented through the same cycles in which elements of the entire system were developed. The last variant shown is the result of design development and the solutions obtained, along with standard and existing industry elements, fulfill all the functionalities of a robotic brain tumor biopsy tool. In addition to the fully functional design, a critical review with tolerance analysis is presented.

Key words: robotic tool, concept development, neurosurgery, bioptic probe, RONNA

1. Uvod

Kirurške operacije delikatne su i precizne radnje koje u većini slučajeva vrši doktor kirurg. S obzirom na veliki raspon drugačijih područja, ljudska ruka u nekim je slučajevima najbolji odabir, no, s druge strane, za neke slučajeve ona nije dovoljno mirna i precizna. Osim toga, ljudi su skloni umoru, a kompleksnost operativnih zahvata zna biti tolika da operacije traju više sati. U takvim trenucima robotski manipulatori dolaze kao izvrstan alat koji kirurzima pomažu u nadomjesku loših karakteristika ljudskog rada.

Robotski asistenti u kirurgiji specifično su korisni za operacije u području neurokirurgije. Operacija uz pomoć robota tip je minimalno invazivne operacije gdje „minimalno invazivna“ znači da se umjesto velikih rezova koriste umanjeni operacijski instrumenti koji se mogu uvesti u pacijenta kroz vrlo male otvore što umanjuje oštećivanje tkiva okolnog operativnom mjestu. [1] Zbog područja rada minimalna invazija imperativ je za boljitak pacijenta zbog čega roboti imaju veliki značaj kod neurokirurških zahvata.

Razvoj takvih robota krenuo je od 1970.-tih godina i do danas je razvijeno više vrsta i inačica od kojih prednjače *NeuRobot*, *ROSA*, *SurgiScope* i drugi. Zanimljivo je da se na području Hrvatske razvio, i dalje se razvija, jedan takav robot. *RONNA* je razvijana na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u suradnji s Kliničkim bolničkim centrom Dubrava od 2010. godine, a od 2016. aktivno sudjeluje u neurokirurškim zahvatima. Zamišljena je kao jednoručni ili dvoručni asistent kirurgu koji pomaže pri lokalizaciji kranijalnog prostora pacijenta virtualno i fizički, kao i dovođenju biopsijske sonde do istoga. Ovisno o konfiguraciji sustava u pojedinim operacijama *RONNA*, osim vođenja, upravlja i dijelom kirurških instrumenata. Nastavkom razvoja *RONNA* sustava želi se omogućiti potpuno autonomno robotsko izvođenje zahvata gdje bi kirurg aktivnim radnjama minimalno sudjelovao. Iako postoje loše strane robotskog rada, kao što su slaba korelacija izvršnog elementa i strojnog vida, manjak osjeta i kvaliteta donesenih odluka, postoji težnja ka razvoju specijaliziranog prilagođenog alata koji bi ispunio zahtjeve kvalitete pri slijednom vršenju operativnih radnji.

2. Povijest robotike u medicini

Robotika u medicini nastala je kao ideja 1970-tih godina unutar NASA-e (*National Aeronautics and Space Administration*) kao uređaj kojim bi upravljao kirurg sa Zemlje, a bio bi u stanju pomoći astronautima u težim zdravstvenim situacijama koje iziskuju operativne zahvate. U slično vrijeme američka DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) radila je na razvoju robota koji bi mogao vršiti istu zadaću, no u uvjetima rata kada je doktorima nemoguće pristupiti ranjenima. Nijedna od ovih ideja nije zaživjela u punom duhu, no 2001. godine uspješno je izvršena daljinska operacija u Strasbourgu koja je bila upravljana iz New Yorka. Bez obzira na veliki uspjeh samog postupka, operacije na daljinu nisu zaživjele zbog brojnih problema od kojih je vodeći bio kašnjenje u izvršavanju zadataka. [2]

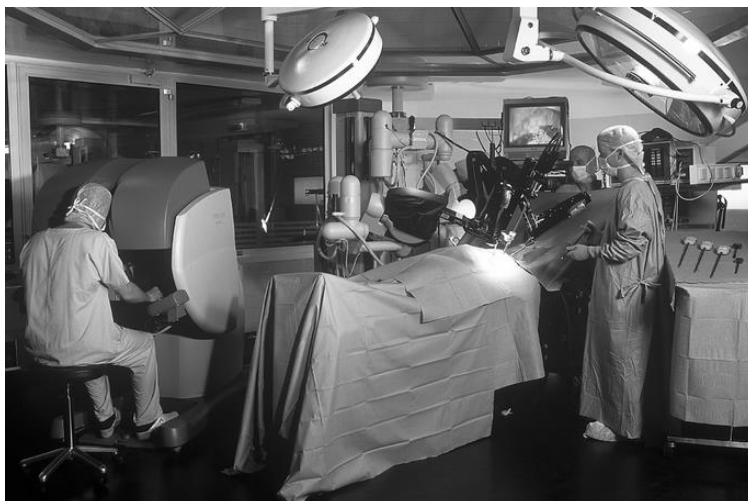
Drugi povijesni cilj u robotskoj medicini bio je eliminirati nepotrebne kretnje. U delikatnim operativnim zahvatima mozga svaki neželjeni drhtaj ruke ili neplanirani pomak mogao je rezultirati neželjenim posljedicama, stoga je u Londonskom *Imperial Collegeu* razvijen prvi robot asistent u operacijskim zahvatima znan kao PUMA 560. Robot PUMA 560 korišten je 1985. godine u postupku stereotaktične operacije¹ gdje je CT² korišten kao navigacijski alat robotu za umetanje sonde u mozak pacijenta kako bi se izvršio zadatak biopsije. Nakon toga, 1988. razvijen na istom mjestu, pojavljuje se i PROBOT koji se koristio za transuretalnu operaciju prostate koja je specifična po velikom broju repetitivnih rezova. Ubrzo nakon toga u Americi je 1992. godine razvijen ROBODOC koji je pripremio bedrenu kost za operacijski zahvat transplantacije kuka puno brže i točnije od bilo kojeg kirurga do tada. [2]

Sljedeći značajan korak koji je uvelike obilježio razvoj robota u operacijskoj okolini bio je razvoj AESOP (*Automated Endoscopic System for Optimal Positioning*) i SRI Green Telepresence Surgery sustava koji je nakon značajnijeg redizajna poprimio novi oblik i puno poznatije ime - *Da Vinci*. Operacijski sustav *Da Vinci* uz ROBODOC-a bio je među prvim takvim sustavima kojeg je odobrila FDA³. Unutar godine dana na tržište je došao i *Zeus* – sustav sličan *Da Vinciju*, kojeg je kroz nekoliko godina kupila kompanija koja je razvila *Da Vincija* i time zaustavila razvoj i proizvodnju. [3]

¹ Stereotaktična operacija ili stereotaksija sustav je ciljanih zahvata u dubini mozga koji se izvode posebnim instrumentima kroz malene otvore na lubanji radi uništenja određenih moždanih središta. [20]

² *Computer topography* – računalna topografija

³ *Food and Drug Administration* - američka federalna agencija za zdravstvo

Slika 1. Prva postava *Da Vinci* sustav [3]

Nakon *Da Vincija* razvija se tek nekolicina komercijalnih robota koji se koriste kao asistenti u operacijama, npr. ARTEMIS i vrlo vjerojatno veliki broj nekomercijalnih vrlo specifičnih robota koji svaki zasebno novim rješenjima malo po pomalo rješavaju mane do sada široko distribuiranih sustava.

Slika 2. Prva postava *Zeus* sustava [3]

2.1. Minimalno invazivni postupci

Najveći doprinos robotike u kirurgiji upravo su minimalno invazivni postupci. Nakon što su se pojavili, vrlo brzo bilo je jasno i vidljivo kako u većini operativnih zahvata oporavak, bol, invaliditet i nelagodu zapravo prouzrokuje oštećivanje okolnog tkiva koje nastaje kako bi se

napravio put do željene operativne točke. Ulaskom robotike u područje medicine kirurzima se stvorila mogućnost da po prvi puta operaciju vrše tamo gdje nemaju direktan vizualni pregled bez direktnog fizičkog dodira. Upravo se pojavom gore navedenih uređaja i sustava, ponajviše *Da Vinci* i *Zeusa*, krajem prošlog stoljeća počeo razvijati takav pristup vršenja operativnih zahvata. [4]

Prvi oblici operacija u kojima se koristilo načelo minimalne invazije bili su postupci laparoskopije⁴, nakon čega se metoda proširila po gotovo svim granama kirurgije: opća kirurgija, ginekologija, urologija, plastična kirurgija, torakalna kirurgija, kardiološka kirurgija, itd. [5]

Osim vrlo jasnih prednosti koje ovaj pristup donosi, od kojih su najznačajniji aspekti kraće vrijeme hospitalizacije, brži oporavak, manje oštećivanje pristupnog puta i dr., postoje i neki nedostaci. Prije svega kirurzi koji se koriste ovim pristupom koriste značajno vrijeme na učenje i vježbanje korištenja alata potrebnih za obavljanje operacija, potrebne su dodatne investicije u opremu i operacije često traju dulje negoli uobičajenim putem. No ukupni je dojam daleko na strani prednosti zbog čega su danas minimalno invazivni postupci vrlo rašireni i koriste se rutinski, a alati i uređaji koji se koriste prilikom operacija poboljšavaju se svakim novitetom koji dolazi u medicinskoj robotici. [4]

2.2. Roboti u primjeni

Već je spomenuto koji su roboti probili led u medicinskoj robotici, no osim njihovih redizajniranih verzija slijede i neki drugi roboti koji su bili vrlo značajni za razvoj ili i daljnje doprinose u području.

Da Vinci

Da Vinci je dakako jedan od prvih i danas najzastupljenijih robota asistenata. Također, on je jedini robotski sustav koji je odobren od strane FDA. Unazad 20 godina, koliko *Da Vinci* postoji na tržištu, princip rada ostao mu je isti. Robot ima 4 zasebno upravljane ruke koje pod vodstvom kirurga odrađuju različite vrste zahvata koristeći posebno razvijene alate. Cijeli sustav sastavljen je od tri zasebne no povezane i jednako važne cjeline. Cjeline su univerzalna konzola za upravljanje (koju koristi kirurg za navigiranje robotskih ruku), tri inačice robotskih ruku koja je svaka specificirana za određenu grupu zahvata: najsvestraniji četveroručni *Da Vinci Xi*, adaptivni

⁴ Laparoskopija je dijagnostička metoda pregleda unutrašnjosti trbušne šupljine uz pomoć posebnih alata koji se uvode kroz mali otvor na trbušnoj šupljini putem kojih se po potrebi može i obaviti biopsija ili operacija. [21]

četveroručni *Da Vinci X* te dvoručni *Da Vinci SP* za operacije u vrlo uskim područjima i kao zadnja univerzalna cjelina dolazi prijenosno računalo čija je glavna zadaća osigurati realnu i što točniju sliku na zaslonu na kojem kirurg prati što se događa unutar pacijenta. [6] [7]

Robotske ruke koriste se za vid i djelovanje, jedna ruka na sebi ima visoko razlučivu kameru s izvorom svjetla, a druge se koriste za držanje različitog pribora. Najnovije verzije ovog sustava na krajevima ruku koriste alate koji su pričvršćeni na vrlo okretnom i malom umjetnom zglobu koji na svojem kraju može imati širok spektar hvataljki, igli, škarica, medicinskih klamera, sisaljki i dr. Velika okretnost zgloba omogućava precizan pristup, a minijaturna izvedba osigurava aspekt minimalne invazije na okolno tkivo. Sustav koristi trodimenzionalni sustav leća na kameri koje omogućavaju trodimenzionalni prikaz unutrašnjosti na ekranu što kirurgu olakšava vizualizaciju okoline i omogućava mu rano otkrivanje krvarenja. [6]

Ovaj robotski sustav operira već više od 20 godina i do sada postoji više od 4.400 implementiranih sustava u funkciji. Sustav ima široku primjenu te ga se tako može koristiti za operacije općeg tipa, operacije srca, glave i vrata, kolorektalne operacije, ginekološke i urološke zahvate te torakalne operacije. Uz to, poseban naglasak stavljen je na prednosti kod liječenja onkoloških pacijenata i sustav se koristi kod liječenja nekoliko tipova karcinoma. [6] [8]



Slika 3. *Da Vinci* - moderna verzija [6]

Monarch

Monarch platforma predstavlja jedan od noviteta u robotskoj medicini. Koristi vrlo inovativnu tehnologiju minijaturnog fleksibilnog robotskog manipulatora. Platforma je prvenstveno korištena za dijagnostiku, no primjenjiva je i za endoskopske operativne zahvate. Platformu je također odobrila i FDA za liječenje plućnih bolesti. *Monarch* je sastavljen od dvije zasebne jedinice koje u međusobnoj komunikaciji obavljaju operaciju. Upravljačko sučelje spojeno je na računalo i monitor koji direktno prenosi ono što se nalazi ispred glave fleksibilnog vrata operativnog alata koji navigira kirurg putem intuitivne upravljačke palice. Upravo se kod plućne strukture može vidjeti inovativnost fleksibilnosti robotskih sustava koja doktoru omogućuje da dođe do perifernih dijelova plućne strukture i uđe u točno željeni ogranak plućnog krila. [9] [10]



Slika 4. *Monarch* [10]

Mazor X

Mazor X sustav je koji omogućava planiranje i izvršavanje složenih operativnih zahvata na kralježnici. Sustav je sačinjen od dvije zasebne cjeline, računala s monitorom te robotskom rukom koja na sebi ima ugrađen vizijski sustav. Skener za prostorno snimanje uzima trodimenzionalnu snimku leđa pacijenta te zajedno s predefiniranim virtualnim modelom lako pronalazi zadane trajektorije i svoju robotsku ruku koja služi kao kanalizator operativnih alata postavlja na operativni put. Zbog vizijskog sustava s kojim komunicira za vrijeme cijele operacije, robotsku ruku precizno vodi na željene pozicije i tako olakšava uobičajeno vrlo zahtjevnu operaciju. [11] [12]

Specifičnost *Mazor X* manifestira se u cjelokupnom sustavu koji, kroz nekoliko faza i konstantnu asistenciju, doktorima pomaže da vrlo složeni zahvat odrade preciznije te brže i sigurnije nego što su mogli prije. Osim toga, sustav koristi različite elemente napredne tehnologije i robotike koji u zajedničkoj suradnji donose vrlo dobre rezultate.



Slika 5. *Mazor X*

Flex Robotic System

Flex sustav sličan je *Monarchu*, principijelno su isti, no i *Flex* je prikazan jer je kao takav doveo novu tehnologiju u minimalno invazivnu granu kirurgije i time ju učinio još boljom i koncentriranijom na srž problema. *Flex* je, dakle, robotski sustav sastavljen od brojnih zasebno pogonjenih mehaničkih elemenata spojenih u koncentrični mehanizam. Mehanizam na svojem vrhu ima kameru kojom prenosi sliku onoga što se nalazi ispred njega, a kirurg, oslanjajući se na to, navigira kroz tijelo i dolazi do vrlo nepristupačnih područja s ciljem tretiranja tumora. Idejno je zamišljeno da se *Flexom* pristupa unutrašnjosti tijela kroz prirodne otvore, no moguće ga je uvesti i kroz male rezove u abdominalnom području. Prilikom kretanja, unutar puta na monitoru na kojem se provodi direktan prijenos s kamere, također se formira i realni trodimenzionalni prikaz krivulje mehanizma kako bi doktor imao jasniju predodžbu trenutne pozicije. Kada se mehanizam dovede do željene točke, moguće ga je fiksirati u čvrstu strukturu i kroz tu strukturu provesti jednako fleksibilne alate kako bi se proveo planirani zahvat. [13] [14]

Kao i svi raniji sustavi, *Flex* ima dvije zasebne cjeline koje međusobno komuniciraju za vrijeme operacije. Na jednom se pomičnom elementu nalazi struktura na koju je montiran fleksibilni robotski mehanizam, a na drugom elementu nalazi se računalo s monitorom i upravljačkim

sučeljem koje sličići igraćim palicama i zbog toga je vrlo intuitivno koristiti se ovim strojem. Ovaj sustav također je dobio odobrenje FDA 2017. godine. [14]

Flex i *Monarch* s ovom tehnologijom u minimalno invazivni pristup donose još veću preciznost, poboljšani pristupni kut pod kojim se obavlja operacija, povećanu mogućnost pokreta i automatski veće dostupno područje, lakše dostupna zahtjevna i, do sad nedostižna, mjesta te značajno poboljšanu vizualizaciju slike unutrašnjosti tijela koje se do sada nikada nije moglo vidjeti direktnim vidom. [15]



Slika 6. *Flex Robotic System* [13]

TCAT

TCAT robotski je asistent koji unutar sustava zvanog *Tsolution-One* čini element koji odrađuje operativni zahvat. Cijeli sustav omogućava lakšu provedbu ortopedskih kirurških zahvata na način da se, kao i kod drugih sustava, operacija definira i isplanira unaprijed u ovom slučaju korištenjem CAM-a⁵, a u trenutku provedbe izvodi *TCAT*-om. [16] [17]

TCAT je specifičan jer uz predefinirane korake procesa te uz prepoznavanje kosti ima sposobnost provesti postupak finog glodanja kosti uz mikrometarsku preciznost vrlo brzo i preciznije negoli to ljudska ruka može slobodnim alatima. Kako bi se očuvala najveća točnost u slučaju pomaka kosti na kojoj se vrši operacija, sustav prepoznaje kretnju i navodi doktora na potrebne pomake kako bi se kost vratila u željenu poziciju i operacija nastavila prema planu. [17]

⁵ *Computer Aid Manufacturing* računalna je tehnologija kojom se vizualizira i planira uobičajeno automatizirani proizvodni postupak, no u ovom slučaju proces obrade kosti standardnom operacijom troosnog glodanja.



Slika 7. TCAT [17]

2.2.1. Roboti u neurokirurgiji

Svojom inovativnošću, novitetima i tehnologijom roboti ostavljaju ključan značaj u neurokirurškim zahvatima. Minimalno invazivni pristup operacije kroz „ključanicu“ neurokirurgiji je omogućio veće područje rada, doseg područja koja su do pojave robota zbog destruktivnih pristupa bila nemoguća, sigurnije zahvate te manje vrijeme oporavka pacijenata. Minimalno invazivna neurokirurgija uglavnom je važna za liječenje bolesti u središnjem dijelu mozga koji je kirurgu dostupan samo transgresijom zdravog moždanog tkiva što je, posebno u neurokirurgiji, vrlo neželjena pojava. [18]

S obzirom na uobičajeno radno okruženje robota u kojem čovjek nije dobro došao, vršenje operativnih zahvata neobična je pojava. Uvjetno se može reći da se primjena u neurokirurgiji mogla simulirati na industrijskim robotima poboljšanjem kvalitete, povećanjem preciznosti i ekonomskim prednostima. Najistaknutije prednosti robota u ovoj primjeni su dugotrajan rad bez pojave umora, ponovljivost, preciznost, eliminacija drhtaja te mogućnost rada u vrlo uskim i dugim operativnim kanalima. Osim toga, svojim vizijskim sustavima roboti kirurzima omogućuju „produženi“ vid, a stupnjevima slobode gibanja i spretnim malim alatima povećanu mogućnost pokreta. [18]

Prema [19] postoje kategorije robota prema vrsti upravljanja, to su nadzirani roboti, teleoperativni i roboti s podijeljenom kontrolom. Nadzirani su, dakle, roboti oni kojima su svi zadaci definirani u predoperativnoj pripremi i tijekom operacije im se ne zadaju kretnje na bilo koji način. Potom slijede teleoperativni koji su nasuprot nadziranima navođeni od strane kirurga tijekom cijele operacije, što znači da kirurg ne stoji uz pacijenta nego navodi robota i njime se služi za obavljanje

zadataka. I naposljetku, roboti s podijeljenom kontrolom služe kirurzima kao alat koji osigurava preciznost i miran pokret, ali kirurg i dalje vrši operaciju samostalno. [19]

SurgiScope

SurgiScope jedan je od starijih sustava čiji je razvoj započeo 1989. godine u tvrtki *ISIS Robotics*. Za razliku od većine ostalih, ovaj robot sa svoje tri ruke koje omogućavaju sedam stupnjeva slobode gibanja, pričvršćen je na strop u operacijskoj sali s ciljem očuvanja kirurškog prostora. Primarno je namijenjen za endoskopiju i biopsiju, ali odlično obavlja bilo kakve postupke neuronavigacijske implementacije. Zamišljen je kao modularan sustav koji nudi opciju nadogradnje specifičnim radnim jedinicama što mu daje pozitivnu vrijednost zbog izbjegavanja robusnosti a, s druge strane, nudi mogućnost obavljanja svih zadataka. [19] [20]

Kao i kod svih drugih sustava, i kod *SurgiScopea* nužno je predoperativno planiranje i odabir trajektorija. Operacija se vrši uz pomoć neurokirurškog alata za stabilizaciju glave *Mayfield*. Preciznost ovog sustava prema istraživanju [19] je 1.6 ± 3.0 mm. Najveći su mu nedostaci produljenje vremena operacije i manjak mobilnosti, no valja uzeti u obzir da je bio među prvim takvim jedinicama. Prema ranije navedenoj podijeli *SurgiScope* spada pod kategoriju nadziranih robota čiji su pokreti posve isplanirani prije operacije.

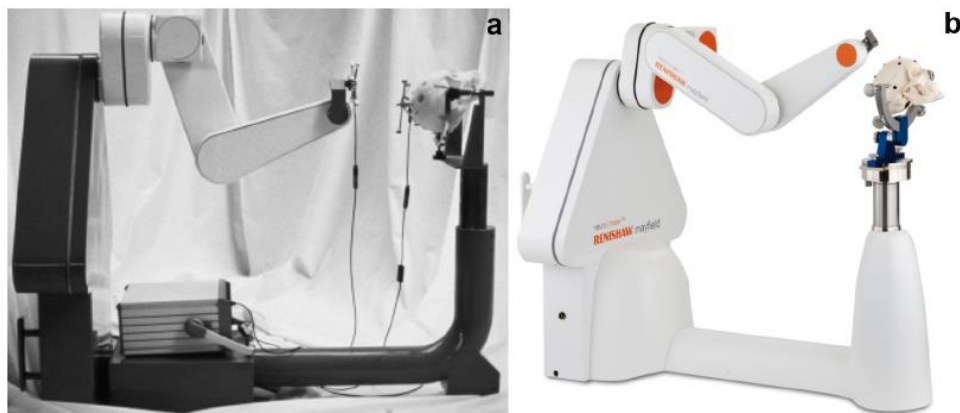


Slika 8. *SurgiScope* [19]

NeuroMate

NeuroMate robot kao i *SurgiScope* razvili su, još u prošlom stoljeću, znanstvenici na Sveučilištu u Grenobleu, a kasnije je cijeli projekt kupio *Integrated Surgical Systems*. Kada je tek izašao na tržište, bio je prvi robot sa stereotaktičnim pristupom koji nije bio namijenjen samo za postupke biopsije. U prvoj inačici imao je pet stupnjeva slobode gibanja i bio je prvi neurokirurški robotski uređaj koji je dobio CE oznaku za europsko tržište i nedugo nakon toga FDA za američko. [21] [19]

NeuroMate radi kao slikom vođeni pasivni asistent za držanje, podršku i stabilizaciju kirurških instrumenata. Volumetričku obradu slike vrši integriranjem CT-a i MRI-a⁶, a lokalizaciju može odraditi konvencionalnim stereotaktičnim okvirima ili naprednijom tehnologijom lokalizacije bez okvira. Lokalizacija konvencionalnom metodom daje mu preciznost rada od 0.86 ± 0.32 mm, a novom metodom bez okvira 1.95 ± 0.44 mm. Sustav bi, nakon izvršene potrebe kalibracije, robotsku ruku pozicionirao na predefiniranu trajektoriju i u toj bi se poziciji fiksirao kako bi kirurg mogao odraditi operativni zahvat čime je prema prethodnoj kategorizaciji spadao u nadzirane robote. Negativni aspekti ovog sustava prije svega bili su robusna građa, a potom i cijena. [22] [18]



Slika 9. *NeuroMate* sustav (a) ISS-jeva starija inačica (b) Novi dizajn tvrtke *Renishaw* [23]

Minerva

Minerva je sustav razvijen na sveučilištu u Laussane 1991. godine. Sustav je imao 5 stupnjeva slobode gibanja od kojih je jedan bio ostvaren gibanjem cijelog robota po tračnicama. Sustav je koristio CT kao alat vizualizacije radnog područja, a pristup mozgu stvarao je kroz 2 mm široki

⁶ *Magnetic resonance imaging* – Snimanje magnetskom rezonancom

provrtu na lubanji. Robot je odrađivao sve zadane zadatke samostalno, od reza na koži i bušenja lubanje do umetanja sonde, čime se svrstao u skupinu nadziranih robota. S obzirom na to da nije bio samo asistent, već je odrađivao i destruktivne zahvate unutar mozga, bio je vrlo interesantan sustav. Razvojni tim već je tada bio svjestan negativnih aspekata robotskog rada u takvim delikatnim okolinama gdje su kirurzi bili zakinuti za vrlo važan osjet opipa i povratne sile pri radu s bilo kojim alatom. Doktori su, dakle, vođeni tim zaključcima razvili i specifične senzore sile koji su vizualno prikazivali povratnu silu, no zbog načina prijenosa signala informacija je bila puna šumova i zbog toga nekada neprecizna. Prema CT snimkama sustav je pokazao preciznost od ± 0.5 mm što je bio značajan napredak u odnosu na preciznost ruke kirurga koja je iznosila ± 2 mm. [18] [24]

Bez obzira na novitete i prednosti koje je Minerva imala, zbog svoje robusnosti i uskraćivanja radnog prostora kirurga te dodatnih tehničkih nedostataka, projekt je ukinut nakon svega nekoliko godina. [22]

PathFinder

Ovaj robotski sustav razvila je kompanija *Prosurgics* i sa svojih šest stupnjeva slobode gibanja često se koristi za duboko moždane biopsije i vođenje kirurških alata za bušenje lubanje. Predoperativno planiranje provodi se pomoću programa koji dolazi uz samog robota, a za planiranje trajektorija uobičajeno se koriste CT snimke ili MRI snimke. Specifičnost ovog sustava njegova je preciznost koja se u najboljim uvjetima rada sa stereotaktičnim okvirom može spustiti ispod 1 mm. Uz taj klasični pristup, sustav koristi i dva nestereotaktična pristupa koja se uz taktilne senzore služe kinematičkim jednadžbama za izračun željenih pozicija, no preciznost im je nešto malo lošija. [25] [19] [18]

Kod predoperativnog planiranja doktor može zadati robotu zonu zabrane gibanja čime se povećava sigurnost izvođenja operativnog zahvata. U slučaju ulaska alata u zabranjeno područje, robot oduzima napon na svim pogonskim jedinicama i time zaključava trenutnu poziciju kako bi se reducirala moguća šteta. [25]

Kod izvođenja zahvata robot može služiti za vođenje alata preciznim pozicioniranjem vodilica na trajektorije, no uz nadogradnju pogonskih jedinica može biti i potpuno autonoman i odraditi cijelu operaciju zasebno. U tom slučaju na aksijalnu os dodaje se dodatni pogon za ostvarivanje linearnog

ulaza, a neki alati kao što su sonde zahtijevaju i dodatnu mogućnost rotacije pa se tada nadograđuje još jedna pogonska jedinica. U oba slučaja robot spada u podskupinu nadziranih sustava. [25]

Evolution 1

Razvijen u kompaniji *Universal Robot Systems* sa svoja 4 stupnja slobode gibanja predstavljao je jedan od najpreciznijih robotskih sustava za neurokirurgiju i endoskopsku primjenu. Zahtijevao je pretpozicioniranje u blizinu trajektorije zbog manjka stupnjeva slobode gibanja, a pokretan je preko upravljačke palice. Povezivanje predoperativnih pripremnih trajektorija i pacijenta radio je laserskim ili infra-crvenim skeniranjem lica i povezivanjem MRI snimaka preko karakterističnosti površine. Ostvarivao je preciznost do 20 μm i razlučivost do 10 μm te je zbog svoje preciznosti i jednostavnosti korišten i u operativnim zahvatima kralježnice. [19] [22]

NeuRobot

Ovaj mikro manipulator teleoperativni je sustav razvijen na Sveučilištu Shinshu s ciljem omogućavanja vršenja operacije manjim kirurškim alatima unutar manje robusnog sustava. Upravo zbog toga *NeuRobotu* dovoljna su samo četiri stupnja slobode gibanja, no uz prethodno pozicioniranje blizu područja rada. Glavni element ovog sustava čini 10 milimetarska sonda dugačka 170 mm putem koje se obavljaju sve radnje. Zbog izrazite minijaturizacije radnih elemenata preciznost ovog sustava je veća i može biti do 0.02 mm uz mirno rukovanje. [26] [19]

Mikro instrumenti kojima se *NeuRobot* uglavnom služi su mikro kuke, mikro pincete, monopolarni koagulator i KTP laser⁷. Sam vrh mikro instrumenata manji je od 1mm i može se gibati s 3 stupnja slobode čime se lako obavljaju svi potrebni zahvati. [26]

NeuroArm

Ovaj slikom vođeni (MRI) robotski sustav razvijen je na Sveučilištu Calgary uz suradnju *MacDonald Dettwiler and Associates*. Jedan je od rijetkih teleoperativnih sustava koji ima ugrađeni haptički povratni tok informacija sa sedam stupnjeva slobode gibanja. Sustav je sposoban za sve

⁷ *Potassium titanyl phosphate* laser – kalijev titanil fosfatni laser

stereotaktične zahvate i mikro operacije koje obavlja s dvije zasebne šest-stupanjske robotske ruke kojima kirurg simultano upravlja preko visoko preciznog ručnog upravljačkog sustava, tj. specijalno razvijene upravljačke palice. [27] [28]

Cijeli sustav bio je razvijan s ciljem ostvarivanja slikom vođenog robota koji bi za vrijeme rada kirurgu mogao davati što realniji povratni tok informacija. Stoga je posebna pažnja stavljena na osjet dodira koji se prema istraživanjima iz [28] u nekim slučajeva pokazao važniji i od vida. Haptički povratni tok ostvaren je sensorima sila koji su montirani na vrh alata svake robotske ruke, a upravljačka jedinica daje povratnu silu na upravljačkim palicama kao što bi se sam alat opirao da ga kirurg drži u rukama. Svojom strukturom robot spada u teleoperativnu vrstu sustava. [27] [28]

Osim razvijenih osjetnih povratnih tokova, ovaj sustav kirurgu osigurava vrlo precizan i jasan trodimenzionalni prikaz operativnog zahvata, a slušalice prenose sve popratne zvukove. Uz to, specifičnost sustava manifestira se kroz sigurnosne mjere koje se kroz godine stalno unapređuju. *NeuroArm*, dakle ima mogućnost zadavanja zabranjene zone u koju robotske ruke nikada neće odlaziti i, uz to, kirurgu je omogućeno zaustavljanje bilo kakvih kretnji pritiskom na sigurnosni prekidač. Naposljetku, uzevši u obzir da je ovo teleoperativni sustav gdje se svi pokreti koje kirurg radi na upravljačkim palicama prenose na ruke, važno je istaknuti da je sustav opremljen filterima za eliminaciju bilo kakvih drhtaja što povećava preciznost obavljanja zahvata i smanjuje mogućnost nanošenja neželjene štete. Preciznost ovog sustava u prvoj inačici iznosi 50 μm , a od druge verzije očekuje se poboljšanje do 20 μm . [28]

ROSA

*ROSA*⁸ je jedan od robotskih uređaja korišten u medicini koji pomaže u neurokirurškim zahvatima bez narušavanja standardnih neurokirurških operacijskih protokola. *ROSA* je integrirana multifunkcionalna platforma koja nudi točnu i pouzdanu asistenciju u zahvatima na području cijelog centralnog neurološkog sustava, odnosno u područjima glave i kralježnice. [29]

Uobičajeno i *ROSA* ima dvije zasebne jedinice gdje se na jednoj nalaze vizijski sustav i dodatni monitor, a na drugoj svi drugi elementi robotskog asistenta. Robotska ruka koja izvršava većinu naredbi ima šest stupnjeva slobode gibanja čime se ostvaruje reprodukcija ljudske ruke. Uz veliku

⁸ *Robotic Stereotactics Assistance* – robotski stereotaktična asistencija

moгуćnost slobode pokreta *ROSA* je specifična i po tome što svojim vizijskim sustavom može pratiti što se događa u trenutku i računalno prikazati kirurške alate koji su u pokretu. Zbog predoperativnog planiranja i preciznog laserskog mjernog sustava, *ROSA* može vrlo točno pozicionirati alate i ostvariti minimalno invazivni pristup. Uz to, *ROSA* ima i precizan haptički sustav koji kirurgu omogućava slobodu pokreta, ali u već predefimiranim granicama što rezultira izvanrednom suradnjom u kojoj se koriste prednosti robotskog sustava i ljudske kognitivne moći. Kao sigurnosnu značajku *ROSA* ima integrirani sustav dinamičkog praćenja koji joj omogućava da zadrži zadane trajektorije ukoliko dođe do pomicanja pacijenta uslijed operacije. [29]

Minimalno invazivni postupci u svim granama kirurgije napravili su veliki korak unaprijed, no u području neurokirurgije specifično je važna implementacija ovakvih sustava zbog osjetljivosti područja rada. Neki od razloga zašto je *ROSA* izvanredan sustav i koje prednosti donosi su: pojednostavljenje kirurških postupaka, poboljšanje kliničkog stanja pacijenata zbog minimalne invazije, optimizirana preciznost zahvata, mogućnost praćenja zadane trajektorije u slučaju pomaka pacijenta, povećana sigurnost i smanjeno trajanje operacija i dr. [29]

Osim operacija na mozgu za koje ovaj sustav ima odobrenje *FDA* od 2012. godine, *ROSA* uspješno izvodi i operacije na kralježnici koje su od siječnja 2017. godine također odobrene od iste organizacije, a time omogućava liječenje degenerativnih bolesti kralježnice, traumatološke bolesti, karcinome na leđnoj moždini, itd. [30]



Slika 10. *ROSA* [29]

2.3. Prednosti i nedostaci

Robotski sustavi doživjeli su veliki napredak u zadnjih pola stoljeća, od jednostavnih industrijskih zadataka razvili su se u vrlo specijalizirane asistente sposobne odraditi najdelikatnije zadatke. Neminovno, svoje su mjesto pronašli i u bolnicama gdje u velikoj mjeri pomažu pacijentima u raznim grana kirurgije, no kako je već prikazano, specifičnu su važnost imali u području neurokirurgije. Zbog brojnih prednosti s kojima dolaze, robotski su sustavi kirurzima omogućili zahvate koji su prije bili nemogući, a one koje su već bili u praksi, znatno su poboljšali.

Prije pojave robota u operacijskim salama pomoć pri operacijama kirurzima je omogućavao CAS⁹ koja je predoperativnim analizama olakšavala odabir ulazne točke alata i preciznije pronalaženje operacijskog puta i željene točke do koje se mora doći. S obzirom na to da su robotski sustavi sami po sebi integrirali CAS i donijeli dodatne aspekte kao što su izvršni članci, vizijski sustavi, bez taktilne metode pozicioniranja i sl., jasne su prednosti. Robotski potpomognute operacije bile su preciznije, točnije i omogućavale su bolju ponovljivost od CAS-a. Roboti su opremljeni naprednim trodimenzionalnim vizijskim sustavima koji donose nove mogućnosti u poboljšavanju preciznosti zahvata naročito kada su povezani digitaliziranim slikama dobivenim kroz razne načine snimanja mekog tkiva. Osim toga, roboti su omogućili kirurzima da operacije vrše kroz vrlo uske koridore u dubokim područjima mozga bez nanošenja značajne štete u okolnom tkivu.

Uz već nabrojane argumente roboti su svoje prednosti još pokazali kroz robusnost sustava koja osigurava ponovljivost bez umora, repozicioniranje operacijskih alata aktivnim praćenjem pacijenta čime se dodatno reducirala mogućnost neželjenih ozljeda. Također brzina odziva na podatke dobivene sensorima ili vanjskim naredbama vrlo je brza što sustav čini agilnim i spretnim i, dakako, mogućnost mikro pokreta i djelovanje predefiniranim mikro silama.

Glavna, dakle, prednost robota proizlazi iz mogućnosti da koriste obilne, detaljne i kvantitativne informacije kako bi izveli precizne i ponovljive kretnje u moguće nepovoljnoj radnoj okolini za čovjeka.

U usporedbi sa čovjekom roboti ostavljaju najvažniji doprinos svojom mogućnošću obavljanja preciznih i točnih mikro kretnji, stabilnim pokretima i različitim sensorima kojima mogu razlučivati veliki broj informacija. Uz to, najnegativniji aspekti limitirana su spretnost i limitirani odnos rada ruke i vizijskog sustava. Roboti i dalje nemaju kvalitetnu mogućnost donošenja odluka,

⁹ *Computer assisted surgery* – kompjuterski potpomognuta operacija

zahtijevaju veliki radni prostor i dalje su vrlo skupi. Ostale prednosti i ograničenja u odnosu čovjek – robot prema [31] prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 1. Različitosti između čovjeka i robota

Čovjek - kirurg	Robot
Prednosti	
Izvrsna koordinacija između rada ruku i vida Visoka razina spretnosti Fleksibilnost i prilagodljivost Sposobnost korištenja kvalitativnih informacija Mogućnost donošenja ispravih odluka	Dobra geometrijska točnost Stabilan i neumoran rad uz ponovljivost Napravljeni za široki raspon skala, skaliranje pokreta s potencijalnim budućim primjenama za mikro i nano kirurgiju Integracija opsežnih i raznolikih informacija Prilikom rada koristi različite senzore (sile, akustične, kemijske, itd.)
Ograničenja	
Ograničena spretnost izvan prirodnog stanja Skloni tremoru i umoru Ograničene mogućnosti u korištenju kvantitativnih informacija Ograničena sterilnosti i sklon pogreškama	Ograničena spretnost u koordinaciji rada i vida Loša kvalitativna sposobnost odlučivanja Ograničeni na relativno jednostavne zadatke Potreban veliki prostor unutar operacijske sale i skupi

2.4. Medicinski roboti u Hrvatskoj

Medicinska robotika svoj je razvoj u Hrvatskoj doživjela tek početkom suradnje Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu i Kliničkog bolničkog centra Dubrava 2010. godine. Od tada RONNA je jedini projekt razvojnog karaktera na području i u svojoj četvrtoj generaciji *RONNA G4* predstavlja jedan od najboljih robotskih sustava današnjice.

3. RONNA

RObotic NeuroNAvigation sustav je razvijen za precizne stereotaktične zahvate. Struktura ovog sustava rastavljena je u tri cjeline - robotska ruka koja je smještena na posebno dizajniranom pokretljivom postolju, globalni optički sustav praćenja (*OTS*¹⁰) i program za planiranje zahvata.

Sustav je s jedne strane dizajniran da veličinom odgovara za specifične radne uvjete u kojima ne smije smetati kirurškom osoblju u radu, dok je s druge strane napravljen da ispunjava specifične radne zahtjeve u pogledu prostornih radnih performansi. *RONNA* ima dvoručnu konfiguraciju za čiju je koordinaciju zaslužan specifičan algoritam koji za vrijeme gibanja pazi da ne dođe do neželjenih kolizija. Dvoručna konfiguracija omogućava da se ovaj sustav koristi ili kao jednoručni robotski asistent ili kao dvoručni radni par koji je sposoban provesti cijelu operaciju samostalno. Odabir oblika rada ovisi o vrsti zahvata u kojem je *RONNA* potrebna i o odluci kirurga. Glavna ruka, nakon korištenja vizijskog sustava, mijenja prihvatni alat i u oba radna oblika asistira pri vođenju radnih instrumenata točnim pozicioniranjem na prethodno isplaniranu operativnu trajektoriju. U jednoručnoj konfiguraciji kirurg provodi alate kroz ruku i izvršava sve korake operacije, dok se kod dvoručne konfiguracije drugi pomoćni robot koristi za manipulaciju kirurškim alatima.

Prostorna lokalizacija odvija se pomoću posebno razvijenog stereovizijskog sustava *RONNAstereo* koji s infracrvenom stereo kamerom uz pomoć dva referentna sučelja vrlo precizno virtualno povezuje pacijenta i robotski sustav. Jedno od sučelja nalazi se na robotu, dok je drugo pričvršćeno na glavu pacijenta najčešće čvrstom rastavljivom vijčanom vezom. Sučelja za prepoznavanje pozicija izrađena su u obliku referentnih reflektivnih sfernih markera koje vizijski sustav lako prepoznaje, a program geometrijski lako klasificira. Upravo zbog te specifičnosti *RONNAstereo* vrlo dobro eliminira sve greške koje se mogu javiti zbog nedovoljne rezolucije snimke. Računalna lokalizacija može se provoditi ručno ili automatski. Ručno povezivanje snimljenih referentnih točaka i računalnih pozicija može biti zamorno, dugotrajno i neprecizno jer je podložno ljudskim greškama. S druge strane automatizirana lokalizacija vrši se algoritmom koji povezuje algoritme strojnog vida, metode biomedicinske filtracije slike i metode matematičkih pretpostavki što znatno ubrzava proces i čini ga vrlo preciznim.

¹⁰ *Optical Tracking System* – Optički sustav praćenja

Lokalizacija pacijenta odvija se na sličan način, no koristeći dvije infracrvene kamere zbog postizanja veće točnosti. U postupku lokalizacije koordinatni sustav vrha alata robota poravnan je s preciznošću od 0.05 mm povezivanjem stvarnog i virtualnog vrha alata unutar računalnog sučelja. Takva postavka omogućava ovom robotskom sustavu pozicioniranje radnog alata s greškom od 0.03 mm i time ga čini jednim od najnaprednijih sustava danas. Prema [32] greška pozicioniranja raste kako je prikazano u Tablica 2.

Tablica 2. Preciznost robotskog sustava *RONNA G3* [32]

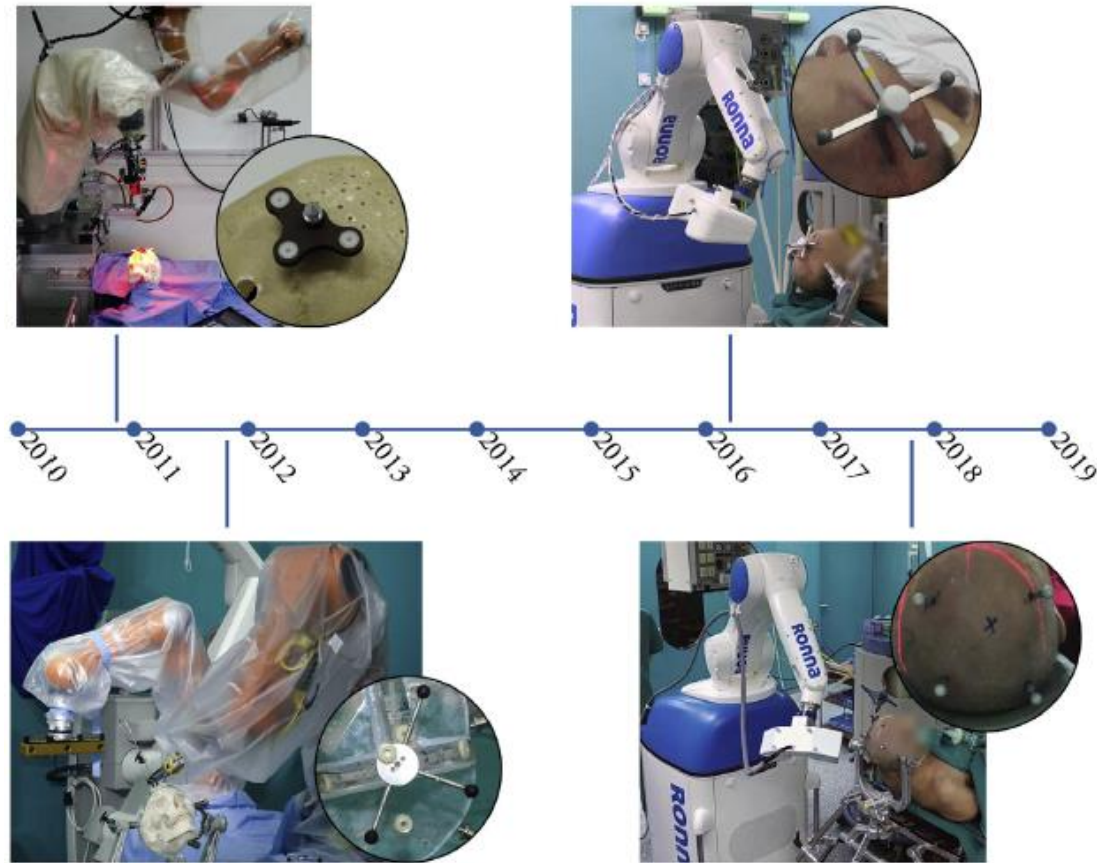
Ciljana skupina	Dubina [mm]	Srednja greška [mm]	Standardna devijacija [mm]	Maksimalna greška [mm]
1	<50	0.43	0.27	1.36
2	50 do 120	0.88	0.37	1.89
1,2	0 do 120	0.65	0.39	1.89

3.1. RONNA G1 – G3

RONNA sustav krenuo se razvijati s ciljem smanjenja opterećenja na kirurgu tijekom izazovnih neurokirurških operacija. Proces razvoja baziran je na temeljima minimalno invazivnih postupaka, a zamišljen je u četiri faze prije kojih su bila potrebna inicijalna ispitivanja različitih pristupa rješavanja problema i dokazivanje radnih koncepata. Inicijalna eksperimentalna faza bazirana je na ispitivanjima različitih konfiguracija sustava, postavki robota, lokalizacijskih metoda i dr. Nakon provedenih eksperimenata odlučena je dvoručna konfiguracija robota od kojih je jedna ruka bila zadužena za vođenje i asistenciju, a druga za invazivne postupke. [33]

Prva je generacija za pozicioniranje koristila sustav sačinjen od kamere, laserskog senzora za udaljenost i referentne lokalizacijske ploče. Druga generacija proizašla je iz ispitivanja prve generacije s poboljšanim sustavima i konceptima. Za izgradnju cijelog sustava korišten je *KUKA Agilus KR6 R900 sixx* + robotski manipulator. Lokalizacijska se metoda promijenila, odabran je stereovizijski sustav koji lokalizira sferne elemente referentnog markera. S tako izrađenim sustavom druga je generacija odradila pretklinička ispitivanja u kojima su se potvrdila robusnost, preciznost i pouzdanost sustava. [33]

Treća generacija okarakterizirana je ugradnjom pomične platforme na kojoj je implementirana sva potrebna elektronika što je cijeli RONNA sustav učinilo potpunim. Osim platforme, implementiran je i novi oblik markera kojim se od 2016. vrše operacije u Kliničkoj Bolnici Dubrava. [33]



Slika 11. Povijesni razvoj RONNA G⁴ sustava: RONNA G1 (2010), RONNA G2 (2011), RONNA G3 (2016), RONNA G⁴ (2017) [33]

3.2. RONNA G4

Robotski neurokirurški sustav RONNA razvijen je za stereotaktičnu navigaciju bez okvira, baziran na standardnim industrijskim robotima. Sustav se sastoji od tri glavne komponente: robotska ruka smještena na univerzalnu pomičnu platformu, sustav za planiranje i navigacijski sustav. RONNA dolazi i u konfiguraciji s dvije robotske ruke koje dijele zadatke operativnog zahvata i kao takav, sustav dolazi i s četvrtom komponentom koja ga čini jednim od najnaprednijih neurokirurških sustava u svijetu. Robotske ruke opremljene su kirurškim alatima poput vodilica, hvataljki, bušilice i sl. Za virtualnu lokalizaciju pacijenta koriste se slobodno rasprostranjeni sferni markeri, dok se za fizičku lokalizaciju koristi RONNA stereo sustav. Roboti RONNA sustava su *KUKA Agilus KR6 R900 sixx* koji sa svojih 6 stupnjeva slobode gibanja omogućavaju veliku fleksibilnost u pozicioniranju

i orijentiranju robotske ruke oko željene trajektorije gibanja koja je definirana s tri translacije i dvije rotacije. [33]

Konfiguracija RONNA sustava uvjetuje mogućnosti uporabe i razinu kojom može pomoći kirurgu za obavljanje operativnog zahvata. U jednoručnoj konfiguraciji glavni robot sustava korišten je za precizno vođenje kirurških instrumenata do željene ciljane točke pozicioniranjem vodilice na trajektoriju zahvata. Kirurg ili robot asistent, kod dvoručne konfiguracije robota, zadužen je za umetanja alata intrakranijalno. Kod dvoručne konfiguracije, osim manipulacije kirurških alata, robot asistent može obavljati i bušenje kosti lubanje. [33]



Slika 12. Trenutna verzija RONNA G4 sustava u dvoručnoj konfiguraciji

U obje konfiguracije RONNA sustava potrebna je uska kolaboracija čovjeka i robota za uspješno izvođenje operativnog zahvata. Razvojem robotskog alata za robotsku biopsiju razina automatizacije RONNA sustava unaprijedila bi se, a potrebna kolaboracija čovjeka i robota za vrijeme izvršenja operativnog zahvata smanjila bi se.

4. Analiza funkcionalnosti alata za robotsku biopsiju

Robotski alat za robotsku biopsiju tumora mozga mora biti sofisticiran alat za vrlo preciznu i specifičnu zadaću. Biopsija je po svojoj definiciji uzimanje komadića živog tkiva za potrebe pretraga kod pacijenta, a u ovom slučaju za eliminaciju ili karakteriziranje tumora mozga. Primarna zadaća ovakvog alata izvlačenje je uzorka tumorske strukture iz područja mozga koristeći se načelima minimalno invazivnog postupka. Takva radnja mora biti precizna i točna što slijedno znači da alat svojim karakteristikama mora osiguravati precizno pozicioniranje biopsijske sonde što se može postići čvrstoćom konstrukcije i finom regulacijom pomaka.

Biopsijska sonda jedan je od postojećih alata u kliničkoj praksi, stoga ovaj alat mora biti u stanju prihvatiti i raditi s takvom sondom. Cilj ovakvog pristupa generalizacija je alata i gradnja sustava „oko“ postojećih elemenata kako bi se univerzalnost i primjenjivost ovog rješenja proširila. Osim prilagodljivosti alata za korištenje već postojeće biopsijske sonde, alat se mora moći pričvrstiti na trenutnu robotsku ruku RONNA sustava čime će svi vanjski parametri prilagodbe biti zadovoljeni. Standardni promjer ovakve sonde iznosi $2,6 \pm 0,2$ mm što znači da elementi sučelja za vođenje moraju moći prihvatiti i voditi ovakvu sondu, kako na prednjem tako i na zadnjem dijelu. Element vezanja alata za robotsku ruku mora biti pripadajuća *Schunkova* prirubnica koji dolazi kao standardni element ovakvih sustava.

Jedna od funkcionalnosti sustava minimalni je translacijski pomak od 120 mm u smjeru biopsijske sonde. Uzevši u obzir relativnu veličinu glave *Homo Sapiensa* i mogućnost pristupa mozgu s velike površine vanjskog dijela lubanje, 120 mm dovoljno je da se pristupi gotovo svim točkama intrakranijalnog prostora pacijenta čak i uz odabir minimalno invazivnog puta. Biopsijska sonda svojim je uskim dijelom dugačka skoro 200 mm što je uz potrebno vođenje i minimalni pomak dovoljno da se ostvari željena radnja.

Prilikom izvođenja ovakvog zahvata važna je informacija o sili probijanja za vrijeme gibanja. Kod neautomatiziranih operativnih zahvata fiktivni senzor sile nalazi se u ruci kirurga. Prilikom ulaska sonde intrakranijalno kirurg laganim pokretima u smjeru trajektorije nameće silu i paralelno osjeća povratnu informaciju. Ni jedan automatizirani sustav ne može nadmašiti čovjeka u ovakvom zadatku, no može mu biti približno dobar. Upravo zbog toga robotski alat svojom funkcionalnošću mora omogućavati mjerenje sile u aksijalnom smjeru i to s osjetljivošću od 0.05 N kako ni najmanje neočekivane sile ne bi ostale nezamijećene.

Roboti su prema svojim prednostima neumorni i precizni, neki od njih zbog svoje robusnosti mogu nositi velike terete, no RONNA svojom profinjenošću omogućava nošenje alata maksimalne mase od 5 kg. Zbog neželjenih momenata inercije prilikom gibanja robotske ruke masa krajnjeg elementa otvorenog robotskog lanca, kao što je RONNA, mora biti što manja. Stoga razvijani alat svojom masom ne smije biti veći od 5 kilograma.

Linearno gibanje koje je ujedno i glavno gibanje sustava, osim što mora osigurati pomak od minimalno 120 mm, mora to činiti s brzinom u rasponu od 0.1 do 5 mm/s. Male brzine očekivane su u trenutku intrakranijalnog gibanja, a veće u pripremno-završnom gibanju.

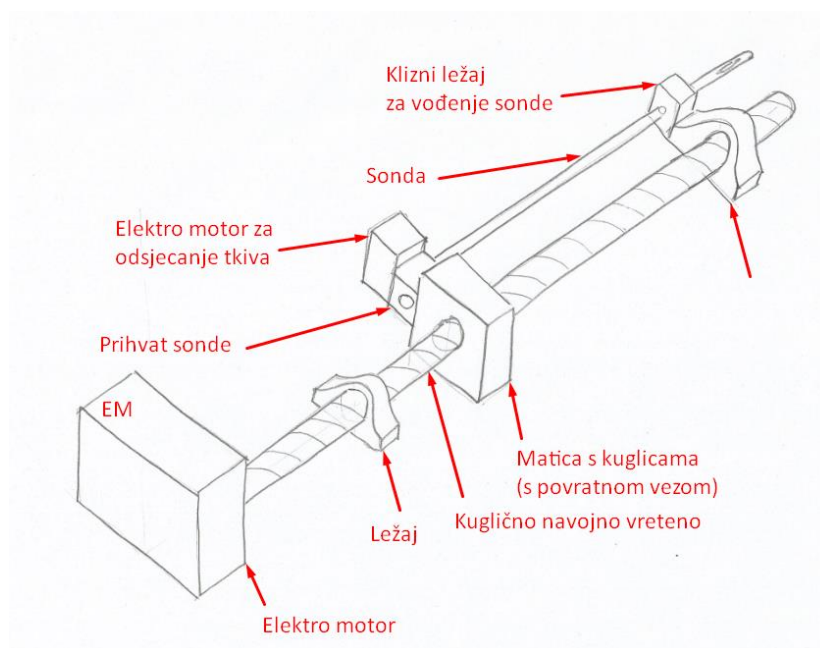
Jedna od glavnih funkcionalnosti ovog alata mogućnost je sterilizacije zbog čistog radnog okruženje operacijske sale. Sterilizacija se mora provoditi kako bi se uklonila sva organska tijela i mikroorganizmi na površinama alata čime se uklanja mogućnost infekcije pacijenta prilikom operativnog zahvata.

Kroz analizu funkcionalnosti ovakvog robotskog alata mogu se zaključiti neke specifične zadaće i problemi koje alat mora moći ispunjavati i aktivno rješavati. Zbog primarnog gibanja i potrebnog aksijalnog pomaka alat svakako mora imati automatizirani pomak i linearno vođenje. Da bi se osigurala primjenjivost, mora se moći vezati za robotsku ruku RONNA sustava i svojom strukturom činiti krutu vezu s ostalim funkcionalnim elementima. Problematika manipulacije i umetanja sonde kroz prihvat prednjeg i stražnjeg uležištenja mora biti riješena da iziskuje što manje operativnih koraka. Mjerenje sile mora se osigurati u aksijalnom smjeru s velikom preciznošću. Odsijecanje tkiva mora se dogoditi nakon nadiranja vakuuma, a prije izvlačenja igle iz intrakranijalnog prostora. Odsijecanje može biti vršeno ručno, od strane kirurga ili ako je moguće automatizirao od strane robotskog alata. Unutar sonde mora se osigurati podtlak kako bi se uzorak tkiva uvukao u unutarnji prostor sonde i potom odstranio odsijecanjem i izvlačenjem. Također treba razmotriti koji su materijali najpogodniji za izradu svih potrebnih elemenata ovog alata.

5. Konceptualna rješenja specifičnih zadataka i problematika robotskog alata

Ovaj robotski alat zamišljen je kao jedan od alata operativnog sustava *RONNA* koji bi se u tijeku zahvata mogao brzo i jednostavno montirati na robotsku ruku i izvršiti finalni dio operativnog dijela biopsije tumora mozga. Kao što je vidljivo iz analize funkcionalnosti, glavni zahtjevi za ovakav alat visoka su preciznost, mala masa, mogućnost linearnog ulaza u područje mozga, mjerenje aksijalne sile, mogućnost sterilizacije alata, vakuumski usis moždanog tkiva te relativni zakret unutarnje sonde u odnosu na vanjsku. Visoka preciznost dolazi kao imperativ zbog ostvarivanja što točnijeg pozicioniranja isto kao i mala masa zbog lakog korištenja i smanjenja momenta inercije gibanja robotske ruke u prostoru.

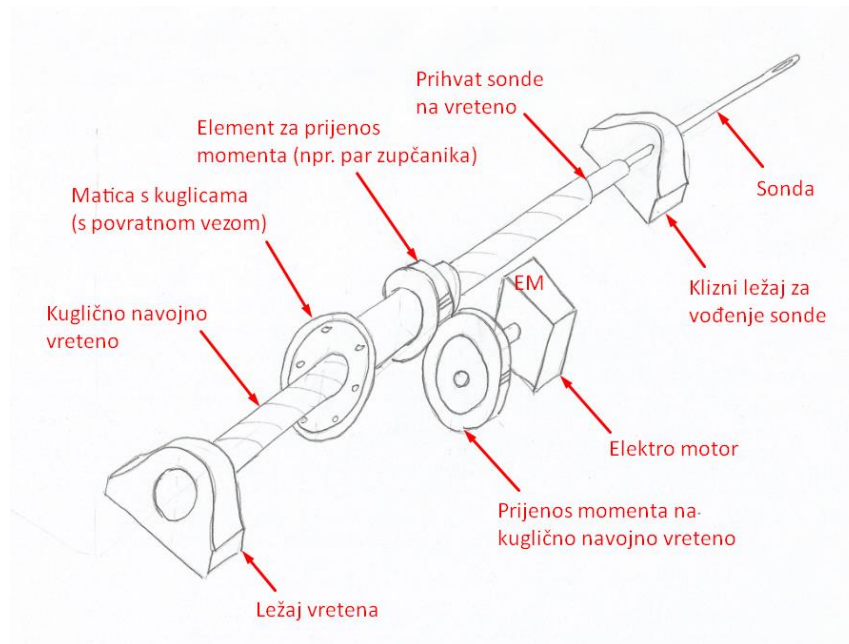
Na osnovu ovih ulaznih parametara nastale su dvije konceptualne ideje s varijacijama u pojedinim elementima sustava.



Slika 13. Prva konceptualna ideja

Slika 13. prikazuje kako bi sustav mogao raditi s kugličnim navojnim vretenom. Kuglično bi se navojno vreteno koristilo za primarno linearno gibanje koje bi biopsijsku sondu dovelo do željene točke unutar moždane strukture na način da je na stražnjem kraju alata smješten pogonski motor koji bi vretenu davao potrebni moment. Odmah iza motora nalazio bi se pripadajući ležaj, a zatim klizni element s kugličnom maticom koja na sebi ima radni stol s elementom koji bi osiguravao prihvat stražnjeg kraja vanjske sonde i koračni elektro-motor koji bi bio spojen na stražnji kraj

unutarnje sonde i isporučio potrebni relativni zakret između unutarnje i vanjske sonde nakon djelovanja vakuuma. Prijenos momenta s manjeg elektro motora na unutarnju sondu razmatrao se putem konvencionalnih metoda (zupčanici, tarenice, remenski prijenos) ali ni jedna nije odabrana kao najbolja. Na kraju vretena nalazio bi se drugi ležaj vretena na kojeg bi bio spojen element s kliznim ležajem za vođenje sonde prilikom linearnog gibanja.



Slika 14. Druga konceptualna ideja

Slika 14. prikazuje drugu konceptualnu ideju koja se zasniva na ideji da je sonda izravno vezana za vreteno te da se prijenos gibanja vrši inverzno na način da je matica fiksno pozicionirana, a da vreteno putuje. Ostali elementi sustava poput uležištenja i pogona, ostali su isti.

Nakon razmatranja ideja zaključeno je da je druga konceptualna ideja interesantna po pitanju gibanja i prijenosa momenta, ali se u praksi takva metoda vezanja elementa pokazala kao neefikasna i nedovoljno precizna. Osim toga, direktan spoj sonde na vreteno značio bi otežano osiguranje podtlaka u sondi i relativnog zakreta unutarnje sonde na vanjsku. Uz pozicioniranje sonde ekscentrično od vretena, a i dalje uz izravno montiranje, podtlak i zakret bi se olakšali, ali bi se uvela ekscentričnost i kompleksnost. Zbog navedenih se razloga druga ideja odbacila.

Za prvu konceptualnu ideju zaključeno je kako bi sustav mogao poprimiti punu funkcionalnost uz nekoliko preinaka.

- Potrebno je implementirati vodilicu koja nije prikazana na skici kako bi se osigurala krutost sustava.
- U slučaju odabira servo-motora s apsolutnim enkoderom za pogon vretena bilo bi potrebno konstruirati senzorski element koji bi prije svake uporabe vršio kalibraciju pozicije sonde kako bi se prilikom operativnog zahvata rupica na kraju sonde mogla pozicionirati u željenom smjeru.
- Vodilice za sonde (prednja i zadnja) trebaju imati izmjenjive čahure kako bi se lakše mogle koristiti sonde različitih proizvođača uz pripadajuće čahure obzirom da krajevi nisu propisani standardom.
- Prihvatni elementi moraju moći zaključati poziciju sonde kako ne bi došlo do slobodnih zakreta tijekom operacije.
- Prijenos momenta na unutarnju sondu nije moguće ostvariti konvencionalnim oblicima prijenosa jer ne zadovoljavaju iz više razloga: kod zupčanika i remenskog prijenosa nije moguće prenijeti moment sa zupčanika na sondu koja se trenutno koristi, a tarni bi prijenos unosio preveliku radijalnu silu na sondu što bi moglo rezultirati pomicanjem vrha sonde koje bi time mogla nanijeti štetu u moždanoj strukturi.

Počevši od skica i prvih ideja već nabrojane problematike rješavane su slijedno.

5.1. Linearni pogon, pomak i vođenje

Potrebno je analizirati koji oblik linearnog pogona može najbolje zadovoljiti uvjete pomaka i visoke preciznosti.

Linearni pogoni:

- Hidraulični linearni pogon – hidraulični cilindar
- Pneumatski linearni pogon – pneumatski cilindar
- Elektromagnetni linearni pogon – linearni električni motor
- Elektromehanički linearni pogon – sustav koji se sastoji od elektro motora i elementa za pretvorbu rotacijsko u linearno gibanje
- Ostali linearni pogoni

Hidraulični pogoni bazirani su na prijenosu nestlačivog fluida kroz sustav koji obavlja mehanički rad. Najčešće se koriste kada je potrebno ostvariti velike sile u sustavu, brzo i relativno precizno. Ovakvi pogoni imaju povratne veze i zbog velikog protoka medija na spojevima nerijetko dolazi do curenja fluida što ove pogone svrstava među prljavije.

Pneumatski pogoni za radni medij koriste zrak koji je za razliku od tekućih nestlačivih fluida čišći te se zbog toga često koristi kada je čistoća jedan od zahtjeva. Postoje široke primjene ovakvih pogona, ali tamo gdje preciznost nije glavni uvjet. Nepreciznost ovakvog pogona rezultat je stlačivosti medija (zraka) koji može dovesti do netočnog pozicioniranja uslijed pojave povratne sile.

Elektromagnetni pogoni vrlo su precizni pogoni koji rade na istom principu kao i elektro motori, ali uz permanentne magnete postavljene na pravocrtnoj putanji. Imaju prednosti u vidu brzog i preciznog gibanja, ali za to koriste puno energije od koje se veliki udio pretvara u toplinu. Osim toga, permanentni magneti potrebni za rad, ovu vrstu pogona čine prilično teškom.

Elektromehanički pogoni najrasprostranjeniji su tip pogona za precizno pozicioniranje kod prijenosa tereta. Glavni elementi ovakvih pogona električni su motor, mehanički elementi koji pretvaraju rotacijsko gibanje u translacijsko gibanje i vodilice koje preuzimaju radjalna opterećenja koja se javljaju u sustavu.

Između nabrojanih pogona najsmislenije je odabrati elektromehanički pogon zbog mogućnosti stvaranja sustava male mase i visoke preciznosti. Hidraulični pogon ne bi bio dobro rješenje zbog svoje kompleksnosti te zbog visoke vjerojatnosti kapanja radnog fluida. Pneumatski pogon ne zadovoljava preciznošću, a elektromagnetni svojom masom.

1. Vrste pogonskih motora elektro mehaničkih pogona

- a. Servo motori – dolaze kao AC ili DC motori koji uz motor imaju i senzor pozicije osovine motora (enkoder). Najčešće dolaze s reduktorom koji povećava izlazni moment, a smanjuje brzinu vrtnje.
- b. Koračni motori – također dolaze kao AC ili DC motori, ali bez senzora pozicije, već se kontroliraju putem koraka koji za motor znači zakret za određeni kut odnosno da se pozicija osovine kontrolira putem impulsa koji dolaze s kontrolera i reguliraju zakret osovine.
- c. Ostali motori – hidraulični, pneumatski i dr.

2. Način pretvorbe rotacijskog gibanja u translacijsko:
 - a. Pogon vretenom – pretvorba se vrši preko matice i zakreta trapeznog ili kugličnog vretena
 - b. Remenski pogon – pretvorba se vrši korištenjem remena
 - c. Pogon preko zupčanika i zubne letve – pretvorba se vrši relativnim pomicanjem zubne letve po zupčaniku
3. Vrste vodilica:
 - a. Vodilice kvadratnog profila s klizačima
 - b. Vodilice okruglog profila s linearnim ležajevima
 - c. Vodilice „V“ profila s kugličnim ležajevima

U ovoj podjeli vrlo važan aspekt jest način pretvorbe rotacijskog gibanja u translacijsko. Prilikom razmatranja najboljeg oblika najvažniji zahtjev bio je preciznost. Iz te perspektive pretvorba preko zupčanika i zubne letve nije loša, ali je prostorno zahtjevna i otvara mogućnost ozljeda zbog otvorenog rada para zupčanika među koje bi u nepažnji nešto moglo zapeti ili upasti. Stoga bi ovakav prijenos zahtijevao velik operativni prostor i kućište što povećava ukupnu masu te se zbog toga ne čini kao najbolji odabir. Uobičajeno je da se ovakav prijenos koristi kod velikih tereta jer je veza u spoju kruta i stabilna i ovakvi sustavi uglavnom imaju dugačak vijek trajanja.

Remenski prijenos izvrstan je odabir kod velikih brzina rada i kod rada s manjim teretima, jeftino je rješenje, ali ne zadovoljava po zahtjevu preciznosti zbog elastičnog ponašanja remena. Remenski prijenosi imaju i relativno visoku kompleksnost i u radnoj okolini u kakvoj će se nalaziti ovaj alat također bi zahtijevali kućište.

Naposljetku, pretvorba putem vretena i matice daje visoko kruti sustav velike preciznosti s relativno jednostavnim mehaničkim dijelovima. Postoje dvije vrste vretena, trapezno vreteno gdje matica kliže po navoju cijelom dužinom vretena i prilikom rada zbog trenja generira toplinu na dodirnim plohama navoja te kuglično vreteno koje u pripadajućoj matici ima kuglice spremljene u kavez i spojene povratnom vezom koje omogućavaju rad na principu ležaja gdje nema trenja klizanja, već samo trenje kotrljanja koje je gotovo zanemarivo. Sustavi s kugličnim navojnim vretenom kuglice matice mogu spremati unutar kaveza s prednaprezanjem zbog čega takvi sustavi imaju već krutost od trapeznih vretena, a time i znatno veću učinkovitost, od 85 – 95 % [34]. Ovakva vretena omogućavaju finiji pokret, veću točnost, veću ponovljivost, duži vijek trajanja i podnose velika opterećenja. Zbog svoje jednostavnosti i visoke krutosti koja rezultira

zadovoljavajućom preciznošću, kuglično navojno vreteno odabrano je kao metoda pretvorbe rotacijskog u translacijsko gibanje.

S obzirom na to da je za glavni linearni pogon odabrana elektro-mehanička metoda s kugličnim navojnim vretenom, potrebno je odrediti vreteno koje će zadovoljiti potrebe ovog sustava.

Na tržištu postoji veliki broj proizvođača ovakvih vretena poput *ThomsonLinear*, *MiSUMi*, *OZAK*, *NSK*, *MORIMOTO*, *THK* i drugi. Između svih proizvođača japanska tvrtka *THK* nudila je veliki izbor preciznih navojnih vretena u mini-seriji, stoga je ona odabrana kao izvor za odabir vretena.

5.1.1. Odabir kugličnog navojnog vretena

Odabrana tvrtka za izbor vretena predlaže svoj standardni proračun koji s nekoliko ulaznih parametara kroz nekoliko koraka dovodi do odabira najboljeg vretena koji odgovara željenim zahtjevima te pripadajućom maticom i ležajevima.

Koristeći se izvorom [35] izvršeni su sljedeći koraci u odabiru.

Prije ulaska u proračun bilo je potrebno odrediti početne uvjete. S obzirom na to da je vreteno prva točka odabira i do njega nema postojećeg sustava kojeg se treba pogoniti, sve vrijednosti odabrane u sljedećoj tablici pretpostavljane su vrijednosti odabrane da predstavljaju moguće ili predimenzionirane realne uvjete.



Slika 15. Primjer kugličnog navojnog vretena [36]

Tablica 3. Početni okvirni uvjeti za odabir kugličnog navojnog vretena

Početni uvjeti	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Masa stola	m_1	1	kg
Radna masa	m_2	3	kg
Radna duljina	l_s	150 - 200	mm
Najveća brzina gibanja	v_{max}	5	m/s
Vrijeme ubrzanja	t_1	2	s
Vrijeme usporavanja	t_3	2	s
Broj izmjeničnog kretanja u minuti	N	10	min ⁻¹
Vrijednost praznog hoda	-	0.005	mm
Točnost pozicioniranja	-	±0.05/300	mm/mm
Ponovljivost u pozicioniranju	-	±0.1	mm
Minimalni korak	S	0.01	mm/pulse
Željeni vijek trajanja	-	10000	h
Pogonski motor	-	1000	min ⁻¹
Moment inercije motora	J_m		kgm ²
Redukcija	A	1	
Faktor trenja vodilica	μ	0.02	
Sila trenja na površini gibanja	F	30	N

S navedenim vrijednostima želi se odabrati i definirati:

- Promjer vretena
- Korak navoja
- Vrsta i oblik matice
- Preciznost pogona
- Aksijalna zračnost pogona
- Metoda podupiranja vretena
- Pogonski motor

Odabir točnosti kuta koraka navoja

Prema željenoj točnosti pozicioniranja od ±0.05/300 prema Tablici 1. sa stranice B15-20 iz [35] odabire se razred točnosti C5 kod kojeg je greška pozicioniranja na maksimalnom pomaku 23 μm uz fluktuaciju od 18 μm. Odabran je razred C5 po preporuci proizvođača kod izrade preciznih vretena.

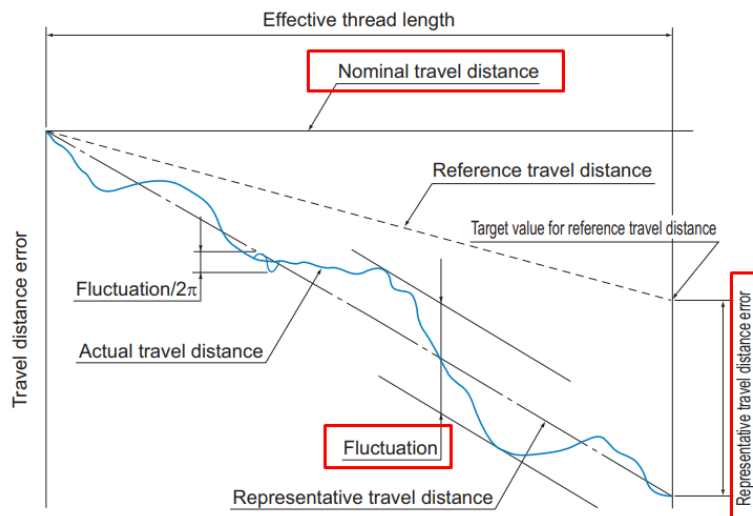
Type	Series symbol	Grade	Remarks
For positioning	Cp	1, 3, 5	ISO compliant
For transport	Ct	1, 3, 5, 7, 10	

Slika 16. Preporuka proizvođača za odabir razreda kvalitete kod odabira vretena

Table1 Lead Angle Accuracy (Permissible Value) Unit: μm

Accuracy grades		Precision Ball Screw										Rolled Ball Screw		
		C0		C1		C2		C3		C5		C7	C8	C10
Effective thread length	Above Or less	Representative travel distance error	Fluctuation	Representative travel distance error	Fluctuation	Representative travel distance error	Fluctuation	Representative travel distance error	Fluctuation	Representative travel distance error	Fluctuation	Travel distance error	Travel distance error	Travel distance error
		—	100	3	3	3.5	5	5	7	8	8	18	18	
100	200	3.5	3	4.5	5	7	7	10	8	20	18			
200	315	4	3.5	6	5	8	7	12	8	23	18			
315	400	5	3.5	7	5	9	7	13	10	25	20			
400	500	6	4	8	5	10	7	15	10	27	20			
500	630	6	4	9	6	11	8	16	12	30	23			

Slika 17. Prikaz odabira razreda točnosti za vreteno



Slika 18. Maksimalna greška i fluktuacija vretena

Odabir aksijalne zračnosti i mogućih promjera vretena

Kako bi zadovoljili maksimalni iznos praznog hoda od 0.005 mm prema Tablici 10. sa stranice B15-27 iz [35] odabire se oznaka zračnosti GT.

Clearance symbol	G0	GT	G1	G2	G3
Axial Clearance	0 or less	0 to 0.005	0 to 0.01	0 to 0.02	0 to 0.05

Slika 19. Odabir oznake zračnosti vretena

S odabranom oznakom zračnosti uz pomoć sljedeće tablice (Tablica 11.) iz izvora odabiru se moguće vrijednosti promjera vretena.

Screw shaft outer diameter	Clearance GT				Clearance G1				Clearance G2						
	C0	C1	C2·C3	C5	C0	C1	C2·C3	C5	C0	C1	C2	C3	C5	C7	
4·6	80	80	80	100	80	80	80	100	80	80	80	80	100	120	
8	230	250	250	200	230	250	250	250	230	250	250	250	300	300	
10	250	250	250	200	250	250	250	250	250	250	250	250	300	300	
12·13	440	500	500	400	440	500	500	500	440	500	630	680	600	500	

Slika 20. Odabir mogućih promjera vretena

Iz tablice s prethodne slike može se iščitati da vrijednosti promjera mogu biti 8, 10 i 12 mm za ukupnu duljinu vretena veću od 200 mm.

Pretpostavljena ukupna duljina vretena

Ukupna duljina vretena određuje se pomoću potrebnog radnog hoda koji je u ovom slučaju minimalno 120 mm ili više (do maksimalno 200 mm zbog maksimiziranja iskoristivosti ukupne duljine sonde) te uz pretpostavku duljine matice i duljine ležajeva vretena. S obzirom na to da već znamo da se radi o vretenu malog promjera, može se pretpostaviti da ukupna duljina matice s ležajevima neće prelaziti 50 mm što u zbroju iznosi maksimalno 250 mm. Ukoliko ukupna duljina matice i ležajeva bude i nešto veća, do maksimalno 100 mm, i dalje će se zadovoljiti minimalni radni hod od 120 mm.

Odabir koraka vretena

Za proračun koraka motora koristi se maksimalna brzina gibanja – 5 m/s, brzina motora i rezolucija enkodera. Kako električni motor i enkoder još nisu odabrani, moguće je izračunati nekoliko varijanti i sukladno tome birati motor.

Prema Tablici 18. sa stranice A15-26 iz [35] vreteno promjera 8 mm može imati korak navoja od 1, 2 ili 10 mm, a vreteno promjera 10 mm može imati korak navoja od 2, 4 i 10 mm. Pretpostavljeno je da će jedno od dva manja moguća promjera zadovoljiti uvjete, stoga se promjer od 12 mm sada nije razmatrao.

Table 18 Standard Combinations of Screw Shaft and Lead (Precision Ball Screw) Unit: mm

Screw shaft outer diameter	Lead																						
	1	2	4	5	6	8	10	12	15	16	20	24	25	30	32	36	40	50	60	80	90	100	
4	●																						
5	●																						
6	●																						
8	●	●					●	○															
10	●	●	●				●	○															
12	●	●	●	●			●																

Slika 21. Prikaz standardnog koraka navoja za odabrani promjer vretena

Prema sljedećoj jednadžbi može se napraviti tablica varijanti.

$$\frac{v_{max} \cdot \text{' rezolucija enkodera' } \cdot 60}{\omega} = P \quad (1)$$

Tablica 4. Varijante rezolucije enkodera i brzine vrtnje motora

Rezolucija enkodera	Brzina vrtnje motora – ω [min^{-1}]	Korak navoja – P [mm]
50	7500	2
100	7500	4
150	7500	6
300	9000	10

Iz tablice 4. vidljivo je da se kombinacijama različitih rezolucija i brzina vrtnje motora mogu postići drugačiji koraci navoja. Ukoliko se prvo odabere korak navoja, tada će se pri odabiru motora morati paziti na ovu tablicu ili na jednadžbu (16) prema kojoj će se moći odabrati nova kombinacija enkodera i brzine vrtnje motora.

Kako bi se zadovoljio uvjet od 0.01 mm/puls, uz odabrani korak navoja, mora se pažljivo odabrati enkoder tako da se korak navoja podijeli željenom rezolucijom, npr. za korak navoja od 2 mm enkoder bi morao imati rezoluciju od 50 te se, sukladno tome, mora odabrati motor sa željenom brzinom vrtnje.

Odabir metode uležištenja vretena

Postoje tri vrste uležištenja vretena:

- Radijalno – aksijalni ležaj – slobodni kraj
- Radijalno – aksijalni ležaj – radijalni ležaj
- Radijalno – aksijalni ležaj – radijalno – aksijalni ležaj

S obzirom na male brzine vrtnje ovog vretena u stvarnoj eksploataciji uležištenje u kombinaciji radijalno – aksijalnog i radijalnog ležaja bit će dovoljno dobro.

U nastavku proračuna izračun vrijednosti opterećenja gotovo je nepotreban s obzirom na male brzine vrtnje vretena s malim opterećenjima bez velikih momenata inercije, no, zbog dokaza da vreteno zadovoljava, proračun se proveo do kraja.

Aksijalna opterećenja

Pri izračunu dozvoljenog aksijalnog opterećenja koristit će se sljedeće vrijednosti iz Tablica 3.

• Masa stola	m_1	1	kg
• Radna masa	m_2	3	kg
• Najveća brzina gibanja	v_{max}	5	m/s
• Vrijeme ubrzanja	t_1	2	s
• Akceleracija sile teže	g	9.807	m/s ²
• Faktor trenja vodilica	μ	0.02	
• Sila trenja na površini gibanja	f	30	N

Prvo će biti potrebno izračunati ubrzanje α prema sljedećoj formuli.

$$\alpha = \frac{v_{max}}{t_1} = 2.5 \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

Nakon toga se računaju sile koje se javljaju prilikom ubrzanja, jednolikog gibanja i usporavanja radnog stola na vretenu.

$$F_{a_1} = \mu \cdot (m_1 + m_2) \cdot g + f + (m_1 + m_2) \cdot \alpha = 40.78 \text{ N} \quad (3)$$

$$F_{a_2} = \mu \cdot (m_1 + m_2) \cdot g + f = 30.78 \text{ N} \quad (4)$$

$$F_{a_3} = \mu \cdot (m_1 + m_2) \cdot g + f - (m_1 + m_2) \cdot \alpha = 20.78 \text{ N} \quad (5)$$

$$F_{a_4} = -\mu \cdot (m_1 + m_2) \cdot g - f - (m_1 + m_2) \cdot \alpha = -40.78 \text{ N} \quad (6)$$

$$F_{a_5} = -\mu \cdot (m_1 + m_2) \cdot g - f = -30.78 \text{ N} \quad (7)$$

$$F_{a_6} = -\mu \cdot (m_1 + m_2) \cdot g - f + (m_1 + m_2) \cdot \alpha = -20.78 \text{ N} \quad (8)$$

Jednadžbe od (3) do (8) redom opisuju gibanje prilikom ubrzanja unaprijed, jednolikog gibanja unaprijed, usporavanja unaprijed, ubrzanja u nazad, jednolikog gibanja u nazad i usporavanja u nazad. Iz priloženih jednadžbi vidi se kako je maksimalna sila koja se pojavljuje u sustavu $F_{a_{max}} = F_{a_1} = 40.78 \text{ N}$. S obzirom na to da je riječ o relativno malim silama, može se pretpostaviti da u ovako krutim sustavima one nemaju značajnog utjecaja.

Dopušteno opterećenje pri izvijanju

Za izračun dopuštenih opterećenja koristit će se preporučena formula sa stranice B15-38 iz [35]. Prilikom izračuna bit će potrebno koristiti faktore η_1 i η_2 koji se mijenjaju ovisno o metodi uležištenja vretena i mogu se naći na stranici B15-38 u [35], a u ovom slučaju iznose $\eta_1 = 2$ i $\eta_2 = 10$. Nadalje, koristit će se pretpostavljena udaljenost između dvije površine montiranja,

pretpostavlja se da će ta udaljenost l_a iznositi 225 mm obzirom na ukupnu duljinu vretena od 250 mm. Naposljetku, koristit će se unutarnji promjer vretena d_1 koji je za nominalni promjer vretena 8 mm s korakom 2 mm $d_1 = 7 \text{ mm}$, za nominalni promjer vretena 8 mm s korakom 10 mm $d_1 = 6.7 \text{ mm}$, za nominalni promjer vretena 10 mm s korakom 4 mm $d_1 = 7.8 \text{ mm}$ te za nominalni promjer vretena 10 mm s korakom 4 mm također $d_1 = 7.8 \text{ mm}$.

$$P_1 = \eta_2 \cdot \frac{d_1^4}{l_a^2} \cdot 10^4 \quad (9)$$

Prema jednadžbi (9) za $d_1 = 7 \text{ mm}$ vrijedi $P_1 = 4742.7 \text{ N}$, za $d_1 = 6.7 \text{ mm}$ vrijedi $P_1 = 3980.47 \text{ N}$ i za $d_1 = 7.8 \text{ mm}$ vrijedi $P_1 = 7311.6 \text{ N}$ što se može vidjeti u Tablica 5.

Prema tome, ako je $F_{a_{max}} < P_1$ vreteno zadovoljava. Za oba promjera sa svim varijacijama koraka navoja vreteno je daleko ispod P_1 što znači da oba vretena zadovoljavaju.

Dopušteno tlačno i vlačno opterećenje

I u ovom slučaju koristi se preporučena formula sa stranice B15-38 iz [35]. U ovom slučaju koristit će se samo unutarnji promjer vretena d_1 koji se koristio i u prethodnom koraku.

$$P_2 = 116 \cdot d_1^2 \quad (10)$$

Prema jednadžbi (10) za $d_1 = 7 \text{ mm}$ vrijedi $P_2 = 5684 \text{ N}$, za $d_1 = 6.7 \text{ mm}$ vrijedi $P_2 = 3980.47 \text{ N}$ i za $d_1 = 7.8 \text{ mm}$ vrijedi $P_2 = 7057.4 \text{ N}$ što se također može vidjeti u Tablici 5.

Ovdje također vrijedi uvjet $F_{a_{max}} < P_2$ i oba slučaja vreteno zadovoljava.

Izračun maksimalne dozvoljene i kritične brzine vrtnje nije potreban s obzirom na uvjete korištenja vretena. Ulazak u moždanu strukturu uvijek će biti vrlo spor kako bi se izbjegla neželjena oštećenja, stoga kritična brzina nikada neće ni biti postignuta. Zbog istog razloga neće se prikazati ni proračun puta ubrzavanja i kočenja, srednjeg broja okretaja u minuti i nazivnog vijeka trajanja.

Odabir modela vretena, pripadajuće matice i pripadajućih ležajeva

Prema ponudi iz kataloga model *BNK* sa stranice A15-132 iz [35] najbolje je odgovarao zbog već pripremljenih krajeva za montažu. Uz model, trebalo je odabrati i broj koji je definiran promjerom i korakom navoja, stoga su u obzir dolazile sljedeće kombinacije:

- BNK 0802
- BNK 0810

- BNK 1002
- BNK 1004

Tablica 5. Usporedba modela vretena u kombinaciji s pripadajućim maticama

Model	BNK0802	BNK0810	BNK1004	BNK1010
Ø (mm)	8	8	10	10
Korak navoja P (mm)	2	10	4	10
Maksimalni radni hod vretena (mm)	150	300	250	300
d ₁	7	6.7	7.8	7.8
BCD = D	8.3	8.4	10.5	10.5
P ₁ (N)	4742.72	3980.47	7311.62	7311.62
P ₂ (N)	5684	718.24	7057.44	7057.44
Masa matice (kg)	0,034	0,049	0,15	0,17
Masa vretena (kg/m)	0,27	0,3	0,32	0,5
Masa vretena (kg)	0,0675	0,075	0,08	0,125
Ukupna masa (kg)	0,1015	0,124	0,23	0,295

Modeli BNK 0802, BNK 1004 i BNK 1010 eliminirani su zbog nepovoljnog razreda kvalitete izrade. Za maksimalnu radnu duljinu vretena od 200 mm postoje samo kvalitete izrade G0 i G2, a naša ciljana kvaliteta je GT. Preciznija skupina G0 bila bi opcionalna ali nepotrebna.

Za jedini preostali model vrijedili su sljedeći mogući oblici:

1. BNK 0810

- BNK 0810-3GT+255LC5Y za ukupni radni hod od 150 mm
- BNK 0810-3GT+305LC5Y za ukupni radni hod od 200 mm.

U oba modela vrijedi BNK kao oznaka modela, 08 vrijednost promjera, 10 korak navoja, potom 3 označava koliki je pomak za jedan okret vretena, iza toga slijedi simbol kvalitete izrade GT, zatim 255L/305L predstavlja radnu i ukupnu duljinu vretena, C5 predstavlja razred točnosti izrade i Y oblik obrade kraja vretena.

U prethodnoj tablici za modele koji ne odgovaraju razredu kvalitete GT prikazane vrijednosti izračunate su za precizniji razred G0.

Za oba odabrana slučaja vrijedi da je, ako se uzimaju ležajevi kvadratnog oblika, zbog jednostavnije montaže na radni stol alata, na aksijalno-radijalnom kraju ležaj sa šifrom EK6

odnosno ležaj AC6-16, a na radijalnoj strani EF6 odnosno ležaj 606ZZ, odabran prema preporuci iz Tablice sa stranice A15-134 i Tablice sa stranice A15-304 iz [35].

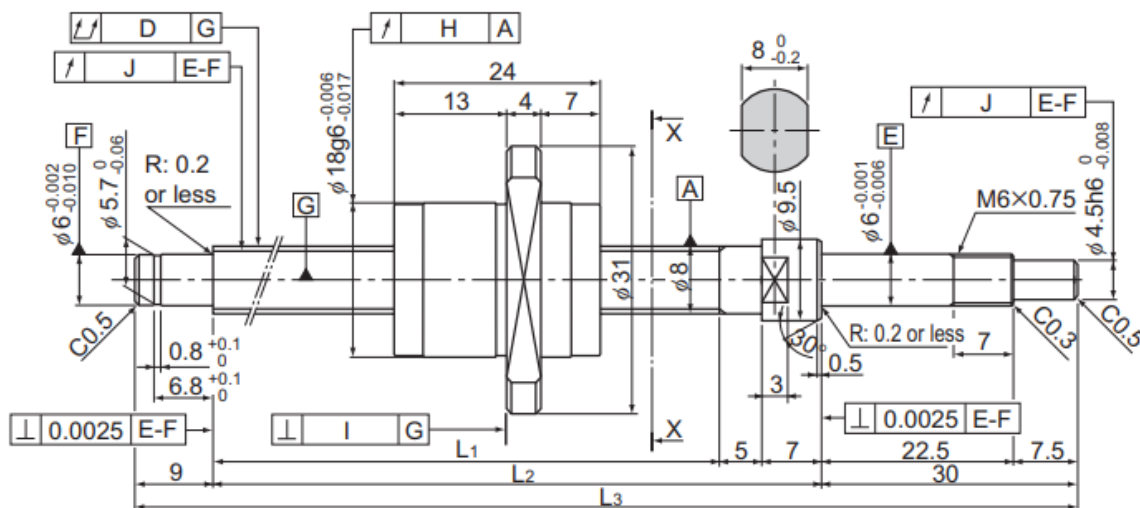
Dozvoljeno aksijalno opterećenje

Za odabrano vreteno izračunat će se dozvoljeno aksijalno opterećenje prema sljedećoj formuli u kojoj će se koristiti inicijalni statički koeficijent naprezanja za odabrano vreteno C_{0a} koje za oba vretena iznosi 3.82 kN i statički faktor sigurnosti f_s koji se može tablično iščitati sa stranice B15-47 iz [35] i njegova aritmetička sredina iznosi 2.5.

$$F_{a_{max}} = \frac{C_{0a}}{f_s} = 1528 \text{ N} \quad (11)$$

Prema jednadžbi (11) i jednadžbama od (3) do (8) može se vidjeti kako je vreteno duboko u sigurnom području rada.

BNK0810-3 Shaft diameter: 8; lead: 10



Model No.	Stroke	Screw shaft length			D	H	I	J	Lead angle accuracy		Nut mass kg	Shaft mass kg/m
		L ₁	L ₂	L ₃					Representative travel distance error	Fluctuation		
BNK 0810-3GT+205LC5Y	100	154	166	205	0.05	0.012	0.01	0.01	±0.02	0.018	0.049	0.30
BNK 0810-3G2+205LC7Y					0.065	0.02	0.014	0.014	Travel distance: ±0.05/300	0.049	0.30	
BNK 0810-3GT+255LC5Y	150	204	216	255	0.05	0.012	0.01	0.01	±0.023	0.018	0.049	0.30
BNK 0810-3G2+255LC7Y					0.065	0.02	0.014	0.014	Travel distance: ±0.05/300	0.049	0.30	
BNK 0810-3GT+305LC5Y	200	254	266	305	0.05	0.012	0.01	0.01	±0.023	0.018	0.049	0.30
BNK 0810-3G2+305LC7Y					0.065	0.02	0.014	0.014	Travel distance: ±0.05/300	0.049	0.30	
BNK 0810-3GT+355LC5Y	250	304	316	355	0.06	0.012	0.01	0.01	±0.023	0.018	0.049	0.30
BNK 0810-3G2+355LC7Y					0.075	0.02	0.014	0.014	Travel distance: ±0.05/300	0.049	0.30	
BNK 0810-3GT+405LC5Y	300	354	366	405	0.07	0.012	0.01	0.01	±0.025	0.018	0.049	0.30
BNK 0810-3G2+405LC7Y					0.09	0.02	0.014	0.014	Travel distance: ±0.05/300	0.049	0.30	

Slika 22. 2D prikaz odabranog vretena i pripadajuća tablica sa specifikacijama

Krutost odabranog linearnog pogona

Krutost linearnog pogona koje uključuje vreteno, maticu i ležajeve utjecat će na ukupnu krutost sustava, a time i na preciznost pozicioniranja vrha sonde unutar moždane strukture. Za izračun krutosti linearnog pogona korištene su preporučene formule sa stranice B15-51 iz [35].

$$\delta = \frac{F_a}{K} \quad (12)$$

Formula (12) predstavlja glavnu formulu za izračun krutosti gdje je δ elastični pomak u aksijalnom smjeru linearnog pogona, F_a primijenjeno aksijalno opterećenje i K aksijalna krutost sustava.

Kako bi se izračunala ukupna krutost K potrebno je pronaći krutosti svih dijelova linearnog pogona.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_N} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_H} \quad (13)$$

Gdje su K_S aksijalna krutost kugličnog navojnog vretena, K_N aksijalna krutost matice, K_B aksijalna krutost ležaja i K_H aksijalna krutost spojke matice i radnog stola.

Za izračun aksijalne krutosti vretena kod ovog tipa uležištenja koristi se sljedeća formula.

$$K_S = \frac{A \cdot E}{1000 \cdot L} \quad (14)$$

Gdje su A poprečni presjek vretena koji se računa prema formuli $A = \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2$, E Yangov modul, d_1 unutarnji promjer vretena i L udaljenost između dvije površine montiranja. Slijedi da je $A = 35.27 \text{ mm}^2$, $E = 2.06 \cdot 10^5$, $L = 300 \text{ mm}$ i $K_S = 24.21 \text{ N}/\mu\text{m}$.

Za izračun aksijalne krutosti matice koja se montira bez preopterećenja koristi se sljedeća formula.

$$K_N = K \left(\frac{F_a}{0.3 \cdot C_a} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot 0.8 \quad (15)$$

Gdje je K tablična vrijednost krutosti koja dolazi uz odabrano vreteno, F_a aksijalno opterećenje i C_a osnovni dinamički koeficijent naprezanja. $K = 100 \text{ N}/\mu\text{m}$, $F_a \approx 41 \text{ N}$ i $C_a = 2.16 \text{ kN}$ čime se dobiva $K_N = 31.88 \text{ N}/\mu\text{m}$.

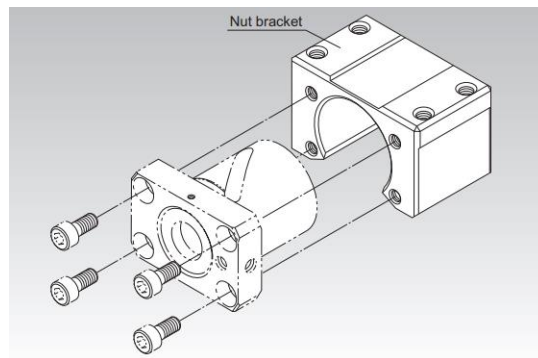
Aksijalna krutost ležaja dolazi kao kataloška vrijednost odabranog ležaja i može se iščitati iz specifikacije. Ako takav podatak nije na raspolaganju, mogla bi se koristiti sljedeća formula.

$$K_B = \frac{3F_{a0}}{\delta a_0} \quad (16)$$

Gdje su F_{a0} predopterećenje ležanja i δ_{a0} aksijalni pomak. Za slučaj odabranog ležaja $K_B = 35 \text{ N}/\mu\text{m}$.

Aksijalnu krutost spojke matice i radnog stola K_H poželjno je ostvariti što većom, s obzirom na to da je riječ o krutoj vezi s rastavljivim spojem za ovaj proračun pretpostavit će se da je veza idealno kruta.

Prema jednadžbi (13) nakon uvrštavanja vrijednosti K_S , K_N i K_B iz jednadžbi (14) - (16) dobiva se $K = 9.88 \text{ N}/\mu\text{m}$.



Slika 23. Izgled i način vezanja spojke matice i radnog stola alata [35]

5.1.2. Sustav za linearno vođenje

Uz linearni pogon, koji u ovom slučaju vrši kuglično navojno vreteno, mora postojati i sustav za linearno vođenje kako bi se osigurala pravilna distribucija masa koje opterećuju maticu vretena zbog ostvarivanja preciznog vođenja. Osim nošenja, sustavi za linearno vođenje podižu i krutost sustava što također osigurava preciznost. Moguće su konfiguracije s jednom ili dvije vodilice uz pogonsko vreteno. Konfiguracije s dvije vodilice izvrstan su odabir kod sustava koji moraju nositi velike mase na velikim brzinama.

Postoje tri najčešće izvedbe vodilica i to su:

- Vodilice okruglog profila s linearnim ležajevima (Slika 24. a))
- Kvadratne (profilne) vodilice s klizačima (Slika 24. b))
- V-tip linearnih vodilica

Vodilice okruglog profila i profilne vodilice imaju veću krutost i bolju nosivost u svim smjerovima. S obzirom na funkciju alata i mogućnost rotacija robotske ruke u svim smjerovima, potrebno je osigurati sigurno i kruto vođenje, stoga u obzir dolaze vodilice sa sljedeće slike.

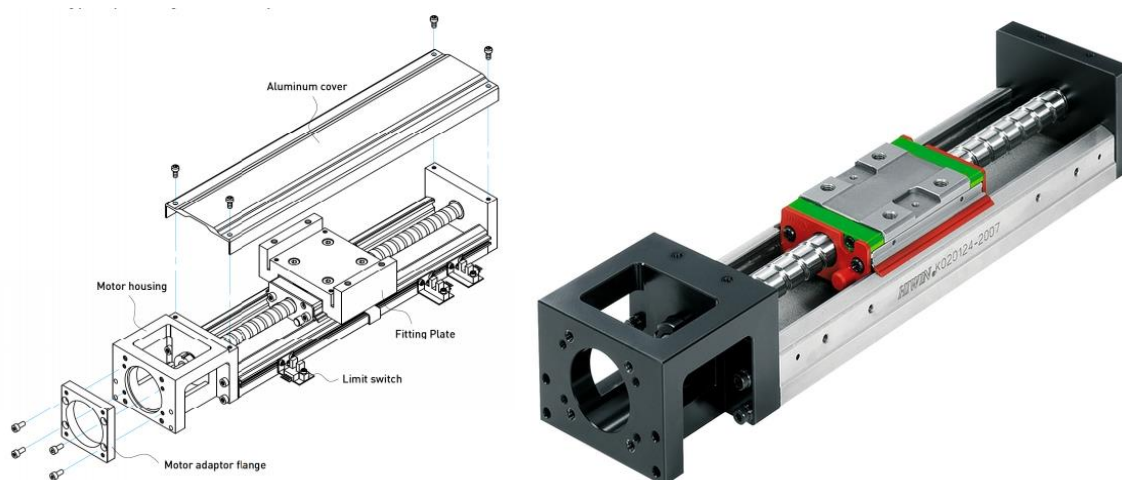


Slika 24. Linearne vodilice a) Okruglog profila b) Profilne vodilice s klizačima [36]

Prije odabira pogonskog motora odlučeno je razmotriti varijante gotovih linearnih aktuatora koji u sebi već imaju ugrađen pogon preko kugličnog navojnog vretena, potrebno vođenje, pogonski motor i često dolaze s kućištem koji je u slučaju rada u operacijskoj sali povoljna okolina.

5.1.3. Linearni aktuatori

Linearni aktuatori izvršni su elementi za linearno pokretanje ili pozicioniranje različitih mehaničkih i nemehaničkih elemenata koji se moraju pomicati pravocrtno. Primjena im je široka od pomicanja vrata, skretnih sustava, medicinskih pomagala, 3D pisača i dr. Mogu isporučivati sile i do nekoliko desetaka kN, hod im može biti i do jednog metra uz velike brzine pomaka, a mogu raditi i na različitim naponima. S obzirom na to da je jednostavnije usporediti performanse ovakvih uređaja nego birati pojedinačne komponente i graditi ih, postoji veliki broj kompanija koje ih proizvode, npr.: *HIWIN*, *THK*, *HENNLICH*, *Misumi*, *Thomson*, *Yamaha*, *IAI* i dr. Za slučaj ovog alata uzeto je nekoliko varijanti u obzir nastojeći odabrati aktuator s vretenom najslučajnijim ranije odabranom.



Slika 25. Primjer linearnog aktuatora tvrtke *HIWIN* [37]

Tablica 6. Usporedba modelaliniarnih aktuatora

Model	RCP3-SA2BC-I-20P-4S-150	RCACR-SA4C-A-20-2.5-150	RSD106B-C1-N-3-150	T4L-2-GC-150-1-CN1	GX05-5-S40-150-R3-R	KRF4-06-0150A-1-AN
Kompanija	IAI	IAI	Misumi	Yamaha	Yamaha	THK
Vrsta motora	Koračni motor	Servo motor	Koračni motor	Servo motor	Servo motor	Servo motor
Tip enkodera	Inkrementalni	Apsolutni	Inkrementalni	Apsolutni/ inkrementalni	Apsolutni/ inkrementalni	Apsolutni/ inkrementalni
Korak navoja	4 mm	2.5 mm	6 mm	2 mm	5 mm	6 mm
Radna duljina	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm
Točnost pozicioniranja	±0.05 mm	±0.02 mm	±0.02 mm	±0.02 mm	±0.005 mm	±0.01 mm
Prazni hod	0.3 mm ili manje	0.1 mm ili manje	0.1 mm ili manje	-	-	0.1 mm ili manje
Vrsta pogona	Kuglično navojno vreteno \varnothing 6 mm, valjano C10	Kuglično navojno vreteno \varnothing 8 mm, valjano C10	Kuglično navojno vreteno \varnothing 8 mm, valjano C10	Kuglično navojno vreteno \varnothing 8 mm	Kuglično navojno vreteno \varnothing 12 mm, razred C5	Kuglično navojno vreteno \varnothing 6 mm
Sustav vođenja	Klizno vođenje	Profilna vodilica	-	Profilna vodilica	Profilna vodilica	-
Težina	0.42 kg	0.9 kg	1.4 kg	1.4 kg	1.8 kg	1.5 kg + motor

Iz prethodne tablice vidljivo je kako svi ponuđeni aktuatori zadovoljavaju prema radnom hodu i preciznosti pozicioniranja. Neki od njih i precizniji su od traženih performansi u usporedbi s odabranim kugličnim navojnim vretenom, a mase variraju od 420 grama do skoro 2 kilograma.

Dakle, uzme li se u obzir željena točnost pozicioniranja iz tablice 3., prvi linearni aktuator iz tablice 6. zadovoljava taj kriterij i daleko je najlakši u usporedbi sa svim ostalim. Važnost male mase ukupnog sustava igra ulogu pri radu robotskog manipulatora za vrijeme operacije, posebno u pozicijama velikih ekstenzija robota. Stoga, kako bi se osigurala mala masa krajnjeg alata, odabire se linearni aktuator tvrtke IAI modela RCP3-SA2BR-I-20P-4S-150. Treba uzeti u obzir da je razred kvalitete izrade vretena ovog aktuatora veći tj. lošiji od onoga koji se odabrao ranije u proračunu vretena, ali zadovoljava točnost pozicioniranja. Oznaka „BC“ unutar naziva modela ovog aktuatora označava konfiguraciju pozicije motora, a za alat se odabrala desna konfiguracija s oznakom „BR“ zbog uštede prostora.

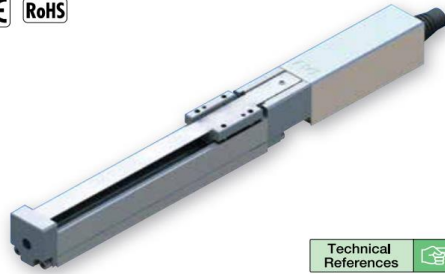
RCP3 ROBO Cylinder

RCP3-SA2BC

ROBO Cylinder, Mini Slider Type, Coupled Motor, 28mm Width, Pulse Motor, Lead Screw

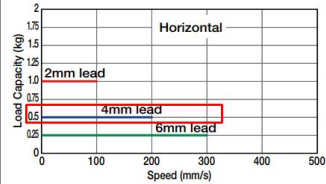
Model Specification Items	RCP3 — SA2BC	I	20P						
	Series	Type	Encoder type	Motor type	Lead	Stroke	Applicable controller	Cable length	Options
			I: Incremental * The Simple absolute encoder is also considered type "I".	20P: Pulse motor, 20□ size	65: 6mm lead screw 45: 4mm lead screw 25: 2mm lead screw	25: 25mm 50: 150mm 25mm pitch increments	P1: PCON-PL/PO/SE PSEL P3: PCON-CA PMEC/PSEP MSEP	N: None P: 1m S: 3m M: 5m X□: Custom length	NM: Non-motor end

* See page Pre-47 for details on the model descriptions.



Technical References Appendix P.5

Speed vs. Load Capacity
Due to the characteristics of the pulse motor, the RCP3 series' load capacity decreases at high speeds. In the table below, check if your desired speed and load capacity are supported.



Actuator Specifications

Leads and Payloads

Model number	Feed screw	Lead (mm)	Max. Load Capacity		Positioning Repeatability (mm)	Stroke (mm)
			Horizontal (kg)	Vertical (kg)		
RCP3-SA2BC-I-20P-6S-①-②-③-④	Lead screw	6	0.25	—	±0.05	25-150 (every 25mm)
RCP3-SA2BC-I-20P-4S-①-②-③-④		4	0.5	—		
RCP3-SA2BC-I-20P-2S-①-②-③-④		2	1	—		

Stroke and Maximum Speed

Lead	Stroke	25 (mm)	50 (mm)	75-150 (mm)
		Lead screw	6	180
Lead screw	4	180	200	—
	2	—	100	—

Code explanation ① Stroke ② Applicable Controller ③ Cable length ④ Options *See page A-71 for details on push motion. (Unit: mm/s)

Actuator Specifications

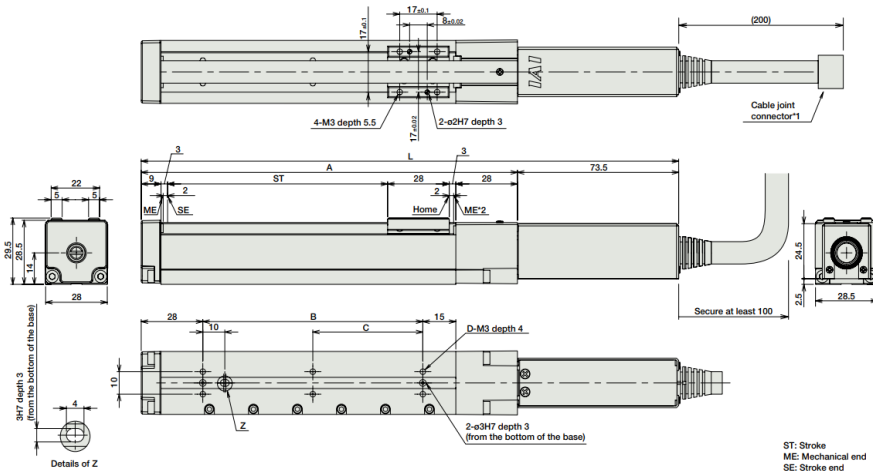
Leads and Payloads

Model number	Feed screw	Lead (mm)	Max. Load Capacity		Positioning Repeatability (mm)	Stroke (mm)
			Horizontal (kg)	Vertical (kg)		
RCP3-SA2BC-I-20P-6S-①-②-③-④	Lead screw	6	0.25	—	±0.05	25-150 (every 25mm)
RCP3-SA2BC-I-20P-4S-①-②-③-④		4	0.5	—		
RCP3-SA2BC-I-20P-2S-①-②-③-④		2	1	—		

Stroke and Maximum Speed

Lead	Stroke	25 (mm)	50 (mm)	75-150 (mm)
		Lead screw	6	180
Lead screw	4	180	200	—
	2	—	100	—

Code explanation ① Stroke ② Applicable Controller ③ Cable length ④ Options *See page A-71 for details on push motion. (Unit: mm/s)



Dimensions and Mass by Stroke

Stroke	25	50	75	100	125	150
L	169.5	194.5	219.5	244.5	269.5	294.5
A	96	121	146	171	196	221
B	25	50	75	100	125	150
C	0	0	0	50	62.5	75
D	4	4	4	6	6	6
Weight (kg)	0.3	0.32	0.35	0.37	0.4	0.42

Slika 26. Specifikacije i tehnička dokumentacija odabranog linearnog aktuatora RCP3-SA2BR

Linearni aktuator cjelovita je struktura linearnog pogona koja osigurava precizan pomak i pravilno vođenje. Kod ovakvih sustava pozicioniranje svih elemenata unutar sustava aktuatora unaprijed je definirano, a cijeli aktuator lako se ugrađuje s nekoliko toleriranih zatika i nekoliko vijaka. S obzirom na jednostavnost uporabe odlučeno je koristiti gotovi linearni sustav zbog smanjenja izradbene kompleksnosti alata zbog čega nema potrebe za konstruiranjem specifičnog linearnog sustava i odabirom klizača i elektro motora.

Nedostatak linearnog aktuatora manifestira se kroz radni temperaturni raspon čija je gornja granica 40°C što znači da element u cijelosti nije moguće sterilizirati standardnim metodama. S obzirom da nije opcija ostaviti sustav nesterilnim, cijeli će se linearni aktuator odvojiti od sterilnog dijela alata elastičnom folijom što je standardna praksa kod takvih sustava.

5.2. Veza s robotskom rukom

Schunkova prirubnica već je spomenuta kao standardni element spajanja na robotsku ruku. Na strani robotske ruke nalazi se „X“ dio prirubnice, a na razvijani alat veže se „Y“ dio prirubnice koji će se u trenutku montiranja spojiti standardnim *Schunkovim* spojnim elementom koji prikazuje slika 27. Iza prirubnice dolazi vezni element koji će prirubnicu spojiti s linearnim aktuatorom. Vezni element u prvoj je verziji zamišljen kao pločasti komad koji će sa što manje materijala osigurati mogućnost pozicioniranja i pričvršćivanja linearnog aktuatora s jedne strane te prirubnice s druge.



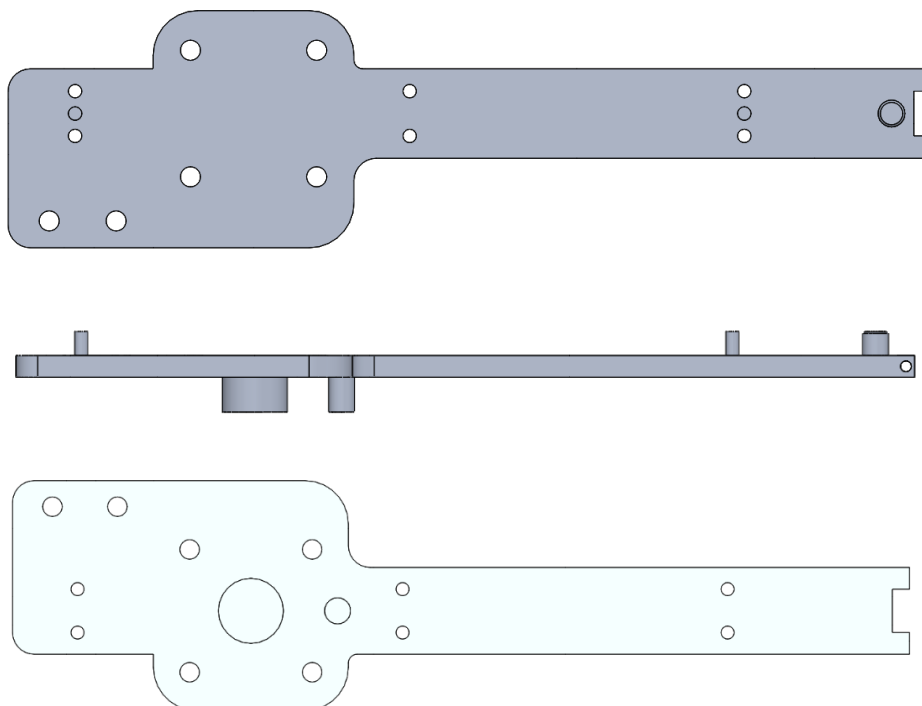
Slika 27. *Schunkova* prirubnica HWS 040 a) HWK 40 "Y" b) HWK 40 "X"



Slika 28. Tlocrt spojne ploče Schunkove prirubnice i linearnog akuatora

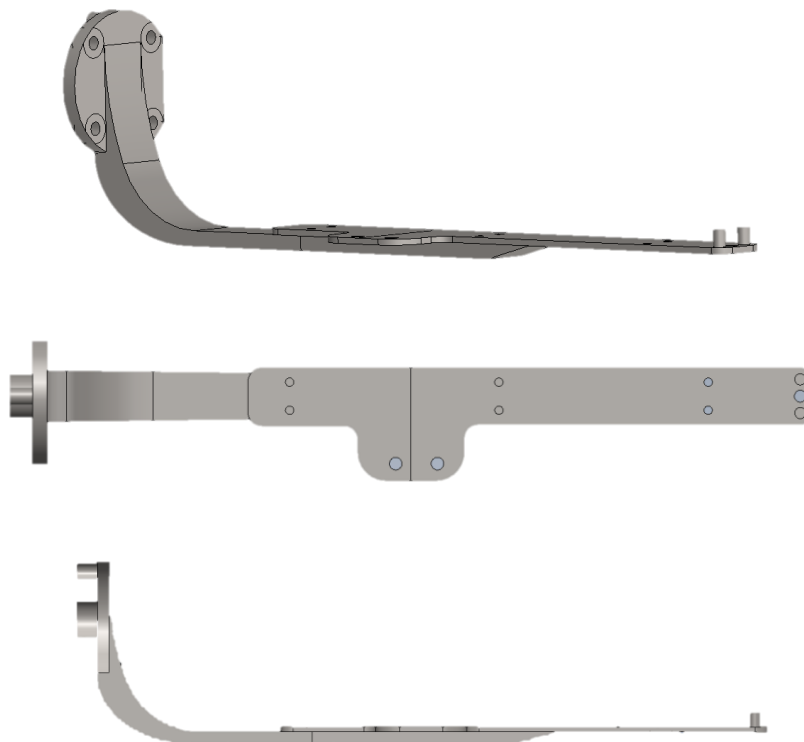
Na prethodnoj slici vidi se tlocrt inicijalnog izgleda ploče koja je sa svoje gornje strane omogućavala vijčano pritezanje akuatora lijevo na vrhu prednjeg uležištenja, na kvadratnom dijelu s donje strane predviđeno je pritezanje prirubnice, a dodatne dvije rupe na daljnjoj desnoj strani predviđene su za pozicioniranje vakuumske elementa sustava. Kroz analizu kvalitete ovakvog dizajna ustanovljeno je da ekscentričnost osi pružanja alata i prirubnice nije povoljna i da je potrebno u dizajn integrirati i zatike za vođenje oblikom i osiguravanje pozicije.

Na ovom se prvom primjeru pokazalo kako će zatici kao elementi spajanja dva komada svojim oblikom na svakom spoju biti nužan element kako bi osigurali dosljednost u mjerama. Vijčanim spojevima ne može se osigurati točnost pozicioniranja, već samo normalna sila na spoju.



Slika 29. Druga iteracija spojne ploče linearnog akuatora i Schunkove prirubnice a) Pogled odozgora b) Bočni pogled c) Pogled od ispod

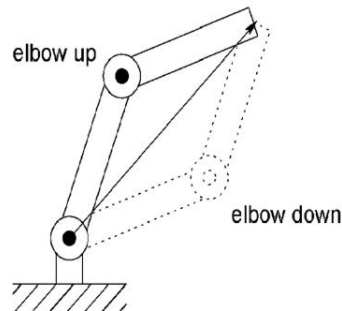
Slika 29. prikazuje drugu iteraciju istog spojnog elementa s poboljšanim konstrukcijskim rješenjima. Prirubnica je pozicionirana da svojom osi djeluje okomito na os pružanja alata što će olakšati upravljanje robotom. Šest prolaznih rupa za vijke za pozicioniranje aktuatora ostale su na istom mjestu, ali je dodan kvadratni usjek na čelu spojnog elementa u koji bi s gornje strane trebao upasti element prednjeg uležištenja s urezanim navojem i osigurati regulaciju pomaka vrata lijevo-desno. S istim ciljem s bočne je strane napravljena rupa za dosjedni vijak koji će svojim zakretom osiguravati horizontalni pomak prednjeg uležištenja. Kao što je ustanovljeno u prethodnoj iteraciji, dodani su zatici za linearni aktuator i vrat alata koji će služiti kao prednje uležištenje. Kružne izbočine s donje strane spojnog elementa svojom tolerancijom služiti će za pravilno pozicioniranje prirubnice. S ciljem osiguranja alata što manje mase, prvotna debljina ovog elementa iznosila je 2 mm.



Slika 30. Treća iteracija spojne ploče linearnog aktuatora i Schunkove prirubnice a) Pogled odozgora b) Izometrija c) Bočni pogled

U trećoj iteraciji razvoja veznog elementa sa slike 30. dodan je novi dio sustava kojim se prihvat prirubnice izmiče iza cijelog alata, s dosadašnje donje pozicije. Pozicija osi prirubnice ovim načinom vezanja može se staviti u os pružanja sonde čime se pozicioniranje alata znatno olakšava. Osim toga položaj zglobova robota u ovakvoj konfiguraciji povoljniji je i za radnu okolinu robota

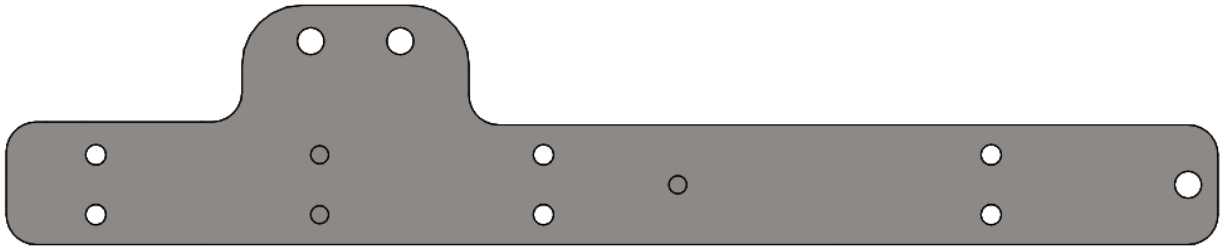
jer na ovaj način robotska ruka može biti u opruženom položaju ili položaju s laktom gore kao što je prikazano na slici 31., dok bi, kod prihvata od ispod, lakat robotske ruke morao biti dolje čime bi ometao kretanje osoblja u operacijskoj sali.



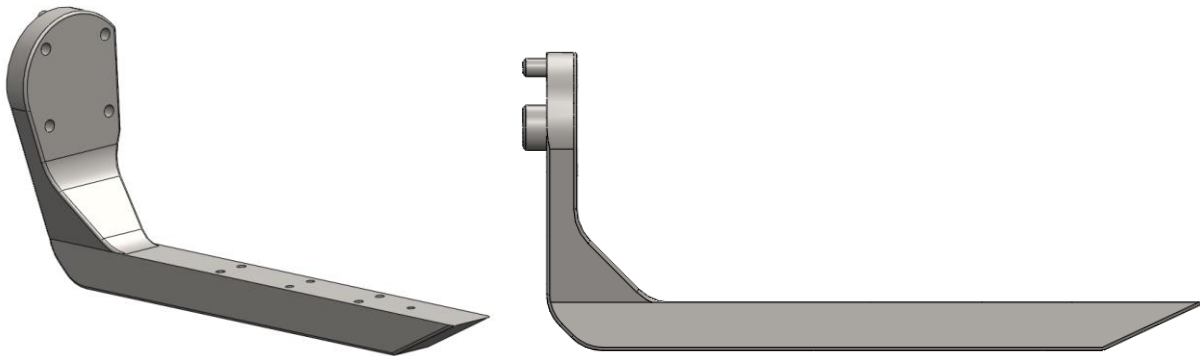
Slika 31. Shematski prikaz konfiguracije robota lakat gore – dolje [38]

Vrat spojne ploče konstruiran je tako da s jedne strane ima povoljnu geometriju za montiranje na prirubnicu iz koje se dalje nastavlja nosivi dio vrata sve do ploče za montiranje linearnog aktuatora. Slika 30. b) prikazuje kako je metoda montiranja linearnog aktuatora ostala ista s predviđenih šest rupa za vijke. Na istoj slici na čelu spojne ploče može se vidjeti promjena, dodan je drugi dosjedni zatik što je omogućilo eliminaciju bočnog vijka za regulaciju pomaka. Ovim principom osigurala se pozicija u horizontalnom smjeru čime se izbjegava visoka složenost konstrukcije. Između dva zatika nalazi se prolazni provrt za vijak koji će se spajati s vratom alata i osigurati normalnu silu držanja. Na slici se također može vidjeti kako su provrti za vezanje vakuumskeg elementa i dalje ostali nepromijenjeni. Na slici 32. c) može se vidjeti kako se vrat konstruirao na način da je gornji radijus prijelaza spojen skoro s vrhom ploče za vezanje na prirubnicu. Konstrukcijsko rješenje izvedeno je na taj način kako bi se eliminiralo naprezanje na spojevima i distribuiralo kroz rebro pod radijusom.





Slika 32. Četvrta iteracija spojne ploče linearnog akuatora i Schunkove prirubnice a) Pogled odozgora b) Bočni pogled c) Pogled od ispod

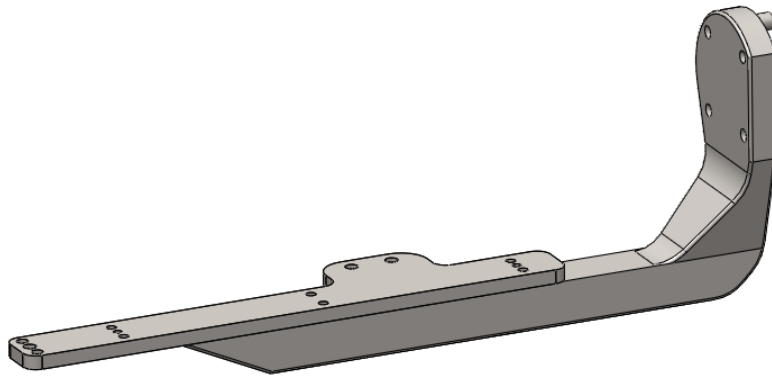


Slika 33. Druga iteracija vrata spojne ploče a) Izometrija b) Bočni pogled

U zadnjoj iteraciji razvoja cijela nosiva konstrukcija poprimila je drugačiju formu. Spojna ploča odvojena je od vrata spojne ploče kako bi se proizvodnja oba komada olakšala. Vrat spojne ploče koji i dalje ostaje kao složen dio konstrukcije za proizvodnju sa spojnou pločom iz jednog dijela zahtijevao bi kompleksnu petoosnu obradu. Slika 32. prikazuje spojnu ploču koja je iz prethodne iteracije geometrijski ostala vrlo slična, montiranje akuatora i prednjeg vrata alata ostalo je isto. Na slici 33. b) može se primijetiti kako zatici ne vire iz materijala, a razlog tomu je opet pojednostavljenje proizvodnje. Na svaku predviđenu poziciju zatika doći će tolerirani provrt u koji će se naknadno ubaciti standardni posebno izrađeni zatik prema normi DIN 7979. Ogljedna simulacija opterećenja konstrukcije pokazala je kako 2 mm debela spojna ploča nije dovoljna za nošenje svih masa, stoga se debljina povećala na 5 mm. To je ujedno i omogućilo izradu provrta za zatike jer se u dosadašnjih 2 mm nije mogao napraviti provrt koji bi imao zadovoljavajuću dubinu.

Na slici 33. može se vidjeti kako je prijelaz iz ravnog donjeg dijela vrata u vertikalni promijenjen iz radijalnog u konusni prijelaz. Takva konstrukcija bolje će distribuirati naprezanja na prijelazu horizontalnog u vertikalni profil. Gornja visina konusnog prijelaza prostorno je uvjetovana

pozicijom linearnog aktuatora i u ovom slučaju iznosi 25 mm. Ostale dimenzije podložne su promjenama i opisat će se u narednom poglavlju.



Slika 34. Sklop nosive konstrukcije

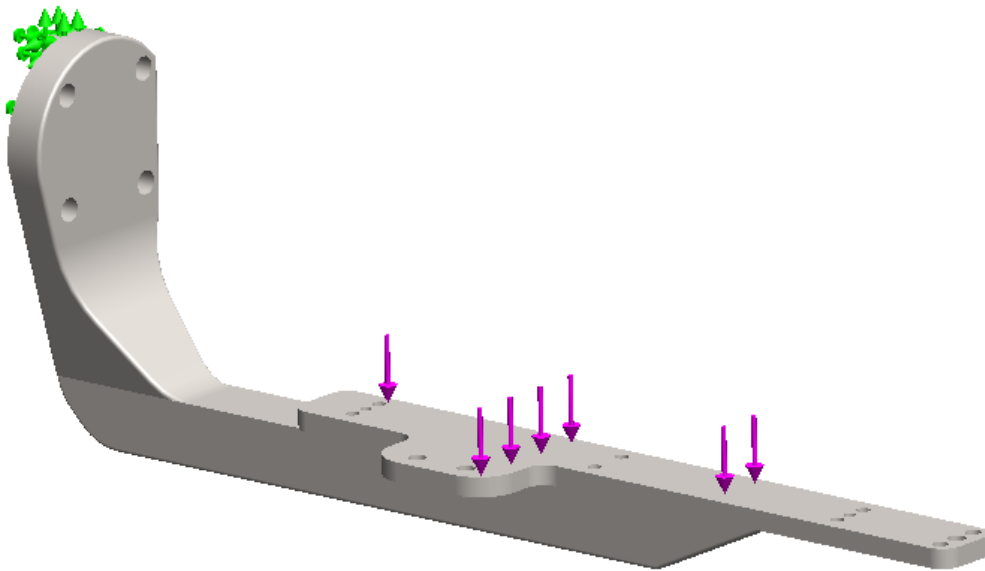
5.2.1. Statička analiza naprezanja

Sklop nosive konstrukcije sastavljen je od 2 već opisana elementa. Konstrukcijski koncept konstrukcije napredovao je od ploče, preko oblog vrata do posebna dva komada i vrata s konusnim prijelazom od 45° . Za pravilno dimenzioniranje ovih dijelova ključno je bilo nekoliko segmenata. Prvo dimenzije važne za montiranje linearnog aktuatora, potom dimenzije važne za montiranje prirubnice i naposljetku ukupna masa koju će konstrukcija morati nositi. Okvirna masa koju će konstrukcija morati nositi znala se od trenutka odabira aktuatora. S obzirom na to da aktuator ima 420 grama i smije maksimalno nositi još 1 kilogram, maksimalno moguće opterećenje bilo bi 15 N.

Dimenzije koje najviše utječu na čvrstoću konstrukcije debljina su spojne ploče, visina vrata, širina ploče prirubnice i visina donjeg skošenja vrata. Višestrukim statičkim analizama s različitim opterećenjima pokazalo se kako je 5 mm debljine spojne ploče dovoljno za masu koju ona mora nositi. Time se redukcija varijabli spustila na tri te se zbog točnosti dimenzioniranja i skraćanja vremena simuliranja provela parametarska analiza dimenzija.

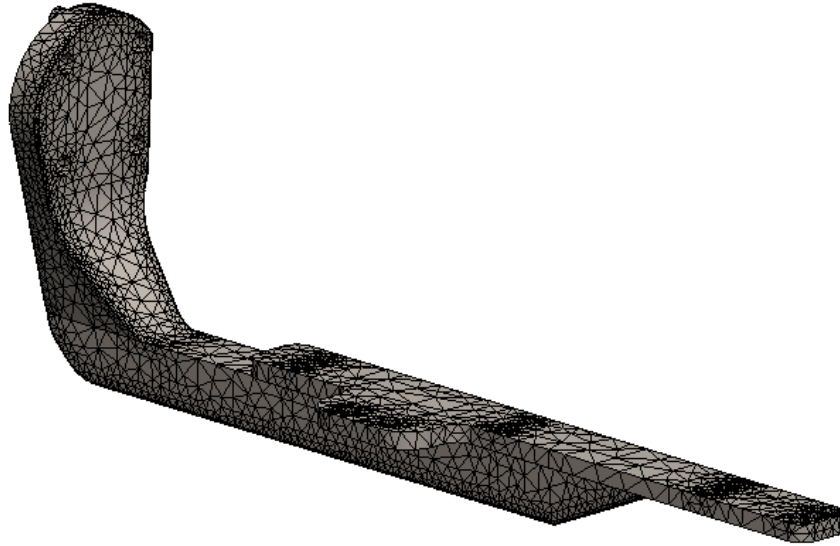
Svi konstrukcijski dijelovi izrađeni su u računalnom programu *SolidWorks* gdje su odrađene i sve ostale simulacije. *Design Study* jedan je od analitičkih alata *SolidWorksa* koji omogućava iterativno simuliranje postavljenog scenarija. U ovom slučaju u *Design Studyju* postavljena su opisana tri parametra, zadane su im gornje i donje granice dimenzija te za svaku od njih željeni korak. Analitički alat računa sve moguće kombinacije vrijednosti pojedinog parametra i postavlja ih kao

moгуće scenarije. Uz parametre čije se vrijednosti žele ispitati potrebno je bilo i postaviti uvjet prema kojem ćemo znati koji će scenariji biti najbolji. Računalna statička analiza naprezanja koja se vrši preko metode konačnih elemenata, čiji će rezultati biti naprezanje i pomak svakog čvora konačnih elemenata, pokazat će nam koja će kombinacija parametara dovesti do najboljeg rješenja. Zbog brzine provođenja ovakve analize radi se nekoliko pojednostavljenja. Na spoju vrata spojne ploče i spojne ploče simulira se odnos jednolikog materijala, na mjestu gdje dolazi prirubnica stavlja se fiksna ploha, a u statičkoj analizi naprezanja uzima se mreža većih konačnih elemenata



Slika 35. Postavke statičke analize naprezanja prikazanih na modelu

Na slici 35 može se vidjeti postavka statičke analize naprezanja. Na gornju površinu spojne ploče stavljeno je opterećenje od 15 N (*External loads* - Slika 35.), veza između spojne ploče i vrata ostvarena je vijcima silom od 50 N – u stvarnom slučaju vijci će se vezati za linearni aktuator pa je ovo pojednostavljenje prihvatljivo. Postavljeni odnos između elemenata definira *No penetration* odnos što znači nemogućnost međusobnog prodiranja. Prirubnica je simulacijski postavljena kao idealno kruto tijelo jer su naprezanje i deformacija u njoj irelevantni za ovu analizu. Veza vrata spojne ploče i prirubnice definirana je preko toleriranih kružnih elemenata postavkom *Hinge* što simulira mogućnost rotacije oko osi kružnog dijela. S obzirom na to da postoje dva takva elementa, moguća rotacija manifestirat će se kroz opterećenje gornjeg izdanka na vratu spojne ploče. Nadalje stavljeni su simulacijski spojevi vijcima između vrata i prirubnice gdje je definirana sila držanja svakog vijaka od 100 N, a sama prirubnica fiksirana je u prostoru.



Slika 36. Postavke mreže konačnih elemenata statičke simulacije napreznja za *Design Study* analizu

Finoća mreže konačnih elemenata utječe na krajnji rezultat, što je mreža gušća i elementi mreže sitniji, rezultati su precizniji. Povećanjem gustoće mreže dolazi do bolje pokrivenosti prostornih točaka unutar materijala za koje se računaju napreznja i deformacije što na kraju rezultira točnijim rezultatom bilo za pojedinu točku ili za ukupan rezultat. Za *Design Study* analizu statička analiza napreznja provedena je mrežom s manje elemenata kao što prikazuje slika 36. Najbolji će se rezultat takve analiza kasnije precizno simulirati preciznijom mrežom kako bi se dobili točniji rezultati. Mreža preciznije statičke analize finija je na mjestima većih napreznja koje je pokazala prethodna analiza, tamo gdje se ne očekuju velika napreznja mreža je i dalje veća kako bi računalo lakše procesuiralo simulaciju.

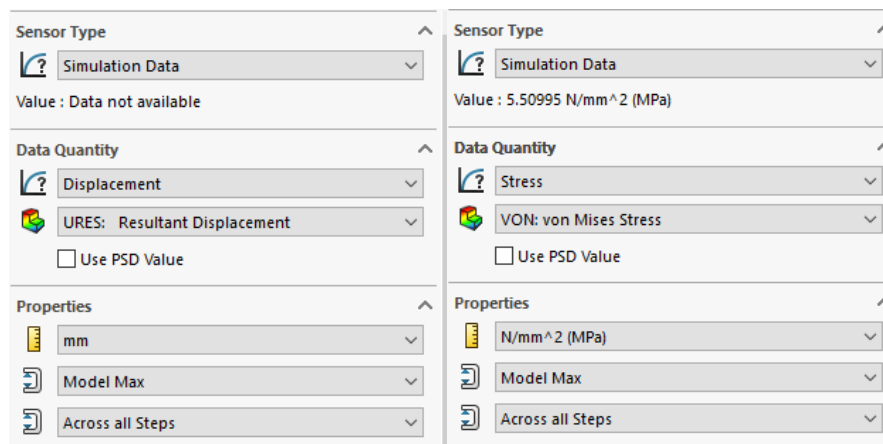
Run Optimization Total active scenarios: 245

Variables

Širina ploče prirubnice	Range with Step	Min: 8mm	Max: 12mm	Step: 1mm
Visina vrata	Range with Step	Min: 10mm	Max: 16mm	Step: 1mm
Visina donjeg skošenja	Range with Step	Min: 7.5mm	Max: 22.5mm	Step: 2.5mm
Click here to add Variables				

Constraints

Displacement1	is greater than	Min: 0mm	Static 1
Stress1	is greater than	Min: 0 N/mm ²	Static 1
Mass1	is greater than	Min: 0 g	
Click here to add Constraints			

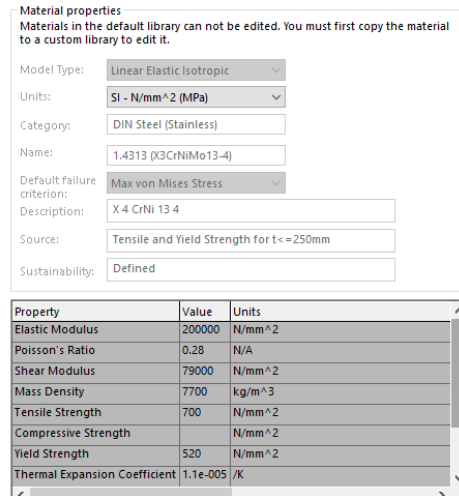
Slika 37. Postavke analize *Design Study*

Slika 33. prikazuje postavke *Design Studyja* s već opisanim parametrima. Mogu se vidjeti postavljene parametri:

- Širina ploče prirubnice - od 8 do 12 mm s korakom 1 mm
- Visina donjeg skošenja vrata - od 7.5 do 22.5 mm s korakom 2.5 mm
- Visina vrata – od 10 do 16 mm s korakom 1 mm

Minimalne rubne vrijednosti odabrane su preliminarnom jednostavnom *Design Study* analizom koja je postavljena sa širokim granicama i pojednostavljenom simulacijom naprežanja koja je pokazala ispod kojih vrijednosti nema smisla razmatrati granice zbog prevelikog naprežanja i pomaka. Maksimalne vrijednosti odabrane su ograničenjima ili proizvoljno - za širinu ploče 12 mm odabrano je proizvoljno zbog minimiziranja mase, visina donjeg skošenja vrata ne smije biti veća od 22.5 mm jer će debljina skošenja biti premala što će analiza i pokazati, a visina vrata odabrana je proizvoljno zbog geometrije presjeka vrata. Vrat ima poprečni presjek u obliku pravokutnika širine 18 i visine maksimalnih 16 mm, stavimo li širinu veću od 18 gubi se funkcija spojne ploče, a proizvoljno, htjelo se pokazati može li vrat biti dovoljno čvrst ukoliko visina bude manja od širine.

Uvjeti analize bili su maksimalni pomak (progib) konstrukcije, maksimalno naprežanje konstrukcije koje je proporcionalno vezano uz pomak i masa. Odabrani materijal za ovu analizu bio je Čelik 1.4313 (X3CrNiMo12-4) čija je vlačna čvrstoća 700 MPa, a smična čvrstoća 520 MPa.



Slika 38. Materijal korišten u simulaciji

Tablica 7. Najboljih 20 rezultata *Design Studyja*

Kombinacija	Širina ploče prirubnice [mm]	Visina donje kosine vrata [mm]	Visina vrata [mm]	Maksimaln i pomak [mm]	Naprezan je [N/mm ²]	Masa [g]
Scenario 245	12	7.5	16	0.02817	3,74	656,00
Scenario 244	11	7.5	16	0.02852	3,79	676,04
Scenario 250	12	10	16	0.02861	4,68	676,04
Scenario 243	10	7.5	16	0.02897	3,69	696,09
Scenario 249	11	10	16	0.02902	5,44	716,13
Scenario 255	12	12.5	16	0.02913	3,61	Rebuild error
Scenario 248	10	10	16	0.02956	5,74	Rebuild error
Scenario 242	9	7.5	16	0.02957	3,75	Rebuild error
Scenario 254	11	12.5	16	0.02963	3,66	Rebuild error
Scenario 260	12	15	16	0.02979	3,64	Rebuild error
Scenario 247	9	10	16	0.03025	6,30	Rebuild error
Scenario 253	10	12.5	16	0.03027	3,68	649,05
Scenario 241	8	7.5	16	0.03039	4,10	669,09
Scenario 259	11	15	16	0.03039	3,64	689,13
Scenario 265	12	17.5	16	0.03064	3,67	709,17
Scenario 252	9	12.5	16	0.03109	3,76	729,22
Scenario 258	10	15	16	0.03115	3,76	644,19
Scenario 246	8	10	16	0.0312	7,15	664,23
Scenario 264	11	17.5	16	0.03138	3,76	684,27
Scenario 270	12	20	16	0.03177	3,70	704,31
Scenario 257	9	15	16	0.03213	3,59	724,36

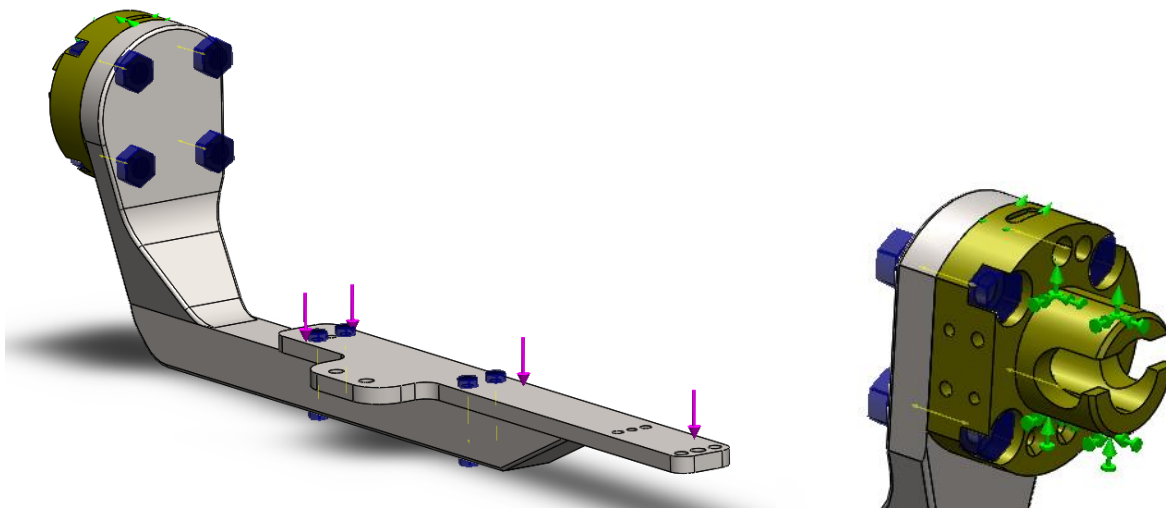
Iz tablice 7. vidljivo je kojih je 20 od mogućih 245 kombinacija rezultiralo najmanjim pomakom, za očekivati je bilo da će veće vrijednosti visine vrata i širine ploče dovesti do boljih rezultata. Iz

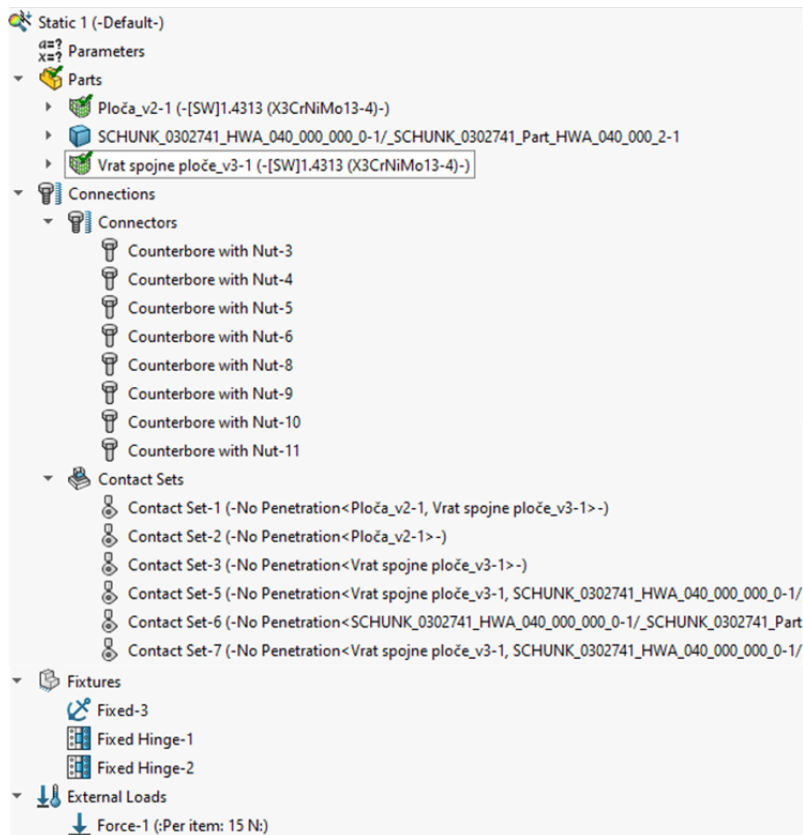
ostatka rezultata ove analize može se vidjeti kako je ukupni progib čvrsto vezan uz „visinu vrata“ nosive konstrukcije. Uz sortiranje rezultata po pomaku od manjeg prema većem, u tablici se može iščitati slijedni pad „visine vrata“, dok ostali parametri variraju u svom rasponu. Kombinacije označene u tablici 7. odabrane su zbog najmanje mase, sve kombinacije u tablici u rasponu su od 4 mikrona pa se sukladno tome gleda drugi najvažniji parametar a to je masa. Nejasno je zašto se u analizi za neke kombinacije nije izračunala i masa, no to ne predstavlja neuspjeh u analizi. Osim toga, teško je objasniti zašto se za pojedine kombinacije koje su rezultirale malim pomakom pojavljuje duplo veće naprezanje u odnosu na ostale kombinacije. Može se pretpostaviti da je greška u netočnosti statičke analize naprezanja za pojedine kombinacije.

Odabrane vrijednosti prema *Design Study* analizi su:

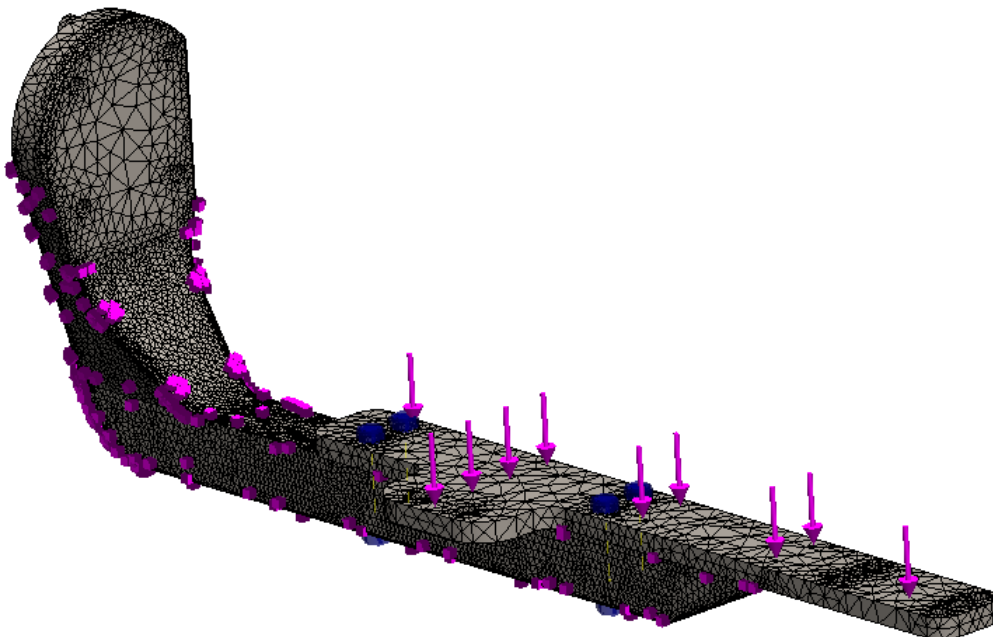
- Širina ploče prirubnice – 10 mm
- Visina donjeg skošenja vrata – 12.5 mm
- Visina vrata – 16 mm

Model korigiran s tim vrijednostima u zasebnoj, preciznije definiranoj, simulaciji pokazuje sljedeće rezultate.

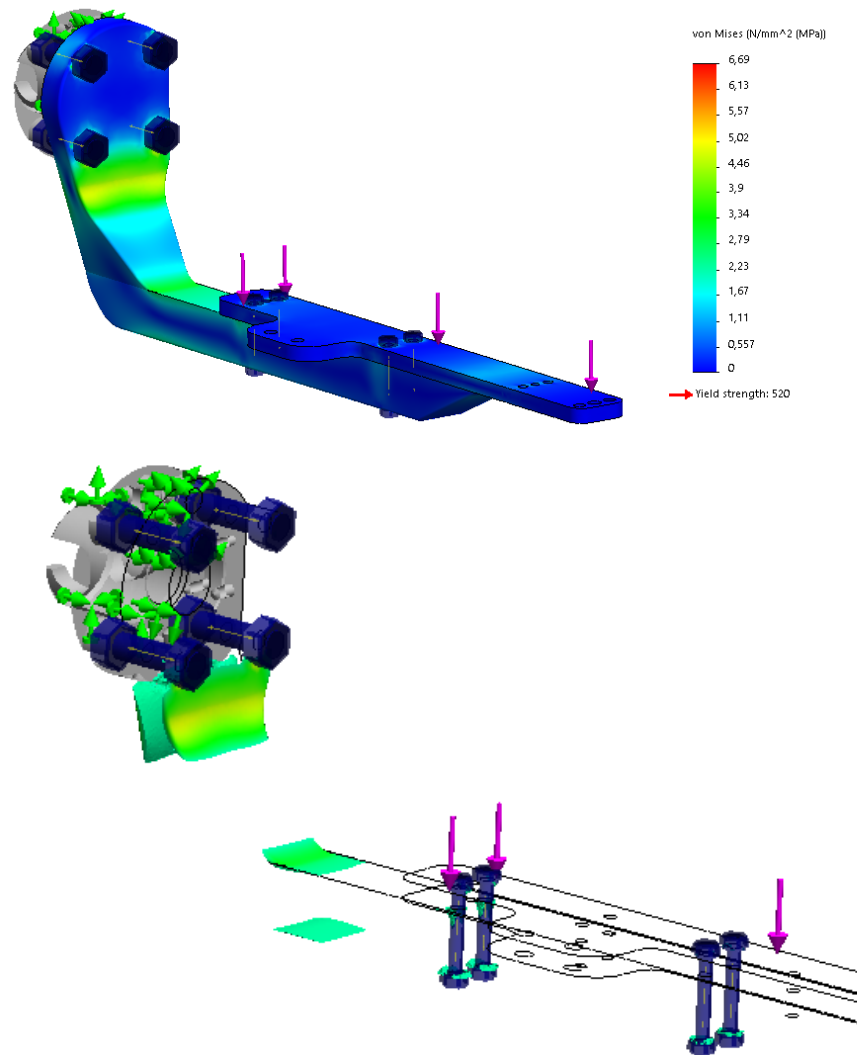




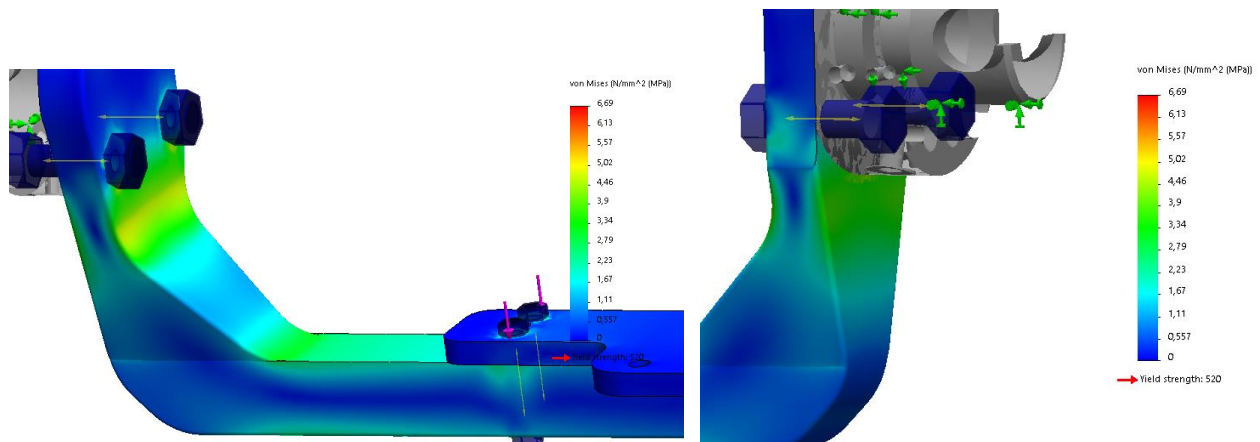
Slika 39. Postavke statičke analize napreznja s korigiranim vrijednostima modela a) Prikaz postavki na modelu b) Prikaz postavki na pribubnici c) „Drvo“ simulacijskih postavki



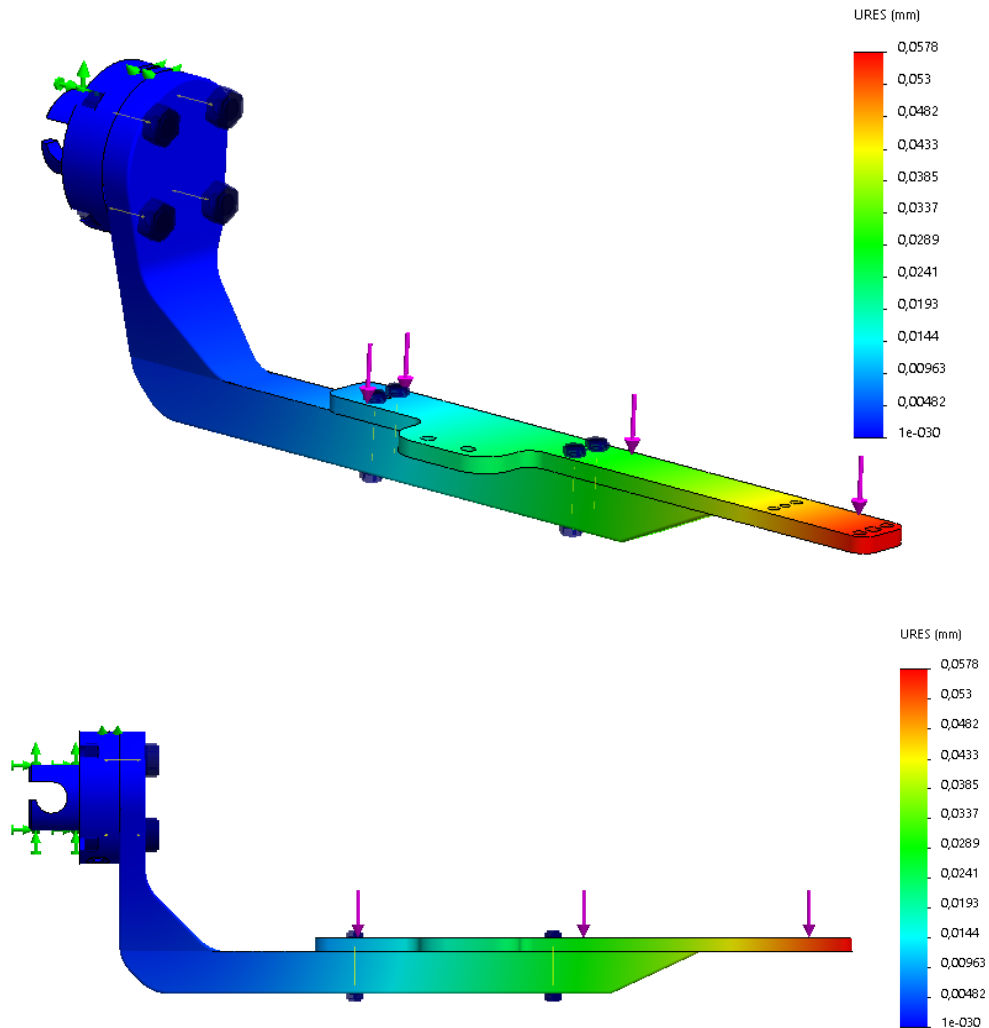
Slika 40. Postavke mreže konačnih elemenata s korigiranim vrijednostima modela



Slika 41. a) Statička analiza naprezanja modela s korigiranim vrijednostima b) Naprezanja veća od 2.3 MPa nosive konstrukcije



Slika 42. Pikaz koncentracije naprezanja statičke analize modela s korigiranim vrijednostima iz dva pogleda



Slika 43. Prikaz maksimalnog progiba nosive konstrukcije

Preciznoj postavkom simulacije dobivaju se i precizniji rezultati, pa se ukupan pomak vrha konstrukcije kreće i do 0.0578 mm što se za precizan alat može činiti puno, no uzme li se u obzir da je faktor sigurnosti konstrukcije oko 2 zbog predimenzionirane sile unutar simulacije, ovakve vrijednosti će zadovoljiti.

5.3. Manipulacija i umetanje sonde

Pogleda li se zadatak cjelokupnog problema iz druge perspektive shvatit će se da je razvijani alat automatizirana naprava za rukovanje sonde. Sonda je zasebna jedinica ovog sustava koja dolazi kao posljednji element prilikom sklapanja, odnosno preciznije rečeno već sastavljeni alat dolazi na robotskoj ruci, a sonda se na njega umeće kao posljednji zasebni element. Kako bi to olakšali i

smanjili vrijeme rukovanja sondom netom prije operativnog zahvata ,razmatraju se različiti pristupi prihvata i umetanja sonde na alat.

Prvi pristup rukovanja sondom umetanje je sonde utiskivanjem kroz držače i zaključavanje finalne pozicije. Ovaj je pristup prvi razvijen pa su svi dijelovi bili orijentirani umetanjem što će biti vidljivo kroz prikaz razvoja i prednjeg i stražnjeg držača.

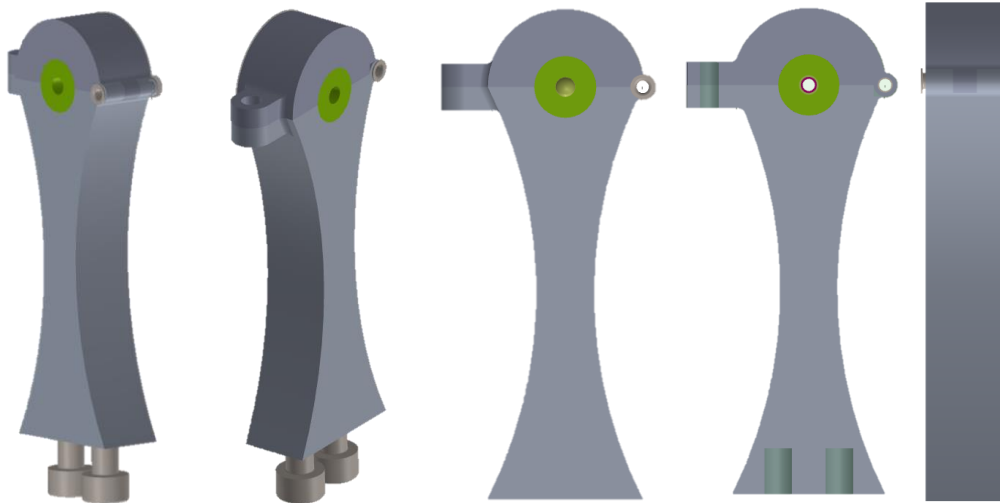
Drugi pristup kojemu je cijela konstrukcija konvergirala vođen je umetanjem sonde odozgor. Prednosti umetanja sonde odozgor su: prvenstveno jednostavnost korištenja robotskog alata iz perspektive čovjeka – kirurga što je usko vezano uz smanjenje operativnog i pripremnog vremena i, naposljetku, otvara mogućnost potpune robotizacije integriranjem asistencije druge robotske ruke koja pripremljenu iglu s postolja može sama umetnuti na željenu poziciju.

5.3.1. Prednje uležištenje

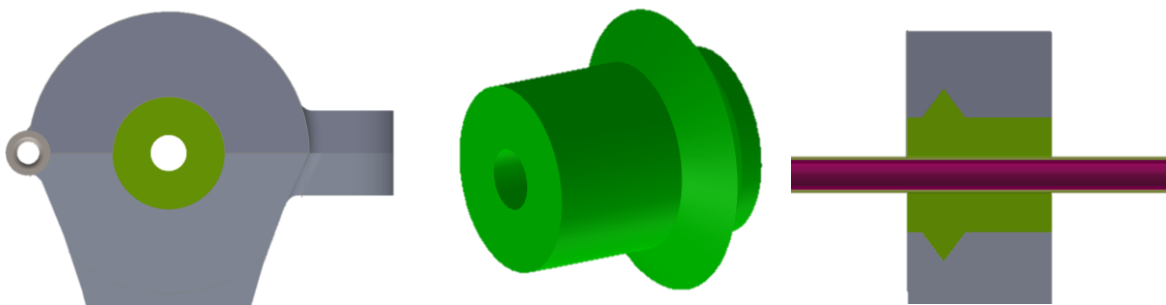
Razmatranjem funkcionalnosti alata uzevši u obzir ukupnu duljinu sonde koja premašuje 200 mm odlučeno je na alatu konstruirati prednji držač s ciljem eliminacije mogućih vibracija vrha sonde prilikom gibanja i pozicioniranja. S prednjim uležištenjem dobit će se držanje i vođenje sonde tik do glave što će pozitivno utjecati na krutost alata.

Prva iteracija konstrukcije vrata alata izgledala je kao na slici 44. Princip spajanja vrata na ostatak konstrukcije zamišljen je preko spojne ploče na koju se veže i linearni aktuator. Spoj se ostvaruje preko dva vijka koja bi prolaskom kroz spojnu ploču pritezala vrat na poziciju. Vrat je konstruiran s užim srednjim dijelom kako bi se uštedjelo na materijalu i smanjilo na masi na najudaljenijoj točki konstrukcije, osim toga nestandardnim ravnim linijama povećava se vizualna prihvatljivost. U gornjem dijelu držača spremljen je klizač koji osigurava gibanje s niskim trenjem. Vrat prednjeg držača s gornje strane ravan je i ravninom dolazi do osi gibanja sonde, na bočnim stranama ima šarke koje će prihvatiti posebno konstruiranu kapu vrata. Kapa vrata zamišljena je da rotira oko bočne osi vrata i svojim otvaranjem omogućava zamjenu i skidanje klizača. Vrat i kapa po svom obodu imaju urezani žljeb koji bi svojim oblikom trebao držati poziciju klizača konstruiranog s vanjskim izdankom na obodu koji je istog oblika. (Slika 45.)

Koncept ovog vrata temelji se na čvrstom nosivom elementu i manjem klizaču s funkcijom kliznog ležaja koji će osigurati prolaz sonde bez velikog utjecaja trenja i ujedno omogućiti varijabilnost prihvata drugačijih promjera sondi svojom zamjenom. S obzirom na jednostavnost klizača, za sondu drugačijeg promjera bilo bi potrebno samo zamijeniti klizač.



Slika 44. Prva iteracija prednjeg držača a) Izometrija b) Izometrija iz drugog pogleda c) Pogled sprijeda d) Pogled sprijeda u presjeku e) Bočni pogled

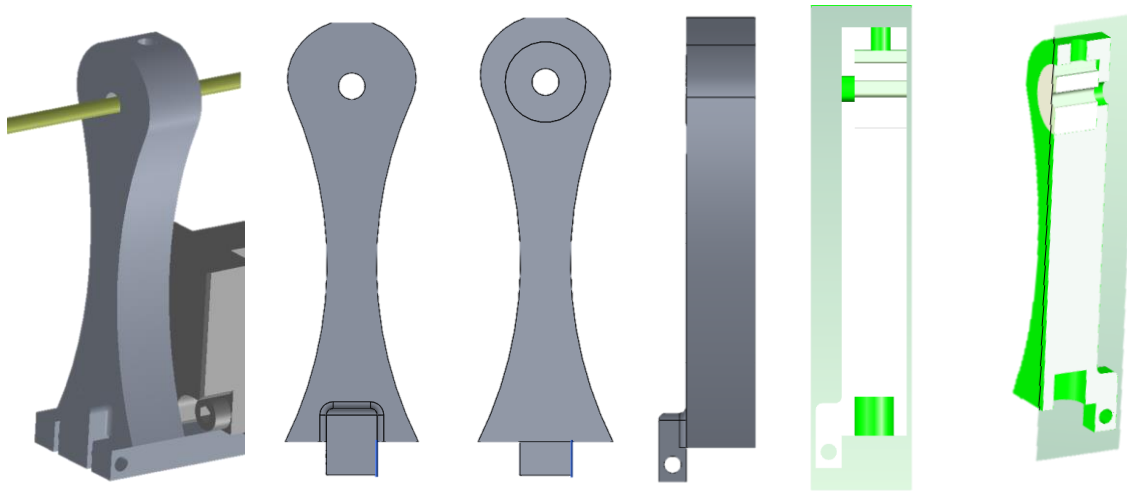


Slika 45. Klizač druge iteracije vrata a) Pogled sprijeda b) Izometrija čahure b) Bočni pogled presjeka spoja vrata, klizača i kape vrata druge iteracije prednjeg držača

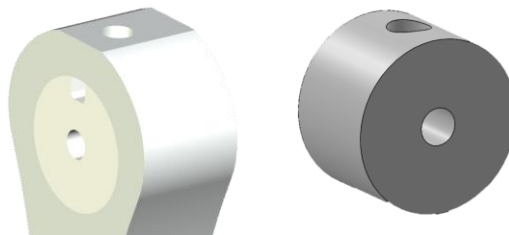
Druga iteracija razvoja prednjeg držača sonde sa slike 46. zadržala je osnovni oblik uskog srednjeg dijela sa sličnim principom vođenja sonde. U gornjem dijelu držača i dalje je spremljen klizač koji osigurava gibanje s niskim trenjem, ali mu se način držanja pozicije promijenio eliminacijom kape prednjeg vrata. Glavni dio vrata čini proširenje na gornjem dijelu koje s prednje strane ima provrt dovoljno velik da kroz njega neometano prolazi sonda, a s druge strane tolerirani provrt za prihvat klizne čahure. Pozicija klizne čahure definirana je džepom urezanim po vanjskom obodu i navojnim provrtom na vrhu vrata kroz koji se zavija vijak i osigurava klizač od ispadanja. (Slika 47.)

Promijenila se i metoda vezanja za ostatak konstrukcije. Spoj se ostvaruje zatikom i dosjednim vijkom koji prolazi kroz spojnu ploču, gdje vrat sa svojim izdankom, u kojem je metrički navoj

sukladnog dosjedbog vijka, omogućava horizontalni pomak. S donje strane vrata alata nalazi se tolerirani utor koji omogućava klizanje u smjeru pružanja vijka za regulaciju pozicije. (Slika 46.)



Slika 46. Druga iteracija vrata konstrukcije a) Izometrija b) Pogled s prijedera c) Pogled straga d) Bočni pogled e) Bočni pogled u presjeku f) Izometrija u presjeku

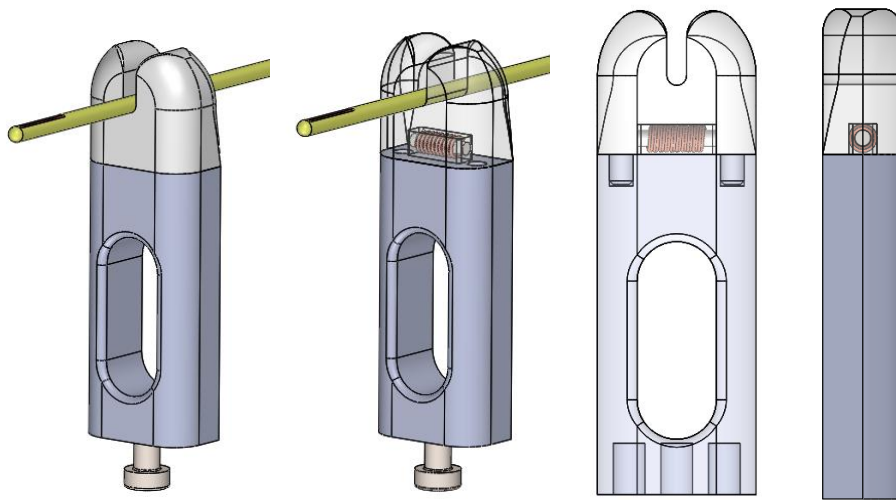


Slika 47. . a) Izometrija vrha vrata prve razvojne iteracija b) Izometrija klizača vrata alata

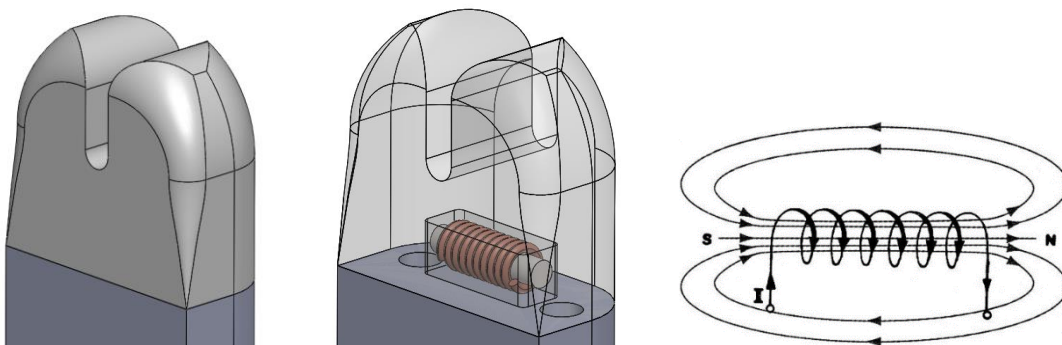
Slika 48. prikazuje treću iteraciju razvoja prednjeg držača sonde koja je poprimila potpuno drugačiji oblik i promijenila gotove sve koncepte funkcionalnosti. Vrat sonde više nema prostorno složenu strukturu, već je konstruiran kao izvučeni kvadar s oblim vrhovima prema prednjem dijelu. U sredini vrata nalazi se rupa u obliku ravnog utora zbog smanjenja mase vrata kako se iz istog razloga ne bi nepotrebno opterećivao najudaljeniji dio alata. Vrat držača montira se na ostatak konstrukcije preko zatika s dva tolerirana provrta i jednim vijkom jer je na taj način bolje osigurana pozicija u odnosu na spojnu ploču.

Na slici 48. c) može se vidjeti kako se na gornjem dijelu vrata nalaze se još dva tolerirana provrta koji s gornje strane prihvaćaju magnetni klizač. Magnetni klizač novokonstruirani je dio koji

zadržava funkciju dosadašnjeg kružnog klizača, ali s drugačijom geometrijom. Ovakva geometrija klizača omogućava primjenu drugog principa umetanja sonde odozgora. Klizač svojim utorom prihvaća uski dio sonde, osigurava vođenje s malim trenjem i držanje horizontalno oblikom, a vertikalno magnetnom silom. Zamišljeno je konstruirati elektromagnet pomoću zavojnice s metalnom jezgrom koja će generiranim magnetskim tokom zahvatiti sondu i privlačiti ju prema dolje i time onemogućiti ispadanje. Ista magnetna sila predviđena je i za držanje cijelog magnetnog klizača na vratu držača međusobnim privlačenjem. Magnetni klizač prikazan na slici 49. trebao bi i dalje zadržati funkciju kliznog ležaja, stoga bi materijal izrade kao i ranije morao biti polimerni materijal koji ima dobra svojstva samopodmazivanja. Elektromagnet morao biti konstruiran s metalnom jezgrom kako bi se osigurao dovoljno jak magnetni tok, odnosno dovoljno jako magnetno polje, koje bi moglo djelovati na obje strane kao što prikazuje slika 49 c).



Slika 48. Treća iteracija razvoja prednjeg držača sonde a) Izometrija b) Izometrija s prozirnim klizačem c) Pogled s prijedra s prozirnim klizačem d) Bočni pogled s prozirnim klizačem

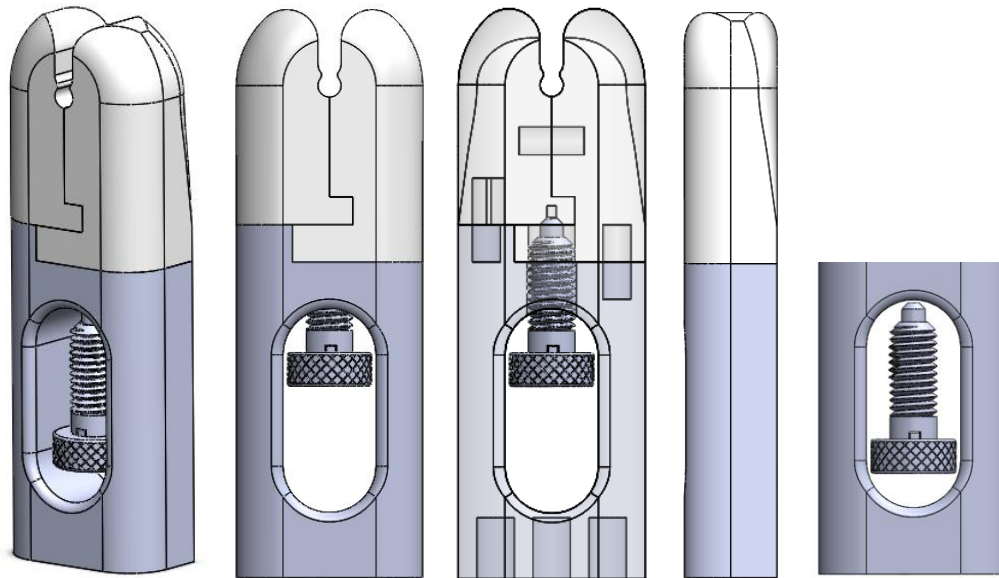


Slika 49. Magnetni klizač a) Izometrija b) Izometrija s prozirnim klizačem c) Silnice generiranog magnetnog polja

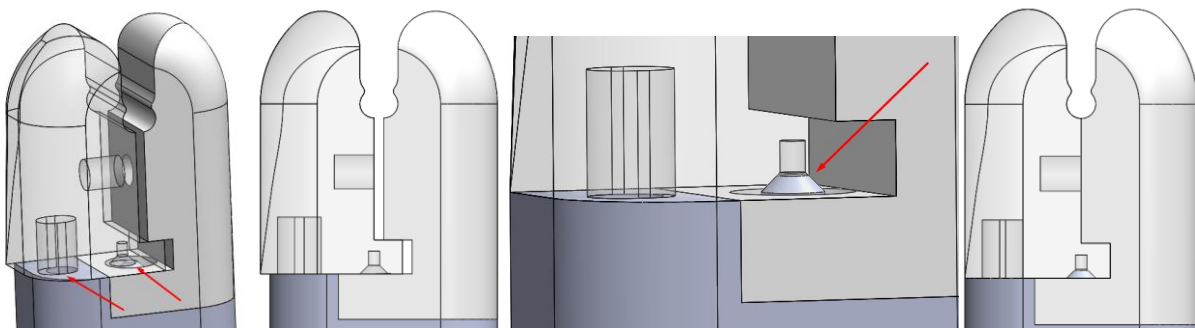
[39]

Četvrta razvojna iteracija prednjeg držača geometrijom prikazanom na slici 50 poprima svoj završni izgled. Vrat držača osnovnom geometrijom ostao je isti kao i u prethodnoj iteraciji, isto kao i montiranje držača na ostatak konstrukcije, no promijenio se klizač i princip držanja sonde. Utor na vratu korigiran je visinom kako bi omogućio montiranje opružnog klipa prikazanog na slici 50. e), zbog kojeg je s gornje strane napravljen prolazni provrt koji će omogućavati montiranje na klizne čeljusti. S obzirom na to da je sonda napravljena od *inoxa* koji nema magnetna svojstva prethodno opisani princip držanja ne zadovoljava formu zbog čega se razmatralo o opciji rastavljanja klizača i spremanja magneta u jednu polovicu koja bi privlačila drugu, čime bi se osiguralo automatizirano otvaranje i zatvaranje. Uzme li se u obzir da je konstrukcija relativno malog elektromagneta složen zadatak i teško bi bilo proizvesti prostor za njegovu ugradnju unutar 10 mm materijala, ovaj koncept regulacije otpada. Otklanjanjem magneta iz konstrukcijskog rješenja prednjeg držača eliminira se i potreba za ožičenjem prednjeg dijela alata.

Vodeći se idejom rastavljanja klizača na dva dijela konstruirana je posljednja verzija držača prikazana slikom 51. Klizač je, dakle, rastavljen na slične polovice koje se horizontalno spajaju sa zatikom zbog čega oba imaju tolerirani horizontalni kružni provrt. Fiksna čeljust prikazana slikama 51. a) i 51 b) vertikalno se montira na vodeći zatik i na srednjem dijelu s donje strane ima urezani navoj za prihvat opružnog klipa koji s trnom osigurava držanje druge čeljusti, a navojem ispadanje klizača s vrata. Pomična čeljust sa slika 51. a) i 51 b) s donje strane ima ravni tolerirani utor koji omogućava horizontalno gibanje lijevo desno. Na donjoj strani, na čeljusti desno, a u sklopu centralno, nalazi se konični upust za trn opružnog klipa koji će osigurati zaključavanje pozicije čeljusti. (Slika 51. c)) Zamišljeno je, dakle, da se prilikom sastavljanja prednji držač sastavlja tako da se dvije čeljusti prvo spoje preko horizontalnog zatika, zatim se preko dva vodeća zatika montiraju na vrat i kao završni korak zavija se opružni klip za držanje i zaključavanje željene pozicije. U operativnom okruženju povlačenjem trna klipa prema dolje otključat će se pozicija pomične strane klizača koja će se odmaknuti dovoljno da sonda može upasti u predviđeni prostor. Nakon umetanja sonde potiskivanjem pomičnog klizača nazad na poziciju, trn uskače u predviđeni upust i onemogućava daljnje pomicanje. Zaključavanjem pozicije dvije čeljusti klizača sonda dobiva horizontalno i vertikalno vođenje oblikom s obzirom na geometriju gornjeg dijela obje čeljusti.



Slika 50. Četvrta iteracija prednjeg držača a) Izometrija b) Pogled sprijeda c) Pogled sprijeda prozirnog sklopa d) Bočni pogled e) Prikaz umetanja opružnog klipa prilikom montiranja



Slika 51. Klizač prednjeg držača konstruiran s dvije čeljusti a) Izometrija odmaknutog pomičnog dijela s otključanim trnom b) Pogled sprijeda odmaknutog pomičnog dijela c) Zaključavanje pozicije trnom d) Pogled sprijeda sastavljenog klizača

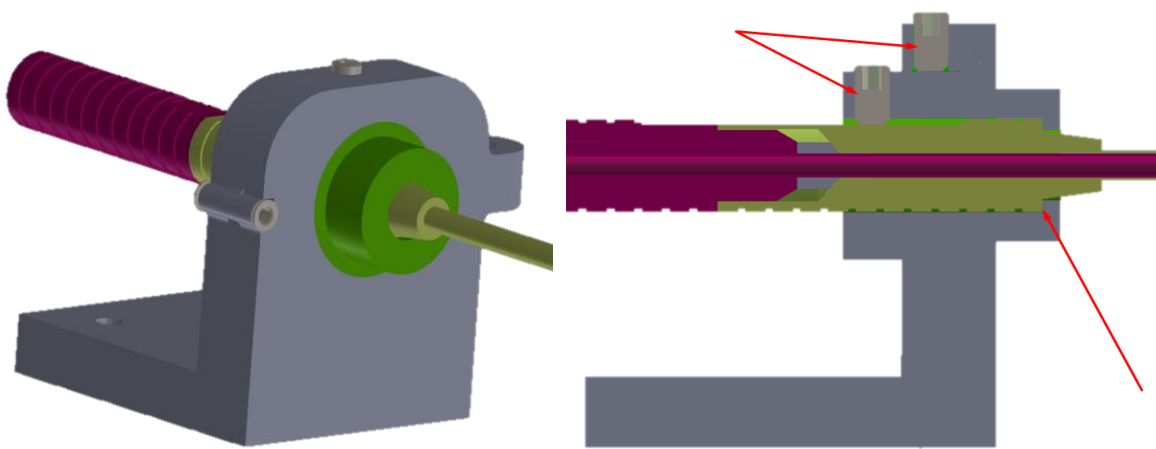
Ovakvim konstrukcijskim rješenjem finalizirano je prednje vođenje sonde.

5.3.2. Stražnje uležištenje

Stražnje uležištenje ujedno predstavlja i fiksno držanje sonde koje mora omogućavati guranje sonde u smjeru pružanja alata. Zbog drugih potrebnih funkcionalnosti alata stražnje uležištenje rezultirat će kao kompleksan sklop dijelova kojim će se zadovoljiti potrebe držanja i vođenja, inicijalne pozicije, odsijecanja tkiva i mjerenje sile.

Svojom funkcijom prije svega mora zadovoljiti čvrsto držanje sonde u smjeru pružanja alata, ali i radijalno što znači da mora onemogućiti slobodnu rotaciju sonde ili rotaciju sonde prilikom rada. Stražnje uležištenje također je provedeno kroz četiri razvojne iteracije, gdje se u prve dvije može vidjeti ispunjenje samo primarnih zahtjeva. Sukladno prvoj iteraciji prednjeg uležištenja stražnje je također zamišljeno da funkcionira preko radnog stola, kape radnog stola i utiskivanja klizne čahure u tolerirani provrt.

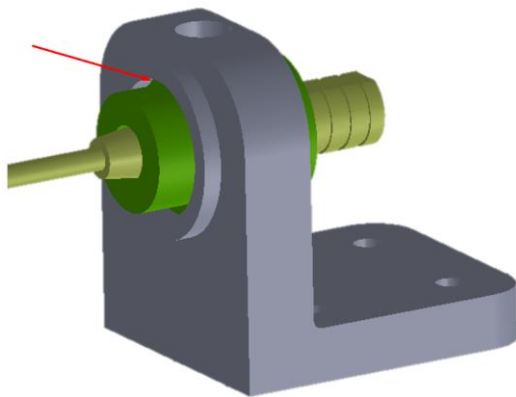
Klizna čahura stražnjeg držača relativno je jednostavne valjkaste geometrije, zamišljena da se kroz nju protiskuje sonda do krajnje pozicije gdje sonda svojom ravnom plohom nasjeda na ravnu plohu čahure prikazane strelicom na slici 52 b). Čahura na stražnjem dijelu ima provrt s navojem za vijak M3 (DIN 914) kojim nasjeda na ravni dio sonde i onemogućava relativni zakret sonde u odnosu na čahuru. Osim toga, čahura na srednjem dijelu ima četiri provrta s navojem koji su u relativnom odnosu pod 90° i omogućavaju inicijalno pozicioniranje zakreta sonde kako bi se utor na vrhu sonde mogao pretpozicionirati vijčanom vezom preko kape radnog stola. Kapa je konstruirana geometrijski prema prvoj iteraciji razvoja prednjeg držača sa šarkom s jedne strane i veznim elementom koji bi omogućavao zaključavanje kape za stol s druge strane. Nužnost pretpozicioniranja prednjeg otvora sonde proizlazi iz potrebe pozicioniranja otvora pod bilo kojim kutom u odnosu na os pružanja alata kako bi se moglo pristupiti svim točkama tkiva oko sonde kada je ona umetnuta intrakranijalno. S obzirom na radni prostor robota u kojem se nalaze ljudi, rotacije pribornice, odnosno alata, od 180° na obje strane moraju se eliminirati pa se ovakvim pretpozicioniranjem to sužava na maksimalni zakret od 45° koji će ovisiti o poziciji tkiva do kojeg se želi doći te odabrane trajektorije.



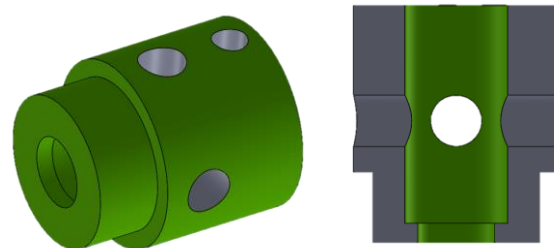
Slika 52. a) Izometrija druge iteracije stražnjeg držača b) Poprečni presjek druge iteracije stražnjeg držača

Stol je u svojoj prvoj iteraciji samo djelomično konstruiran i ne ispunjava sve zahtjeve. Vežanje stola na linearni aktuator odvija se preko četiri prolazne rupe za vijke, a vođenje i držanje sonde osigurano je preko već opisane klizne čahure.

Druga razvojna iteracija sa slike 53. nije daleko odmakla od prve u vidu rješenja funkcionalnosti. Principom se pratila druga iteracija prednjeg držača i, umjesto korištenja kape radnog stola, konstrukcija se pojednostavila eliminacijom nepotrebnih elemenata. Klizna čahura sada se samo umeće u tolerirani provrt radnog stola i vijčanom vezom zaključava na željenoj poziciji. Predviđeno je i dalje da se stol za linearni aktuator veže pomoću vijaka isto kao i relativni odnos klizne čahure i stola. Klizna čahura u ovoj iteraciji ostala je bez promjena kako geometrijski, tako i svojom funkcionalnošću, što prikazuje slika 54 b).

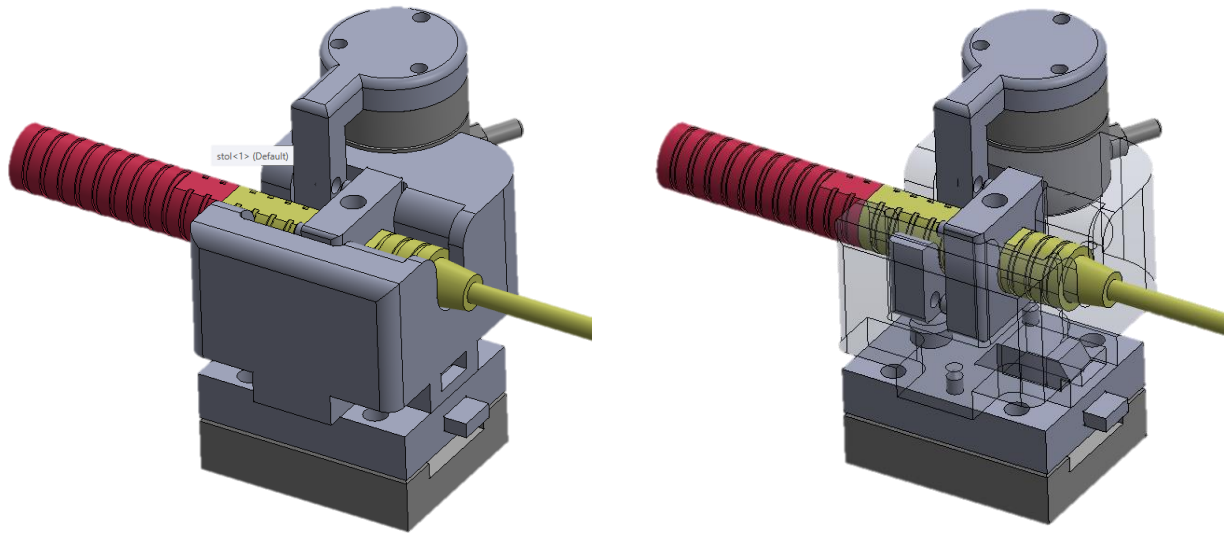


Slika 53. Izometrija prve iteracije stražnjeg držača



Slika 54. a) Klizna čahura stražnjeg držača b) Klizna čahura stražnjeg držača u presjeku

Treća iteracija stražnjeg držača konstrukcijski je puno kompleksnija i svojom funkcionalnošću donosi nova rješenja robotskog alata, a vođena je principom umetanja sonde odozgor. (Slika 55.) Držać je konstruiran od više međusobno ovisnih elemenata gdje svaki ispunjava određenu funkcionalnost. Podnožje stola prvi je vezivni element s linearnim aktuatorom na kojeg se montira nosivi stol koji na sebi nosi ostale elemente: senzor sile, spojni element senzora sile, kvadratni prsten sonde i sondu.



Slika 55. Četvrta iteracija stražnjeg držača alata a) Izometrija b) Izometrija s prozirnim stolom

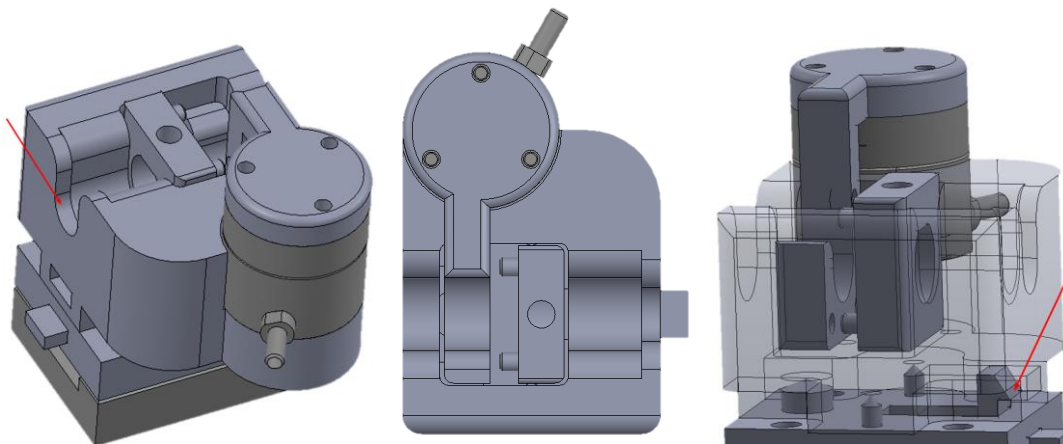
Montiranje stražnjeg držača rastavljeno je u dva dijela. Na klizni element linearnog aktuatora prvo dolazi podnožje stola sa slike 56., koji se na aktuator veže pomoću toleriranih zatika s donje strane a koji osiguravaju poziciju, i četiri vijka koji se zavijaju u klizač aktuatora, a na podnožju imaju prolazne provrte. Na podnožju se s gornje strane nalaze tri tolerirana zatika koji svojom veličinom i pozicijama uvjetuju jedinstveno nasjedanje stola i pomični potisnik kao zasebni element koji oblikom osigurava prihvat stola. Za pomični potisnik, koji se vidi ugrađen na slici 56. a), u podnožju stola izrađen je jedinstveni utor koji svojim oblikom osigurava vođenje potisnika i mogućnost pomaka samo u horizontalnom smjeru.



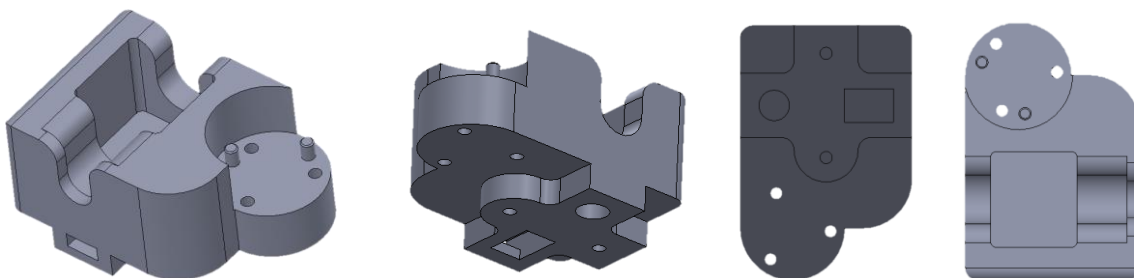
Slika 56. Podnožje stola četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Bočni pogled c) Pogled odozgor d) Pogled odozdol

Nosivi stol montira se na podnožje vertikalnim natiskivanjem odozgor. Toleriranim provrtima stol nasjeda na zatike, a kratkim bridom utora za potisnik (koji se vidi na slici 58. a) i b)) potiskuje kosi brid potisnika prema nazad koji se prolaskom nosivog dijela vraća na poziciju djelovanjem opruge spremljene u prostor potisnika. (Slika 57. c))

Nosivi stol s donje strane geometrijski je uvjetovan vezanjem na podnožje stola (Slika 58. b) i c)), iznad vezivnog dijela stola dolazi kvadratni element koji na srednjem dijelu ima cijelom širinom utor za sondu. Na prednjem dijelu stola iznad utora za potisnik nalazi se uži nastavak utora za sondu (označen strelicom na slici 57. a)) koji oblikom osigurava poziciju sonde i onemogućava pomak sonde unaprijed. Kao i prethodnoj iteraciji pozicija sonde držala se preko iste površine. U nastavku većeg utora čiji je promjer definiran promjerom stražnjeg dijela sonde, osigurava se pravilno nasjedanje stražnjeg kraja. Dalje u nastavku stola nalazi se kvadratni utor vidljiv na slikama 58. a) i d) čiji je oblik definiran geometrijom kvadratnog prstena. Na stražnjem bočnom dijelu stola nalazi se prostor za montiranje senzora sile, dva zatika kao i u prethodnim primjerima služe za vođenje, a tri prolazna provrta za vijke. (Slika 58. a) i d))



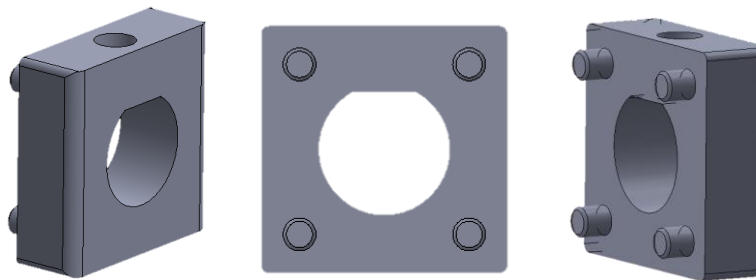
Slika 57. Četvrta iteracija stražnjeg držača alata a) Izometrija iz drugog pogleda b) Pogled odozgor c) Spoj kvadratnog prstena i spojnog elementa senzora sile



Slika 58. Nosivi stol četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Izometrija – pogled odozdol c) Pogled odozdol d) Pogled odozgor

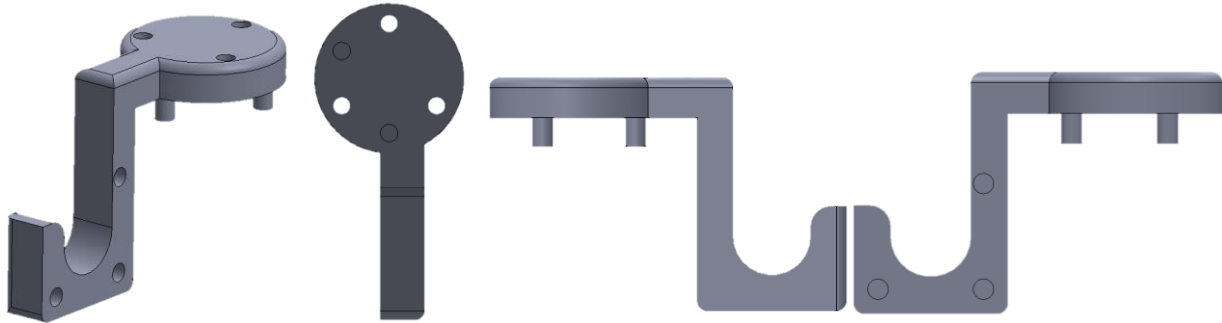
Kvadratni prsten osmišljen je kao spojni element sonde i senzora sile čija je funkcija dvojaka, s jedne strane svojim oblikom i montažom na sondu omogućava pretpozicioniranje otvora na prednjem dijelu sonde, a s druge strane vezom, koju sa sondom ostvaruje, vijkom prenosi silu na

spojni element senzora. Zamišljeno je da se prije umetanja sonde u robotski alat prsten natakne na stražnji kraj vanjske sonde nakon čega se sonda umeće u alat. Zakretom kvadratnog prstena uvjetovala bi se pozicija otvora sonde s obzirom na nasjedanje oblikom na sondu i držanje prstena oblikom s druge strane. Nakon umetanja sonda bi se istovremeno trebala držati u poziciji gdje naliježe na vertikalnu plohu stola, a prsten bi se trebao pomaknuti unazad da se dovedu u kontakt sa spojnim elementom senzora. Pri postizanju takvog odnosa vijak kvadratnog prstena trebao bi se pritegnuti na sondu čime bi se ostvarila čvrsta veza koja bi osigurala poziciju kvadratnog prstena na sondi. Prsten na unutarnjem utoru s jedne strane ima zaravnanje kao i sonda što mu osigurava držanje sonde oblikom. (Slika 59. b)) S druge strane, prsten ima četiri kratka zatika koji svoje pripadajuće rupe imaju u spojnom elementu senzora. (Slika 60.) Spajanjem kvadratnog prstena i spojnog elementa senzora ostvaruje se spoj preko kojeg se prenose sve sile koje djeluju na sondu, prije svega aksijalna sila, a potom i ostalih ukoliko dođe do toga.



Slika 59. Kvadratni prsten sonde četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Pogled s prijedela c) Druga izometrija

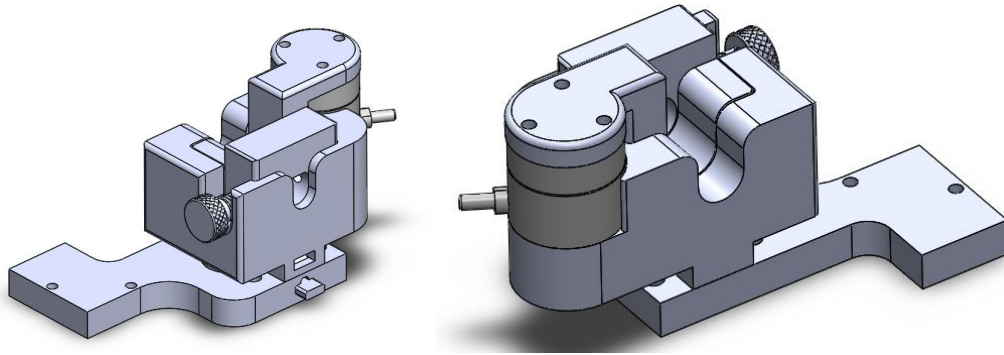
Spojnik element senzora sile geometrijski je predodređen. S gornje strane uvjetovan je senzorom i načinom vezanja, dok je s bočne strane uvjetovan kvadratnim prstenom i neometanim umetanjem sonde. Kružni je dio uvjetovan oblikom senzora, a s donje strane ima dva zatika koji nasjedaju u tolerirane provrte na senzoru. Pored zatika nalaze se i tri prolazna provrta za vijke. Iz kružnog dijela nastavlja se veza s polovičnim parom kvadratnog prstena koji na 3 moguća mjesta ima provrte za nasjedanje zatika kvadratnog prstena. Cijeli element svojim oblikom prilagođen je nosivom stolu, senzoru na koji se montira, kvadratnom prstenu s kojim se spaja i načinom umetanja sonde. Važnost ovog elementa krije se u prijenosu svih vanjskih sila koje se javljaju na sondi u senzor kako bi se osiguralo sigurno gibanje sonde pomoću alata.



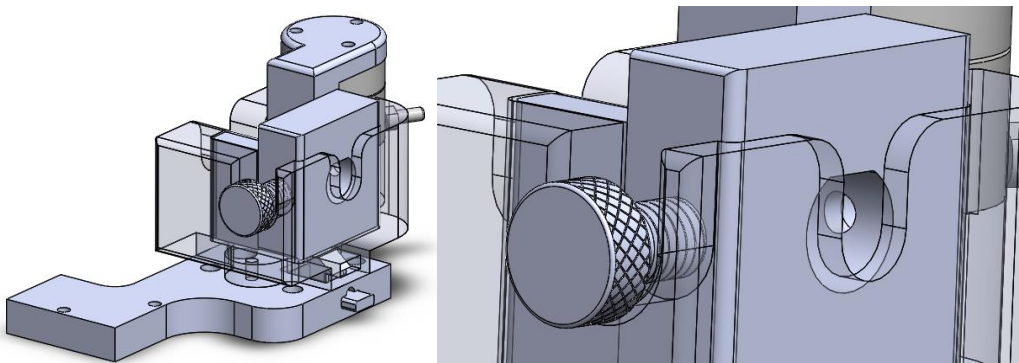
Slika 60. Spojni element senzora sile četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Pogled odozdo c) Pogled straga d) Pogled sprijeda

Ovako konstruiran stražnji držač omogućio bi pretpozicioniranje otvora sonde, njezino vođenje i držanje. Montiranjem senzora na stol i spajanjem posebno konstruiranim spojnim elementom omogućava se aktivno praćenje sile tijekom ulaske sonde u intrakranijalnom prostoru. Rješenjima poput potisnika s oprugom i eliminacijom vijaka za pritezanje skraćuje se potrebno vrijeme rukovanja alatom što korištenje čini lakšim, bržim i spretnijim.

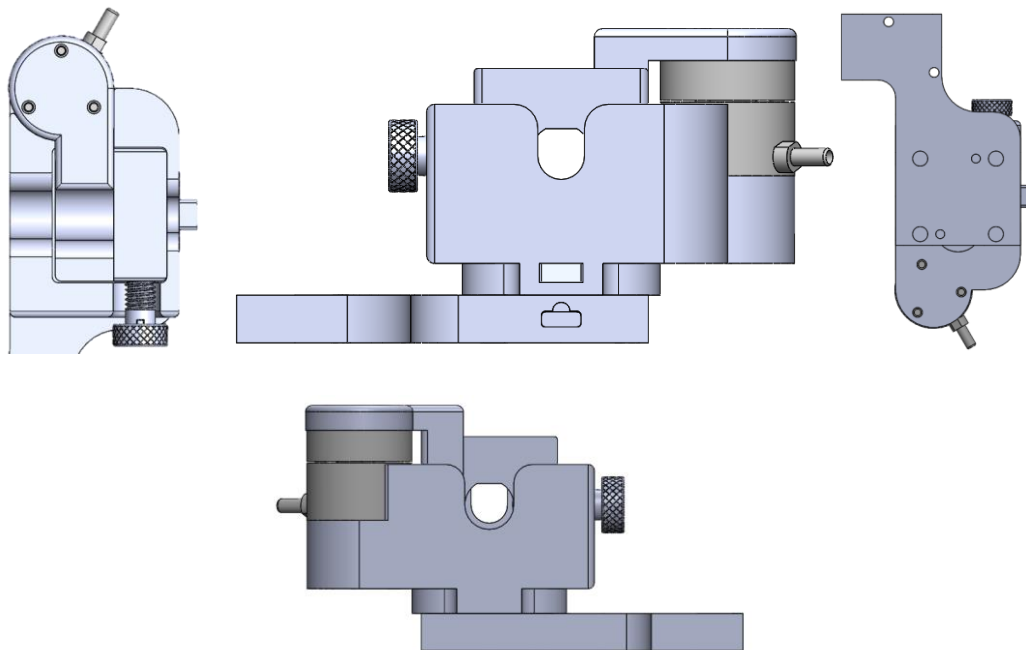
Četvrta iteracija stražnjeg držača izgledom je vrlo slična prethodnoj inačici. Male su se promjene dogodile na svim dijelovima sustava zbog pojednostavljenja ili poboljšanja funkcionalnosti. Slika 61. prikazuje izgled sklopa stražnjeg držača s prednje i stražnje strane. Primarna funkcija svih elemenata ostala je ista: spojna ploča i dalje je vezivni element linearnog aktuatora i nosivog stola, ali uz dodatak za prihvat malog linearnog aktuatora koji će se koristiti za odsijecanje tkiva, nosivi stol zadužen je za nošenje svih elemenata držača i vođenje sonde, kvadratni prsten osigurava početnu poziciju otvora na vrhu sonde i pomoću opružnog klipa prijenos sile između sonde i spojnog elementa senzora te, posljednji, spojni element senzora koji služi kao prijenosnik sile između senzora i kvadratnog prstena. Svi oblikom vođeni spojevi promijenjeni su, tako da su zatici koji su do sada bili iz primarnog materijala pojedinih elemenata izdvojeni kao zasebni elementi, a u dijelovima su na istim mjestima predviđeni tolerirani provrti. Na ovaj način znatno je povećana jednostavnost proizvodnje jer se dijelovi mogu izrađivati iz manjih komada materijala što zahtijeva manje obrade. Jednostavnije je izraditi potrebne provrte nego skidati sav materijal visine izdanaka s ploča kako bi se izradilo svega dva ili tri zatika.



Slika 61. Četvrta iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Izometrija iz drugog pogleda



Slika 62. Četvrta iteracije stražnjeg držača a) Izometrija s prozirnim nosivim stolom b) Odnos kvadratne matice i nosivog stola



Slika 63. Četvrta iteracija stražnjeg držača a) Pogled odozgor b) Pogled sprijeda c) Pogled odozdol d) Pogled straga

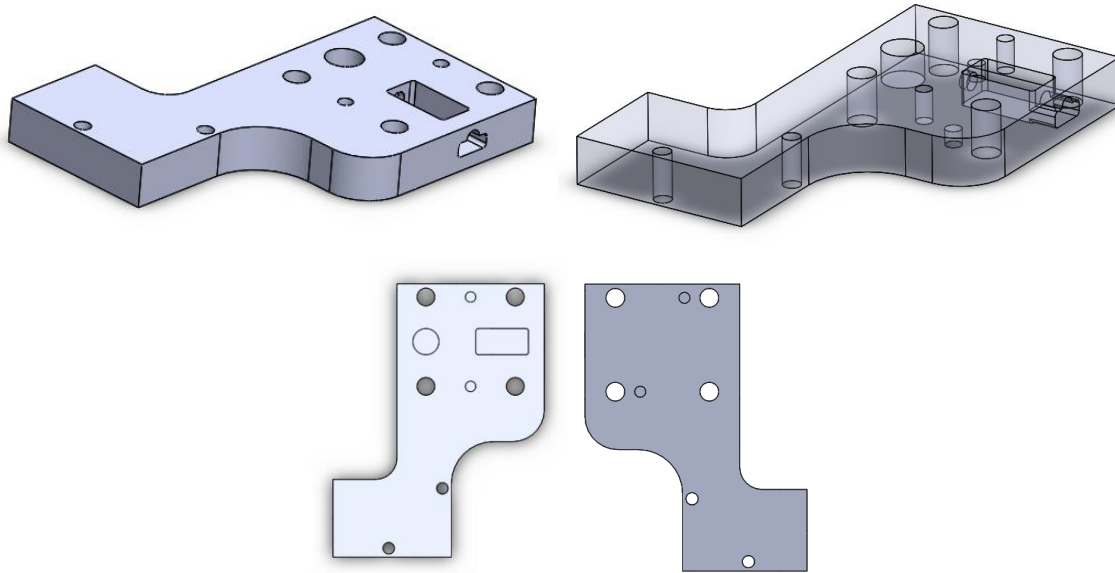
Spojna ploča primarnom je geometrijom ostala ista, bočni dodatak konstruiran je za prihvat malog linearnog aktuatora čija će zadaća biti izvršenje odsijecanja tkiva na kraju procesa utiskivanja sonde intrakranijalno i djelovanja podtlaka. Na spojnoj ploči sa slike 64., kao što je pojašnjeno, svi su izdanci zamijenjeni zasebnim zaticima, stoga se na mjestima prijašnjih izdanaka za vođenje sada nalaze tolerirani provrti u koje će se u postupku montaže uprešati standardni zatici. Osim toga, preciznije je konstruiran utor za potisnik vodeći računa o mogućim načinima proizvodnje. Utor je dovoljno velik da omogućava prvotno umetanje potisnika, a potom i opruge čija će funkcija biti vraćanje potisnika na inicijalnu poziciju i zaključavanje nosivog stola. (Slika 65.)

Za odabir opruge bilo je važno odabrati tlačnu oprugu vanjskog promjera koji odgovara konstrukciji. S obzirom na to da sila povratka potisnika ne mora biti velika, nužno je odabrati oprugu koja gabaritnim mjerama odgovara konstrukciji. Potrebno je odabrati oprugu koja je nakon ugradnje prednapregnuta kako bi se osiguralo vraćanje potisnika na željeno mjesto. U suprotnom, moglo bi se dogoditi da se ne ostvari dovoljno veliki pomak koji će sabiti oprugu i generirati opružnu silu vraćanja. Tvrtka *Hennlich* nudi veliki izbor opruga od kojih jedna odgovara zahtjevima ove konstrukcije, a prikazana je na slici 67. Opruga je izrađena od žice s promjerom 0.2 mm čija je duljina u opuštenom stanju 13.3 mm. Sačinjena je od 18.5 aktivnih koji isporučuju 0.19 N po sabijenom mm.

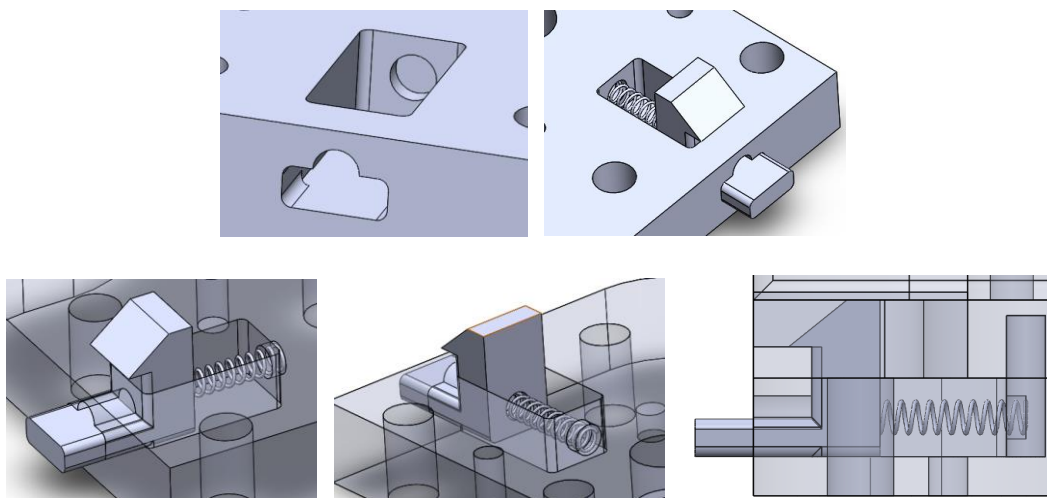
$$F_{\text{prednaprezanja}} = (L_0 - L_{\text{ugradnje}}) \cdot k \quad (17)$$

$$F_{\text{otpuštanja potisnika}} = L_{\text{zuba potisnika}} \cdot k \quad (18)$$

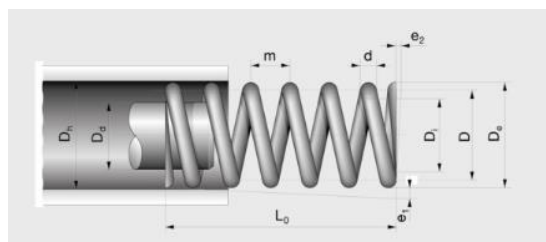
Prema formuli 17 uz $L_0 = 13.3 \text{ mm}$ i $L_{\text{ugradnje}} = 9 \text{ mm}$ možemo dobiti $F_{\text{prednaprezanja}} = 0.82 \text{ N}$, a prema formuli 18 ukoliko znamo da je duljina zuba potisnika $L_{\text{zuba potisnika}} = 1.3 \text{ mm}$ možemo dobiti silu koju je potrebno ostvariti kako bi se nosivi stol mogao odvojiti od podnožja stola $F_{\text{otpuštanja potisnika}} = 0.25 \text{ N}$ što je lako ostvariti pritiskom prsta.



Slika 64. Spojna ploča četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Prozirna izometrija c) Pogled odozgor d) Pogled odozdol



Slika 65. Potisnik spojne ploče četvrte iteracije stražnjeg držača a) Prednji utor potisnika s utorom za oprugu b) Sklop spojne ploče, potisnika i opruge c) Sklop s prozirnom spojnom pločom d) Drugi pogled sklopa s prozirnom spojnom pločom e) Bočni pogled



Slika 66. Shema dimenzija za odabir opruge [40]

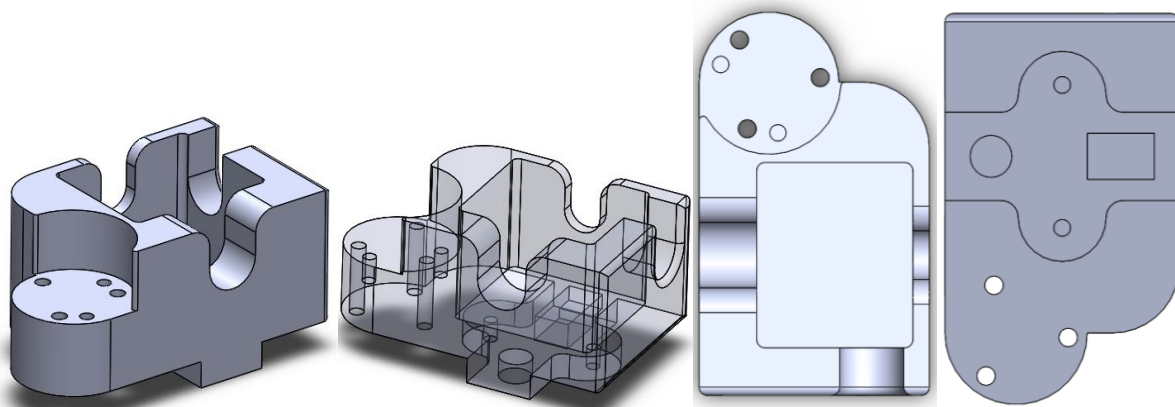
Druckfedern Edelstahl

4780 Schärding · Alfred-Kubin-Straße 9 a-c · Tel. 07712 / 31 63 - 0 · Fax: 07712 / 31 63 - 24 · federtechnik@hennlich.at · www.hennlich.at

1.4310 Edelstahl-Rostfrei, V2A																
Baugrößen								Feder-Wege und -Kräfte					Bestelldaten		Kennung	
d mm	D _e mm	D mm	D _l mm	L ₀ mm	n –	D _d mm	D _h mm	R N/mm	s _n mm	L _n mm	F _n N	M g	Artikel Nr.		☒	☒
0,20	1,20	1,00	0,80	2,0	3,5	0,7	1,3	4,08	0,4	1,6	1,7	0,00	32/1/1	506	–	+
				2,7	5,5			2,60	0,7	2,0	1,7	0,01	32/1/2	506	–	+
				3,9	8,5			1,68	1,2	2,7	2,0	0,01	32/1/3	506	–	+
				5,5	12,5			1,14	1,9	3,6	2,1	0,01	32/1/4	506	–	–
				7,8	18,5			0,77	2,8	5,0	2,2	0,02	32/1/5	507	–	–
0,20	1,40	1,20	1,00	2,3	3,5	0,9	1,5	2,36	0,7	1,6	1,7	0,01	32/2/1	505	–	+
				3,2	5,5			1,50	1,2	2,0	1,7	0,01	32/2/2	505	–	+
				4,6	8,5			0,97	1,9	2,7	1,8	0,01	32/2/3	505	–	+
				6,5	12,5			0,66	2,9	3,6	1,9	0,01	32/2/4	506	–	–
				9,3	18,5			0,45	4,3	5,0	1,9	0,02	32/2/5	507	–	–
0,20	1,80	1,60	1,40	3,0	3,5	1,3	2,0	1,00	1,4	1,6	1,4	0,01	32/3/1	505	–	+
				4,4	5,5			0,63	2,4	2,0	1,5	0,01	32/3/2	505	–	+
				6,4	8,5			0,41	3,7	2,7	1,5	0,01	32/3/3	506	–	+
				9,2	12,5			0,28	5,6	3,6	1,6	0,02	32/3/4	507	–	–
				13,3	18,5			0,19	8,3	5,0	1,6	0,03	32/3/5	508	–	–
0,20	2,20	2,00	1,80	4,0	3,5	1,7	2,4	0,51	2,4	1,6	1,2	0,01	32/4/1	505	–	+

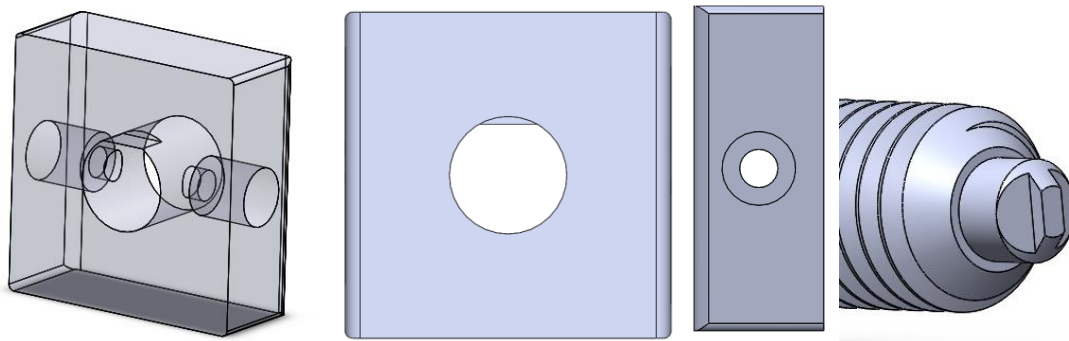
Slika 67. Odabrana tlačna opruga 32/3/5 tvrtke *Hennlich* [40]

Nosivi stol sa slike 68. konstrukcijski je promijenjen samo na središnjem dijelu gdje se kvadratni utor za kvadratni prsten i spojni element senzora povećao. Princip rada ova dva elementa promijenio se, čime se pojavila mogućnost povećanja dimenzija senzorskog elementa zbog veće čvrstoće i preciznijeg prijenosa sile. Kao i podnožje stola, na mjestu montiranja senzora sile više nema izdanka za vođenje oblikom, već toleriranih provrta u koje će se prilikom montiranja uprešati standardni zatici.

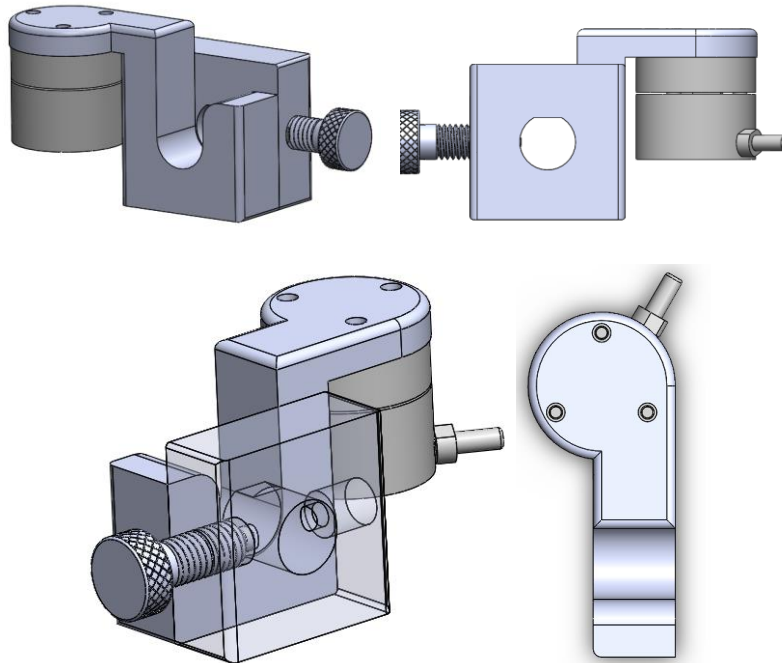


Slika 68. Nosivi stol četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Prozirna izometrija c) Pogled odozgor d) Pogled odozdol

Razmotri li se redosljed potrebnih radnji za umetanje sonde i pravilno korištenje alata u prethodnoj iteraciji, može se uvidjeti relativno velika složenost pričvršćivanja sonde na alat. Pretpostavi li se da će jedna osoba morati činiti sve ranije nabrojane radnje za pozicioniranje sonde na alat, može se zaključiti kako bi pojednostavljenja operativnih zahvata bila poželjna. U četvrtoj iteraciji spoj kvadratnog prstena i spojnog elementa senzora više nema oblikom vođene elemente, s obzirom na to da su oni bili važni samo za prijenos sila koje ne djeluju u smjeru osi sonde, koje bi u ovom sustavu trebale biti minimalne ili nepostojane, pa prema tome tih elemenata više nema. Zbog uklanjanja izdanaka unutar kvadratnog upusta na radnom stolu više nema potreba za prostorom koji osigurava pomicanje prstena, stoga su se oba komada proširila. Kvadratni prsten u prethodnoj se iteraciji na sondu vezao preko vijaka koji je svojom glavom nalijegao na ravnu površinu vanjske sonde, dok je u ovoj iteraciji ovaj odnos pojednostavljen opružnim klipom, koji se može nabaviti kao standardni element, ali s posebno obrađenim vrhom koji omogućava pravilno nasjedanje u vanjske zazoru na stražnjem kraju sonde. (Slika 69.) Spojni element senzora slika 70. također se povećao u širini kako bi mu se povećala čvrstoća. Čvrstoća ovog elementa iznimno je važna zbog ostvarivanja što preciznijeg mjerenja senzora. Kada ovaj element ne bi bio dovoljno čvrst, djelovanjem sile dolazilo bi to progiba elementa što bi rezultiralo nepreciznim očitanjem senzora i značilo da je dio sile, koja se željela prenijeti na senzor, preuzeo spojni element i pretvorio ju u deformaciju i naprezanje.



Slika 69. Kvadratni prsten četvrte iteracije stražnjeg držača a) Prozirna izometrija b) Pogled s prijedba c) Pogled s boka d) Vrh pripadajućeg opružnog klipa



Slika 70. Spojni element senzora sile i kvadratni prsten sonde četvrte iteracije stražnjeg držača a) Izometrija b) Pogled sprijeda c) Izometrija iz drugog pogleda s prozirnim kvadratnim prstenom d) Pogled odozgora na spojni element senzora sile

Stražnji držač četvrte iteracije zadnja je varijanta sklopa koja zadovoljava sve funkcionalnosti potrebnog alata. Osim opisanih međuodnosa i elemenata koji su prikazani u prethodnim poglavljima, na spojnu ploču montira se već spomenuti pomoćni linearni aktuator koji će s drugim prstenom sonde omogućavati odsijecanje tkiva. Iako su pomoćni aktuator i kružni prsten dijelovi sustava stražnjeg držača, detaljnije će biti opisani u narednim poglavljima.

5.4. Mjerenje sile

Mjerenje sile jedna je od sigurnosnih funkcionalnosti ovoga alata. Iako bi se zadatak mogao izvršiti iz podataka o povratnoj sili, zbog osiguranja kvalitete zahvata, eliminacije neželjenih oštećenja tkiva i preciznosti gibanja ovom robotskom alata potreban je i senzor koji je u stanju isporučivati povratnu informaciju. Zbog kvalitetnog prikaza funkcionalnosti svih elemenata stražnjeg držača odabrani je senzor već prikazan u ranijim slikama.

Senzori su, općenito, uređaji koji prenose neki oblik informacije iz fizičkog svijeta u digitalni. Postoje razne vrste senzora za razne potrebe, neki od njih su senzori pomaka linearnog i rotacijskog, topline, sile, momenta tlaka, vibracija, dodira i sl. Međusobno se, osim funkcijom, razlikuju i

prema preciznosti, veličini i načinu obrade signala. U slučaju ovog alata potreban je senzor sile što manje veličine i što veće preciznosti.

Senzor sile mjeri fizičku silu koja je primijenjena na njega bilo od osobe ili objekta. Mnogi senzori sile reagiraju brzo i mogu mjeriti promjenjive sile. U slučaju robotike senzori sile mogu isporučiti razne korisne informacije poput jakosti stiskanja krajnjim hvataljkama ili taktičkog osjeta uslijed provođenja operacije robotskim alatom. [41] Upravo je to ono što se u ovom alatu očekuje od senzora sile.

Prilikom klasičnog postupka operativnog zahvata, kirurg utiskivanjem sonde u intrakranijalni prostor nazad kroz sondu preko ruke dobiva povratnu informaciju o lakoći prodiranja kroz tkivo prema kojoj može *ad hoc* odlučiti o daljnjim željenim kretnjama. Ljudi su ovdje puno ispred elektronike i ljudski osjet uvijek će biti kvalitetnija informacija, no i senzori mogu biti približno dobri. Za ovaj robotski alat kod kojeg je predviđeno jedno glavno gibanje, linearno u smjeru pružanja osi sonde, najvažnije je mjeriti povratnu silu koja dolazi istim putem. Stoga su minimalni zahtjevi senzora mjerenje sile u pravcu jedne osi s rezolucijom boljom ili jednakom od 0.05 N. Iako se rezolucija mjerenja čini vrlo visokom, postoje i senzori koji imaju i manje.

Istraživanjem tržišta senzora sile ustanovljeno je da dolaze u različitim oblicima. Jedan od interesantnijih oblika senzora bio je u obliku kružnog vijenca. Takav oblik senzora omogućio bi montiranje direktno iza sonde, a istovremeno bi omogućavao pristup vakuumskom elementu do unutarne sonde. Nedostaci ovakvih senzora prije svega bili su veličina i preciznost. Ovakvi senzori najčešće dolaze u dimenzijama većim od 40 mm u promjeru i mogu mjeriti sile u kN što je u slučaju robotskog alata nepotrebno i nedovoljno dobro. Iako su razmatrani razni proizvođači poput *Forsentek*, *Futek*, *Monad* i dr., zbog susretanih problematika s ovakvim oblikom, potrebno je bilo naći senzore koji svojim performansama bolje ispunjavaju tražene uvjete.



Slika 71. TAS60W senzor sile tvrtke HT SENSOR TECHNOLOGY CO. [42]

U daljnjem istraživanju preciznost je imala imperativ prilikom pretrage. Nekoliko je senzora zadovoljilo uvjete, no samo je jedan imao pouzdan način montiranja, s prihvatljivom veličinom i odgovarajućom preciznošću. *Nano 17* tvrtke *ATI Industrial Automation* vanjskog promjera 17 mm s mjernim rasponom od 12 N u F_x i F_y smjeru te od 17 N u F_z smjeru. Rezolucija senzora ovisna je o računalnoj kalibraciji koja će se provoditi, a može biti između 0.025 N do maksimalnih 1/320 N. Uobičajene primjene ovakvog senzora u dentalnim su istraživanjima, robotskim operacijama, istraživanjima robotskih ruku i istraživanjima sile prstiju.

Senzor dolazi u dvije verzije IP65 i IP68 što označava *Ingress Protection mark*, odnosno mogućnost prodiranja korisnika, stranih tijela i vlage u uređaj. Prva znamenka kreće se u rasponu od 0 do 6, gdje 6 označava maksimalnu zaštitu, a 0 najmanju, a označava mogućnost neželjenog ulaska stranih tijela u uređaj. Druga znamenka referira se na mogućnost ulaska vode u uređaj i kreće se u rasponu od 0 do 9. IP65 maksimalno je zaštićen od ulaska čestica, direktnog prodiranja vode i nije opasan za rukovanje, dok je IP68 uz maksimalnu zaštitu od čestica osiguran i od ulaska vode pod pritiskom.



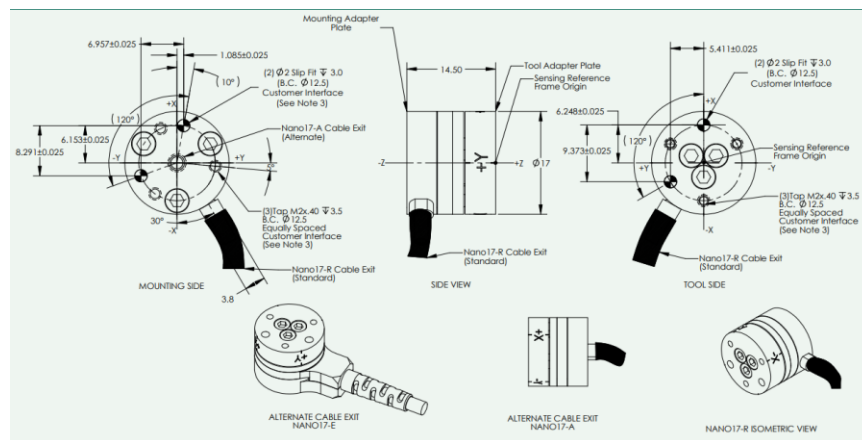
Slika 72. NANO 17 senzor sile tvrtke *ATI Industrial Automation* [43]

Tablica 8. Mjerno područje i rezolucija senzora sile NANO 17 tvrtke *ATI Industrial Automation*

SENSING RANGES	Calibrations					
	SI-12-0.12		SI-25-0.25		SI-50-0.5	
Axes						
F_x, F_y ($\pm N$)	12		25		50	
F_z ($\pm N$)	17		35		70	
T_x, T_y ($\pm Nmm$)	120		250		500	
T_z ($\pm Nmm$)	120		250		500	
RESOLUTION	System Type*					
Axes	CTL		Net/DAQ		CTL	
F_x, F_y (N)	1/160	1/320	1/80	1/160	1/40	1/80
F_z (N)	1/160	1/320	1/80	1/160	1/40	1/80
T_x, T_y (Nmm)	1/32	1/64	1/16	1/32	1/8	1/16
T_z (Nmm)	1/32	1/64	1/16	1/32	1/8	1/16

Tablica 9. Tehničke specifikacije senzora sile NANO 17 tvrtke *ATI Industrial Automation*

Single-Axis Overload	English	Metric
Fxy	±56 lbf	±250 N
Fz	±110 lbf	±480 N
Txy	±14 lbf-in	±1.6 Nm
Tz	±16 lbf-in	±1.8 Nm
Stiffness (Calculated)	English	Metric
X-axis & Y-axis force (Kx, Ky)	4.7x10 ⁴ lb/in	8.2x10 ⁶ N/m
Z-axis force (Kz)	6.5x10 ⁴ lb/in	1.1x10 ⁷ N/m
X-axis & Y-axis torque (Ktx, Kty)	2.1x10 ³ lbf-in/rad	2.4x10 ² N/m/rad
Z-axis torque (Ktz)	3.4x10 ³ lbf-in/rad	3.8x10 ² N/m/rad
Resonant Frequency (Non-IP rated, Measured)		
Fx, Fy, Tz	7200 Hz	
Fz, Tx, Ty	7200 Hz	
Physical Specifications	English	Metric
Weight*	0.02 lb	0.00907 kg
Diameter*	0.669 in	17 mm
Height*	0.571 in	14.5 mm

Slika 73. Tehnička dokumentacija senzora sile NANO 17 tvrtke *ATI Industrial Automation*

U ovom sustavu senzor neće biti postavljen da mjeri silu u svojoj Z osi, već će zbog jednostavnosti montiranja biti postavljen tako da će mu se X os poravnati s osi pružanja sonde.

Postoje dvije metode mjerenja kod senzora sile, jedna je piezoelektrična koja rabi komadić kristala za pretvorbu sila u napon, a druga je putem električnog otpora stvorenog između dva materijala. Piezoelektrični senzori nisu dobri za statičko očitavanje sile već za promjene, dok su senzori s elektrootporničkim tenzometrom dobri u oba slučaja. Senzori koji rade na principu elektrootporničkog tenzometra u sebi imaju dva elementa - jedan statičan i jedan koji ima opružno djelovanje svojom geometrijom. Ploha opružnog elementa vanjskim djelovanjem sile dolazi u kontakt sa statičkom i daje informaciju o sili preko veličine površine koja je došla u kontakt. U

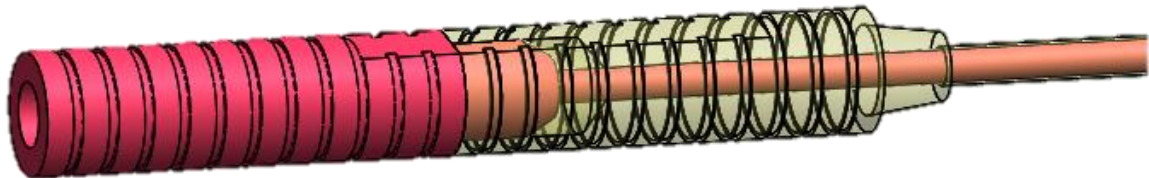
slučaju veće sile elastični će se komad deformirati više i veća će površina biti u kontaktu te se zbog toga ovakvi senzori smatraju silom kontrolirani potenciometri. [41] NANO 17 koristi precizniju i pouzdaniju metodu elektrootporničkog tenzometra.

5.5. Vakuum

Stvaranje podtlaka u unutarnjoj sondi dovodi do usisa bioptata u šupljinu unutarnje sonde putem bočnog otvora na samom vrhu. Kiruršku sondu čine dva dijela, unutarnja i vanjska sonda koje su izgledom vrlo slične. Vanjska sonda promjerom igle veća je od unutarnje i služi kao kućište, dok je kod unutarnje sonde promjer igle definiran unutarnjim promjerom igle vanjske sonde. Stražnji kraj oba elementa jednakog je promjera, no prednja sonda na kraju ima zaravnanje paralelno bočnom otvoru na prednjem dijelu, a unutarnja sonda isto zaravnanje ima na prednjem dijelu stražnjeg kraja. (Slika 74.) Zaravnanje stražnjeg kraja paralelno je s bočnim otvorom na početku sonde i svojim odnosom pokazuje odnos otvora na vrhu kada je sonda postavljena intrakranijalno.



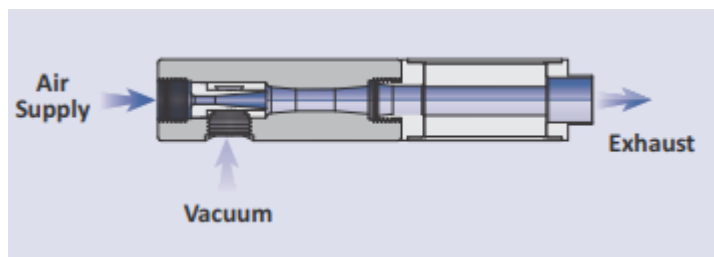
Slika 74. Kirurška sonda



Slika 75. Spoj unutarnjeg i vanjskog dijela sonde u prikazu s prozirnim vanjskim dijelom sonde

U trenutku kada je sonda unutar tkiva, stvaranjem podtlaka na izlazu dolazi do povlačenja tkiva unutar prostora sonde nakon čega slijedi odsijecanje objašnjeno u sljedećem poglavlju. Kako bi se osigurao utjecaj vakuuma i stvaranje podtlaka u sondi, na alat je potrebno ugraditi vakuumski generator ili vakuum pumpu koja će preko cjevčice biti spojena s otvorom sonde. Razlika između vakuum generatora i vakuum pumpe u tome je što za vakuum generator treba osigurati protok stlačenog zraka, a za vakuum pumpu električnu struju. Vakuum generator radi na principu Venturijeve cijevi stvaranjem podtlaka unutar konstrukcije generatora povećanjem brzine strujanja fluida na uskom dijelu konstrukcije. Tako ubrzani fluid povlači za sobom čestice iz drugog izvora i stvara vakuum iz području odakle čestice dolaze. Vakuum pumpa za rad ne treba izvor stlačenog

zraka, već osigurava stvaranje podtlaka na jednom izlazu tako što brzim titrajima membrane istiskuje fluid na drugi kraj.



Slika 76. Prikaz rada vakuuma generatora [44]

Kod odabira oblika stvaranja vakuuma opet je ulogu imala veličina, radna temperatura, isporučivani podtlak i način montaže. Nakon analize tržišta i ponude, sve mikro i mini električne vakuuma pumpe iako zadovoljavajuće veličine, nisu zadovoljile u pogledu radne temperature.

Tablica 10. Usporedba vakuuma generatora

Model	VUH05-44A [45]	CV05-HS-TT [46]	JV07 [47]	AVR [48]	JS-40UM [44]
Slika					
Tvrtka	PISCO	MILLIBAR	ANVER	AIR-VAC	VACCON
Podtlak [kPa]	-90	-92	-88	-93	-92
Ušis zraka [l/min]	10	6	14	4.53	-
Radna temperatura [°C]	0 do 60	<130	-10 do 80	0 do 204	-73 do 204
Dimenzije [mm]	fi 13 x 49.3	57.1 x 31.8 x 15.9	43 x 9.5 x 15	85.7 x 49.2 x 50.8	fi 14.3 x 36.8

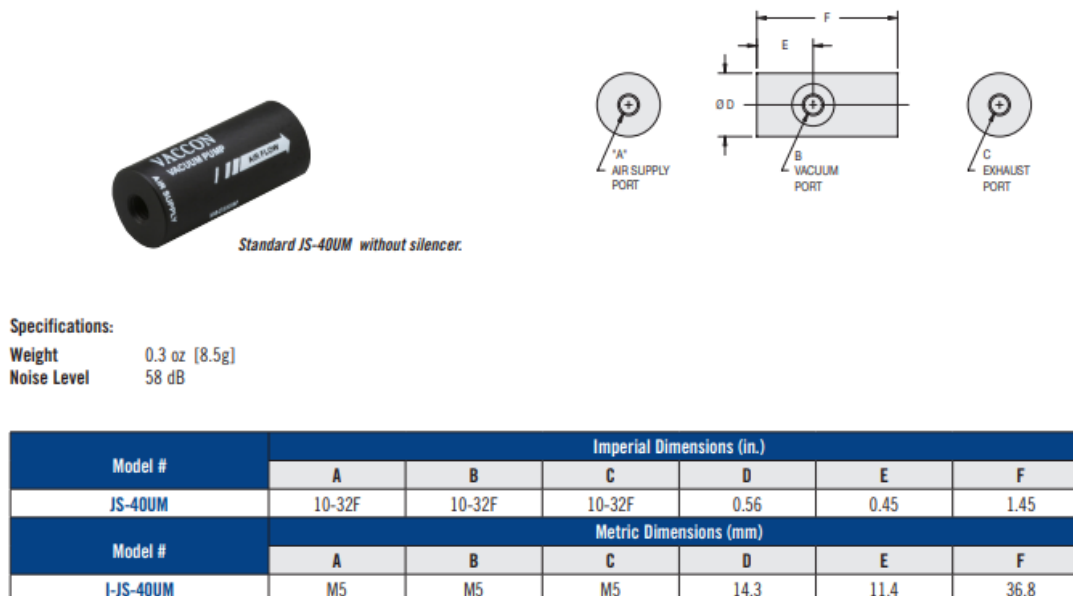
Tablica 10. prikazuje usporedbu najboljih vakuuma generatora pronađenih na tržištu. Modeli VUH05-44A i JV07 ne zadovoljavaju radnom temperaturom koja je nedostatna da se generatori podvrgnu postupku sterilizacije. Model AVR tvrtke AIR-VAC dolazi samo u varijanti ANSI standarda pa se zbog jednostavnosti montiranja i uporabe ovaj model ne odabire. Preostala dva modela JS-40UM i CV05-HS-TT sličnih su performansi, model tvrtke MILLIBAR nema numerički naznačenu gornju granicu radnog temperaturnog raspona iako proizvođač garantira podnošenje temperature i preko 130°C. Isti model omogućava neznatno jednostavniju montažu jer na kućištu

ima predviđene provrte za vijčano pričvršćivanje, a model tvrtke *Vaccon* zahtijevao bi izradu posebnog držača. Posljednja razlika između dva modela u obliku je geometrije i gabaritnim mjerama koje su na strani generatora JS-40UM. Tvrtka *Vaccon* za svoje generatore ne nudi gotove držače, no tvrtka *Pisco* nudi držač cilindričnog oblika primarno za model VUH05-44A koji svojim dimenzijama odgovara i za generator JS-40UM. S obzirom na to da je time riješeno pitanje montiranja generatora JS-40UM, upravo se on odabire kao najbolja opcija.

Budući da je nejasna kvantitativna potreba podtlaka unutar sonde, odabran je najmanji generator iz serije. Pokaže li se eksperimentalno potreba za većim podtlakom, ista firma nudi niz redno većih generatora koji mogu isporučivati nešto veći podtlak na izlazu. Prednosti ovog generatoru mala su masa, jednostavnost uporabe, mogućnost sterilizacije i mogućnost nadogradnje prigušivača zvuka ukoliko se pokaže da je u radnoj okolini operacijske sale ovaj vakuum generator prebučan.



Slika 77. Vakuum generator JS-40UM tvrtke *Vaccon* [44]



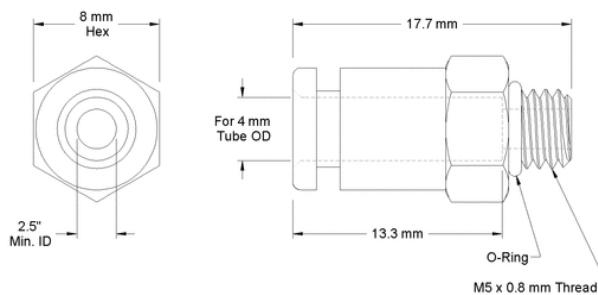
Slika 78. Tehnička dokumentacija vakuum generatora JS-40UM tvrtke *Vaccon* [44]

Za odabrani generator preporuča se korištenje cjevčice promjera 4 mm.

Uz odabrani vakuum generator potrebno je odrediti način spajanja vakuum cjevčice na sondu i generator. Na generator se vežu klasični vakuumski konektori vanjskog navoja M5. Za dovod stlačenog zraka odabran je ravni konektor pod šifrom 7880T368 tvrtke *McMASTER-CARR* koji omogućava lako skidanje i umetanje pomoću prstena za otpuštanje. (Slika 79.)



Slika 79. Ravni konektor, za plastične cijevi vanjskog promjera 4 mm, M5 x 0.8 mm [49]

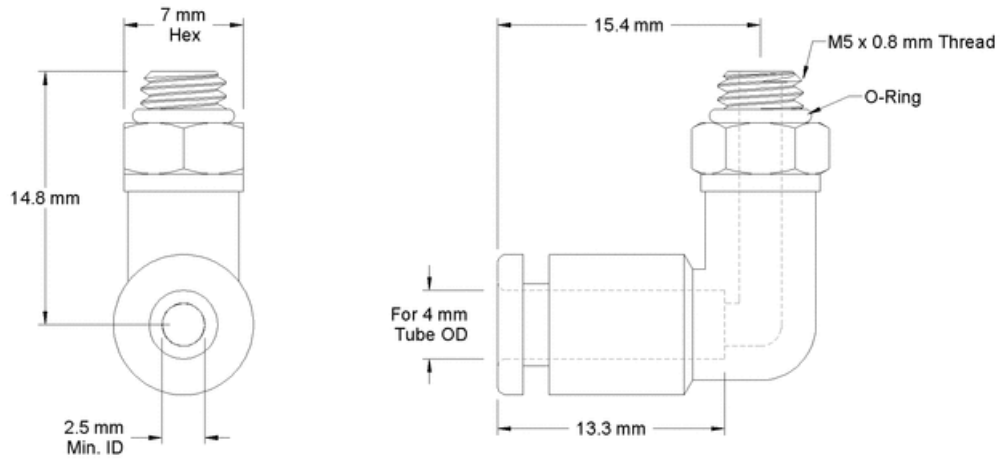


Slika 80. Tehnička dokumentacija ravnog konektora sa Slika 79.

Za prihvat cjevčice vakuuma koja će s druge strane biti spojena na sondu koristi se sličan konektor, ali s laktom kako bi se smanjilo savijanje cjevčice tijekom rada. Ovaj konektor također omogućava lako postavljanje i skidanje cjevčica pomoću prstena za opuštanje. Pozicija lakta bit će prema stražnjoj strani kako bi se osiguralo pružanje vakuum cjevčice bez nepotrebnog savijanja. Odabran je konektor pod šifrom 7880T432 također tvrtke *McMASTER-CARR*. (Slika 81. i Slika 82.)



Slika 81. Konektor s laktom, za plastične cijevi vanjskog promjera 4 mm, M5 x 0.8 mm [49]



Slika 82. Tehnička dokumentacija konektora s laktom sa slike 81.

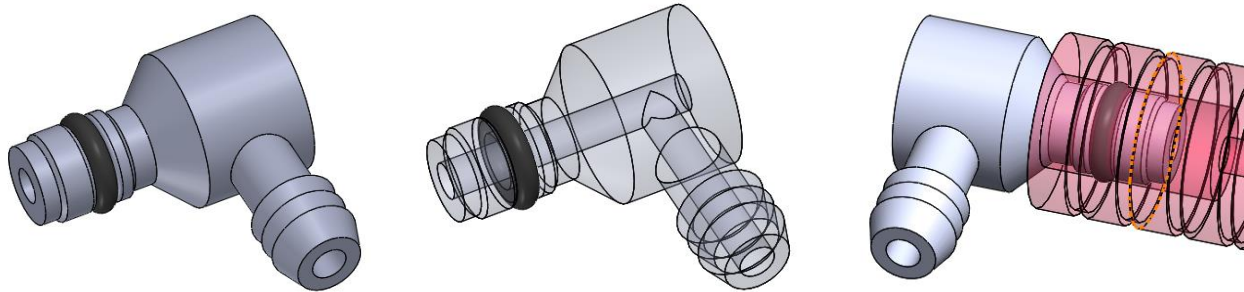
Ostalo je još pronaći konektor cjevčice i sonde. S obzirom na to da je takav tip spoja nestandardan, nije moguće pronaći posve odgovarajući tip konektora. Stoga se konstruira konektor sličan onome kao sa slici 83., ali s odgovarajućim dimenzijama. Konstruirani konektor s obje će strane imati vanjski promjer 4 mm gdje će na orebrenje dolaziti cjevčica, a na stranu s gumenom brtvom sonda.



Slika 83. Slika vakuum konektora s dva muška izdanka s orebrenjem i nasjedanjem brtvom

Odabrana gumena brtva prikazana je na slici 84. Guma joj daje savitljivost i mogućnost prilagodbe prilikom utiskivanja u unutarnju sondu. Brtva je odabrana da može popuniti spoj konektora i sonde s unutarnjim promjerom 2.5 i vanjskim 4.5 mm te podnijeti temperature veće od 130°C. Gumena brtva nalazi se pod kodom 9262K511 tvrtke *McMASTER-CARR*. Unutarnji promjer sonde iznosi 4.2 mm što će s gumenom brtvom činiti preklap od 0.15 mm.

Slika 84. Gumena brtva 9262K511 tvrtke *McMASTER-CARR* [49]



Slika 85. Konstruirani konektor po uzoru na onaj prikazan na slici 83. a) Izometrija b) Prozirna izometrija c) Spoj konektora i sonde

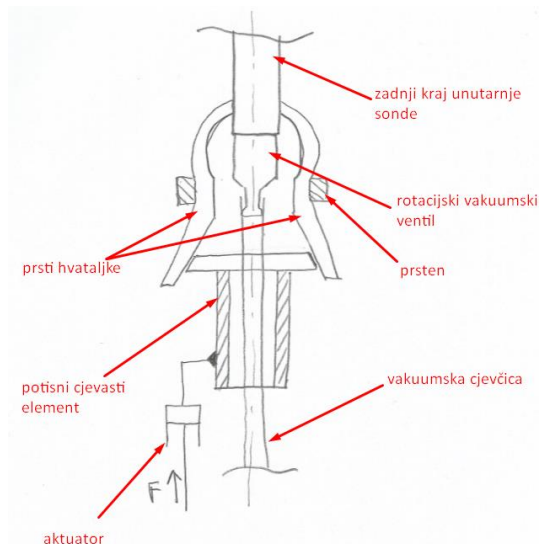
Slika 85. prikazuje konstruirani konektor za cjevčicu vanjskog promjera 4 mm čija je dimenzija uvjetovana odabranim vakuum generatorom. Ovaj konektor omogućava brtvljeni spoj sa sondom i cjevčicom, odnosno omogućava stvaranje podtlaka unutar sonde radom vakuum generatora.

5.6. Odsijecanje tkiva

Odsijecanje tkiva dolazi kao gotovo zadnja radnja u slijednom nizu događanja. Nakon pozicioniranja sonde u alat, linearnog gibanja unaprijed, pozicioniranja i stvaranja podtlaka koje uvlači dio tkiva u unutarnji prostor sonde, mora se izvršiti odsijecanje kako ne bi došlo do povlačenja tkiva izvlačenjem sonde. Klasičnim operativnim postupkom kirurg je zbog, oblikom definiranog međudnosa unutarnje i vanjske sonde, znao gdje je otvor na vrhu. Zaravnanje na stražnjem kraju sonde pokazuje u kojem je smjeru otvor, ukoliko su zaravnanja na vanjskoj i unutarnjoj sondi poravnana, sonda može usisati tkivo. Nakon uvlačenja tkiva, potrebno je napraviti relativni zakret unutarnje sonde u odnosu na vanjsku kako bi brid utora unutarnje sonde s bridom utora vanjske sonde kreirao smičnu silu na maloj površini meke tvari i učinio odsijecanje. U klasičnom postupku kirurg bi prema zaravnanjima stražnjeg dijela znao međusobni odnos vanjske i unutarnje sonde, a zakret od 90° garantirao bi sigurno odsijecanje. Tek nakon zakreta i odvajanja bioptata, dozvoljen je povratak sonde u inicijalnu poziciju, odnosno izvlačenje iz intrakranijalnog prostora pacijenta. Iako za robotski alat funkcionalno nije zahtijevano automatiziranje ove radnje, odsijecanje će se omogućiti bez potrebe za ljudskom intervencijom.

Pristup rješavanja ovog problema u konstrukcijskom smislu počeo je od skice. Slika 86. prikazuje polazni koncept. Zamišljeno je konstruirati sustav koji bi linearnim potiskom osiguravao zakret hvataljki preko fiksnog prstena, a ujedno osiguravao šupljinu po duljini cijelog prihвата kako bi vakuumska cjevčica neometano mogla dosegnuti unutarnju sondu. Hvataljke su zamišljene kao

mali prsti čija bi se rotacija osigurala klizanjem linearnog aktuatora po unutarnjoj plohi, a oni bi se zbog vanjskog fiksnog prstena rotirali i na vrhovima stvarali silu prihvata. Potisni element linearnog aktuatora bio bi cjevastog oblika s prirubnicom koja bi bočnim stranama ostvarivala klizanje po prstima hvataljke. Nakon stezanja hvataljke na sondu potrebno bi bilo dovesti zakretni moment koji će preko konstrukcije hvataljke dovesti moment i do unutarnje sonde.

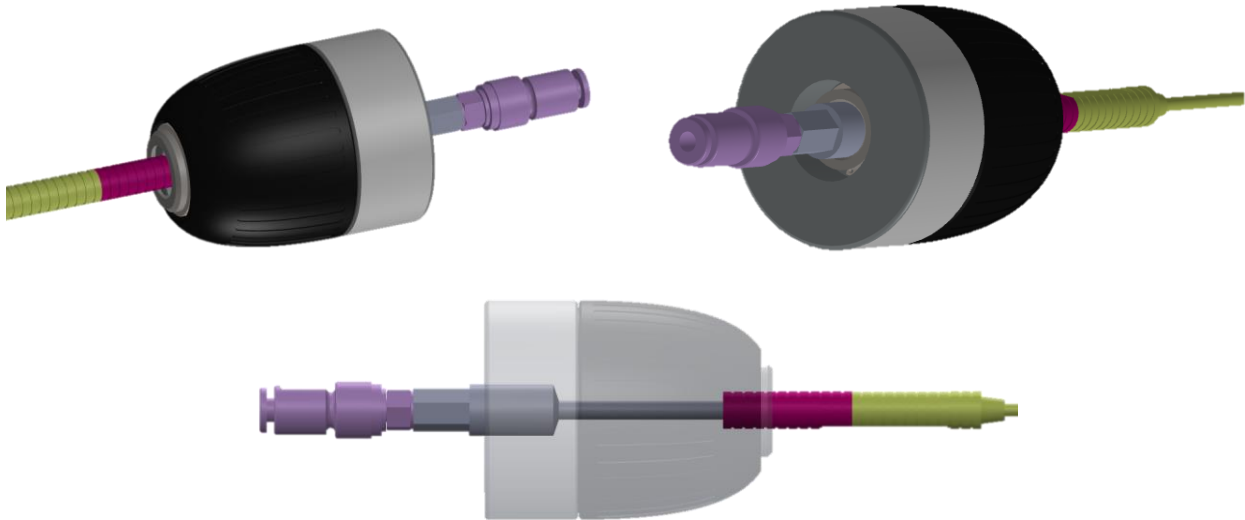


Slika 86. Koncept prihvata unutarnje sonde za unos zakreta s omogućenim prolaskom vakuumske cjevčice

Daljnjom razradom ideje težilo se standardnim dijelovima i pojednostavljenju konstrukcije, tako da je u prvoj iteraciji posebno konstruirani element hvataljke zamijenila standardizirana stezna čeljust (Slika 88.) također poznata pod nazivom „amerikaner“.

Prva iteracija prikazuje početne korake rješavanja ovog problema kao što prikazuje Slika 87. Posebno konstruiranim elementom omogućilo bi se vezanje stezne glave, brtvljenje u unutarnjoj sondi i vezanje vakuumskom ventila. Ovakav konektor (Slika 89.) na svom bi vanjskom obodu imao urezani navoj na koji bi se mogla pričvrstiti stezna glava, na prednjem dijelu imao bi cjevasti nastavak koji bi na samom vrhu imao predviđeno mjesto za gumicu koja bi osiguravala brtvljenje. Vanjski promjer cjevastog dijela konektora uvjetovan je promjerom provrta stražnjeg dijela unutarnje sonde, a navoj veličinom navoja odabrane stezne glave. Konektor bi iz navoja za steznu glavu imao obrađeni šesterokutni oblik koji bi omogućavao prijenos potrebnog zakretnog momenta oblikom preko dodatnog elementa. Na stražnjem kraju konektor bi imao urezani navoj kako bi se na njega mogao spojiti rotacijski vakuum ventil. (Slika 90.) Ovakav ventil odabran je kako bi se spriječilo uvijanje vakuumske cjevčice. S obzirom na to da ventil omogućava rotaciju, prilikom

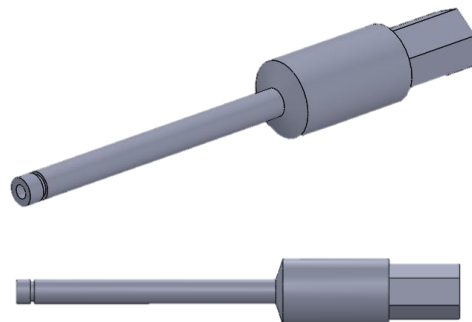
rotacije sonde, kod odsijecanja tkiva ne bi došlo do uvijanja cjevčice koja vodi do vakuum generatora.



Slika 87. Prva iteracija razvoja odsijecanja tkiva a) Izometrija sa steznom glavom b) Izometrija sa steznom glavom - drugi pogled c) Bočni pogled s prozirnom steznom glavom



Slika 88. Stezna glava prve iteracije sustava za odsijecanje tkiva



Slika 89. Konektor stezne glave i vakuum ventila sa sondom



Slika 90. Rotacijski vakuum ventil prve iteracije sustava za odsijecanje tkiva

Razvojem sustava uvidjelo se da kompleksnost rješenja raste i pojavom elektro motora i potrebnih elemenata za prijenos momenta, sustav bi možda zahtijevao i kućište. Zbog mogućih problema i složenosti rješenja zamišljen je drugačiji pristup. Drugi pristup ovom problemu bio je linearni aktuator kao izvor pomoćnog gibanja, a ne rotacijski kao što je to trebao biti u prvoj iteraciji. Uvođenjem linearnog aktuatora u sustav javlja se potreba fiksne veze sa sondom kako bi se linearno gibanje moglo pretvoriti u rotaciju unutarnje sonde.

Druga iteracija sustava za odsijecanje tkiva temelji se, dakle, na pretvorbi linearnog pomaka u rotaciju. Ključni spoj sustava sa sondom bio bi preko kružnog prstena koji bi svojim unutarnjim oblikom, kao i kvadratni prsten na stražnjem držaču, odgovarao vanjskoj geometriji sonde. Takva veza omogućila bi prijenos rotacije bez potrebe za hvataljkama. Drugi elementi sustava moraju omogućiti zglobnu vezu prstena i linearnog aktuatora koja će omogućavati linearni pomak u smjeru okomitom na pružanje sonde i rotaciju spoja. Prsten bi se trebao vezati čvrstom vezom za taj spoj, no treba uvidjeti kako će prilikom gibanja, u slučaju čvrste veze, kontakt putovati po kružnici koju opisuje vrh spojnog elementa prstena i linearnog aktuatora. S obzirom na krutost linearnog aktuatora i nemogućnost savijanja klizača aktuatora, veza između aktuatora i spojnog elementa prstena mora biti klizna. Kliznom vezom osiguralo bi se gibanje spoja pravocrtno po liniji gibanja klizača aktuatora, a spojni element mijenjao bi točku kontakta tijekom gibanja.

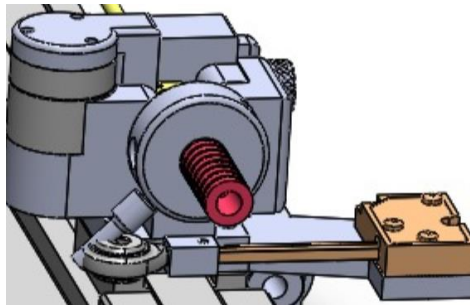
Prva verzija ovakvog spoja zamišljena je korištenjem zglobne glave (Slika 91.) koja bi bila vezana za linearni aktuator. Pomakom aktuatora i zglobne glave, kuglasti element prilagođavao bi se kutu spojnog elementa i ujedno omogućavao njegovo klizanje tijekom gibanja. S obzirom na već spomenuti potrebni kut zakreta sonde od minimalno 90° , ovakvi spojevi nisu zadovoljili jer svojim kuglastim elementima u kombinaciji s kućištem u najboljem slučaju omogućavaju svega 42° zakreta. Pregled tržišta također je pokazao kako postoje zglobne glave s proširenim kuglastim elementima koji omogućavaju veći zakret kuta i uobičajeno se koriste u suspenzijama vozila. Iako bi s većim ostvarim kutom ovakav spoj zadovoljio svojom veličinom, ne odgovara našem alatu. Kao što je već opisano, takav element morao bi se vezati za linearni aktuator što bi uvjetovalo njegovo izmicanje dalje od osi pružanja sonde zbog duljine kućišta i veličine glave. Takva konfiguracija nepovoljna je za alat zbog čega se konstrukcijski tražilo novo rješenje. (Slika 93.)



Slika 91. Zglobna glava tvrtke IGUS [50]



Slika 92. Zglobna glava s proširenim kuglastim elementom tvrtke QAI [51]



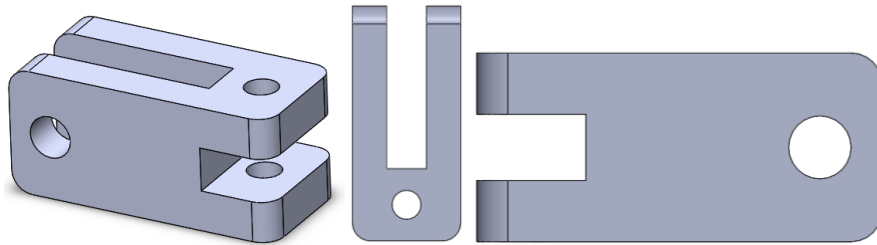
Slika 93. Prikaz nepovoljnog položaja aktuatora pri korištenju zglobne glave

Drugo konstruktivno rješenje bio je koljenasti zglob sa svornjakom (Slika 94.) u modificiranoj verziji koja omogućava klizanje. Vodeći se principom rada koljenastog zgloba konstruirana je klizna veza spojnog elementa prstena i modificiranog ženskog elementa koljenastog zgloba. S obzirom na odabrani linearni aktuator, dio koljenastog zgloba koji se vezao za njega morao je svojim oblikom osigurati mogućnost spajanja. Zbog specifičnosti izgleda klizača odabranog pomoćnog linearnog aktuatora nije se mogao koristiti standardni element iz ponude, već se morao konstruirati zglob koji omogućava spajanje na aktuator. Novokonstruirani element koljenastog zgloba zapravo omogućava koljenasto vezanje na oba kraja jer klizač pomoćnog linearnog aktuatora ima izgled muškog dijela koljenastog zgloba što je vidljivo na slici 99. S druge strane, vezni je element prstena zamišljen da se zavija u prsten radi sigurnosti od ispadanja, zbog čega s gornje strane ima narezani navoj, a od navoja dalje valjkasti je dio zaravnan s obje strane i u njemu je izrađen utor. (Slika 97.) Sa strane aktuatora koljenasti zglob spaja se svornjakom promjera 1.6 mm prema normi DIN 1436 koji je osiguran sa sigurnosnom pločicom norme DIN 6799, a s druge zglob se spaja svornjakom promjera 2 mm iste norme i istog načina osiguranja. (Slika 96.) Širina zaravnatog dijela uvjetovana je širinom ženskog dijela koljenastog zgloba, a utor veličinom svornjaka koji će držati spoj. Utor je izrađen po gotovo cijeloj visini spojnog elementa kako bi omogućio prolazak svornjaka gore dolje za vrijeme rotacije prstena i spojnog elementa. Duljina

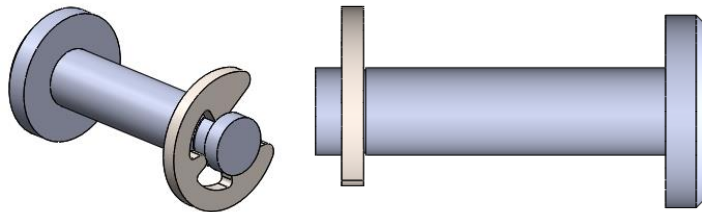
spojnog elementa ograničena je visinom između kružnog prstena i glavnog linearnog aktuatora, ali ostavlja dovoljno prostora kako bi se za vrijeme cijelog gibanja osigurao spoj. Duljina ženskog dijela koljenastog vratila uvjetovana je maksimalnim kutom pod kojim muški dio koljenastog vratila stoji u krajnjim pozicijama. Zazor sa slike 95. b) u koji muški dio usjeda morao se napraviti dovoljno dugačkim kako se u početnoj i krajnjoj točki rotacije ne bi dogodila kolizija.



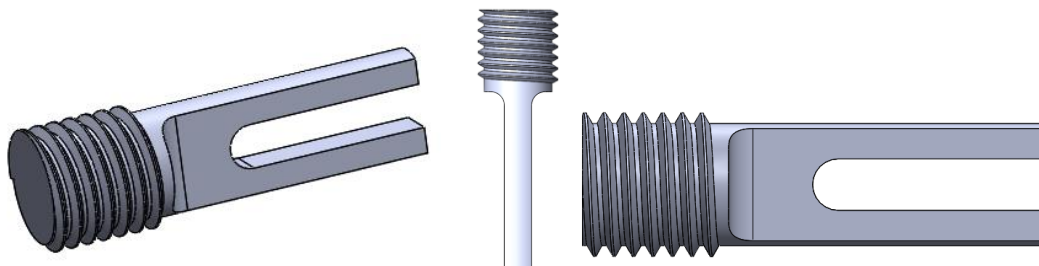
Slika 94. Ženski element koljenastog zgloba s pripadajućim svornjakom tvrtke IGUS [50]



Slika 95. Dvostruko koljenasti zglobni spojnik a) Izometrija b) Pogled odozgor c) Pogled sprijeda

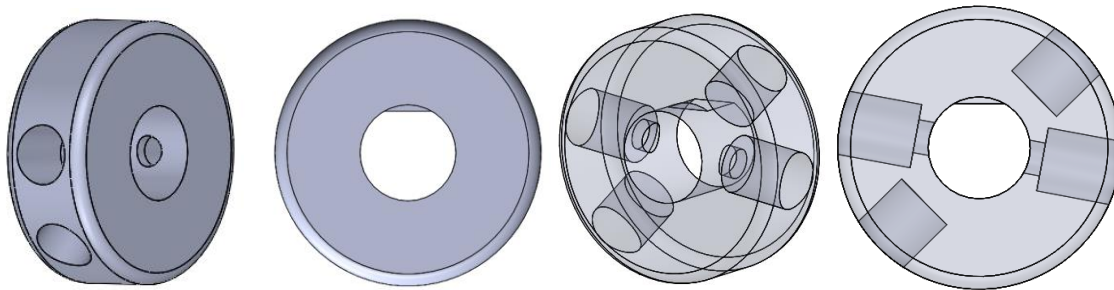


Slika 96. Svornjak (DIN 1436) sa sigurnosnom pločicom (DIN 6799)



Slika 97. Spojni element prstena i zgloba a) Izometrija b) Bočni pogled c) Pogled sprijeda






Prsten sustava za odsijecanje tkiva kružnog je oblika s vanjske strane, a unutarnjim provrtom prati vanjsku geometriju sonde. Praćenjem geometrije i nasjedanja prstena oblikom, osigurava se prijenos zakreta koji se donosi povlačenjem linearnog aktuatora preko kliznog koljenastog zgloba. Linearna pozicija kružnog prstena definira se istim principom kao i kod kvadratnog prstena, pomoću opružnog klipa s posebno obrađenim vrhom za pravilo nasjedanje u vanjske zazoru sonde. Navojni provrt opružnog klipa stoji pod 10° na horizontalnu os prstena kako bi se izbjeglo doticanje provrta unutar prstena. Drugi par provrta namijenjen je već opisanom spojnom elementu prstena i zgloba. Dva su para provrta zbog dvije moguće konfiguracije pozicije sonde. S obzirom na to da prsten prati zakret sonde, oblikom može biti zarotiran za 180° pa se, zbog osiguranja uvijek iste postavke opružnog klipa i spojnog elementa prstena, izrađuju dva para provrta.



Slika 98. Kružni prsten unutarnje sonde za odsijecanje tkiva a) Izometrija b) Pogled sprijeda c) Prozirna izometrija d) Pogled sprijeda - prozirn

Linearni aktuator pokretač je sustava za odsijecanje tkiva, predstavlja pomoćno gibanje cijelog alata i smješten je na stražnjem držaču. Kriteriji odabira ovog pogona bili su male dimenzije, način montaže i dozvoljeni radni uvjeti.

Tablica 11. Usporedba linearnih aktuatora

Model	PQ12-P [52]	20DAM-K [53]	21H4(X)-V [54]	XLA-1 [55]	N-310 NEXACT [56]
Slika					
Tvrtka	ACTUONIX	Portescap	Haydon kerk - PITTMAN	XERYON	PI motion
Radni hod [mm]	20	15	9 - 38.1	20 - 200	10 - 125
Radna temperatura [°C]	-10 do 50	-20 do 70	maksimum 130	-30 do 70	0 do 50
Dimenzije [mm]	47.5x21.5x15	20 x 45	20 x 20 x 81.1 (25.4)	22.7 x 14.8 x 5.4	25 x 25 x 60 (20)
Maksimalna sila guranja/vučenja [N]	18 - 50	30.6	44	1	10

U prethodnoj tablici prikazani su najrelevantniji aktuatori pronađeni u istraživanju tržišta. 20DAM-K ne zadovoljava premalim hodom, PQ12-P i 21H4(X)-V prilično su veliki za ovakav alat i način montiranja stvarao bi problem. U uži izbor ušli su XLA-1 i N-310, a odabran je aktuator XLA-1 zbog manjih dimenzija i veće radne temperature. Dimenzijski gledano manji aktuator znači lakše pozicioniranje i uporabu u robotskom sustavu te bi se kao takav trebao dobro uklopiti. Temperaturno ne zadovoljava u potpunosti s radnom temperaturom, ali proizvođač tvrdi da može podnijeti veće temperature ukoliko ne radi, ali da bi se u operativnom vremenu trebalo držati preporučenog zahtjeva. Za ovaj alat to znači da aktuator zajedno s ostatkom naprave smije biti podvrgnut klasičnim metodama sterilizacije. Radni hod od 20 mm nije dovoljan za pokrivanje punog zakreta prstena od 90° te je odabrana duljina klizača aktuatora od 30 mm. Radna sila od 1 N prilično je mala, ali trebala bi biti dostatna za odsijecanje s obzirom na to da djeluje na kraku preko spojnog elementa prstena.



Slika 99. Odabrani linearni aktuator za odsijecanje tkiva XLA - 1, slike izometrije [55]

Key features

drive principle	patented Crossfix™ ultrasonic piezo technology
lifetime	> 100 km / 1 million cycles
control principle	open-loop
operating voltage	20 to 48 V
controller	integrated

Environmental compatibility

temperature range	-30°C to +70°C
humidity range	20% to 90% RH (non-condensing)
heat dissipation (motor only)	< 1 W

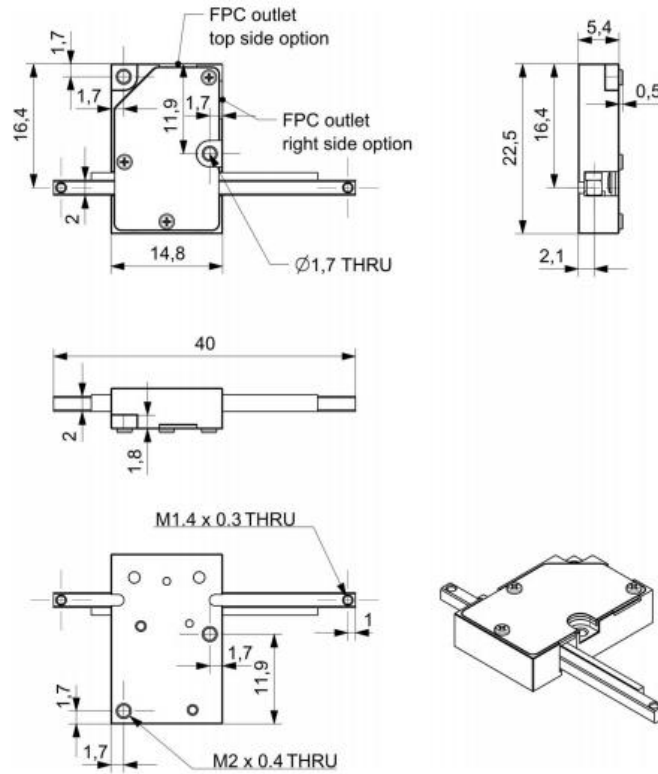
Motion performance

		XLA-1 Open-loop all rod lengths	unit	tolerance	
LIMITS	type	optical			
ENCODER	type	no encoder			
ACTUATOR	positioning	resolution = min. step size = min. incremental motion (MIM)	50 - 100 nm (pulsed operation)	nm	typ.
	speed	max. speed	400	mm/s	typ.
		min. speed	10	µm/s	typ.

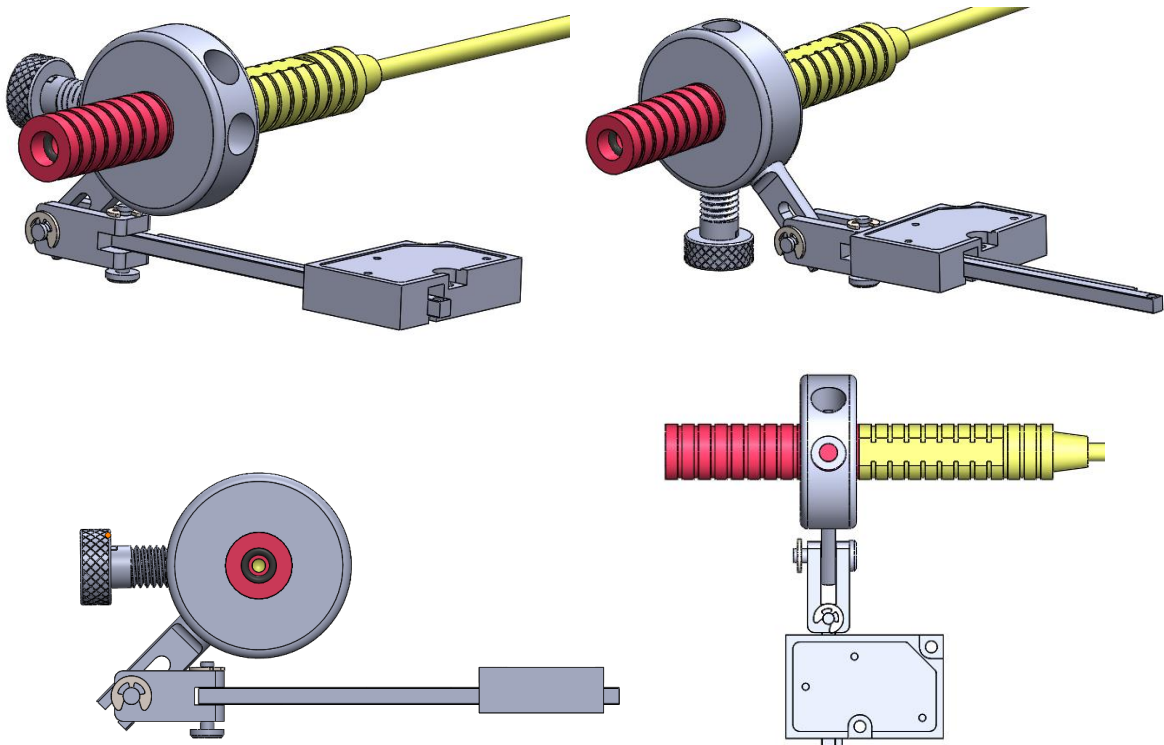
Mechanical properties

	XLA-1												unit	tolerance
rod length	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-100	-120	-140	-160	-200	mm	± 0.1
stator/housing dimensions	22.7 x 14.8 x 5.4 (4.9 without cover)												mm	± 0.1
stroke/ travel range	5	15	25	35	45	55	65	85	105	125	145	185	mm	± 0.1
mass	5.5	5.9	6.3	6.7	7.1	7.5	7.9	8.7	9.5	10.3	11.1	12.7	g	± 5%
holding force	1												N	min.
driving force	1												N	min.
actuator materials	anodised aluminium (housing) stainless steel (rod and housing cover)													
cable type	FPC, 8 core, 0.5 mm pitch with same side contacts													

Slika 100. Tehničke specifikacije odabranog linearnog aktuatora XLA-1 tvrtke Xeryon [55]



Slika 101. Tehnička dokumentacija odabranog linearnog aktuatora XLA-1 tvrtke Xeryon [55]



Slika 102. Sklop sustava za odsijecanje tkiva a) Izometrija u inicijalnoj poziciji b) Izometrija u završnoj poziciji (nakon odsijecanja) c) Pogled srijeda d) Pogled odozgor

5.7. Materijali

Materijali za izradu dijelova konstrukcije vrlo su važan aspekt uzevši u obzir radnu okolinu. Standardna praksa nalaže nekoliko primarnih skupina metala koje treba razmotriti, to su: *inox* čelici, aluminijske slitine i titanske slitine. Titanske slitine izvrstan su odabir kada postoji potreba za relativno lakim materijalom dobrih mehaničkih svojstava. *Inox* čelici dolaze u širokom rasponu varijanti masenih udjela pojedinih elemenata koji mijenjaju karakteristike materijala. Za svrhu medicinskih alata odabiru se čelici poznati kao *sea inox* zbog svoje izvrsne primjenjivosti u visoko agresivnim medijima. Medicinski alati ne nalaze se u tolikom doticaju sa abrazivnim medijima prilikom rada, no podvrgavani su raznim abrazivnim sredstvima za dezinfekciju zbog čega moraju biti otporni kako bi zadržali postojanost i funkcionalnost. Aluminijske legure korištene u medicini također se klasificiraju kao i čelik, one koje podnose agresivne radne uvjete, kao što je more, zadovoljavaju i radne uvjete na području medicine.

Za čelike vrijedi da klasifikacija s oznakom 1.44xx označava materijal koji dobro podnosi morsku okolinu, a kod aluminijskih slitina klasifikacija je definirana oznakom 5xxx ili 6xxx. Iako se i unutar aluminijskih i titanskih slitina mogu pronaći one koje mehaničkim svojstvima zadovoljavaju, s obzirom da će ukupna masa alata i s *inoxom* biti unutar željenih granica, zbog aspekta troškova za nosivu konstrukciju odabire se *inox*. Nosiva konstrukcija jedina je opterećena stvarnim silama, stoga mora zadovoljavati visoke standarde čvrstoće kako bi osigurala krutost sustava, dok je za druge dijelove jedino važna preciznost izrade. S obzirom na proračun nosive konstrukcije u kojem se koristio materijal 1.4313 (X3CrNiMo12-4) čija je vlačna čvrstoća 700 MPa pri odabiru ispravnog materijala treba voditi računa minimalnim mehaničkim karakteristikama. Upravo zbog toga za materijal nosive konstrukcije odabire se *inox* čelik oznake 1.4460 čija se mehanička svojstva mogu vidjeti na slici 103., a za ostatak dijelova konstrukcije materijal izrade bit će aluminijska slitina 6061-T6 čija se mehanička svojstva mogu vidjeti na slici 104. Odabirom čelika 1.4460 povećavaju se vlačna i smična čvrstoća materijala nosive konstrukcije što donosi dodatnu redukciju ukupnog progiba vrha alata. Osim toga, zbog potrebe ostvarivanja dobrih kliznih svojstava za čeljusti prednjeg držača odabire se polimerni materijal pod oznakom PTFE odnosno politetrafluoroetilen također poznat kao teflon. Odabirom PTFEa faktor trenja između sonde i čeljusti bit će 0.04 kako za statički slučaj, tako i za dinamički čime će se vođenje sonde odvijati bez generiranja velike sile trenja, a sukladno time i topline.

Property	Value	Units
Elastic Modulus	200000	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.28	N/A
Shear Modulus	79000	N/mm ²
Mass Density	7800	kg/m ³
Tensile Strength	770	N/mm ²
Compressive Strength		N/mm ²
Yield Strength	610	N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient	1.1e-005	/K

Slika 103. Mehanička svojstva čelika 1.4460 (X3CrNiMoN27-5-2)

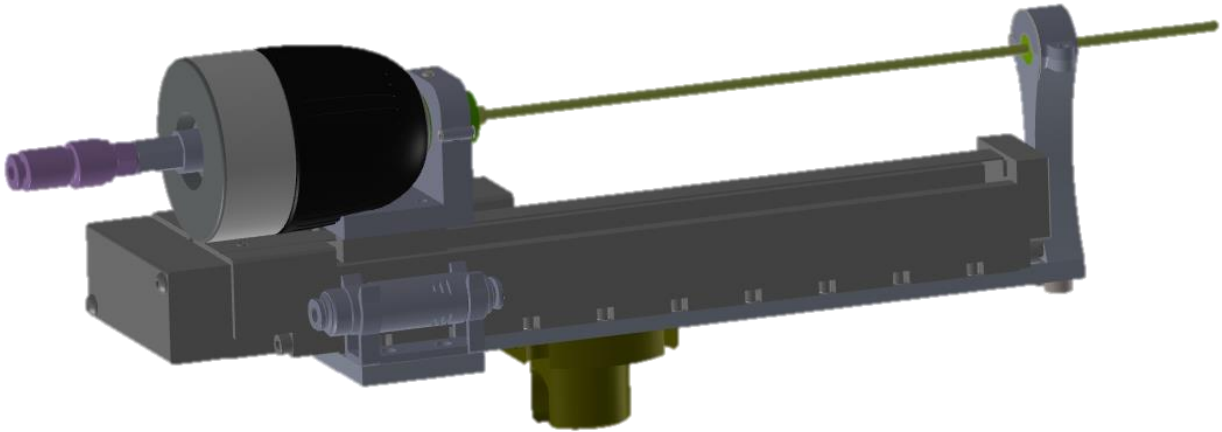
Property	Value	Units
Elastic Modulus	69000.00067	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Tensile Strength	310.0000021	N/mm ²
Yield Strength	275.0000009	N/mm ²
Tangent Modulus		N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient	2.4e-005	/K
Mass Density	2700	kg/m ³
Hardening Factor	0.85	N/A

Slika 104. Mehanička svojstva aluminijske slitine 6061-T6

6. Sklopne varijante kao međukoraci u procesu razvoja konceptualnog rješenja

Četiri razvojna stadija koncepta robotskog alata prikazat će evoluciju robotskog alata za robotsku biopsiju i ispunjavanje svih funkcionalnosti koje alat treba imati. Kroz stadije sklop 3D modela prikazat će se međudnos razvojnih varijanti pojedinih dijelova opisanih u 5. poglavlju.

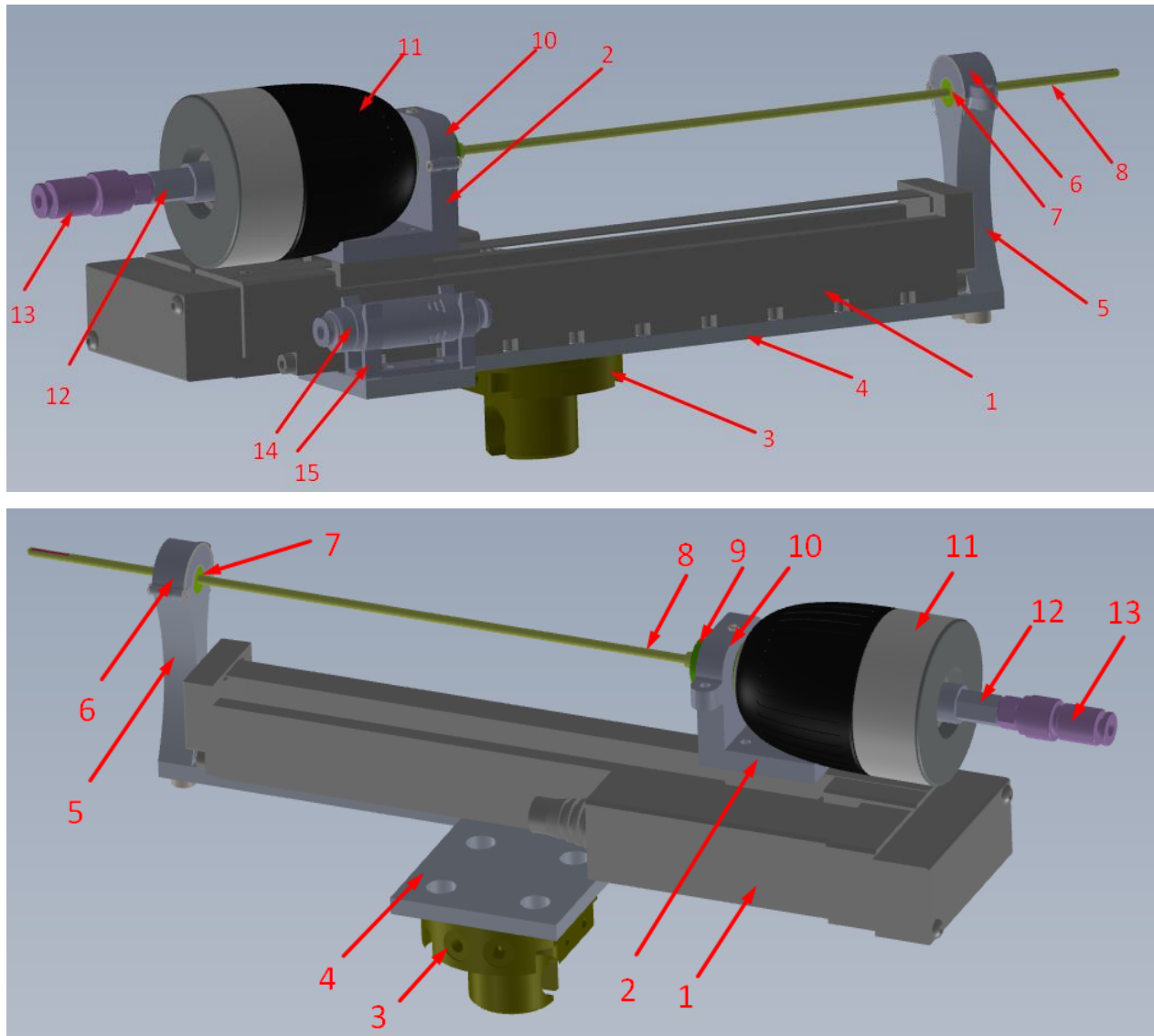
6.1. Prva varijanta koncepta robotskog alata ¹¹



Slika 105. Prva varijanta koncepta robotskog alata

Na slici 105. može se vidjeti izometrijski prikaz prvog modela koji prikazuje konceptualni izgled alata i relativni odnos dijelova. Kao što je već ranije objašnjeno, linearni aktuator centralni je dio alata i kao takav djeluje kao glavni pogon za linearno gibanje. Ispod njega predviđena je pozicija spojnog elementa na robotsku ruku, a na njemu svi ostali dijelovi važni za potpunu funkcionalnost.

¹¹ U narednom poglavlju brojke u zagradama odnosit će se na numerirane dijelove sa slike 106.



Slika 106. Oznake dijelova prve varijante koncepta robotskog alata

Na slici 106. numerički su označeni svi dijelovi te slijede objašnjenja.

1. Linearni aktuator *RCP3-SA2BR-I-20P-4S-150*
2. Radni stol
3. *Schunkova* prirubnica „*hwa 040*“
4. Spojni element prirubnice i aktuatora
5. Vrat prednje čahure
6. Kapa prednje čahure
7. Prednja čahura
8. Vanjska sonda

9. Čahura radnog stola
10. Kapa radnog stola
11. Stezna glava
12. Spojni element stezne glave i vakuumskog ventila
13. Rotacijski vakuumski ventil
14. Vakuumski generator
15. Držač vakuumskog generatora

Glavna funkcionalnost ovog alata jest dovesti bočni zazor seta sonde predefiniranom trajektorijom do željenog dijela moždanog tkiva, vakuumski usisati dio tkiva, potom zakretom unutarnje sonde odsjeći usisano od ostatka tkiva i istom trajektorijom izaći van.

Linearni aktuator (1) zadužen je za pravocrtno vođenje sonde (8) naprijed i nazad po trajektoriji koju je definiralo kirurško osoblje metodama minimalno invazivnog puta prema CT snimkama. Aktuator morao se moći pričvrstiti na *Schunkovu* prirubnicu (3) robotske ruke, stoga je u alatu kao vezivni element stavljen alatni par *Schunkove* prirubnice. Između aktuatora i prirubnice nalazi se spojni element (4) nestandardnog oblika koji omogućava s jedne strane spoj na prirubnicu, a s druge na aktuator prema predefiniranim rupama za vijke. Na kraju spojnog elementa nalazi se vrat prednje čahure (5) koji je također spojen vijcima s donje strane, a čija je visina definirana pozicijom stezne glave (11). Iznad vrata prednje čahure nalazi se kapa (6) koja, s jedne strane omogućava rotaciju oko zajedničke osi vrata i kape, a s druge mogućnost vezanja ta dva elementa vijčanim putem ili kopčom. Kapa postoji kako bi se mogla izmijeniti čahura (7) koja služi kao klizni element za vođenje sonde netom prije ulaska u područje lubanje, a svoju poziciju drži opisanim trokutnim elementom. Čahura postoji zbog omogućavanja klizanja s malim trenjem te jednostavne zamjene za sonde većeg promjera, odnosno kako bi mu se povećala univerzalnost uporabe. Na drugom kraju sonde stoji radni stol (2) koji je preko klizača vezan na kuglično navojno vreteno linearnog aktuatora i koristi isti princip prihvata sonde kao i prednji vrat čahure. Čahura (9) na stražnjem dijelu izgleda drugačije zbog većeg promjera stražnjeg dijela sonde. Pozicija čahure u odnosu na kapu radnog stola (10) definirana je vijkom M3 pod normom DIN 913. Istim principom definirana je i pozicija vanjske sonde u odnosu na čahuru.

Do sada opisanim elementima moguće je ostvariti linearni pomak sonde intrakranijalno. Kao što je opisano, slijedno dolazi potreban usis tkiva. Kako bi ostvarili vakuumsko djelovanje unutar sonde potrebno je napraviti brtvljeni spoj sa stražnjim krajem unutarnje sonde. Takav spoj ostvario

se posebno konstruiranim dijelom koji na svom prednjem kraju ima predviđeni ulaz u unutarnju sondu čiji je spoj zabrtvljen gumicom na vanjskom obodu spojnog elementa. Dalje, na vanjskom obodu elementa nalazi se urezani navoj za spajanje stezne glave, a na samom kraju urezan je unutarnji navoj kako bi se mogao pričvrstiti rotacijski vakuumski ventil. Odabran je specifični vakuumski ventil koji omogućava rotaciju elemenata na koje se veže kako bi omogućio zakret sonde bez uvijanja vakuumskog crijeva s druge strane. Na ventil je spojena vakuumska cjevčica koja vodi do vakuumskog generatora ili vakuumske pumpice pričvršćene na spojni element aktuatora i prirubnice. Ukoliko je riječ o vakuumskom generatoru, tada je na njega još spojen dovod stlačenog zraka, a ukoliko je riječ o vakuumskoj pumpici, tada od nje slijede kablovi za dovod električne energije. Opisanim elementima moguće je provesti usis tkiva u unutarnju sondu.

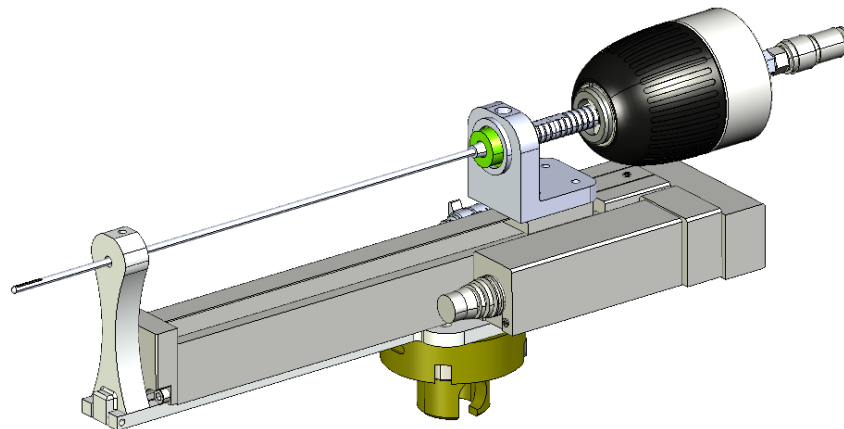
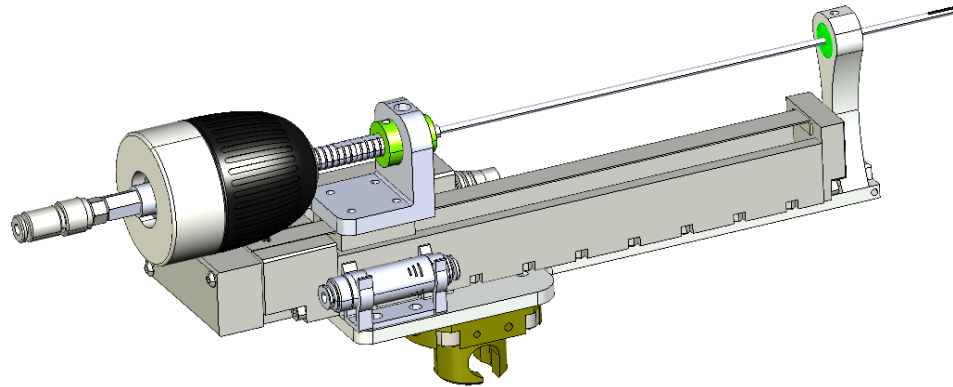
Nakon usisa potrebno je odrezati vezu tkiva principom giljotine tako da se unutarnja sonda zakrene dok vanjska miruje. Steznom glavom osigurao bi se prihvat na stražnji kraj unutarnje sonde nakon čega je zamišljeno da se djelovanjem momenta prvo počnu skupljati prsti stezne glave koji, kada dođu u zahvat sa sondom, kreću prenositi moment i zakretati sondu do željenog kuta. Način unos momenta zakreta, odnosno elektromotor i prijenos momenta, stezne glave i sonde nije razrađen. Gibanjem aktuatora unazad završile bi se sve potrebne radnje.

Nakon razmatranja svih rješenja unutar ovoga alata zaključeno je koja rješenja treba doraditi, a koja promijeniti, stoga slijedi drugi razvojni 3D model.

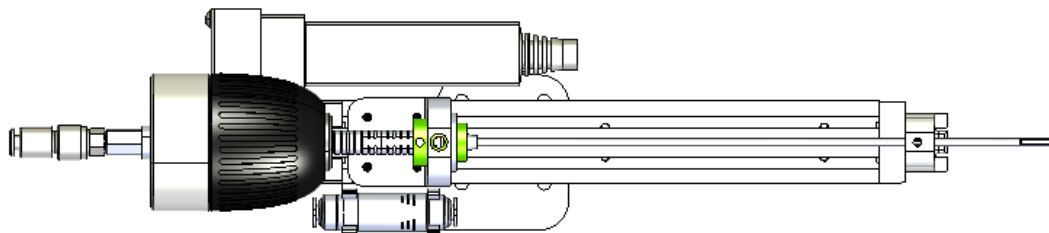
6.2. Druga varijanta koncepta robotskog alata

Problemi prve varijante koncepta alata:

- Vezni element linearnog aktuatora i prirubnice nije valjanog izgleda i ne postoje dosjedni elementi za prihvat i pozicioniranje prirubnice.
- Prihvat obje čahure treba pojednostaviti pazeći da se smanjuje vrijeme rukovanja s obzirom na to da je predviđena jednostavna zamjena i montiranje.
- Omogućiti horizontalno gibanje vrata čahure kako bi se mogla provesti kalibracija prije svake operacije.
- Osmisliti sustav za spajanje stezne glave montirane na vakuumsku spojku i vakuumski ventil sa sondom na način jednostavnog rukovanja.



Slika 107. Druga varijanta koncepta robotskog alata



Slika 108. Druga varijanta koncepta robotskog alata – tlocrt

Na slikama 107. i 108. može se vidjeti drugi razvojni 3D model projektiranog alata s poboljšanjima koja rješavaju probleme prvog razvojnog modela. Konceptualna rješenja problema ostala su ista, ali je funkcionalnost pojedinih elemenata bolja.

Linearni aktuator ostao je isti, kao i *Schunkova* prirubnica, ali se njihov spojni element promijenio. Na spojevima su dodani zatici koji će s toleriranim provrtima osigurati pravilno vođenje u postupku montaže. Osim što zatici preciznom izradom uvjetuju okomito nasjedanje, svojim rasporedom i promjerom uvjetuju jedinstveno spajanje elemenata. Tako na primjer za prirubnicu na spojnom

elementu postoje središnji veći zatik i manji ekscentrični zatik zbog kojeg se definirao jedinstven prihvat prirubnice.

Vrat prednje čahure promijenjen je u pogledu montiranja i prihvata klizne čahure. Smanjila se konstrukcijska kompleksnost kod prihvata prednje i stražnje čahure eliminacijom prednje i stražnje kape. Montiranje prednjeg vrata ovdje je zamišljeno s dosljednim vijkom koji bi omogućavao horizontalnu kalibraciju.

Opisanim promjenama na drugom razvojnom modelu riješena su prva četiri nedostatka prvog razvojnog modela. Zadnji problem zamišljeno je riješiti pomoću jednostavnih linearnih vodilica na kojima bi stajao cijeli sklop stezne glave sa spojnim vakuumskim elementom i vakuumskim ventilom namješten tako da se ručnim pomakom do graničnika spojni element s vrhom, gdje se nalazi brtva, dovede unutar sonde. S bočne strane linearne vodilice bila bi kočnica kojom bi se željena pozicija mogla zaključati. Ovo rješenje nije prikazano u modelu.

Zbog promjene pristupa vođenja i prihvata sonde stražnjeg i prednjeg uležištenja odbacila se ideja unosa zakretnog momenta putem stezne glave zbog nezgrapnosti i kompleksnosti zbog čega rješenje konstruktivno nije dovedeno do kraja. Prednosti drugog pristupa integriranog u treću razvojnu generaciju nametnule su se kao bolje rješenje u usporedbi s prve dvije varijante.

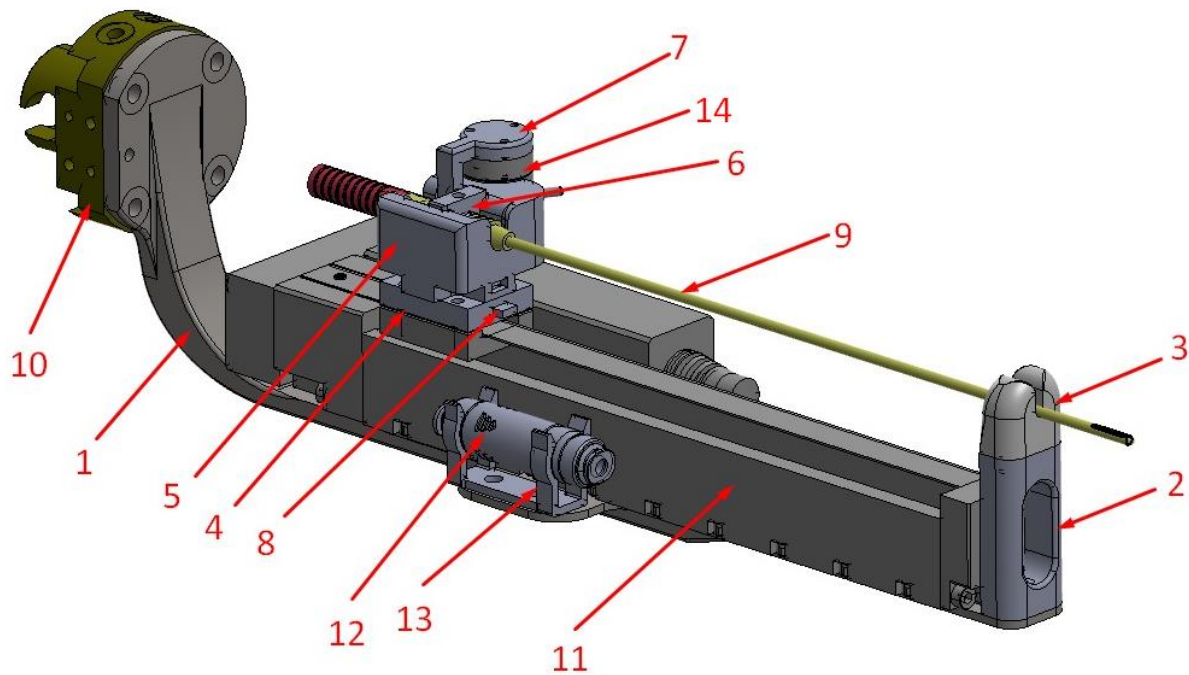
6.3. Treća varijanta koncepta robotskog alata ¹²

Treća varijanta koncepta robotskog alata konstrukcijski je puno složenija, evolucijski je znatno naprednija od prethodne varijante jer prikazuje gotovo sva rješenja funkcionalnih zahtjeva alata. Mogu se uočiti verzije treće iteracije razvoja pojedinih dijelova alata iz poglavlja 5. i njihov međusobni odnos u cijelome sklopu.

Problemi druge varijante koncepta robotskog alata bili su:

- Nemogućnost mjerenja sile
- Nepovoljna pozicija prihvata alata
- Kompleksan sustav vezanja prednjeg vrata alata
- Nerazrađen sustav pogona za odsijecanje tkiva i korištenje nezgrapne stezne glave
- Umetanje sonde utiskivanjem straga

¹² U narednom poglavlju brojke u zagradama odnosit će se na numerirane dijelove sa slike 109.



Slika 109. Treća varijanta koncepta robotskog alata

1. Spojna ploča linearnog aktuatora
2. Prednji vrat alata
3. Magnetni klizač
4. Podnožje nosivog stola
5. Nosivi stol
6. Kvadratni prsten sonde
7. Spojni element senzora sile
8. Potisnik
9. Sonda
10. Schunkova prirubnica „hwa 040“
11. Linearni aktuator *RCP3-SA2BR-I-20P-4S-150*
12. Vakuum generator *VUH05-44A*
13. Držać vakuumskog generatora
14. Senzor sile *Nano 17*

Glavna razlika treće varijante u usporedbi s prethodnom mjesto je i način vezanja prirubnice. Prirubnica (10) je sada izmještena da svojom osi leži na osi pružanja sonde kako bi se upravljanje alatom olakšalo te kako bi se omogućila povoljna konfiguracija robotskog lakta. Elementi sustava

spajani su preko vodećih zatika i pripadajućih toleriranih provrta. Vrat (2) alata koji osigurava nošenje klizača i vođenje sonde više nema mogućnost horizontalnog pomaka jer se vrat oblikom spaja na spojnu ploču (1) čime mu je osigurana pravilna pozicija. Magnetni klizač (3) polimerni je element u funkciji kliznog ležaja koji osigurava držanje sonde i vođenje s malim trenjem. Podnožje stola (4) služi kao međuelement za spajanje nosivog stola konstruiran zbog lakše montaže. Podnožje stola vijcima se steže na klizač linearnog aktuatora (11) i svojim oblikom i mehanizmom s opružnim potisnikom omogućava jednostavno nasjedanje nosivog stola (5). Nosivi stol omogućava nošenje sonde i montažu senzora sile te svojim oblikom omogućava usjedanje kvadratnog prstena (6) i elementa senzora sile (7). Senzor sile montiran na nosivi stol pomoću pripadajućeg elementa i kvadratnog prstena koji se veže za sondu (9) pomoću vijka M3 omogućava mjerenje sile u smjeru pružanja osi sonde. Linearni aktuator omogućava glavno gibanje alata u smjeru pružanja osi sonde, montiran je na spojnu ploču a na sebi nosi sklop stražnjeg držača. Na spojnoj ploči još se nalazi držač vakuumske generatora (13) koji u ovoj varijanti ima prikazani VUH05-44A vakuum generator (12).

Ovako prikazani koncept ispunjava gotovo sve funkcionalne zadatke alata. U modelu nije prikazana vakuum cjevčica zbog slobodne geometrije i fleksibilnosti. Ukoliko bi se odsijecanje tkiva ostavilo na zadatak kirurgu, alat bi mogao zadovoljiti minimalne zahtjeve. Kritičkim pristupom ustanovile su se točke mogućih poboljšanja koja se donose u sljedećoj varijanti alata.

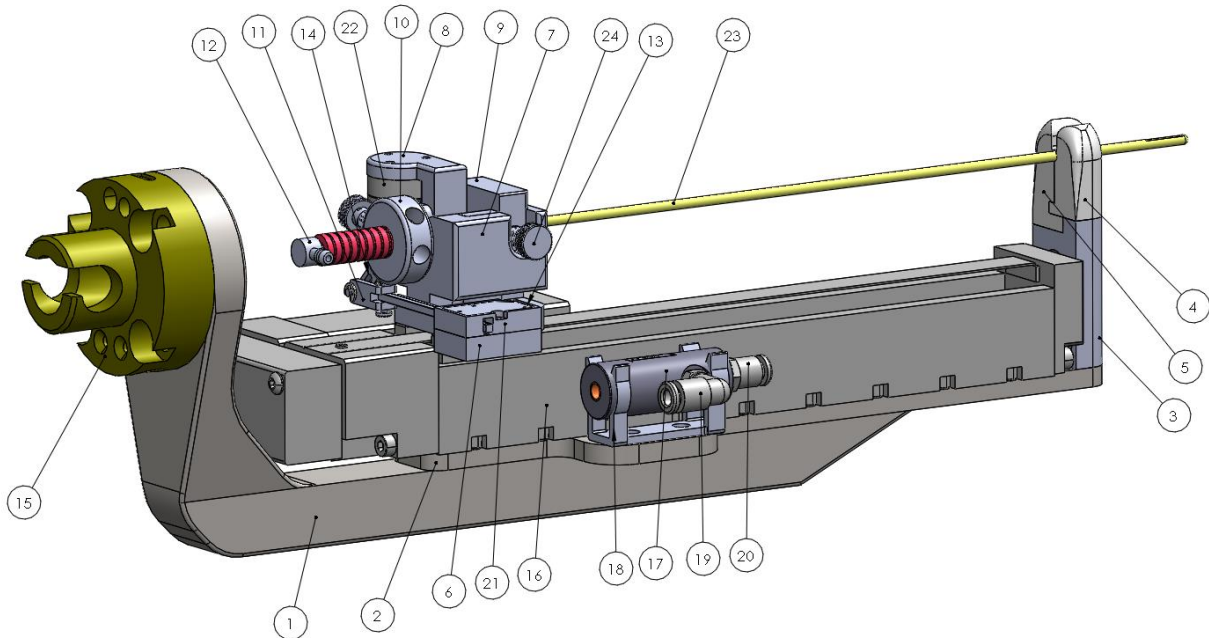
6.4. Četvrta varijanta koncepta robotskog alata

Četvrta varijanta koncepta robotskog alata, ujedno i zadnja, objedinjava sva rješenja specifičnih problematika i omogućava ovom robotskom alatu sve tražene funkcionalnosti. Kao i u prethodnim koracima, i ovdje su prikazana rješenja zadnjih iteracija razvoja iz 5. poglavlja zajedno sa svim odabranim standardnim dijelovima koji se mogu nabaviti na tržištu.

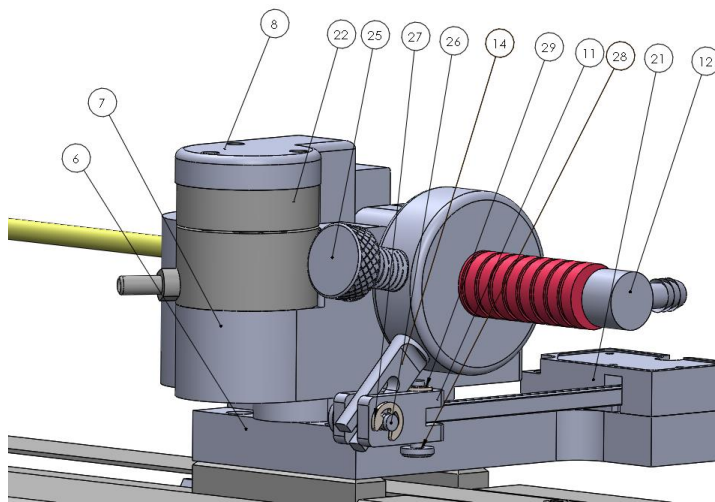
Iako naizgled kompletna, treća iteracija koncepta robotskog alata imala je svoje nedostatke i probleme.

- Prednje uležištenje magnetnim silama ne osigurava silu držanja sonde i konstrukcijski je zahtjevno zbog potrebe za konstrukcijom i ugradnjom elektromagneta.
- Vakuum generator odabran za treću iteraciju ne zadovoljava radnim temperaturnim rasponom, a potrebni sustav za ostvarenje vakuuma nema jasno određene elemente.

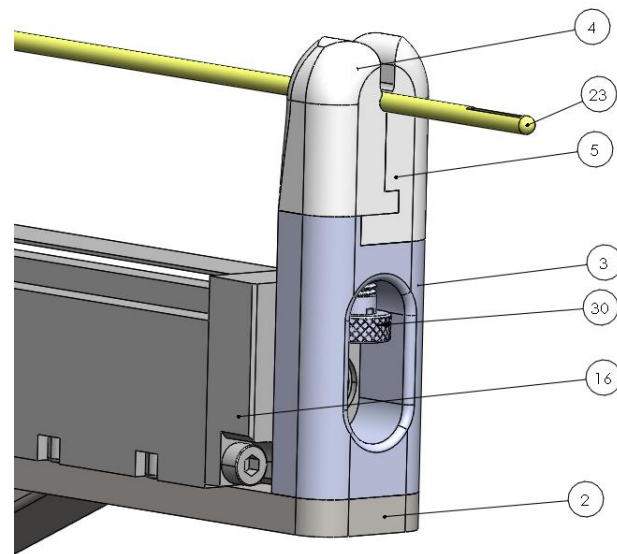
- Odsijecanje tkiva u trećoj iteraciji prepušteno je kirurgu, odnosno nije automatizirano.
- Način spajanja dijelova za mjerenje sile relativno je kompleksan i zahtijevao bi delikatno rukovanje.
- Glavna nosiva konstrukcija zamišljena je iz jednog komada koji bi bilo teško izraditi.
- Vrat nosive konstrukcije nije optimiziran geometrijski ni dimenzijski.
- Potisnik za držanje nosivog stola i prostor za njezino umetanje nisu detaljno konstruirani.



Slika 110. Četvrta varijanta koncepta robotskog alata



Slika 111. Detaljni prikaz stražnjeg uležištenja sa sustavom za odsijecanje tkiva četvrte iteracije koncepta robotskog alata



Slika 112. Detaljni prikaz prednjeg uležištenja četvrte iteracije koncepta robotskog alata

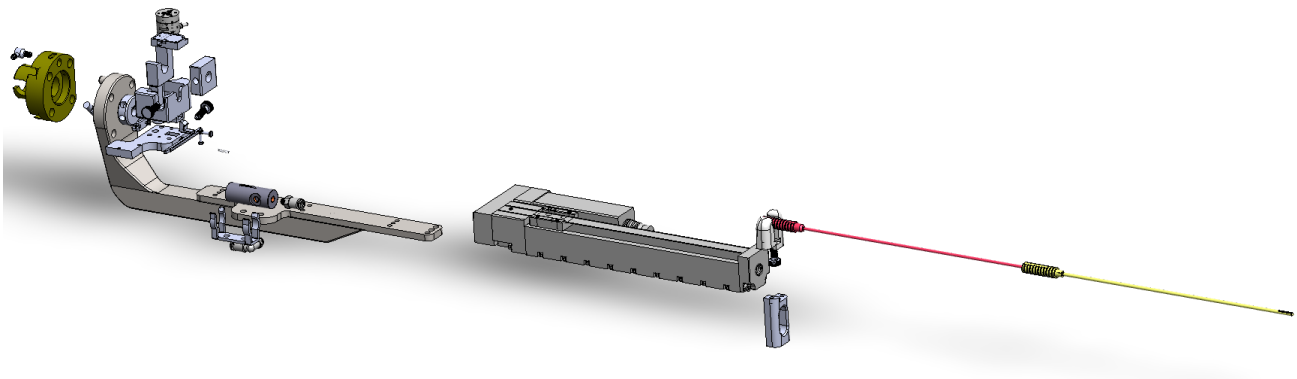
1. Vrat spojne ploče
2. Spojna ploča
3. Vrat prednjeg držača
4. Klizna čeljust prednjeg držača
5. Fiksna čeljust prednjeg držača
6. Podnožje nosivog stola
7. Nosivi stol
8. Spojni element senzora sile
9. Kvadratni prsten sonde
10. Kružni prsten sonde
11. Dvostruki koljenasti zglob
12. Vakuum konektor sonde i cjevčice
13. Potisnik
14. Spojni element kružnog prstena
15. Schunkova prirubnica hwa040
16. Linearni aktuator RCP3-SA2BR-I-20P-4S-150
17. Vakuum generator JS-40UM
18. Držač vakuum generatora
19. Koljenasti vakuum konektor 7880T432

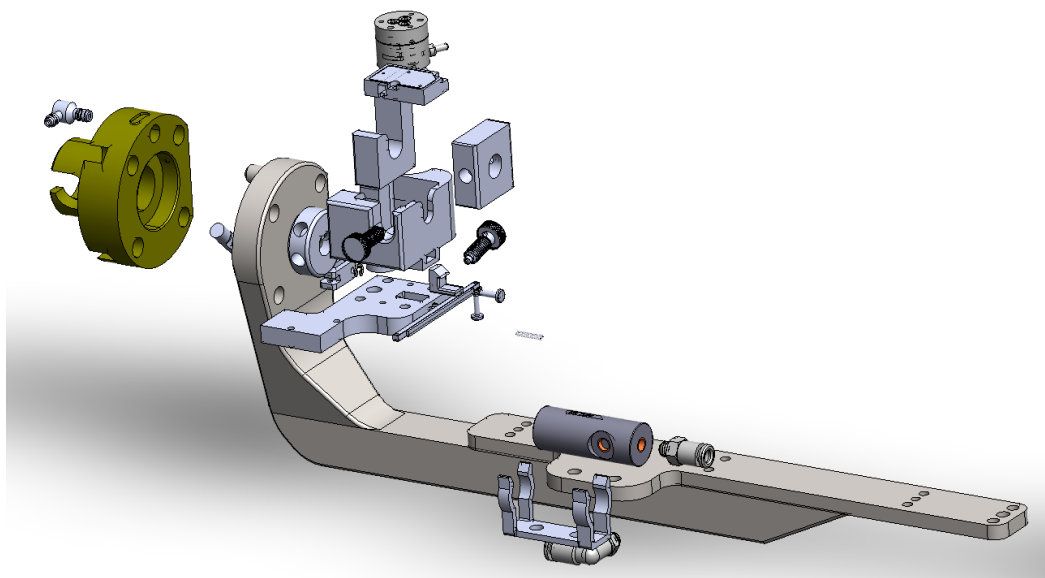
20. Ravni vakuum konektor 7880T368
21. Pomoćni linearni aktuator XLA-1
22. Senzor sile NANO 17
23. Sonda
24. Opružni klip kvadratnog prstena s obrađenim vrhom
25. Opružni klip kružnog prstena s obrađenim vrhom
26. Svornjak DIN 1436 ϕ 2 mm
27. Uskočnik DIN 6799 ϕ 2 mm
28. Svornjak DIN 1436 ϕ 1.6 mm
29. Uskočnik DIN 6799 ϕ 1.6 mm
30. Opružni klip prednjeg vrata s koničnim vrhom
31. Tlačna opruga potisnika

Slike od 110. do 112. prikazuju zadnju konstrukcijsku izvedbu robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga. Ovakvim konstrukcijskim rješenjem zadovoljene su sve željene funkcionalnosti robotskog alata te unaprijeđene sve problematike njegovog razvoja. U analizi funkcionalnosti robotskog alata opisan je potreban slijed događanja radnji koje alat treba ispuniti kako bi obavio sve željene zadaće. Dakle, robotski je alat sposoban prihvatiti sondu uz minimalnu prethodnu pripremu koja je svedena na umetanje dva prstena na sondu pomoću jednostavnih opružnih klipova koji se laganim povlačenjem glave mogu odspojiti te pomaknuti ili skinuti. Tako pripremljena sonda umeće se u alat geometrijski vođena pravilno pozicioniranim prstenima i spaja se na vakuumski sustav utiskanjem vakuum konektora u stražnji izlaz unutarnje sonde. Prilikom umetanja sonde na poziciju koljenasti zglobovi potrebno je, putem linearnog aktuatora za odsijecanje, postaviti ispod igle kako bi se umetanje spojnog elementa prstena u koljenasti zglobovi olakšalo. Desni se klizač prednjeg uležištenja, potom, utiskuje na svoju poziciju i alat je spreman za uporabu. Prstenovi sonde konstruirani su da osiguravaju dvije konfiguracije postavljanja sonde u kojoj jedna osigurava bočni utor prednjeg dijela sonde na gornjoj strani, a druga osigurava bočni utor sonde na donjoj strani. Osoblje zaduženo za pripremu robota mora voditi računa o željenoj konfiguraciji sonde i time prilagoditi konfiguraciju elemenata spojenih na prstenove kako bi se osiguralo pravilo usjedanje. Konfiguraciju sonde odabrat će kirurg u pripremi operativnog zahvata prilikom planiranja trajektorije operacije i načina prilaska tumorskom tkivu. Dođe li do potrebe pozicioniranja utora pod određenim kutom u odnosu na vertikalnu ravninu, zakret će se moći ostvariti zakretanjem zadnjeg zgloba robotske ruke.

Pravilno pozicionirana i spojena sonda spremna je za uporabu. Uz pripremljen operativni zahvat preko upravljačke jedinice glavni linearni aktuator pomiče svoj klizni stol na koji su preko veznog elementa spojeni nosivi stol sa senzorom sile i sustav za odsijecanje tkiva. Sonda vođena elementima stražnjeg uležištenja putuje naprijed uz nadzor senzora sile koji upozorava na silu probijanja i moguće zapreke, a dolaskom do željene pozicije korištenjem vakuum generatora stvara se podtlak unutar sonde koji uvlači bioptat u prostor sonde. Prestankom djelovanja podtlaka dolazi do korištenja pomoćnog linearnog aktuatora koji svojim pomakom preko spojnog elementa s dvostrukim koljenastim zglobovima, svornjaka i spojnog elementa kružnog prstena sonde, zakreće unutarnju sondu što dovodi do odsijecanja tkiva bridovima utora sonde. Odsijecanjem tkiva nema opasnosti za povlačenjem te se sonda ponovnom kretnjom glavnog linearnog aktuatora može izvući izvan intrakranijalnog prostora.

Na slikama od 110. do 112. vide se svi relevantni dijelovi i njihovi međusobni odnosi. Spojevi su, kako je u prethodnim poglavljima opisano, ostvareni preko standardnih zatika pod normom DIN 7979 za osiguranje točnosti pozicioniranja. Dimenzije zatika uvjetovane su nazivnim mjerama provrta, pojavljuju se zatici promjera 2, 3, 4 i 5 mm različitih duljina svi u tolerancijskom polju h8. Svi zatici po normi se izrađuju od tvrdih materijala kako se prilikom uprešavanja ne bi deformirali. Na svim spojevima gdje su potrebni vijci koriste se imbus vijci metričkog navoja pod normom DIN 912. Svi potrebni vijci dolaze u dimenzijama M3 i M4 različitih duljina ovisno o spoju.





Slika 113. Razvijeni pogled na četvrtu varijantu koncepta robotskog alata a) Cijeli sklop b) Nosiva konstrukcija i stražnje uležištenje sa sustavima za vakuum i odsijecanje tkiva

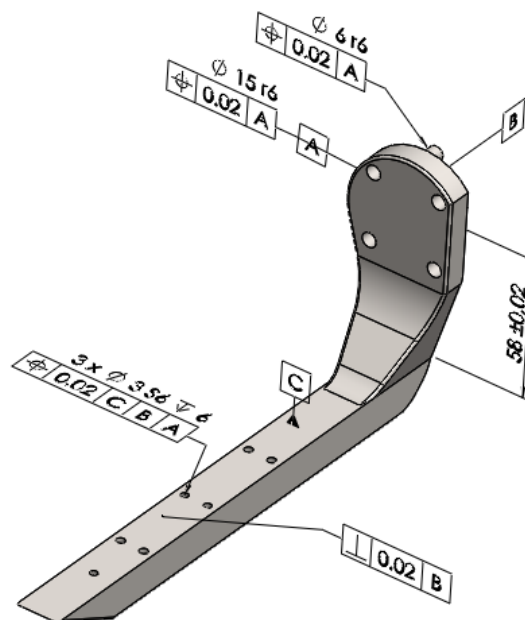
7. Analiza rješenja

7.1. Tolerancijska analiza četvrte varijante sklopa

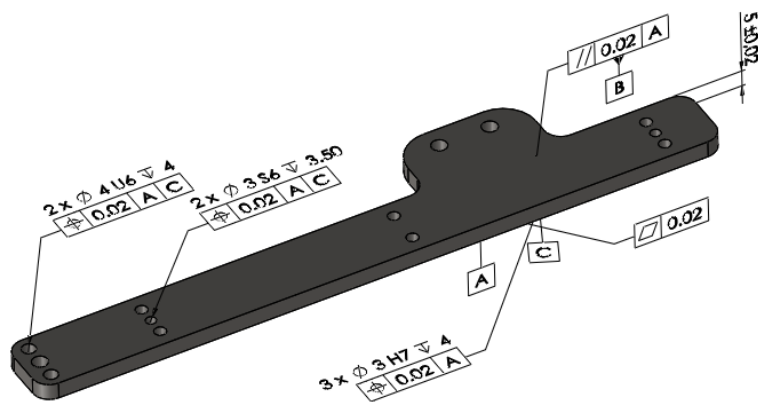
Kako bi se utvrdila preciznost pozicioniranja vrha alata izradila se tolerancijska analiza sa simulacijskim paketom *TolAnalyst* unutar računalnog programa *SolidWorks*. Ovakav oblik tolerancijske analize predstavlja *stack-up tolerance analysis*, odnosno analizu taloženja greški tolerancijskog polja. Kod složenih sklopova kao što je ovaj, vrlo je bitno utvrditi točnost i preciznost krajnje željene mjere zbog utvrđivanja preciznosti alata, a potom i zbog potrebnih dimenzijskih i geometrijskih tolerancija o kojima je prilikom izrade potrebno voditi računa.

Unutar analize pretpostavilo se da je sonda idealno ravna s obzirom na to da podaci o stvarnoj ravnosti nisu dostupni. U stvarnim uvjetima ravnost sonde trebala bi se eksperimentalno provjeriti prije uporabe kako bi se potencijalni odmak mogao uračunati u točnost pozicioniranja. Ostalim dijelovima pridijeljene su tolerancije potrebne za definiranje vodećih površina, geometrija i provrta kao što je vidljivo na sljedećim slikama. Za postavljanje tolerancija koristili su se naputci iz [57], [58] i [59].

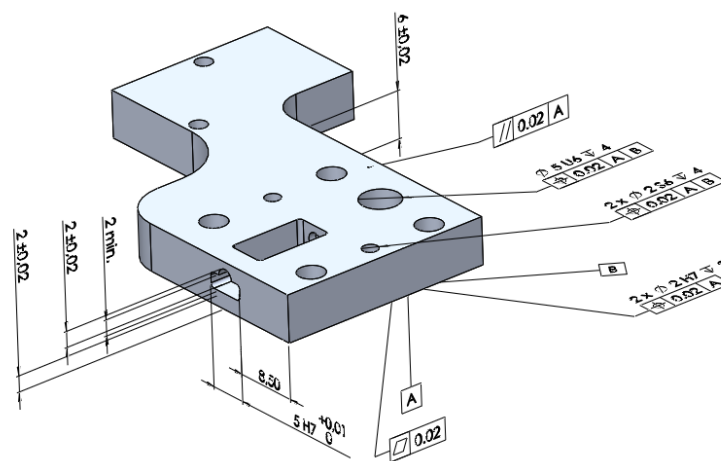
Analizom se željelo pokazati može li se univerzalnom tolerancijom postići zadovoljavajući maksimalni odmak vrha sonde pri radnim uvjetima kada je sonda pozicionirana intrakranijalno na dubini od 120 mm.



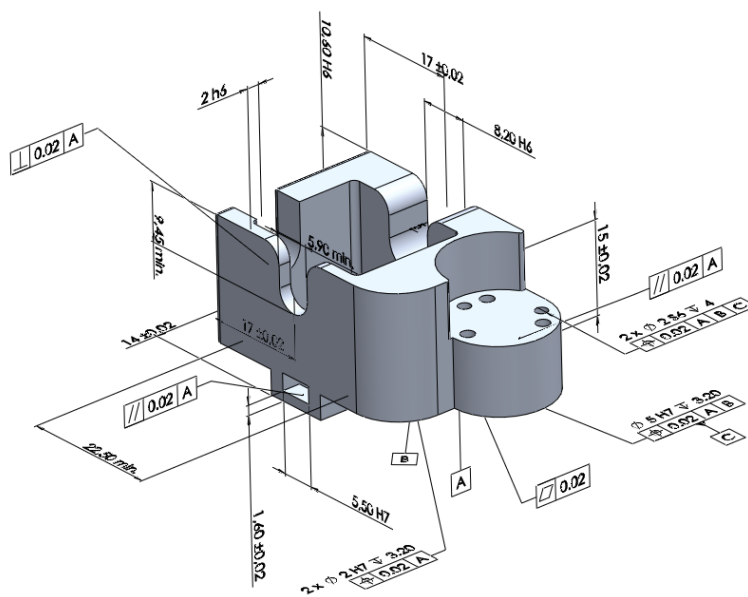
Slika 114. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Vrata spojne ploče



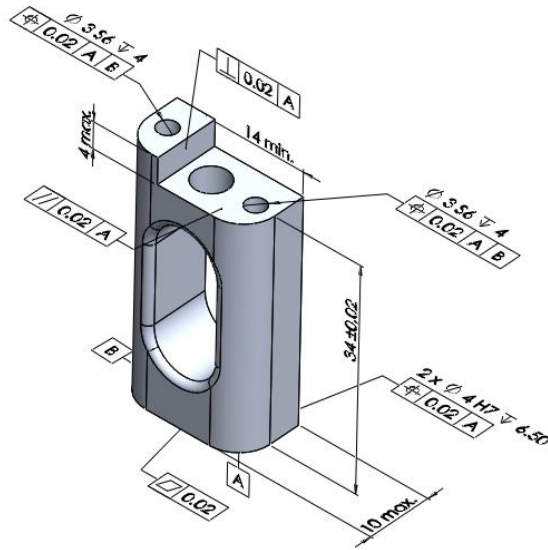
Slika 115. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Spojne ploče



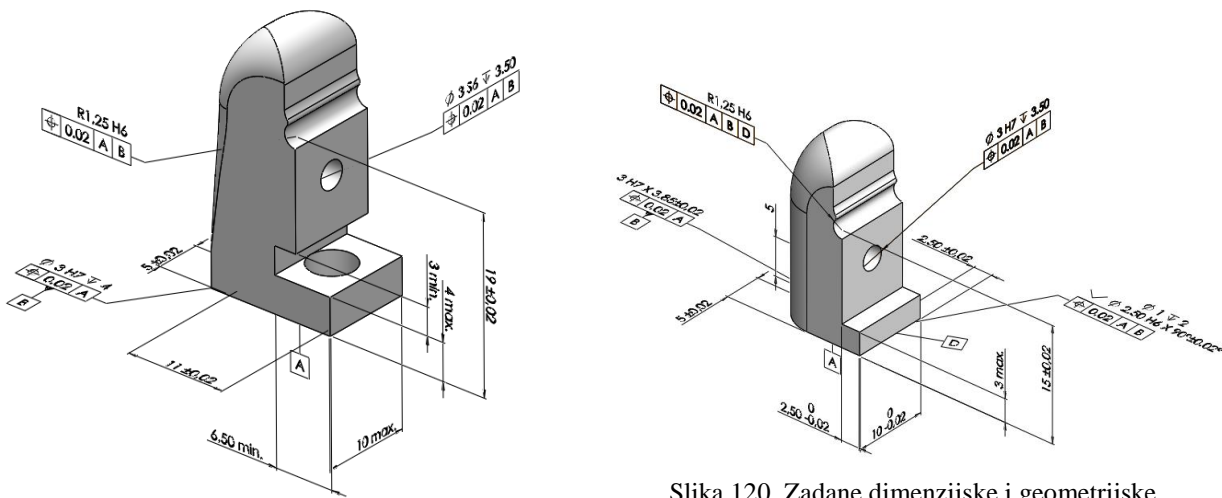
Slika 116. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Podnožja nosivog stola



Slika 117. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Nosivog stola

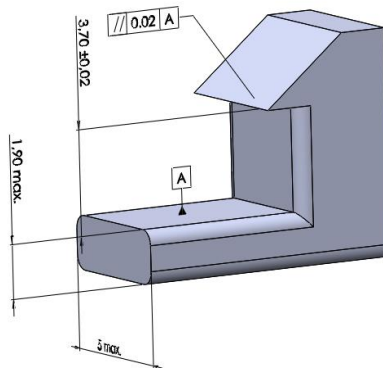


Slika 118. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Vrata prednjeg držača

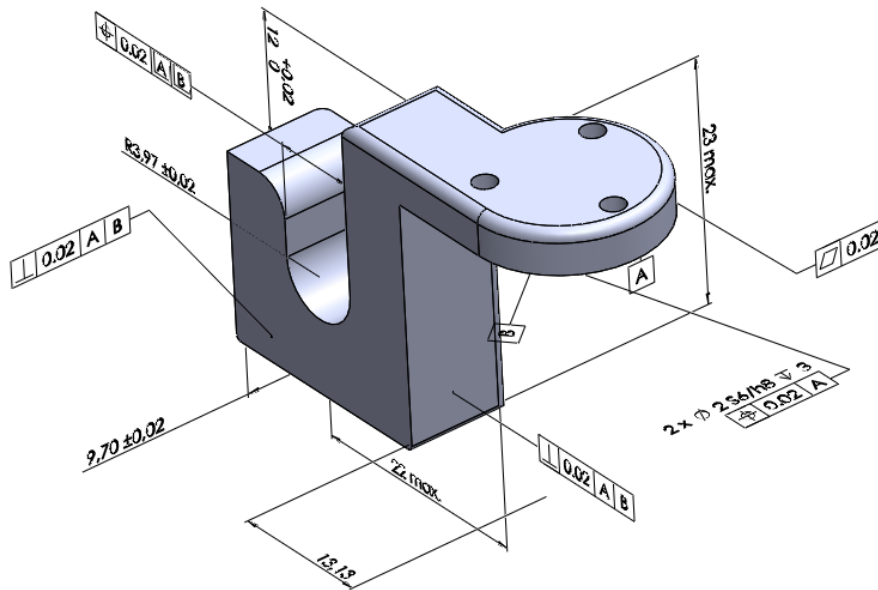


Slika 119. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Fiksne čeljusti klizača prednjeg uležištenja

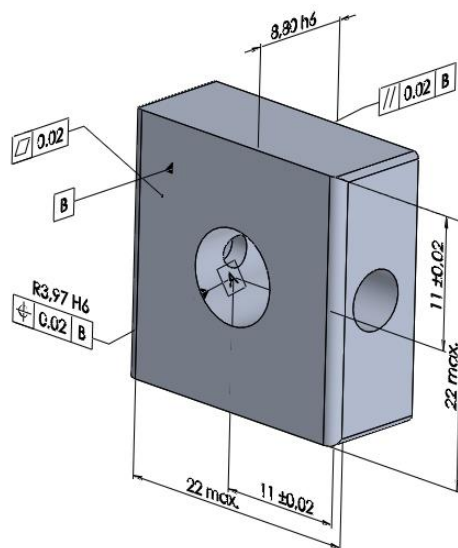
Slika 120. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Klizne čeljusti klizača prednjeg uležištenja



Slika 121. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Potisnika



Slika 122. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Spojnog elementa senzora

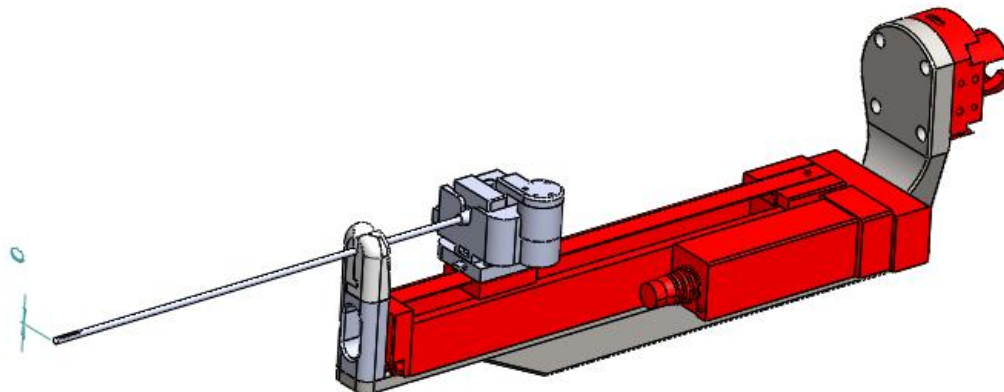


Slika 123. Zadane dimenzijske i geometrijske tolerancije Kvadratnog prstena sonde

U sklop analize uvršteni su samo dijelovi koji svojom geometrijom utječu na vođenje i pozicioniranje sonde kao što je prikazano na slici 124. Svi spojevi sa zaticima tolerirani su u polju kvalitete IT6 ili IT7, tako da je provrt s kojim se stvara čvrsti dosjed s zaticom toleriran s poljem S6 za promjere $\phi 1$, $\phi 2$ i $\phi 3$ i s poljem U6 za provrte $\phi 4$ i $\phi 5$. Provrti s druge strane, gdje elementi nasjedaju na uprešani zatic, tolerirani su poljem H7 za sve promjere ($\phi 1$, $\phi 2$, $\phi 3$, $\phi 4$ i $\phi 5$). Svi zatici dolaze tolerirani s poljem h8 i tako se u sklopnom modelu mogu naći sljedeći dosjedi:

Tablica 12. ISO tolerancija dosjeda

ISO TOLERANCIJE		ISO TOLERANCIJE DOSJEDA	
φ2S6	-0.014	φ2S6/h8	0.0
	-0.020		-0.020
φ3S6	-0.014	φ3S6/h8	0.0
	-0.020		-0.020
φ4U6	-0.020	φ4U6/h8	-0.002
	-0.028		-0.028
φ5U6	-0.020	φ5U6/h8	-0.002
	-0.028		-0.028
φ2H7	+0.010	φ2H7/h8	+0.024
	0.0		0.0
φ3H7	+0.010	φ3H7/h8	+0.024
	0.0		0.0
φ4H7	+0.012	φ4H7/h8	+0.030
	0.0		0.0
φ5H7	+0.012	φ5H7/h8	+0.030
	0.0		0.0
φ2h8	0.0	φ6H7/r6	+0.023
	-0.014		+0.003
φ3h8	0.0	φ15H7/r6	+0.034
	-0.014		+0.005
φ4h8	0.0		
	-0.018		
φ5h8	0.0		
	-0.018		

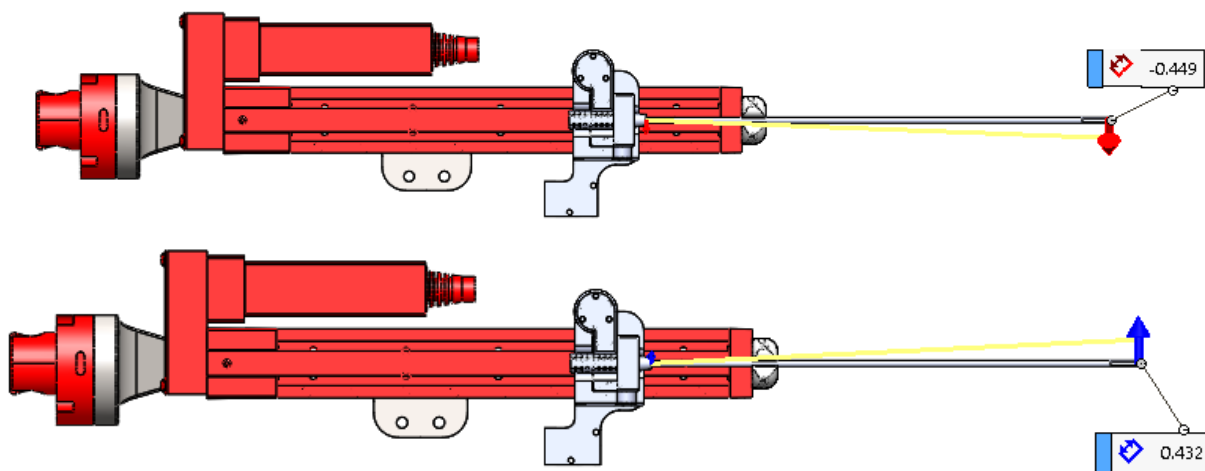


Slika 124. Prikaz elemenata sklopa četvrte varijante alata koji svojom geometrijom utječu na vođenje i pozicioniranje vrha sonde

Postavljanje tolerancijske analize unutar *TolAnalyst* simulacijskog alata počinje od definiranja željene mjerne vrijednosti. Za ovaj primjer konstruirana je geometrijska točka unutar modela sonde koja je vezana za najudaljeniji dio polusfere vrha sonde, a za drugu mjernu referencu na istom mjestu konstruirana je prostorna točka vezana za prirubnicu alata i ona će služiti kao referentna oznaka za mjeru najvećeg i najmanjeg pomaka. Nadalje definira se redoslijed slaganja elemenata sustava kako će biti i u stvarnosti počevši od *Schunkove* prirubnice pa sve do sonde koja predstavlja zadnji element sustava. Kao završni korak ostaje definicija odnosa pojedinih dijelova i relevantnih veza. Alat sam nudi moguća ograničenja uvjetovana postavljenim kotama i tolerancijama iz *DimExpert* alata *SolidWorksa* zbog čega je vrlo važno početne uvjete i tolerancije postaviti pravilno kako bi unutar analize mogli spojiti odgovarajuće relacije. Po završetku definiranja odnosa elemenata sustava simuliraju se minimalni i maksimalni uvjeti tolerancijskih polja koji isporučuju minimalni (*Min*) i maksimalni (*Max*) pomak te *RSS Min* i *RSS Max* koji predstavljaju *Root Sum Squared* (kvadratni korijen zbroja kvadrata odnosno *Gaussov* zakon propagacije pogrešaka) metodu tolerancijske analize koji ukazuje na statistički najočekivanije rezultate.

Simulacija nije u mogućnosti prostorno opisati sve točke po kojima se vrh alata može gibati, stoga rezultati dolaze kao prikazani mogući pomaci u smjeru apscise, ordinate i aplikate.

Rezultati tolerancijske analize s pretpostavljenim kliznim dosjedim spojevima s zatikom u smjeru apscise donose pomak s minimalnom granicom od -0.449 mm i maksimalnom od 0.432, sa statističkim najizglednijom granicom za minimum od -0.095 mm i maksimum od 0.091 mm.

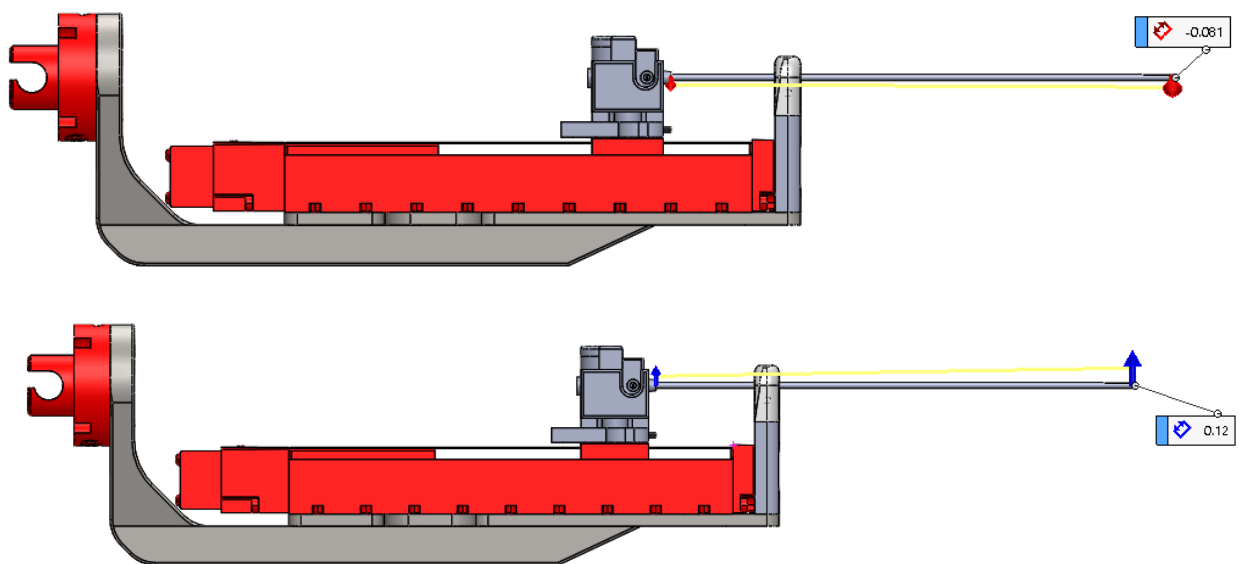


Slika 125. Minimalni i maksimalni pomak vrha alata u smjeru apscise tolerancijske analize s linearnim pomakom od 120 mm

	Min:	-0.449
	Max:	0.432
	RSS Min:	-0.095
	RSS Max:	0.091

Slika 126. Rezultati tolerancijske analize za pomak u smjeru apscise

Rezultati tolerancijske analize s pretpostavljenim kliznim dosjedim spojevima sa zatikom u smjeru ordinate donose pomak s minimalnom granicom od -0.081 mm i maksimalnom granicom od 0.12, sa statističkim najizglednijim granicama od -0.049 mm do 0.073 mm.



Slika 127. Minimalni i maksimalni pomak vrha alata u smjeru ordinate tolerancijske analize s linearnim pomakom od 120 mm

	Min:	-0.081
	Max:	0.12
	RSS Min:	-0.049
	RSS Max:	0.073

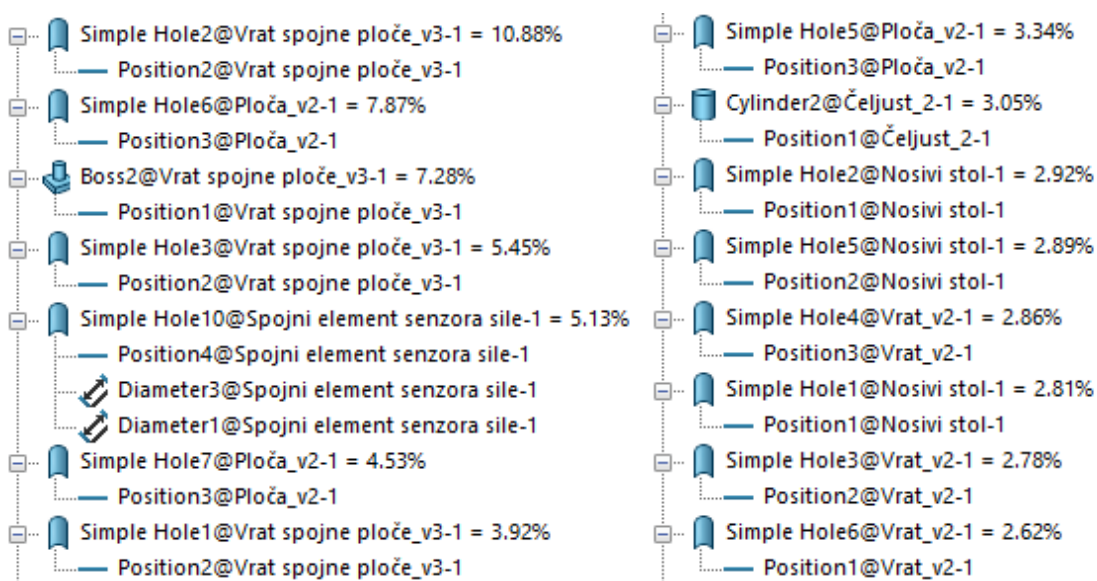
Slika 128. Rezultati tolerancijske analize za pomak u smjeru ordinate

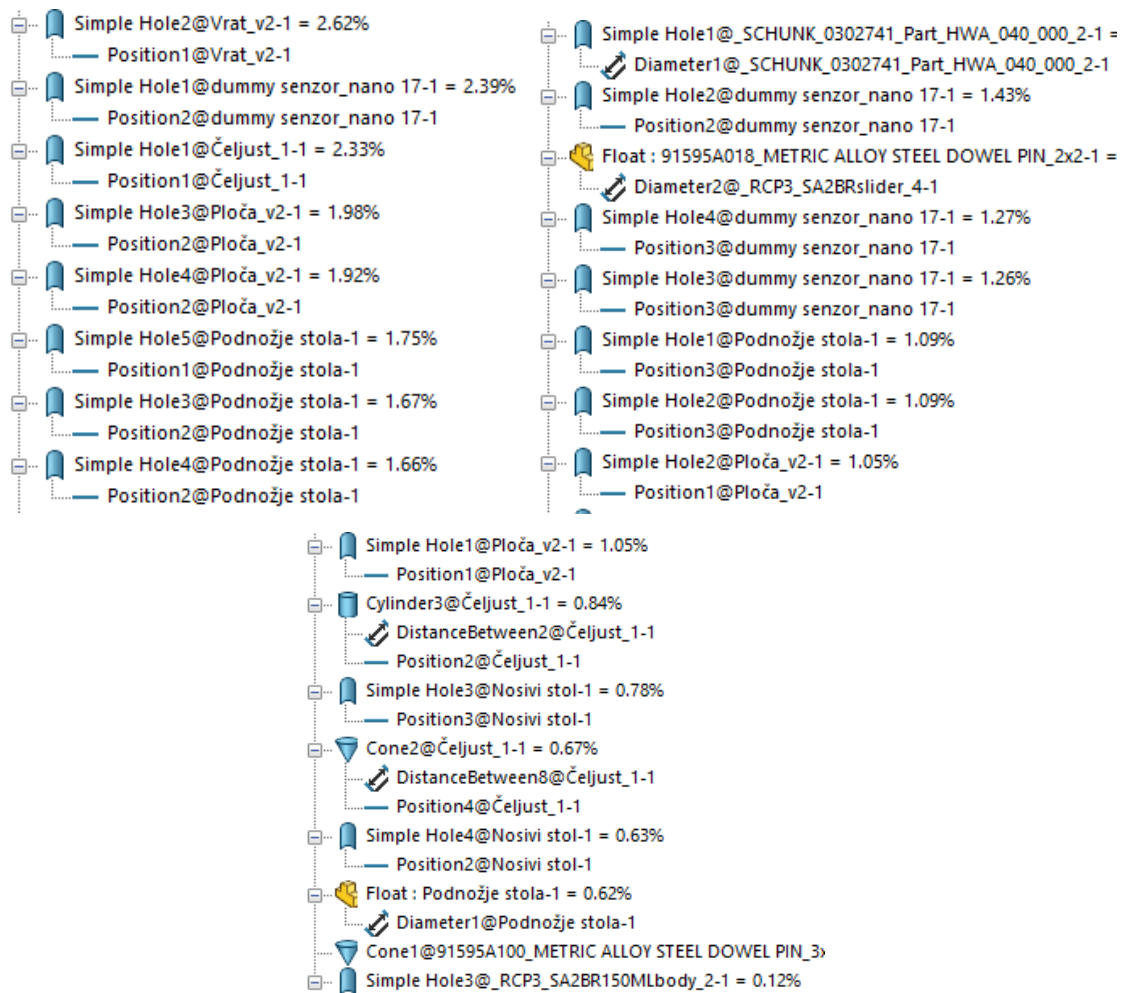
U smjeru aplikate točnost pozicioniranja uvjetovana je točnošću pozicioniranja glavnog linearnog aktuatora koja iznosi ± 0.05 mm.

Pomaci vrha alata u smjeru ordinate dovoljno su niski pogotovo uzmu li se u obzir statistički pretpostavljene minimalne i maksimalne vrijednosti pomaka. Međutim pomaci vrha alata u smjeru

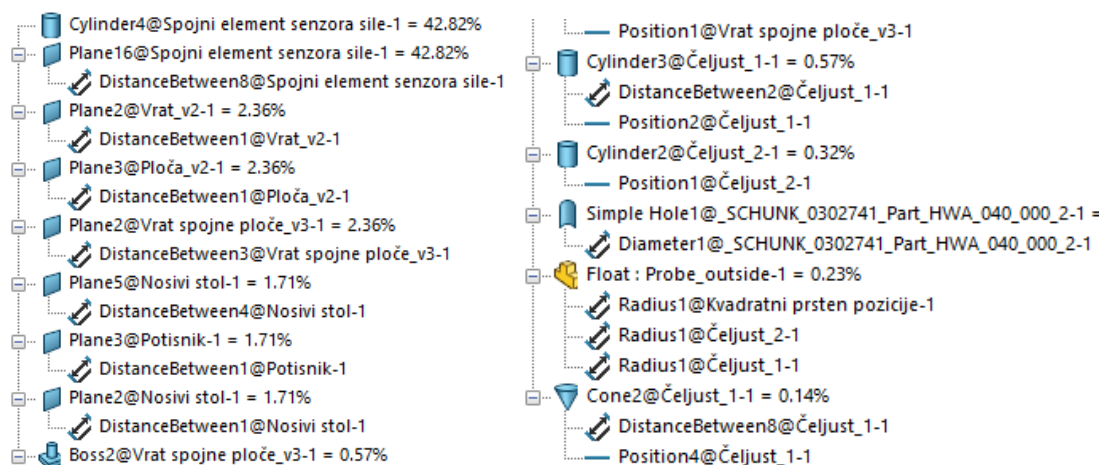
apscise ne zadovoljavaju svojom preciznošću iz čega se može zaključiti da uniformna tolerancija za sve dijelove alata nije zadovoljavajuće rješenje. Prednost ovakve analize također se očituje kroz izračunatu tablicu utjecaja spojeva na krajnji željeni rezultat. *TolAnalyst* pri izračunu minimalnog i maksimalnog odmaka pri taloženju granica tolerancijskog polja, računa i kojim postotkom svaka veza koja dolazi u niz utječe na krajnji rezultat pa tako za pomak u smjeru apscise, koji ne zadovoljava, možemo na slici 129. vidjeti listu čimbenika poredanih od onog koji utječe najviše do onog koji utječe najmanje. Osim za apscisu, na slici 130. prikazana je i lista čimbenika za pomak u smjeru ordinate. Prikazane liste u računalnom su alatu interaktivne i omogućavaju jednostavan pristup zadanim tolerancijskim poljima koji se potom mogu regulirati. Takvom regulacijom i ponovnim izračunima, pomak vrha može se ručno konvergirati do željenih granica. Treba imati na umu da su i ovako zadana tolerancijska polja uska i zahtijevaju preciznu i skupu izradu zbog čega se njihovo smanjivanje treba razmotriti kroz prizmu mogućnosti i isplativosti izrade ili kroz prizmu izrade kalibracijskog sustava.

Kalibracijski sustav kod ovakvog alata omogućio bi ili regulaciju nekih od spojeva, što bi značilo povećanje kompleksnosti konstrukcijskog rješenja, ili kalibraciju sonde ukoliko je to moguće. Kao takav, eventualna unaprjeđenja ostavljena su kao otvoreno pitanje. S druge strane, ostaje nam pooštavanje tolerancijskih polja najutjecajnijih spojeva. Stoga, kako bi se iskoristio maksimum ove analize, iterativnim se postupkom smanjivanja najutjecajnijih tolerancijskih polja nastojalo dovesti pomak sonde u smjeru apscise ispod 0.05 mm.





Slika 129. Prikaz čimbenika i njihov značaj na ukupni pomak vrha sonde u smjeru apscise



Slika 130. Prikaz čimbenika i njihov značaj na ukupni pomak vrha sonde u smjeru ordinate.


Postavljanjem svih geometrijskih tolerancija s utjecajem do 1.5% na 0.01 s dosadašnjih 0.02 mm dobivaju se rezultati s pomakom u smjeru apscise od minimalnih -0.23 mm do maksimalnih 0.209

mm. Statistički najizgledniji slučaj minimalne granice pomaka bilo bi -0.046 mm, a maksimalne 0.041 mm. Takve vrijednosti i dalje ne zadovoljavaju pa se će se geometrijski red još jednom smanjiti za duplo.

	Min:	-0.23
	Max:	0.209
	RSS Min:	-0.046
	RSS Max:	0.041

Slika 131. Preciznost pozicioniranja vrha sonde u smjeru apscise dobivena u analizi s postavljenim geometrijskim tolerancijama od 0.01 mm za sve čimbenike s utjecajem do 1.5% .

S postavljenim geometrijskim tolerancijama od 0.005 mm za sve čimbenike s utjecajem do 1.5% dobivaju se minimalna granica pomaka u smjeru apscise od -0.098 i maksimalna od 0.079 . Srednje statističke vrijednosti nalaze se u granicama od -0.02 do 0.16 mm što bi zadovoljilo željeni uvjet preciznosti pozicioniranja od ± 0.05 mm.

	Min:	-0.098
	Max:	0.079
	RSS Min:	-0.02
	RSS Max:	0.016

Slika 132. Preciznost pozicioniranja vrha sonde u smjeru apscise dobivena u analizi s postavljenim geometrijskim tolerancijama od 0.005 mm za sve čimbenike s utjecajem do 1.5% .

Bilo je za pretpostaviti da će se regulacijom utjecajnih čimbenika korigirati i preciznost pomaka vrha sonde i u smjeru ordinate iako nisu dirani najutjecajnije parametri ovog slučaja pa se tako dobivaju minimalna granica pomaka u smjeru ordinate od -0.086 mm i maksimalna od 0.099 , sa statistički najizglednijim granicama od minimalnih -0.053 mm i maksimalnih 0.006 mm. S obzirom na to da je pomak u smjeru ordinate od početka precizniji, ispitivanje sužavanjem tolerancija u ovom se slučaju nije provodilo.

	Min:	-0.086
	Max:	0.099
	RSS Min:	-0.053
	RSS Max:	0.06

Slika 133. Preciznost pozicioniranja vrha sonde u smjeru ordinate dobivena u analizi s postavljenim geometrijskim tolerancijama od 0.005 mm za sve čimbenike s utjecajem do 1.5% u smjeru apscise .

S ovakim rezultatima potrebno je pristupiti detaljnom odabiru mogućih metoda izrade pojedinih komada te raspraviti s proizvodnim sektorom potrebne točnosti i realnu mogućnost izvedbe. Na posljetku zajedno sa svim informacijama treba razlučiti vjerojatnosti statističkog postizanja željene preciznosti i izrade sustava kalibracije. Tehnička dokumentacija izrađena je s tolerancijama od 0.02 mm koja se naknadno može korigirati donesenom odlukom o preciznoj izradi ili o izradi kalibracijskog sustava.

7.2. Analiza mase

Masa alata proporcionalno je vezana odabranim materijalima dijelova. Željena masa alata bila je ispod 5 kg, a ostvareni rezultati prikazani su tablicama 13. i 14.

Tablica 13. Mase standardiziranih dijelova i ostalim elemenata koji se proizvode

Pozicija	Ime	Masa [g]	Količina	Norma	Funkcija
15	Schunkova prirubnica HWA 040	120	1	-	Spoj alata i robotskog manipulatora
16	Linearni aktuator RCP3_SA2BR_150	420	1	-	Ostvarivanje glavnog linearnog pomaka
17	Vakuu generator JS-40UM	18	1	-	Generiranje podtlaka unutar sonde
18	Držač vakuum generatora	1,37	1	-	Držač vakuum generatora
19	Koljenasti vakuum konektor	2	1	-	Spoj vakuum cjevčice s vakuum konektorom sonde
20	Ravni vakuum konektor	2	1	-	Spoj vakuum cjevčice sa spremnikom stlačenog zraka
21	Linearni aktuator XLA-1	6,3	1	-	Ostvarivanje linearnog pomaka za odsijecanje tkiva
22	Senzor sile NANO 17	9,07	1	-	Mjerenje sile
24, 25, 30	Opružni klip	3,2	3	-	Držanje pozicije elemenata
26	Svornjak $\phi 2 \times 8$ mm	0,31	1	DIN 1436	Prijenos sile sa spojnog elementa aktuatora na spojni element prstena
27	Uskočnik svornjaka $\phi 1.6$ mm	0,03	1	DIN 6799	Osiguravanje od ispadanja
28	Svornjak $\phi 1.6 \times 8$ mm	0,22	1	DIN 1436	Prijenos sile s linearnog aktuatora na spojni element
29	Uskočnik svornjaka $\phi 2$ mm	0,04	1	DIN 6799	Osiguravanje od ispadanja
31	Tlačna opruga potisnika	0,03	1	-	Vraćanje potisnika
	Zatik $\phi 2 \times 4$ mm	0,09	2	DIN 7979	Spoj klizača linearnog aktuatora i podnožja nosivog stola
	Zatik $\phi 2 \times 7$ mm	0,16	2	DIN 7979	Spoj podnožja nosivog stola i nosivog stola
	Zatik $\phi 2 \times 7$ mm	0,16	4	DIN 7979	Spoj senzora sile s nosivim stolom i spojnim elementom senzora sile

	Zatik $\phi 3 \times 6$ mm	0,3	2	DIN 7979	Spoj ploče i linearnog aktuatora
	Zatik $\phi 3 \times 6$ mm	0,3	1	DIN 7979	Spoj čeljusti klizača prednjeg držača
	Zatik $\phi 3 \times 8$ mm	0,41	2	DIN 7979	Spoj vrata prednjeg držača i čeljusti klizača
	Zatik $\phi 3 \times 10$ mm	0,52	3	DIN 7979	Spoj vrata spojne ploče i spojne ploče
	Zatik $\phi 4 \times 10$ mm	0,91	2	DIN 7979	Spoj vrata prednjeg držača i spojne ploče
	Zatik $\phi 5 \times 7$ mm	0,94	1	DIN 7979	Spoj podnožja nosivog stola i nosivog stola
	Imbus vijak M2x6 mm	0,04	3	DIN 912	Spoj senzora sile i spojnog elementa senzora sile
	Imbus vijak M2x8 mm	0,05	2	DIN 912	Spoj linearnog aktuatora za odsijecanje tkiva i podnožja nosivog stola
	Imbus vijak M2x12 mm	0,06	3	DIN 912	Spoj senzora sile i nosivog stola
	Imbus vijak M3x8 mm	0,12	2	DIN 912	Spoj spojne ploče i linearnog aktuatora
	Imbus vijak M3x10 mm	0,21	4	DIN 912	Spoj klizača linearnog aktuatora i podnožja nosivog stola
	Imbus vijak M3x25 mm	0,24	4	DIN 912	Spoj vrata, spojne ploče i linearnog aktuatora
	Imbus vijak M4x6 mm	0,21	2	DIN 912	Spoj vakuum držača i spojne ploče
	Imbus vijak M4x10 mm	0,26	1	DIN 912	Spoj vrata prednjeg držača i spojne ploče
	Imbus vijak M6x20 mm	0,96	4	DIN 912	Spoj vrata spojne ploče i Schunkove prirubnice
603,11 grama					

U tablici 13. opisana je i funkcija pojedinih elemenata sustava kako bi se moglo razumjeti gdje dolaze u sustavu i zbog čega su potrebni. Osim toga, može se isčitati kako je njihova ukupna masa 603,11 grama.

Tablica 14. Mase nestandardnih dijelova

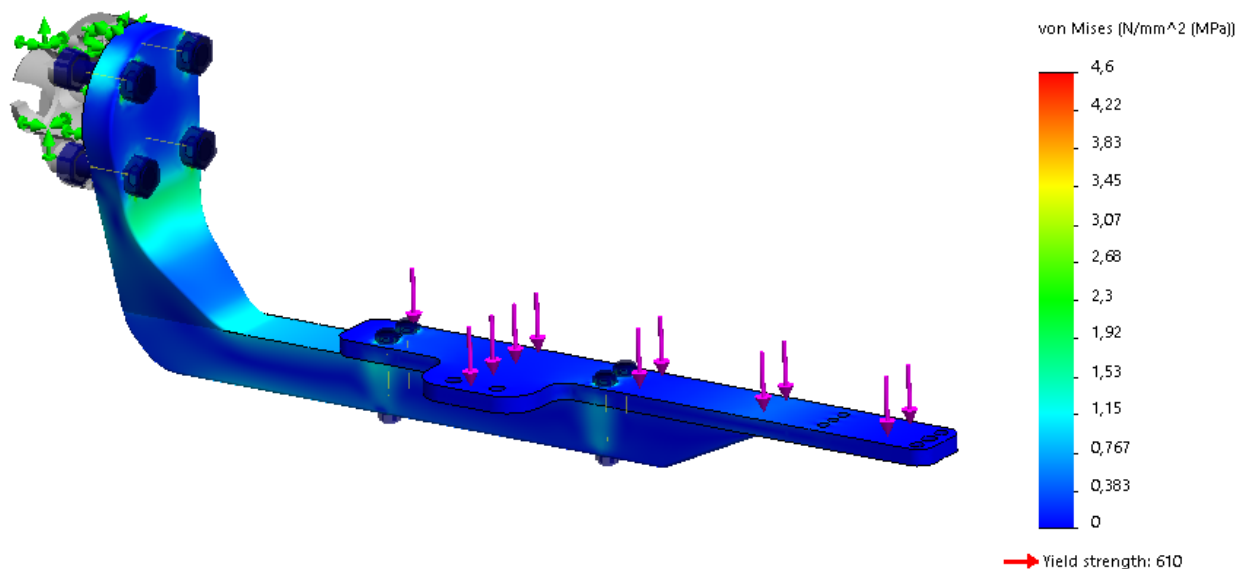
Pozicija	Ime	Materijal	Masa [g]
1	Vrat spojne ploče	Čelik 1.4460	724,86
2	Spojna ploča	Čelik 1.4460	180,83
3	Vrat prednjeg držača	6061-T6	11,46
4	Klizna čeljust prednjeg držača	PTFE	4,46
5	Fiksna čeljust prednjeg držača	PTFE	5,23
6	Podnožje nosivog stola	6061-T6	18,69
7	Nosivi stol	6061-T6	36,64
8	Spojni element senzora sile	6061-T6	12,42
9	Kvadratni prsten sonde	6061-T6	9,68
10	Kružni prsten sonde	6061-T6	5,9

11	Dvostruki koljenasti zglob	6061-T6	0,76
12	Vakuum konektor sonde	ABS	0,32
13	Potisnik	6061-T6	0,5
14	Spojni element kružnog prstena	6061-T6	0,55
			1011,75 grama

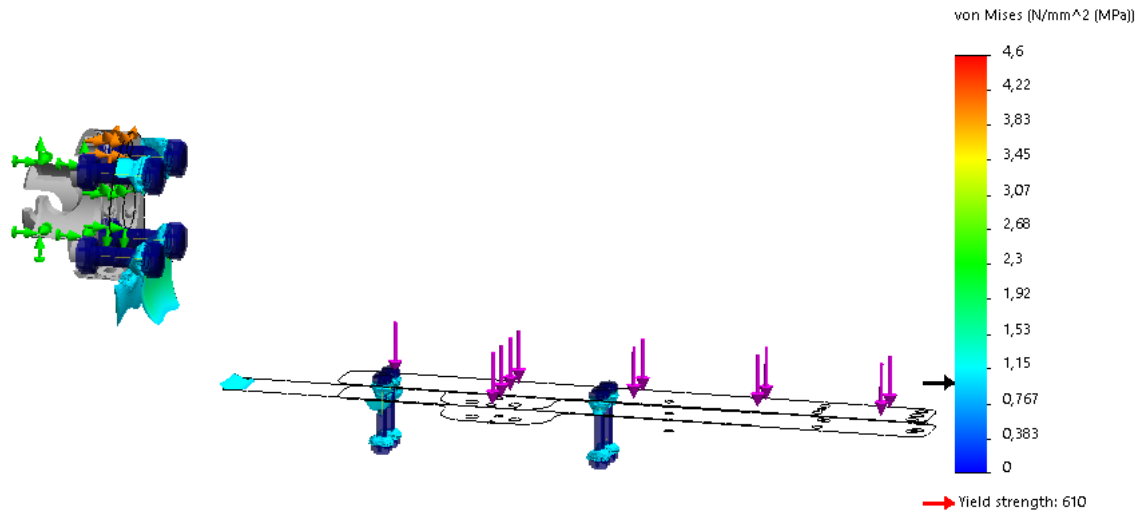
Zaključno s tablicom 14. može se vidjeti kako je ukupna masa alata **1614,86 grama**.

7.3. Statička analiza napreznja

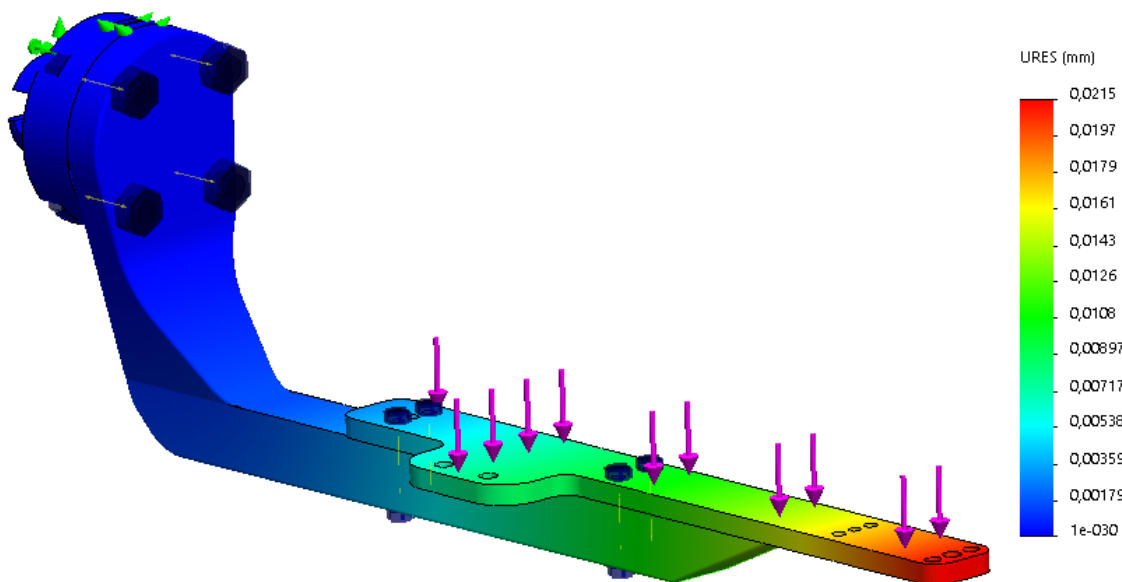
Definiranjem ukupne mase alata definirao se i nepoznati uvjet prethodno izrađene statičke analize napreznja iz poglavlja 5.2.1. Oduzme li se od ukupne mase masa nosive konstrukcije i *Schunkove* pribornice dobiva se ukupna masa koja će uz akceleraciju sile teže opterećivati nosivu konstrukciju. Tako izračunata masa ukupno iznosi 589.37 g što uz akceleraciju sile teže $g = 9.807 \text{ m/s}^2$ donosi silu opterećenja od 5.78 N što znači da rezultati prethodno provedene statičke analize napreznja imaju uračunati faktor sigurnosti iznosa 3. Provede li se precizno postavljena simulacija s postavkama prikazanima na slikama 39. i 40. dobivaju se rezultati prikazani slikama.



Slika 134. Statička analiza napreznja modela s korigiranim vrijednostima



Slika 135. Naprezanja veća od 1 MPa nosive konstrukcije



Slika 136. Prikaz maksimalnog progiba konstrukcije opterećenog sa silom mase od 5.78 N

Kada je riječ o ovako malim silama i iznimno malim napreznjima treba uzeti u obzir i nepreciznost računskih alata u izračunu progiba čiji su rezultati u desecima mikrona. Pri izračunu napreznja računskih alata koristi se nekoliko metoda od kojih neke daju preciznije rezultate od drugih, no za njih zahtijevaju veće procesne resurse. Za ovu analizu koristio se *FFEPlus solver* računalnog programa *SolidWorks*.

8. Zaključak

Konstrukcija alata koju sačinjava 14 nestandardiziranih elemenata, 13 elemenata koji se mogu nabaviti na tržištu i 48 standardiziranih spojnih elemenata kao što su vijci, zatici i sl., zadovoljava sve funkcionalnosti potrebne za valjano izvođenje robotiziranog operativnog zahvata biopsije mozga. Alat omogućava linearni pomak sonde od 154 mm od vrha koji je od prednjeg uležištenja u inicijalnoj poziciji odmaknut za 26.45 mm. Sva potrebna rukovanja izvedena su uz pomoć elemenata i sustava koji omogućavaju brzo korištenje povlačenjem, utiskivanjem ili sličnim radnjama bez potrebe za predoperativnim zavijanjem vijaka. Robotski alat također omogućava automatizirano odsijecanje čime se radnje kirurga za vrijeme operativnog zahvata minimiziraju. Ukupna masa alata od 1614,86 g daleko je manja od dopuštenih 5 kg što će korištenje i manipulaciju robotom znatno olakšati.

Preciznost alata postignuta uniformnim tolerancijskim poljem od 0.02 mm kreće se u redu veličine 0.5 mm. Za daljnje korake u smjeru razvoja, sužavanja tolerancija ili konstruiranja kalibracijskih elemenata potrebno bi bilo analizirati preciznost manualnog načina provođenja zahvata, izračunati vjerojatnosti statističkih najvjerojatnijih granica i definirati željene maksimalne granice dopuštenog pomaka. Sužavanjem najutjecajnih tolerancijskih polja povećava se i preciznost pozicioniranja alata u gotovo proporcionalnom omjeru.

S obzirom na željenu funkcionalnost rada i precizne kretnje koje alat treba obavljati, za očekivati je da elementi alata koji svojim međudnosom trebaju postići preciznost na razini mikrona ili desetak mikrona, moraju biti jednako precizno ili čak preciznije izrađeni. Precizna obrada zahtjevana je i skupa zbog čega se manifestira kao negativni aspekt ovog konstrukcijskog rješenja.

Na preciznost alata utječe i ukupni progib najudaljenije točke alata od veze s robotskim manipulatorom. Završnom statičkom analizom naprezanja pokazalo se kako je konstrukcijski nosivi dio alata napravljen tako da je ukupni progib svega par mikrona van željenog tolerancijskog polja ostatka spojeva.

Glavni nedostatak ovog konstrukcijskog rješenja robotskog alata nemogućnost je potpune sterilizacije alata, odnosno nemogućnost rada glavnog linearnog aktuatora na temperaturama većim od 40°C. Kako bi se doskočilo tom problemu zamišljeno je odvajanje sterilnog od nesterilnog dijela omatanjem aktuatora folijom koja se na mjestima spajanja probija čime se pogon odvaja od klizača. Nedostatak alata, također je i minimalni progib konstrukcije koji se događa pod utjecajem sile teže

na elemente cijelog sustava. Treba imati u vidu kako je riječ o progibu od svega nekoliko desetaka mikrona koji se u realnim uvjetima nikada neće moći potpuno eliminirati.

LITERATURA

- [1] R. Abaza, »Robotic Renal Surgery,« *Springer*, svez. 978, br. 1, 2013..
- [2] K. Ohuchida i M. Hashizume, »Robotic surgery - Overview of Robotic Surgery,« *Springer*, svez. 978, br. 4, pp. 1-9, 23 Studeni 2014.
- [3] A. R. Lanfranco, A. E. Castellanos, J. P. Desai i W. C. Meyers, »Robotic surgery - A Current Perspective,« US National Library of Medicine National Institutes of Health, 2004..
- [4] K. H. Fuchs, »Minimally Invasive Surgery,« *Thieme*, svez. 34, br. 2, pp. 154-159, 2002..
- [5] M. J. Mack, »Minimally Invasive and Robotic Surgery,« *The Journal of the American Medical Association*, svez. 285, br. 5, pp. 568-572, 7 Veljača 2001..
- [6] »Intuitive,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.intuitive.com/>. [Pokušaj pristupa 15 Siječnja 2019.].
- [7] H. Alemzadeh, J. Raman, N. Leveson i R. K. Iyer, »SAFETY IMPLICATIONS OF ROBOTIC SURGERY: A STUDY OF 13 YEARS OF FDA DATA ON DA VINCI SURGICAL SYSTEMS,« Studeni, 2013..
- [8] »ROSWELL PARK,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.roswellpark.org/robotics>. [Pokušaj pristupa 15 Siječnja 2019.].
- [9] K. Pellegrino, »Business Wire,« 23. Ožujak 2018.. [Mrežno]. Dostupno: <https://www.businesswire.com/news/home/20180323005162/en/Auris-Health-Unveils-FDA-Cleared-Monarch-Platform-Ushering>. [Pokušaj pristupa 16 Siječnja 2019.].
- [10] »Auris health,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.aurishealth.com/monarch-platform>. [Pokušaj pristupa 16 Siječnja 2019.].
- [11] »Mazor robotics,« [Mrežno]. Dostupno: <https://mazorrobotics.com/en/product-portfolio/mazor-x/mazorx-how-it-works>. [Pokušaj pristupa 16 Siječnja 2019.].

- [12] »Medtronic,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.medtronic.com/us-en/healthcare-professionals/products/neurological/spine-robotics/mazorx.html>. [Pokušaj pristupa 16 Siječnja 2019.].
- [13] »Medrobotics,« [Mrežno]. Dostupno: <https://medrobotics.com/gateway/technology/>. [Pokušaj pristupa 17 Siječnja 2019.].
- [14] S. Ross, »SAGES,« 2. Travanj 2018.. [Mrežno]. Dostupno: <https://www.sages.org/publications/tavac/flex-robotic-system-and-flex-colorectal-drive/>. [Pokušaj pristupa 17 Siječnja 2019.].
- [15] »Cancer center,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.cancercenter.com/treatments/flexible-robotic-surgery/>. [Pokušaj pristupa 17. Siječnja 2019.].
- [16] »THINK Surgical,« Technolgy, [Mrežno]. Dostupno: <https://thinksurgical.com/professionals/#technology>. [Pokušaj pristupa 17 Siječanj 2019.].
- [17] M. L. L. Liow, P. L. Chin, H. N. Pang, D. K. Tay i S.-J. Yeo, »THINK surgical Tsolution-One (Robodoc) total knee arthroplasty,« US National Library of Medicine, 2017.
- [18] M. S. Eljamel, »Robotic Applications in Neurosurgery,« Medical Robotics, 2008..
- [19] C. Faria, E. De Momi, W. Erlhagen, G. Feringo i M. Rito, »Review of Roboti Technology for Stereotactic Neurosurgery,« Biomedical Engineering, IEEE, 2015.
- [20] A. Benabid, D. Hoffmann, E. Seigneuret and S. Chabardes, "Robotics in neurosurgery: which tools for what?," Acta Neurochirurgica, 2006..
- [21] T. Haidegger, L. Kovacs, G. Fordos, Z. Benyo i P. Kazanzides, »Future Trends in Robotic Neurosurgery,« *Springer*, svez. 20, pp. 229-233, 2008..
- [22] T. A. Mattei, A. Hafiz Rodrigez, D. Smbhara i E. Mendel, »Current state-of-the-art and future perspectives of robotic technology in neurosurgery,« Neurosurgical Review, 2014..
- [23] T. Haidegger, "Theory and Method to Enhance Computer-Integrated Surgical Systems, Ph.D. Thesis," Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2010..

- [24] D. Glauser, H. Fankhauser, M. Epitoux, J. Hefti and A. Jaccottet, "Neurosurgical Robot Minerva: First Results and Current Developments," *Journal of Image Guided Surgery*, vol. 1, no. 5, pp. 266-272, 1995..
- [25] P. Finlay and P. Morgan, "PathFinder image guided robot for neurosurgery," *Industrial Robot*, 2003..
- [26] H. Takasuna, T. Goto, Y. Kakizawa, T. Miyahara, J. Koyama, Y. Tanaka, T. Kawai i K. Hongo, »Use of a micromanipulator system (NeuRobot) in endoscopic neurosurgery,« Elsevier, 2014..
- [27] Y. Maddahi, K. Zareinia, L. Shi Gan, S. Lama i G. R. Sutherland, »Positional and Force Characteristic of neuroArm Robotic Manipulators: A Pilot Study,« Winnipeg, 2015..
- [28] G. R. Sutherland, S. Wolfsberger, S. Lama and K. Zarei-nia, "The Evolution of neuroArm," *Neurosurgery journal*, 2012..
- [29] »Medtech,« [Mrežno]. Dostupno: <http://www.medtech.fr/en/rosar-innovative-technology>. [Pokušaj pristupa 18 Siječnja 2019.].
- [30] E. Demaitre, »Robotics business review,« 1. Siječanj 2017.. [Mrežno]. Dostupno: <https://www.roboticsbusinessreview.com/health-medical/zimmer-biomet-buys-medtech-rosa-surgical-robot/>. [Pokušaj pristupa 19. Siječnja 2019.].
- [31] N. Nathoo, M. C. Cavusoglu, M. A. Vogelbaum and G. H. Barnett, "In Touch with Robotics: Neurosurgery for the Future," *Neurosurgery*, vol. 56, no. 3, pp. 421-433, 2005..
- [32] M. Švaco, B. Šekoranja, F. Šuligoj, J. Vidaković, B. Jerbić i D. Chudy, »A Novel Robotic Neuronavigation System: RONNA G3,« *Journal of Mechanical Engineering*, 2017..
- [33] B. Jerbić, M. Švaco, D. Chudy, B. Šekoranja, F. Šuligoj, J. Vidaković, D. Dłaka i N. i. d. Vitez, »RONNA G4—Robotic Neuronavigation: A Novel Robotic Navigation Device for Stereotactic Neurosurgery,« *ELSEVIER*, Sves. 1631789, br. CH035, pp. 599-629, 2019.
- [34] H. Pranjić, »SUSTAV ZA PRECIZNI LINEARNI TRANSPORT LAGANIH,« *Završni rad*, br. 141., 2017. .

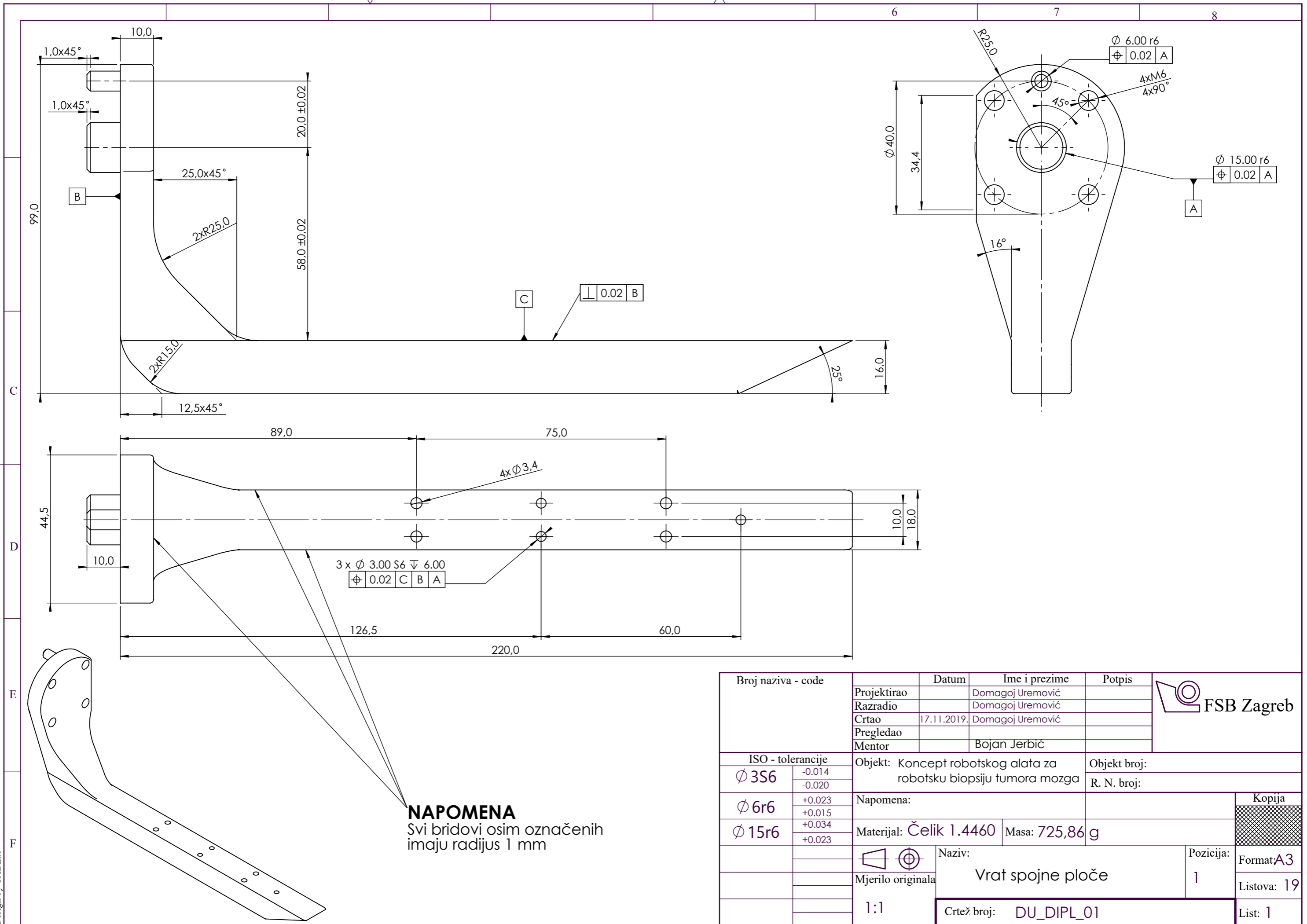
- [35] g. c. Ball Screw, »THK,« [Mrežno]. Dostupno: https://tech.thk.com/en/products/pdf_download.php?file=511E_15_BallScrew.pdf. [Pokušaj pristupa 20. March 2019.].
- [36] »UN-TRA,« [Mrežno]. Dostupno: http://www.un-tra.hr/linearna_i_montazna_tehnika/linearna_tehnika. [Pokušaj pristupa 15 Rujan 2019.].
- [37] »HIWIN,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.hiwin.com/index.html>. [Pokušaj pristupa 15. Rujan 2019.].
- [38] B. Fernini, »Kinematic Modeling and Simulation of a 2-R Robot by Using Solid Works and Verification by MATLAB/Simulink,« *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, Sves. %1 od %2Vol. 1,, br. No. 2, p. 78~93, 2012.
- [39] »ElectricianProf,« [Mrežno]. Dostupno: <https://electricianprof.ru/hr/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [40] »Hennlich,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.hennlich.hr/proizvodi/opruge-tlacne-opruge-metarske-tlacne-opruge-162.html>. [Pokušaj pristupa 18. Studeni 2019.].
- [41] C. Platt i F. Jansson, *Encyclopedia of Electronic Components - Sensors* (vol. 3), San Francisco: Maker Media, 2016.
- [42] »HT SENSOR TECHNOLOGY CO.,LIMITED,« [Mrežno]. Dostupno: <http://www.htc-sensor.com/index.html>. [Pokušaj pristupa 20. Studeni 2019.].
- [43] »ATI Industrial Automation,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.ati-ia.com/index.aspx>. [Pokušaj pristupa 17. Studeni 2019.].
- [44] »VACCON,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.vaccon.com/standard-products/modular-venturi-vacuum-pumps/cylindrical/JS40UM>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [45] »PISCO,« [Mrežno]. Dostupno: http://www.pisco.com/products/Vacuum_Generators_VU_VUM. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [46] »MILLIBAR,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.millibar.com/product/cv05-hs-tt/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].

- [47] »ANVER,« [Mrežno]. Dostupno: <https://anver.com/vacuumcomponents/vacuumgenerators/jv-series/jv07/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni, 2019.].
- [48] »AIR-VAC,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.airvacpumps.com/AVpump.html>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [49] »McMASTER CARR,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.mcmaster.com/7880t368-52065K428>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [50] »IGUS,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.igus.eu/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [51] »QA1,« [Mrežno]. Dostupno: Slika 73. Zglobna glava s proširenim kuglastim elementom tvrtke QA1. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [52] »Actuonix,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.actuonix.com/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [53] »Portescap,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.portescap.com/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [54] »Haydon kerk PITTMAN,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.haydonkerkpittman.com/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [55] »Xeryon,« [Mrežno]. Dostupno: <https://xeryon.com/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [56] »PI motion | positioning,« [Mrežno]. Dostupno: <https://www.pi-usa.us/en/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [57] K.-H. Decker, ELEMENTRI STROJEVA, Zagreb: Tehnička knjiga, 1987..
- [58] I. Alfrević, D. Bjelovučić, I. Budin, B. Matijašević i B. i. d. Modilić, Inženjerski priručnik ip1, Zagreb: Školska knjiga, 1996..
- [59] I. Skupina autora: Alfrević, Ž. Alar, M. Crneković, M. Esser i Z. i. d. Guzović, KRAUTOV SROJARSKI PRIRUČNIK, Zagreb: Sajema d.o.o., 2009..

- [60] »Hrvatska enciklopedija,« Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2018.. [Mrežno]. Dostupno: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=58035>. [Pokušaj pristupa 10. Siječanja 2019.].
- [61] »Hrvatska enciklopedija,« 2018.. [Mrežno]. Dostupno: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=35415>. [Pokušaj pristupa 13 Siječnja 2019.].
- [62] »PISCO,« [Mrežno]. Dostupno: <http://www.pisco.com/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].
- [63] »RS Components,« [Mrežno]. Dostupno: <https://uk.rs-online.com/web/p/pneumatic-quick-connect-couplings/6671778/>. [Pokušaj pristupa 21. Studeni 2019.].

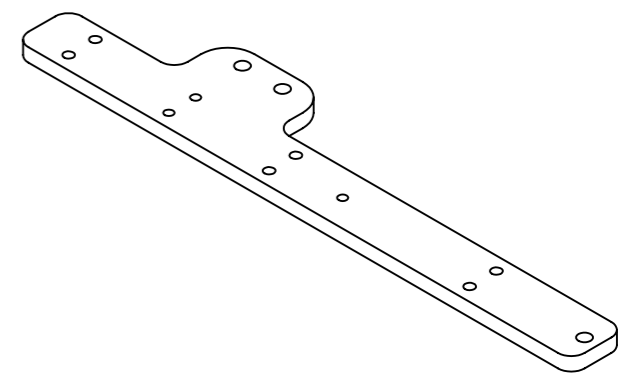
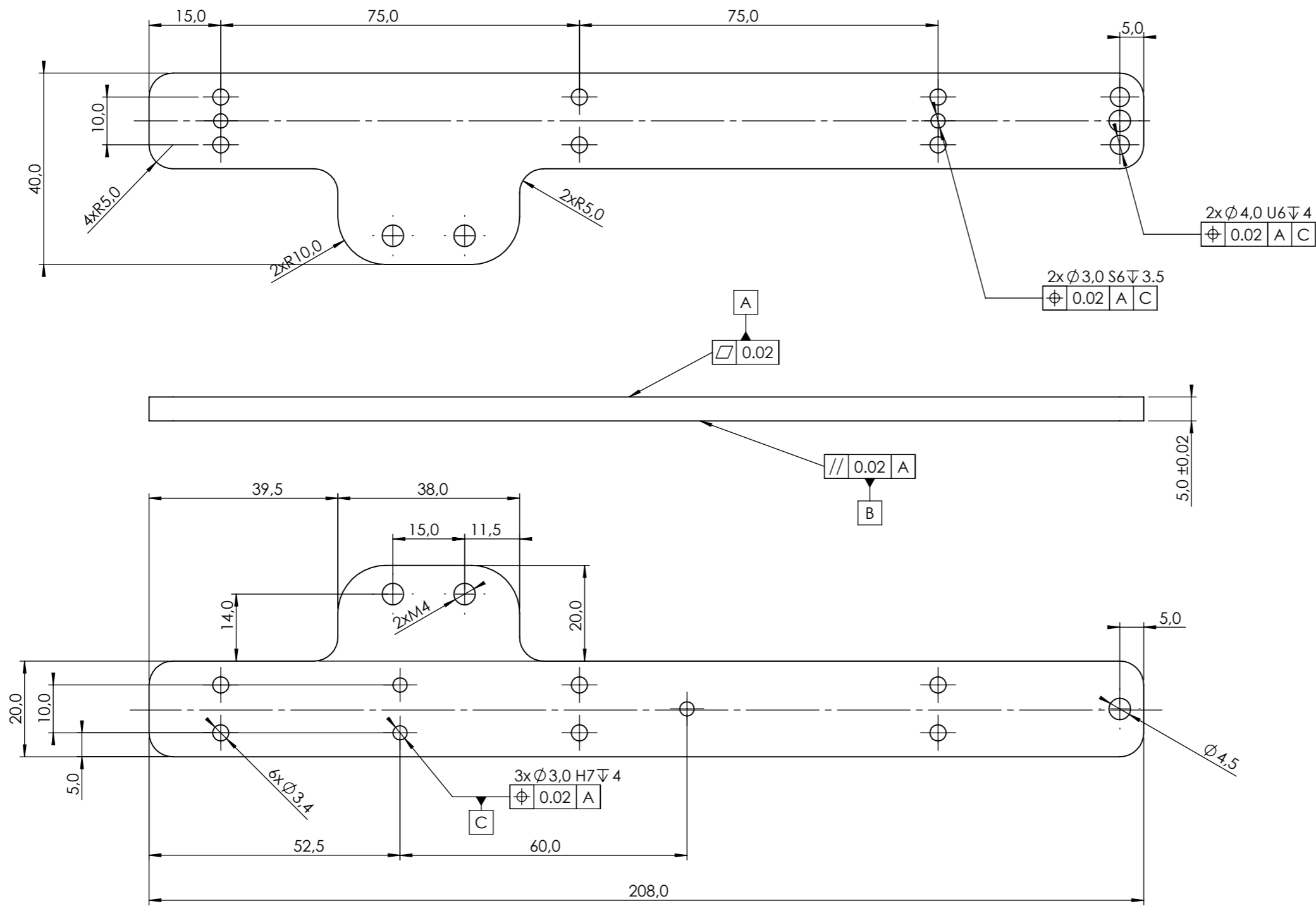
PRILOZI

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

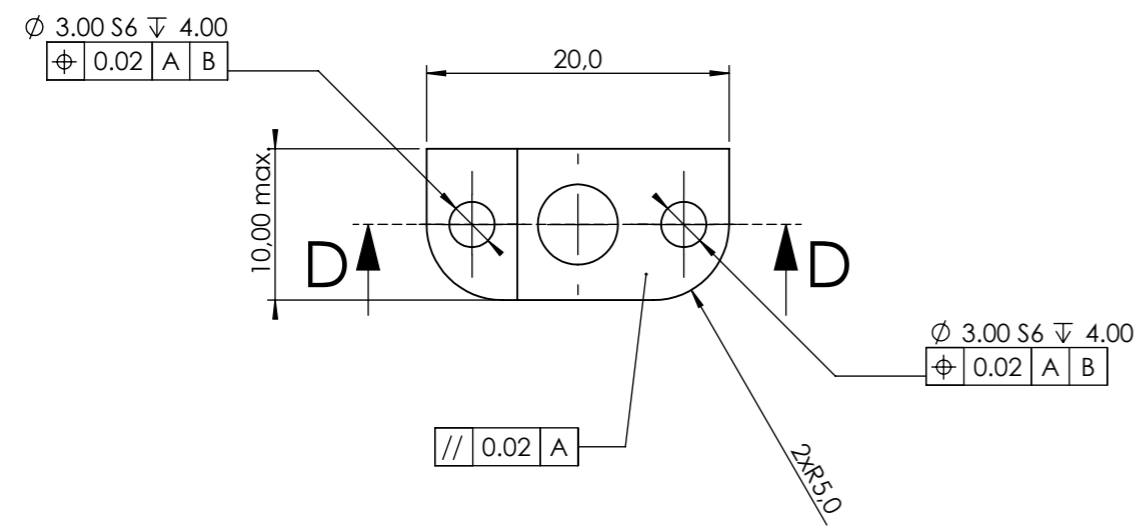
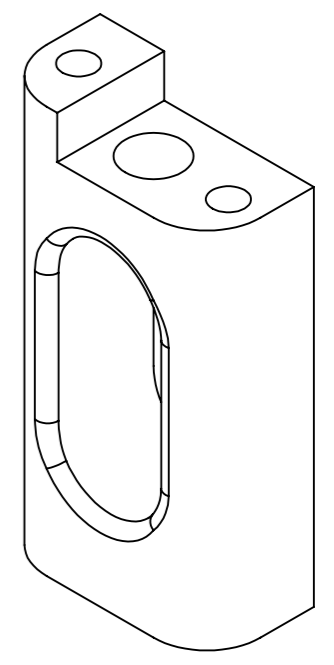
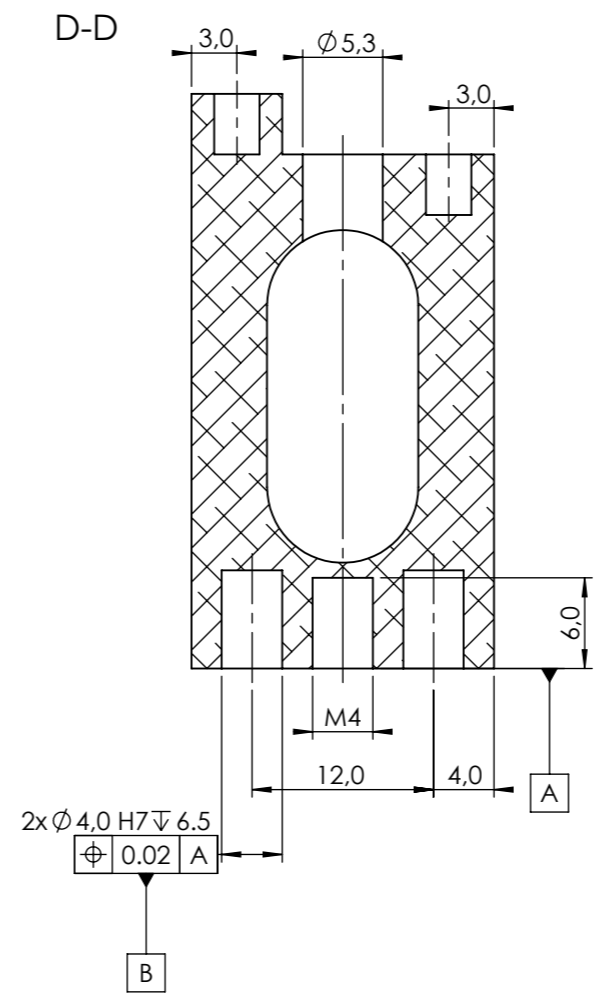
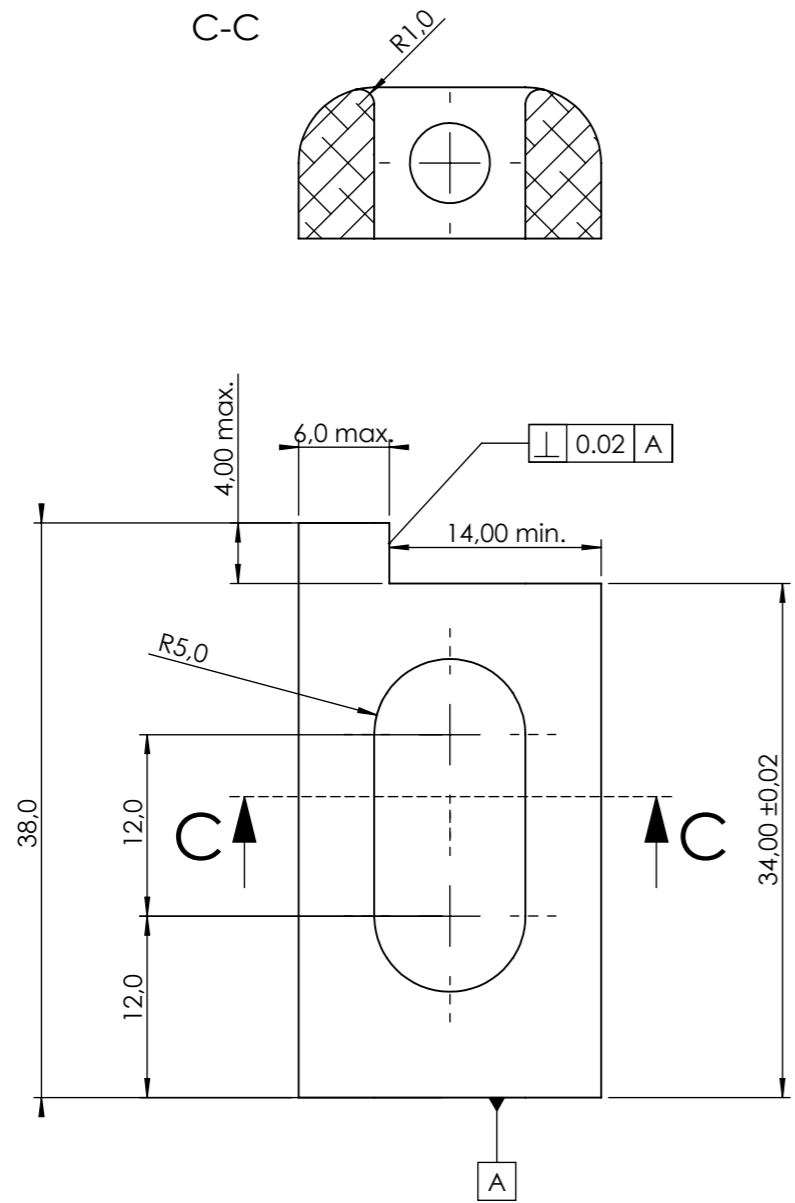


NAPOMENA
Svi bridovi osim označenih
imaju radijus 1 mm

Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio		Domagoj Uremović		
	Crtao	17.11.2019.	Domagoj Uremović		
	Pregledao				
	Mentor		Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:	
∅ 3S6	-0.014 -0.020			R. N. broj:	
∅ 6r6	+0.023 +0.015	Napomena:			
∅ 15r6	+0.034 +0.023	Materijal: Čelik 1.4460	Masa: 725,86 g		
		Naziv: Vrat spojne ploče		Pozicija: 1	Kopija
		Mjerilo originala			Format: A3
		1:1	Crtež broj: DU_DIPL_01		Listova: 19
					List: 1

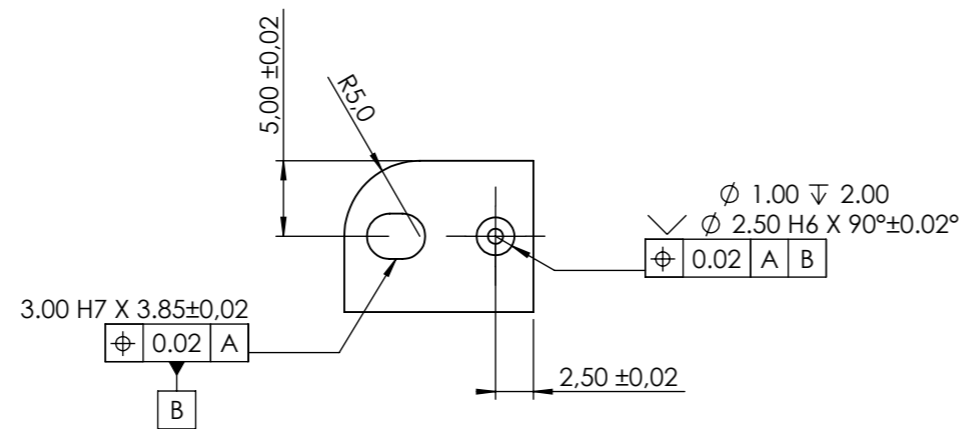


Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio		Domagoj Uremović		
	Crtao	17.11.2019.	Domagoj Uremović		
	Pregledao				
	Mentor		Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:	
Ø 3H7	+0.010 0.0			R. N. broj:	
Ø 3S6	-0.014 -0.020	Napomena:			
Ø 4U6	-0.020 -0.028	Materijal: Čelik 1.4460	Masa: 80,83g		
		Naziv: Spojna ploča		Pozicija: 2	Kopija
		Mjerilo originala: 1:1			Format: A3
		Crtež broj: DU_DIPL_02			Listova: 19
					List: 2

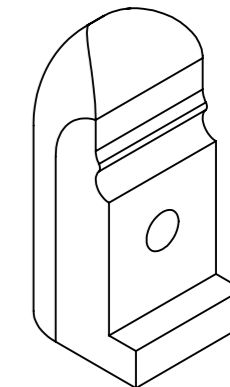
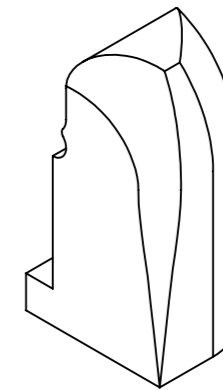
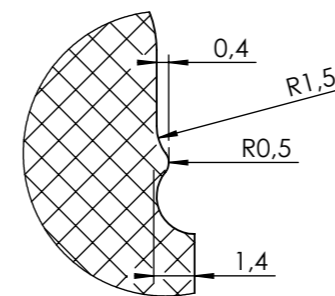


Broj naziva - code	Projektirao	Domagoj Uremović	Potpis	
	Razradio	Domagoj Uremović		
	Crtao	17.11.2019. Domagoj Uremović		
	Pregledao			
	Mentor	Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga	Objekt broj:	
$\phi 4H7$	+0.012 0.0		R. N. broj:	
$\phi 3S6$	-0.014 -0.020			
Napomena:				Kopija
Materijal: 6061-T6		Masa: 11,46g		
Mjerilo originala		Naziv: Vrat prednjeg držača		Pozicija: 3
2:1		Crtež broj: DU_DIPL_03		List: 3

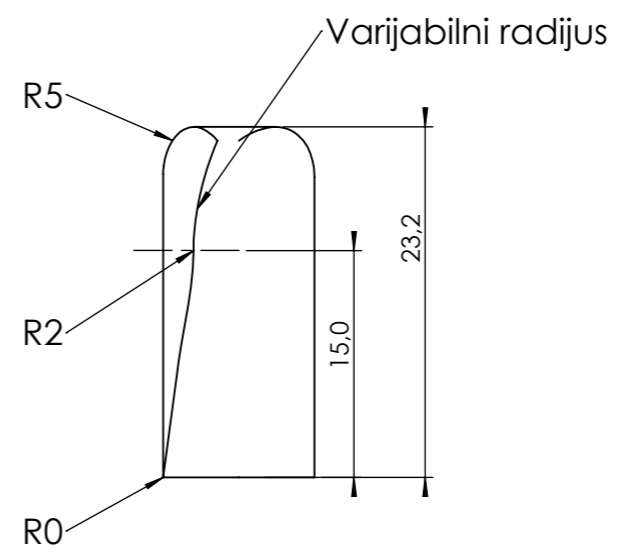
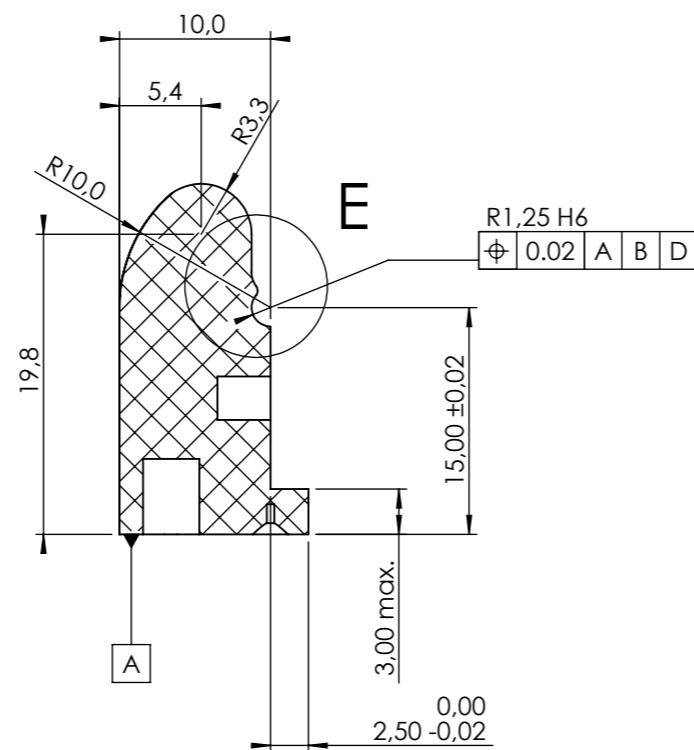
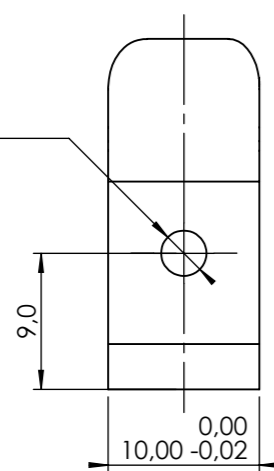




E (4 : 1)

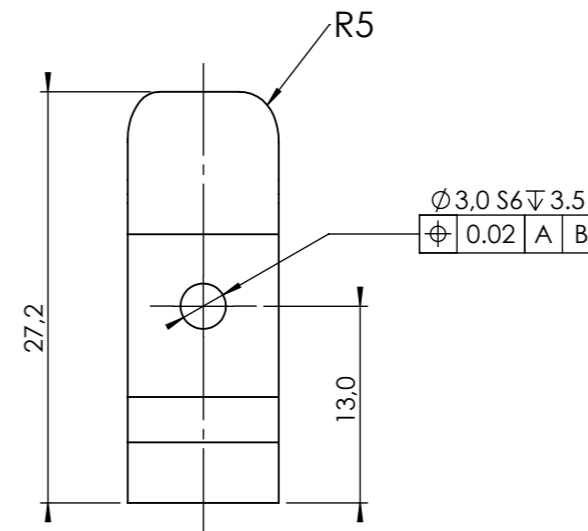
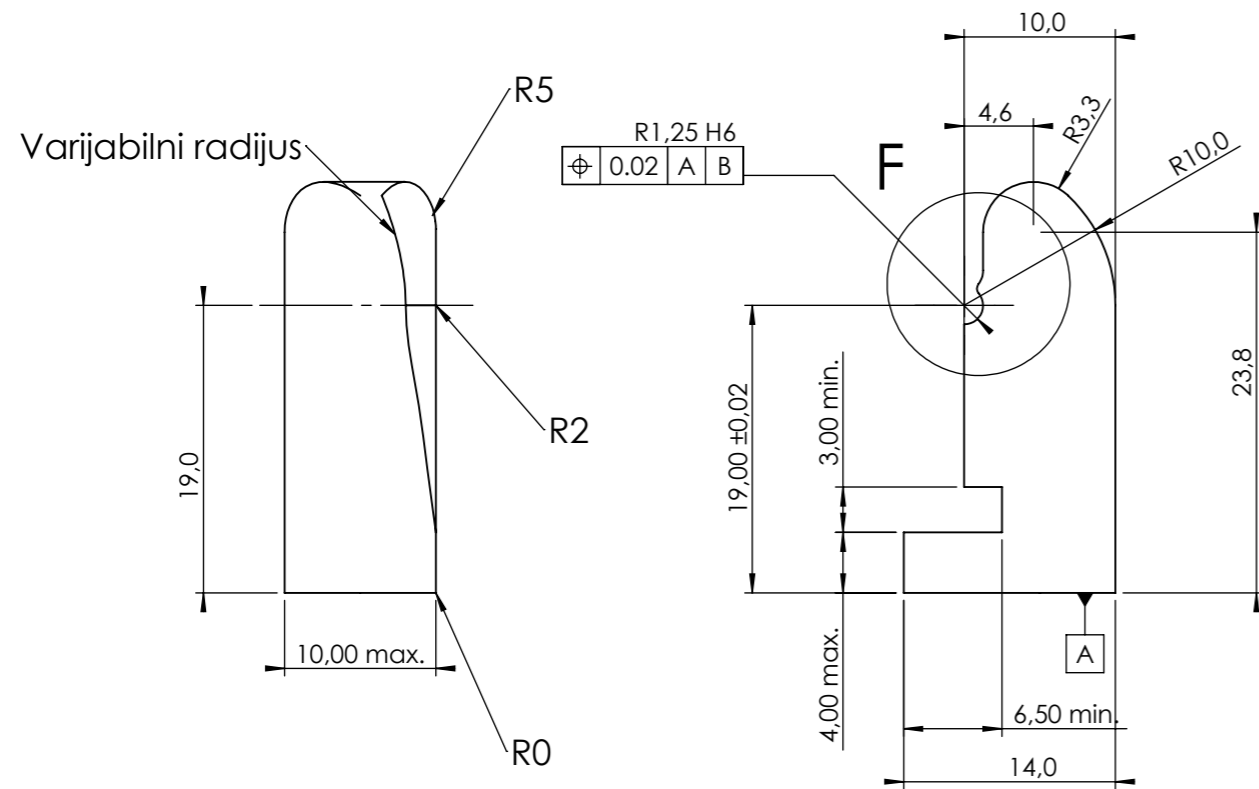
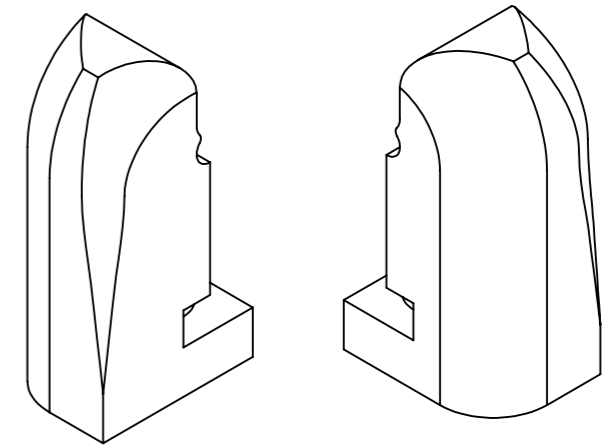
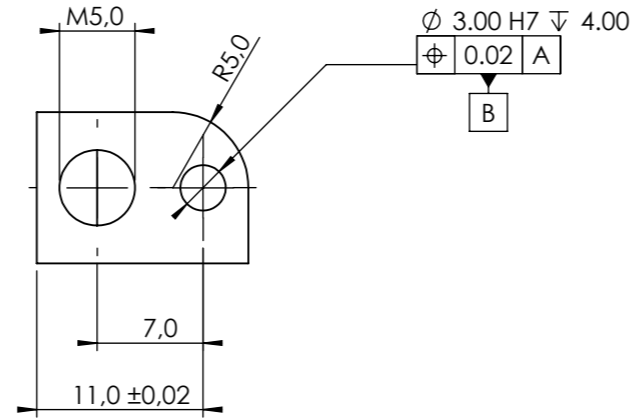
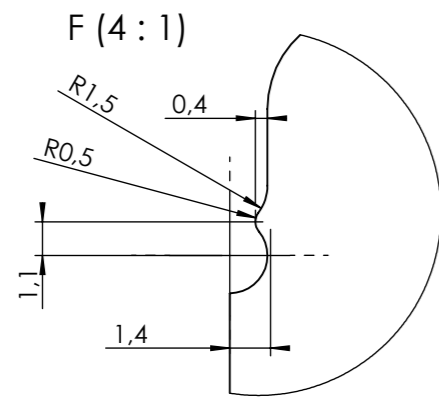


$\phi 3.00 \text{ H7 } \nabla 3.50$
 $\phi 0.02$ A B



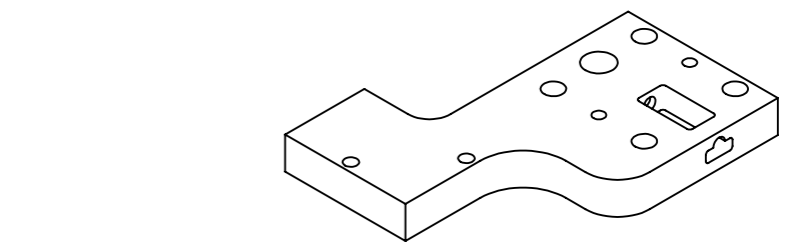
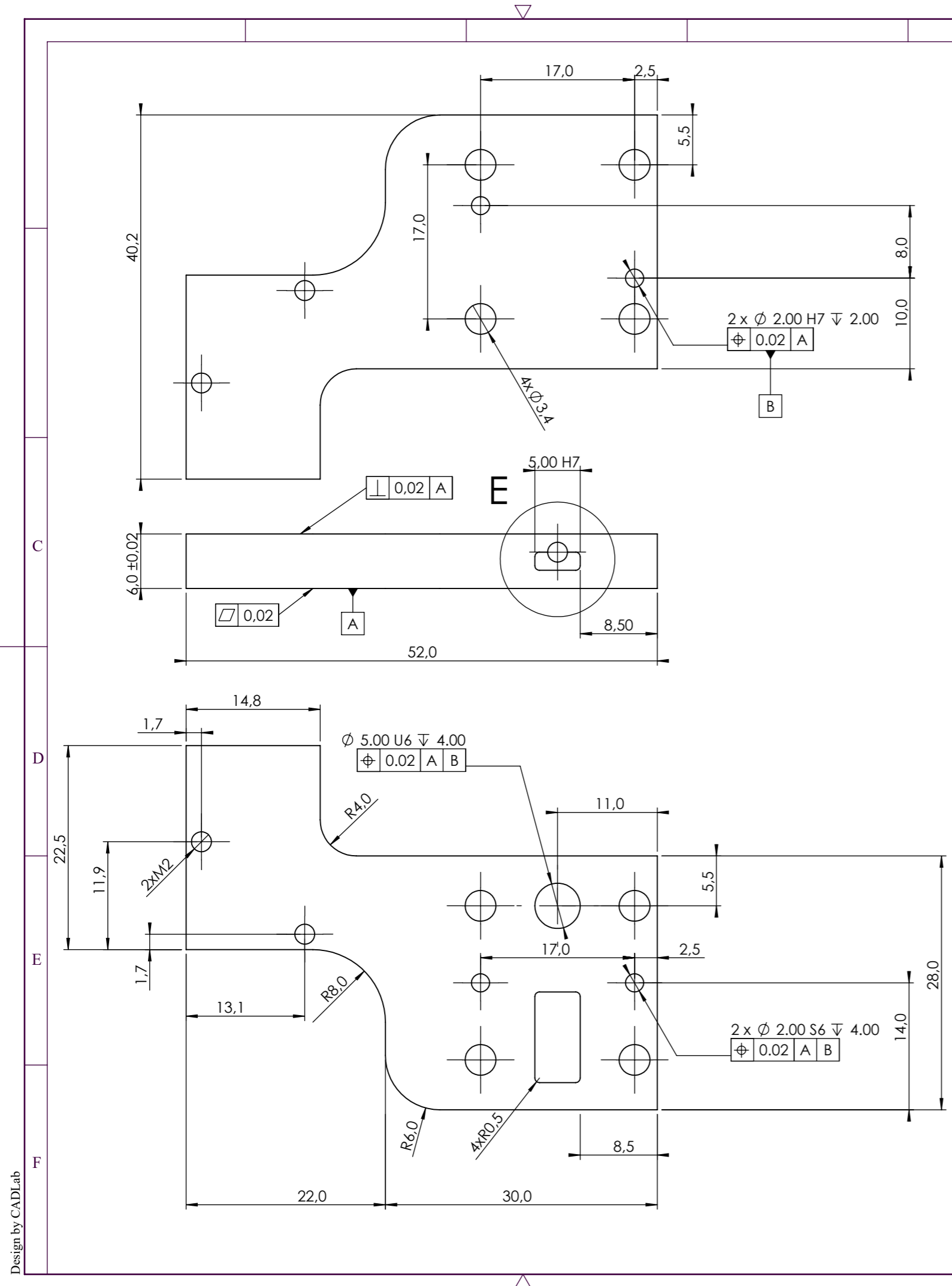
Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio		Domagoj Uremović		
	Crtao	17.11.2019.	Domagoj Uremović		
	Pregledao				
	Mentor		Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:	
$\phi 3\text{H7}$	+0.010 0.0			R. N. broj:	
$\phi 2.5\text{H6}$	+0.006 0.0	Napomena:			
		Materijal: PTFE	Masa: 4,46g		
		 Mjerilo originala	Naziv: Klizna čeljust prednjeg držača	Pozicija: 4	Kopija
		2:1	Crtež broj: DU_DIPL_04	Format: A3	Listova: 19
				List: 4	



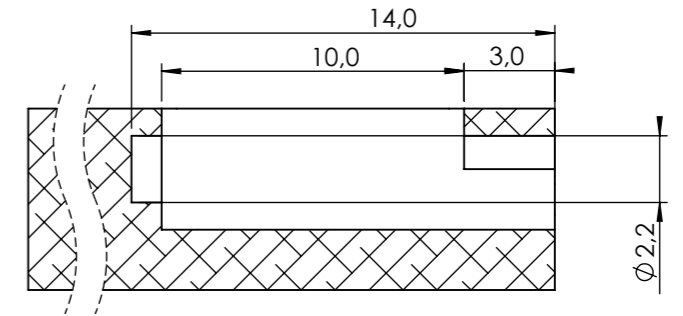


Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio		Domagoj Uremović		
	Crtao	17.11.2019.	Domagoj Uremović		
	Pregledao				
	Mentor		Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:	
Ø 3H7	+0.010 0.0	Napomena:		R. N. broj:	
Ø 3S6	-0.014 -0.020				
Ø 2.5H6	+0.006 0.0	Materijal: PTFE	Masa: 5,23g	Kopija 	
		Naziv: Fiksna čeljust prednjeg držača			
		Mjerilo originala		Format: A3	
		2:1	Crtež broj: DU_DIPL_05		Listova: 19
					List: 5

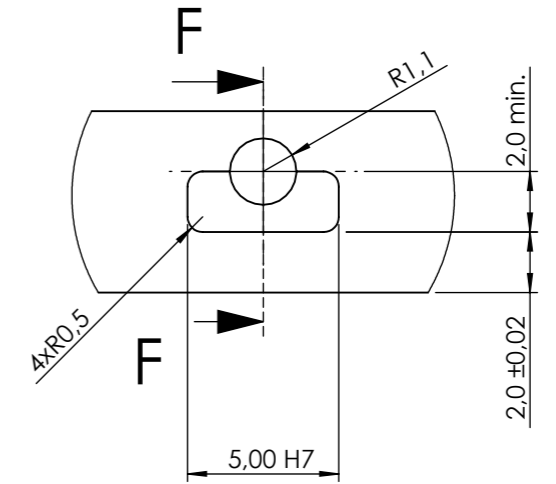




F-F (4 : 1)

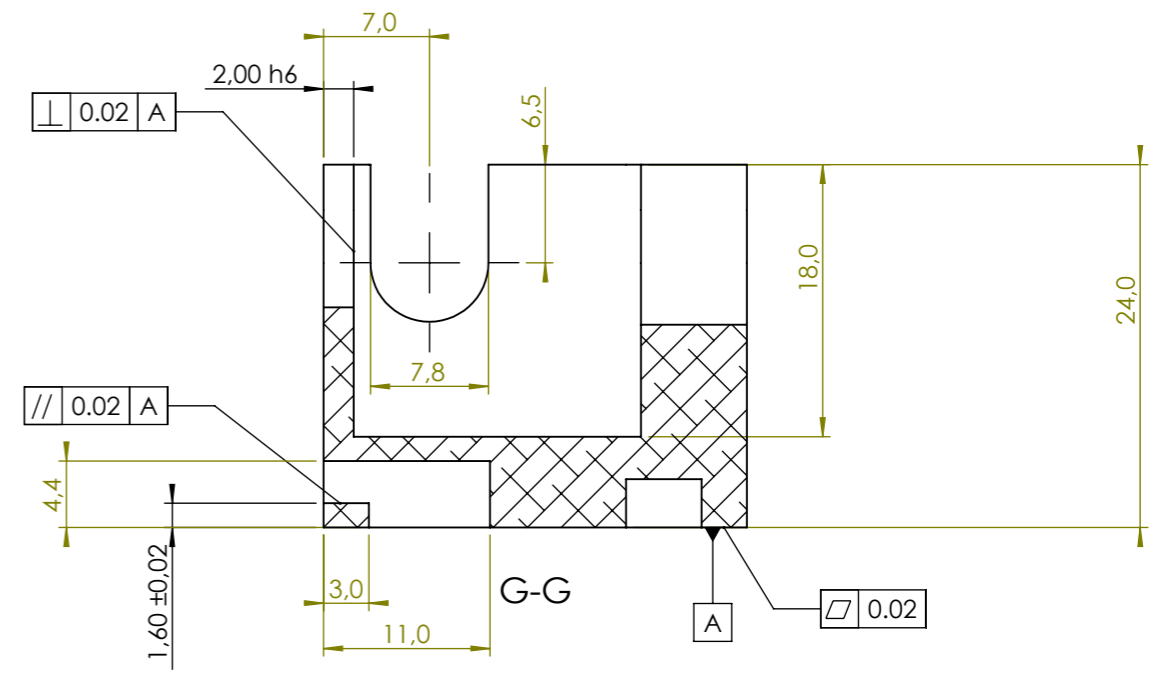
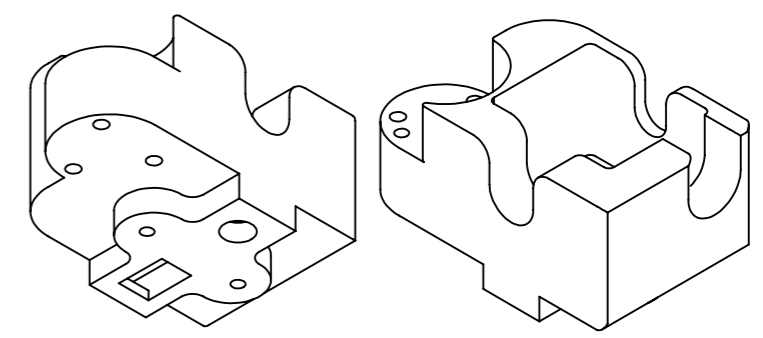
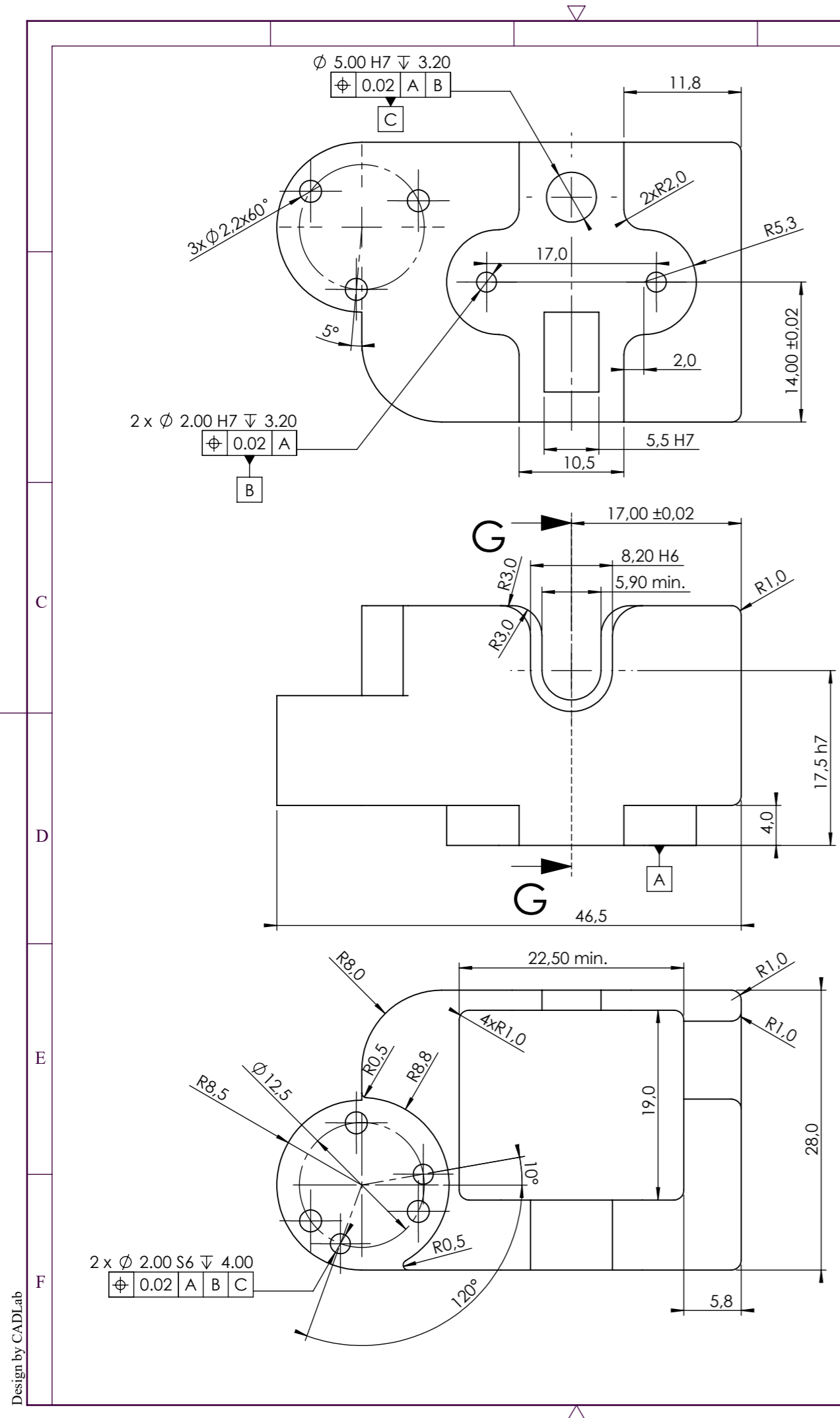


E (4 : 1)



Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio		Domagoj Uremović		
	Crtao	17.11.2019.	Domagoj Uremović		
	Pregledao				
	Mentor		Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:	
Ø 2H7	+0.010 0.0	Napomena:		R. N. broj:	
Ø 2S6	-0.014 -0.020				
Ø 5U6	-0.020 -0.028	Materijal: 6061-T6	Masa: 18.69g	<div style="background-color: #cccccc; width: 100px; height: 20px;"></div>	
5H7	+0.012 0.0	Naziv: Podnožje nosivog stola			
		Mjerilo originala			Format: A3
		2 : 1	Crtež broj: DU_DIPL_06		Listova: 19
					List: 6

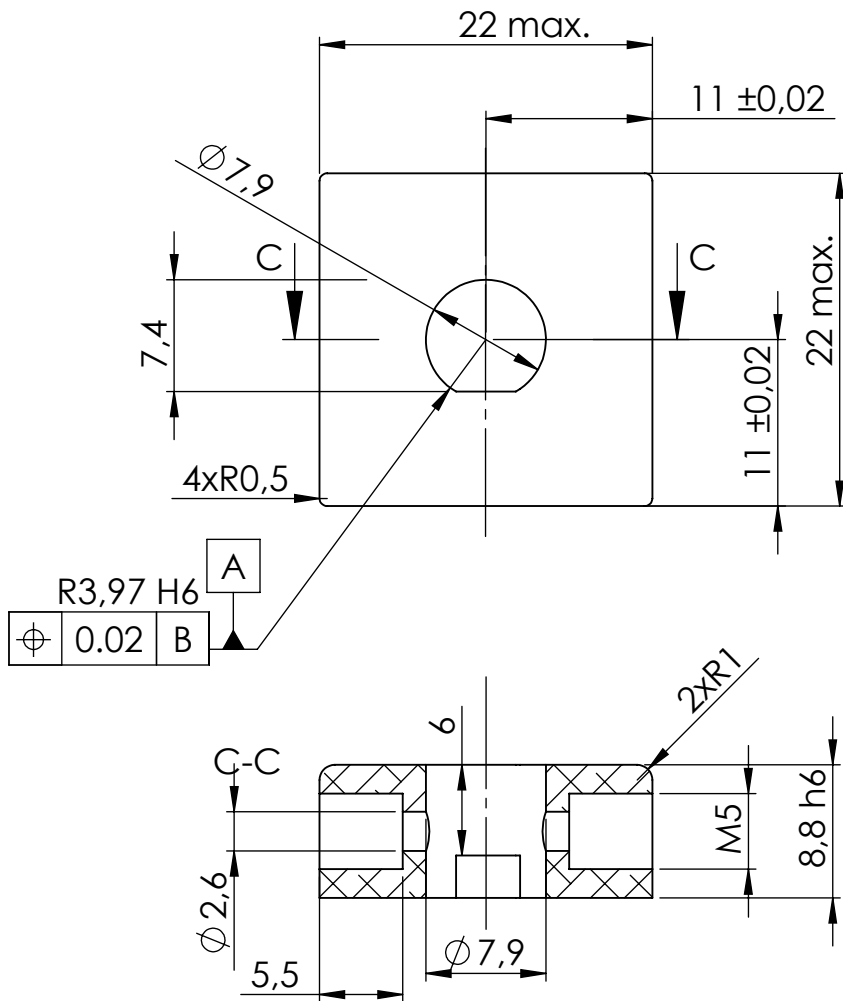
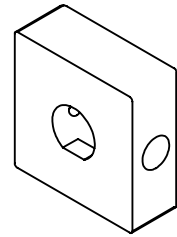




Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio	17.11.2019.	Domagoj Uremović		
	Crtao		Domagoj Uremović		
ISO - tolerancije	Pregledao				
Ø 2H7	Mentor		Bojan Jerbić		
Ø 2S6		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:	
Ø 5H7		Napomena:		R. N. broj:	
5.5H7		Materijal: 6061-T6	Masa: 36.64g		Kopija
8.2H6		Mjerilo originala	Naziv: Nosivi stol	Pozicija: 7	Format: A3
2h6		2 : 1	Crtež broj: DU_DIPL_07		Listova: 19
17.5h7					List: 7

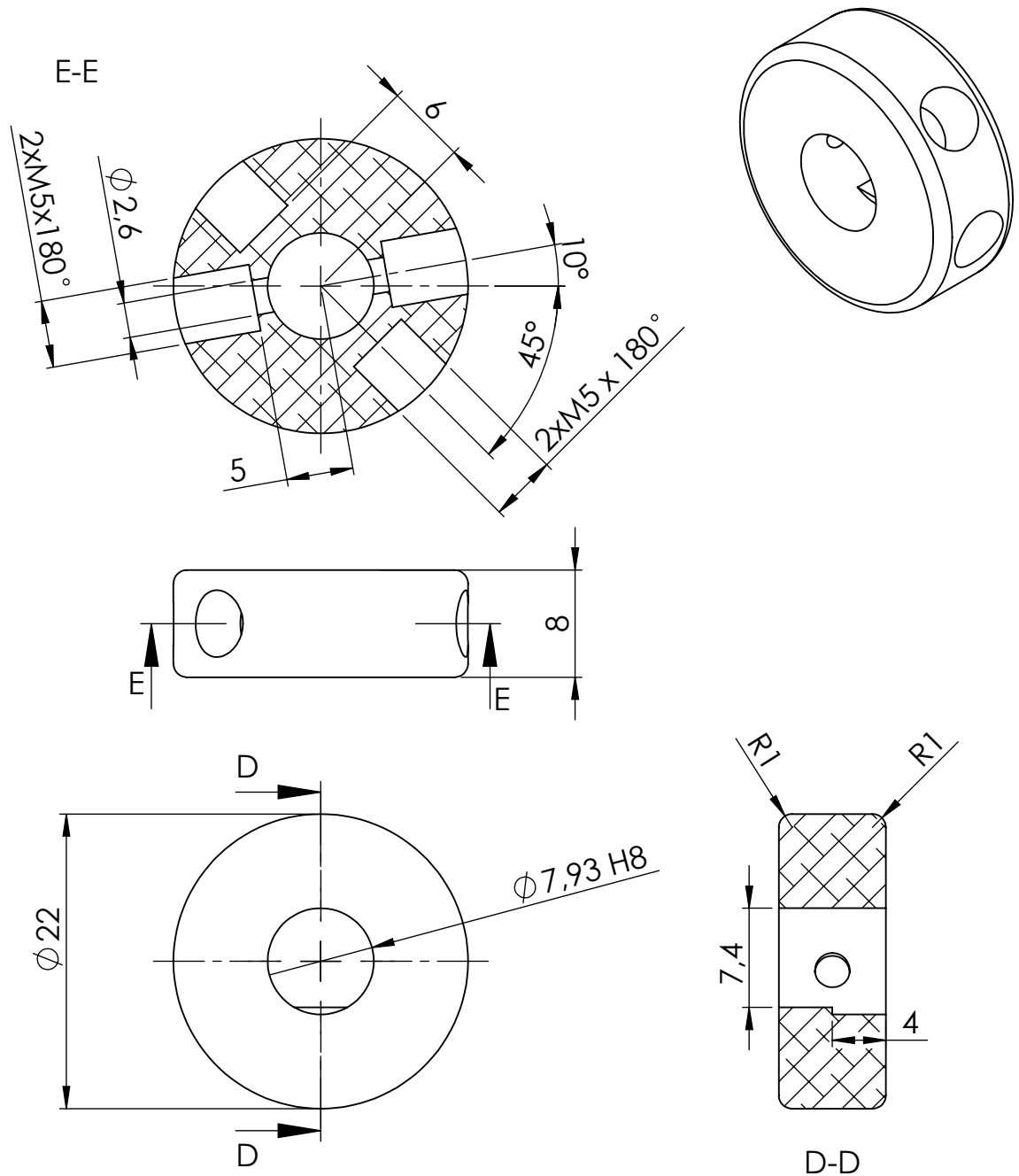


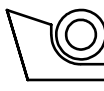
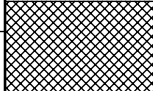
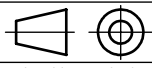
Design by CADLab



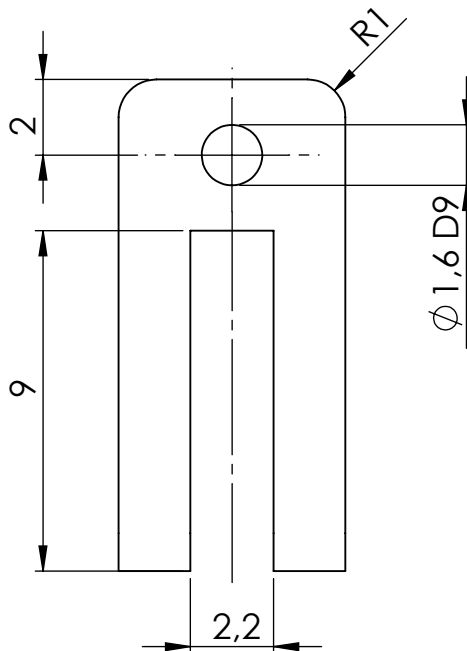
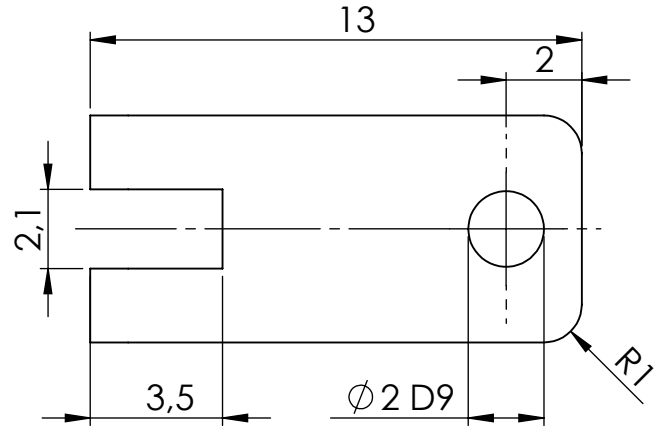
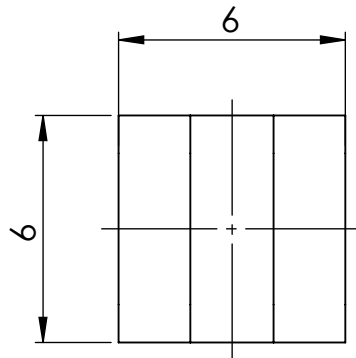
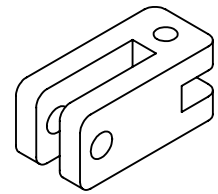
Broj naziva - code	Datum		Ime i prezime		Potpis	
	Projektirao		Domagoj Uremović			
	Razradio		Domagoj Uremović			
	Crtao		17.11.2019. Domagoj Uremović			
	Pregledao					
Mentor		Bojan Jerbić				
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga			Objekt broj:	
Ø7.94H6	+0.006 0.0				R. N. broj:	
8.8h6	0.0 -0.009	Napomena:				
		Materijal: 6061-T6	Masa: 9,68 g			
		 Mjerilo originala	Naziv: Kvadratni prsten sonde			Pozicija: 9
		2:1	Crtež broj: DU_DIPL_9			Format: A4 Listova: 19 List: 9

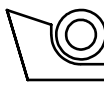
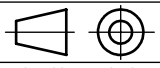
Design by CADLab



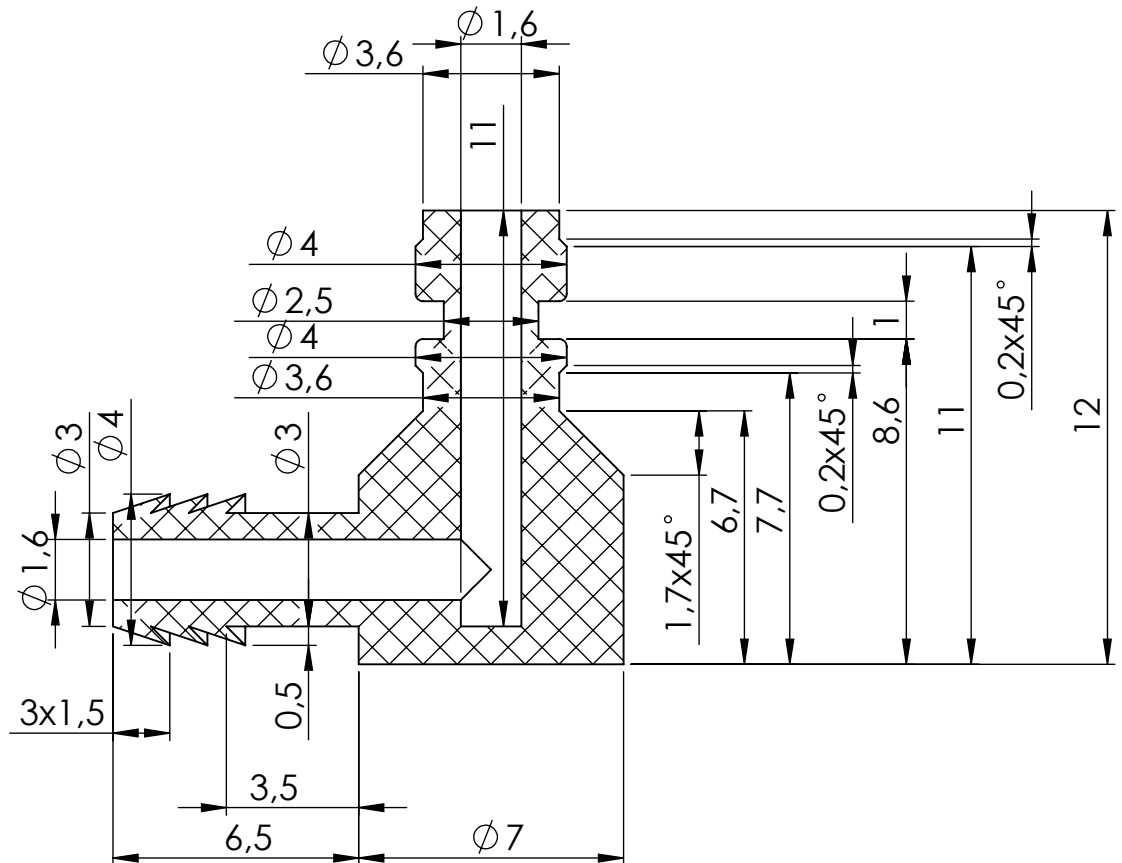
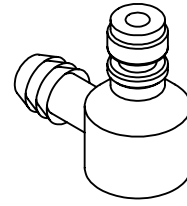
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
		Projektirao	Domagoj Uremović		
		Razradio	Domagoj Uremović		
		Crtao	17.11.2019. Domagoj Uremović		
		Pregledao			
		Mentor	Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:	
$\phi 7.98H8$	+0.014 0.0			R. N. broj:	
		Napomena:			Kopija
		Materijal: 6061-T6	Masa: 5,9 g		
		 Naziv: Kružni prsten sonde Mjerilo originala	Pozicija: 10		Format: A4
		2:1	Crtež broj: DU_DIPL_10		Listova: 19
					List: 10

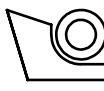
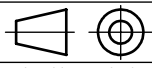
Design by CADLab



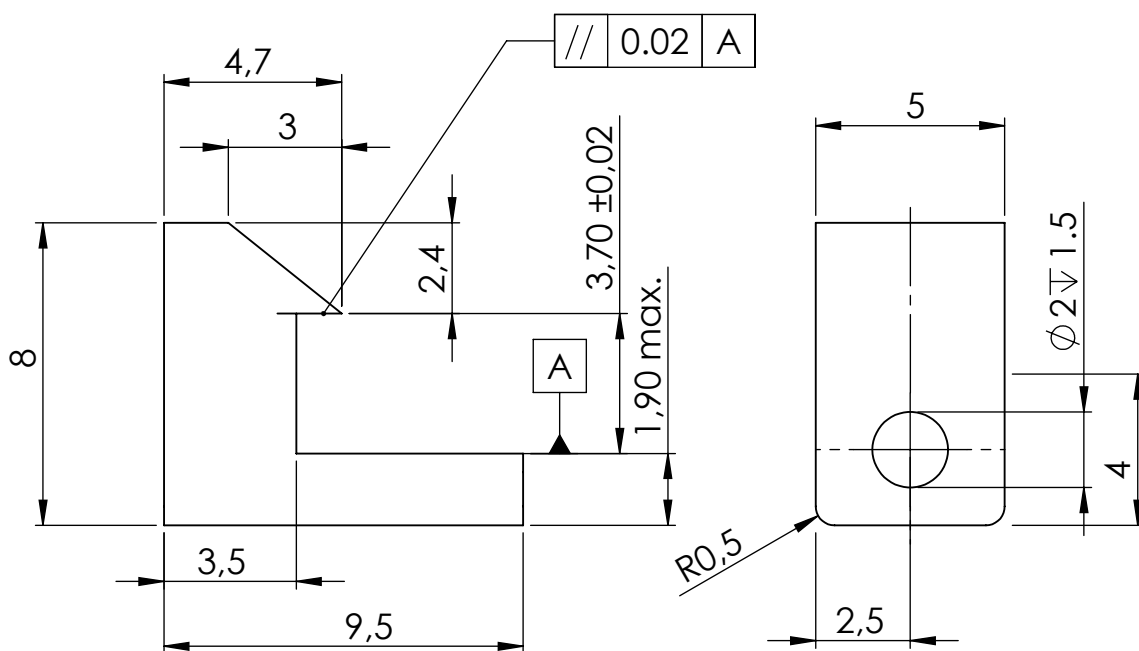
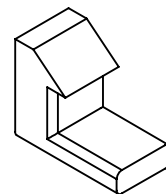
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
		Projektirao	Domagoj Uremović		
		Razradio	Domagoj Uremović		
		Crtao	17.11.2019. Domagoj Uremović		
		Pregledao			
		Mentor	Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:	
$\varnothing 2D9$	+0.045			R. N. broj:	
	+0.020				
$\varnothing 1.6D9$	+0.045	Napomena:			
	+0.020				
		Materijal: 6061-T6	Masa: 0,76 g		
		 Naziv:	Dvostruki koljeasti zglob		Pozicija:
		Mjerilo originala			11
		5:1	Crtež broj: DU_DIPL_11		Format: A4
					Listova: 19
					List: 11

Design by CADLab



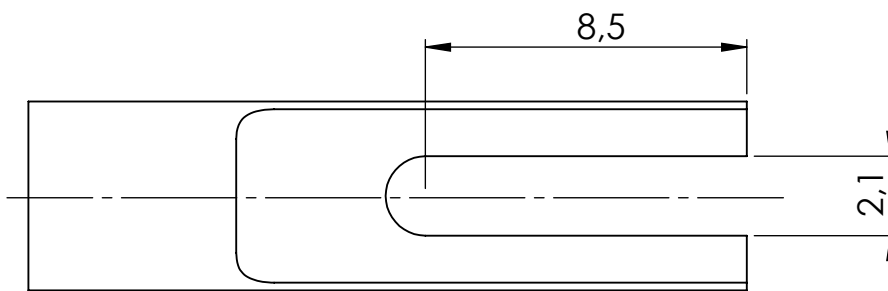
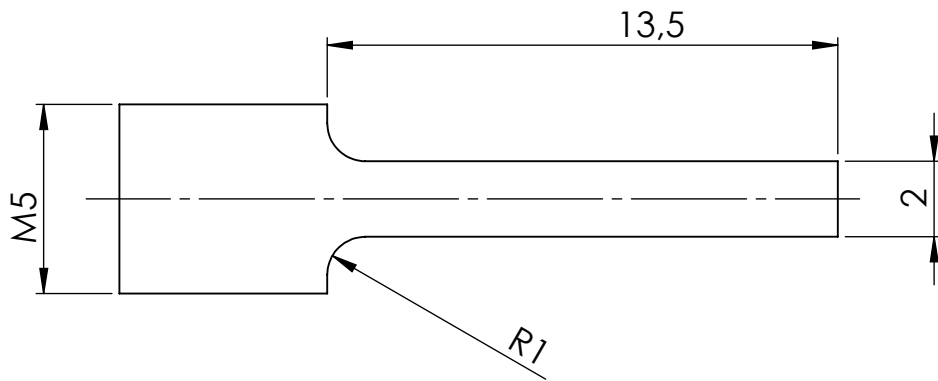
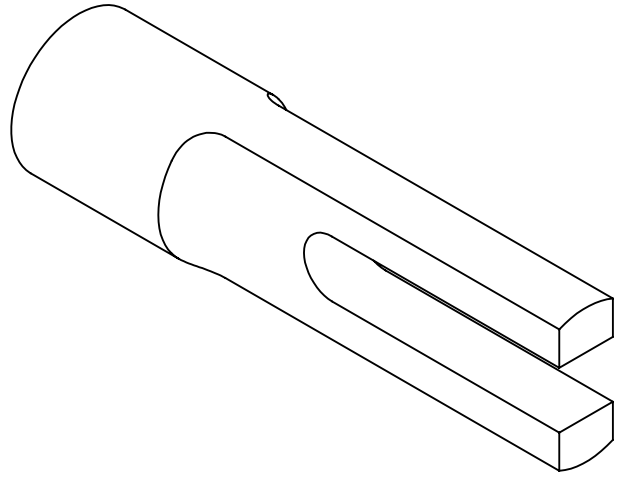
Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Razradio		Domagoj Uremović		
	Crtao	17.11.2019.	Domagoj Uremović		
	Pregledao				
	Mentor		Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije	Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena:				Kopija
	Materijal: ABS		Masa: 0,32 g		
	 Mjerilo originala	Naziv: Vakuum konektor sonde		Pozicija: 12	Format: A4
	5:1	Crtež broj: DU_DIPL_12			Listova: 19
					List: 12

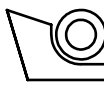
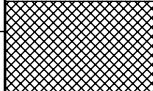

Design by CADLab



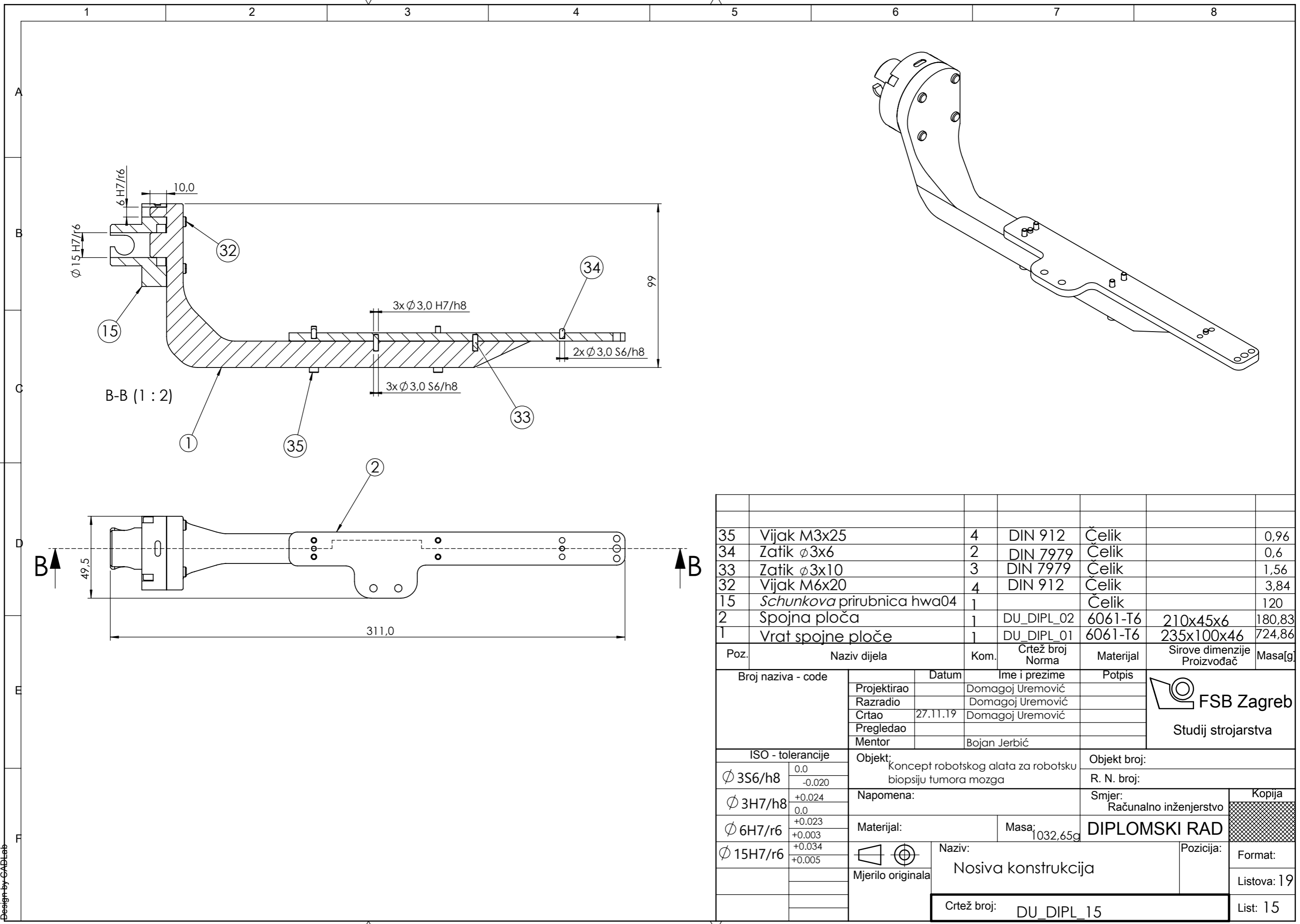
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Projektirao	Domagoj Uremović		
	Razradio	Domagoj Uremović		
	Crtao	17.11.2019. Domagoj Uremović		
	Pregledao			
Mentor	Bojan Jerbić			
ISO - tolerancije	Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:	
			R. N. broj:	
	Napomena:			Kopija
	Materijal: 6061-T6	Masa: 0,5 g		
	 Mjerilo originala	Naziv: Potisnik	Pozicija: 13	Format: A4
	5:1	Crtež broj: DU_DIPL_13		Listova: 19
				List: 13


Design by CADLab



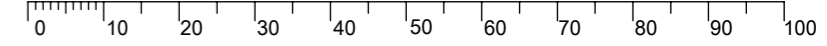
Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Razradio		Domagoj Uremović		
	Crtao	17.11.2019.	Domagoj Uremović		
	Pregledao				
	Mentor		Bojan Jerbić		
ISO - tolerancije	Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena:				Kopija
	Materijal: 6061-T6		Masa: 0,55 g		
	 	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Mjerilo originala	Spojni element kružnog prstena		14	Listova: 19
	5:1	Crtež broj: DU_DIPL_14			List: 14

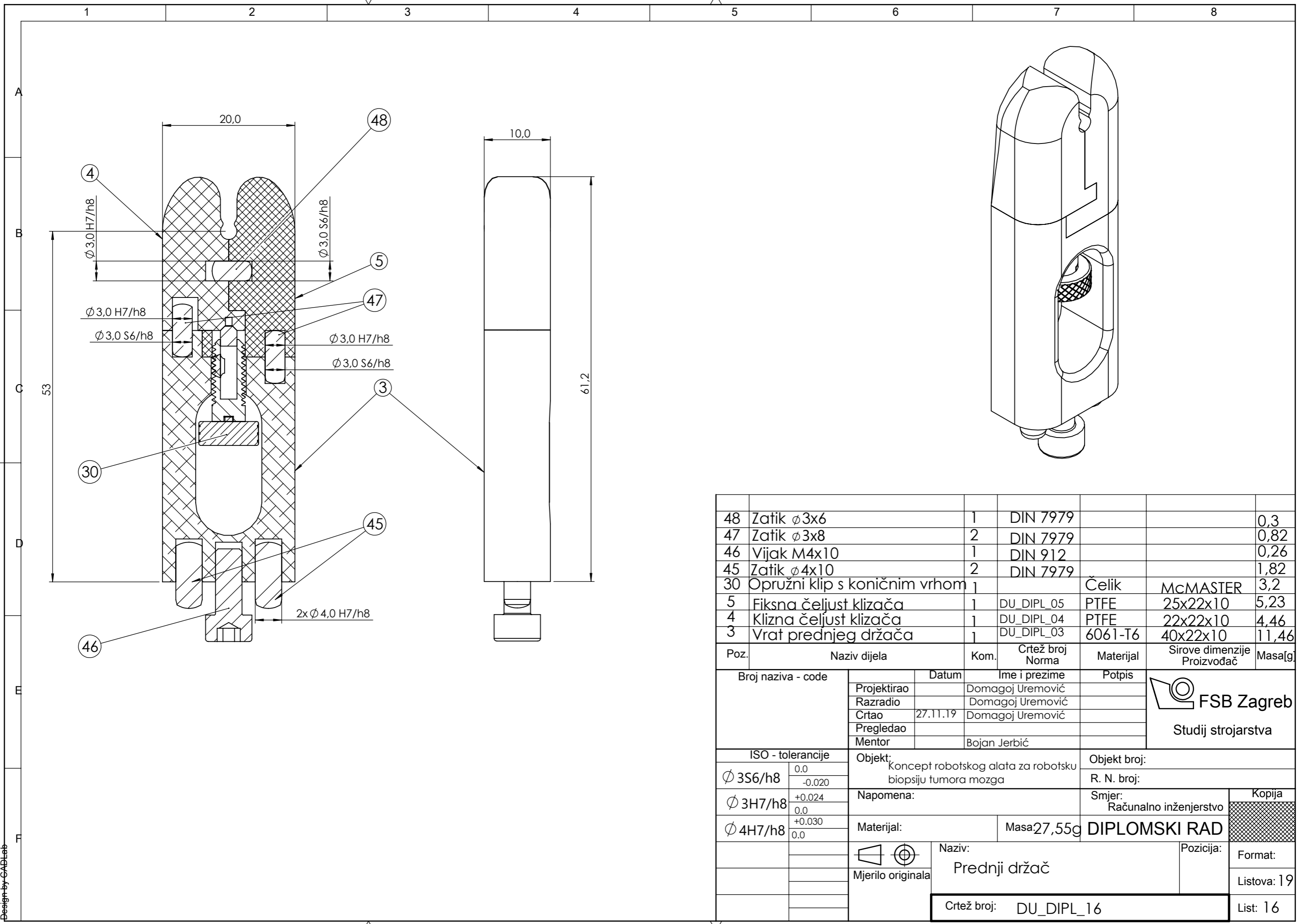
Design by CADLab



35	Vijak M3x25	4	DIN 912	Čelik		0,96
34	Zatik ϕ 3x6	2	DIN 7979	Čelik		0,6
33	Zatik ϕ 3x10	3	DIN 7979	Čelik		1,56
32	Vijak M6x20	4	DIN 912	Čelik		3,84
15	Schunkova pribubnica hwa04	1		Čelik		120
2	Spojna ploča	1	DU_DIPL_02	6061-T6	210x45x6	180,83
1	Vrat spojne ploče	1	DU_DIPL_01	6061-T6	235x100x46	724,86
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa[g]
Broj naziva - code		Datum		Ime i prezime		Potpis
Projektirao		Domagoj Uremović				 FSB Zagreb Studij strojarstva
Razradio		Domagoj Uremović				
Crtao		27.11.19		Domagoj Uremović		
Pregledao						
Mentor		Bojan Jerbić				
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
ϕ 3S6/h8	0,0 -0,020	Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		R. N. broj:		
ϕ 3H7/h8	+0,024 0,0	Napomena:		Smjer:		
ϕ 6H7/r6	+0,023 +0,003	Materijal:		Računalno inženjerstvo		
ϕ 15H7/r6	+0,034 +0,005	Masa: 1032,65g		Kopija		
Mjerilo originala		Naziv:		DIPLOMSKI RAD		
		Nosiva konstrukcija		Format:		
		Crtež broj: DU_DIPL_15		Listova: 19		
				List: 15		

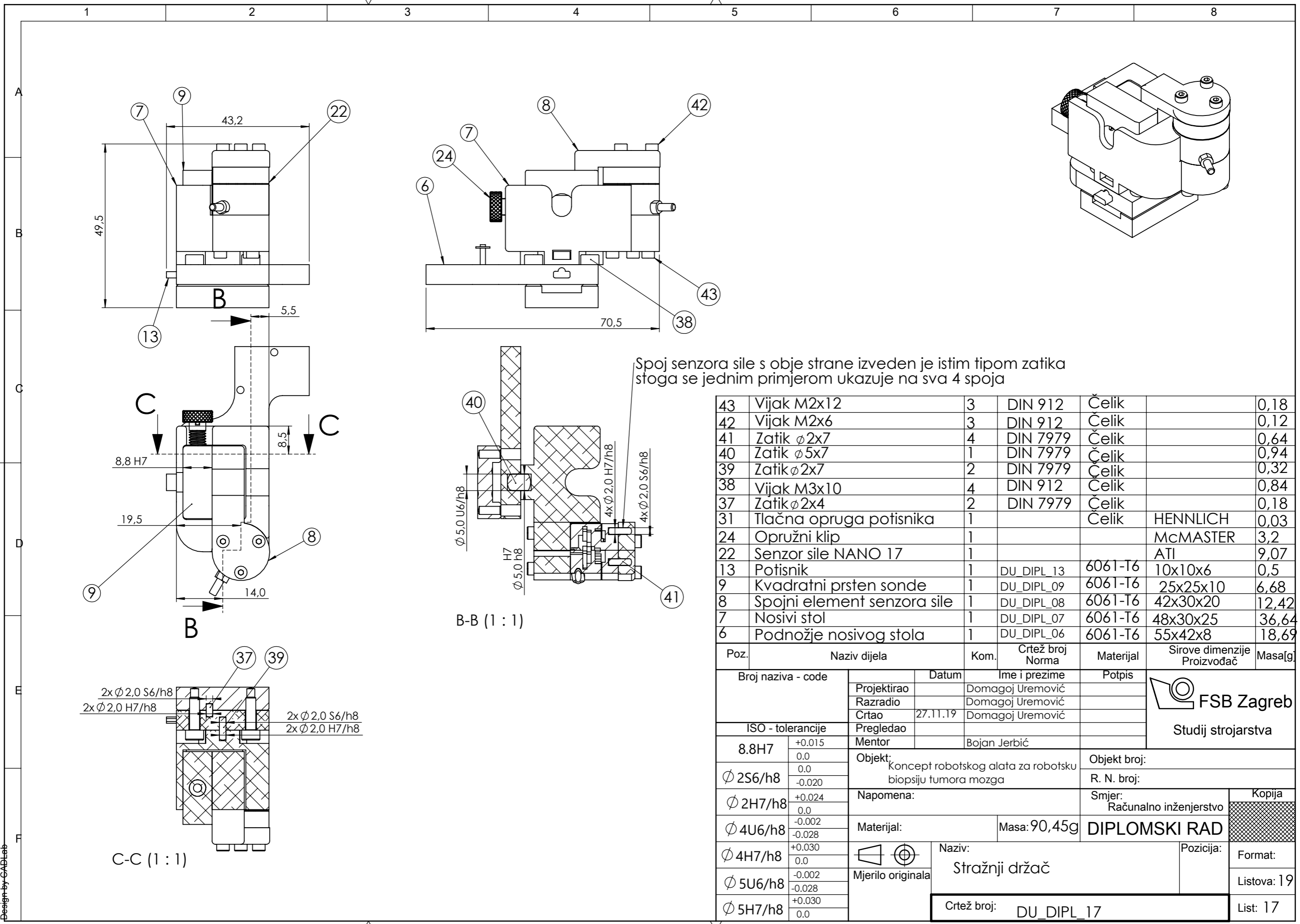
Design by CADLab





48	Zatik $\phi 3 \times 6$	1	DIN 7979			0,3
47	Zatik $\phi 3 \times 8$	2	DIN 7979			0,82
46	Vijak M4x10	1	DIN 912			0,26
45	Zatik $\phi 4 \times 10$	2	DIN 7979			1,82
30	Opružni klip s koničnim vrhom	1		Čelik	McMASTER	3,2
5	Fiksna čeljust klizača	1	DU_DIPL_05	PTFE	25x22x10	5,23
4	Klizna čeljust klizača	1	DU_DIPL_04	PTFE	22x22x10	4,46
3	Vrat prednjeg držača	1	DU_DIPL_03	6061-T6	40x22x10	11,46
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa[g]
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime		Potpis	
Projektirao			Domagoj Uremović			
Razradio			Domagoj Uremović			
Crtao		27.11.19	Domagoj Uremović			
Pregledao						
Mentor			Bojan Jerbić			
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:	
$\phi 3S6/h8$	0,0 -0,020	Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga			R. N. broj:	
$\phi 3H7/h8$	+0,024 0,0	Napomena:			Smjer: Računalno inženjerstvo	
$\phi 4H7/h8$	+0,030 0,0	Materijal:			Masa: 27,55g	
		Mjerilo originala			Naziv: Prednji držač	
					Pozicija:	
					Kopija	
					Format:	
					Listova: 19	
		Crtež broj: DU_DIPL_16			List: 16	

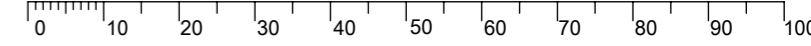
Design by CADLab



Spoj senzora sile s obje strane izveden je istim tipom zatika stoga se jednim primjerom ukazuje na sva 4 spoja

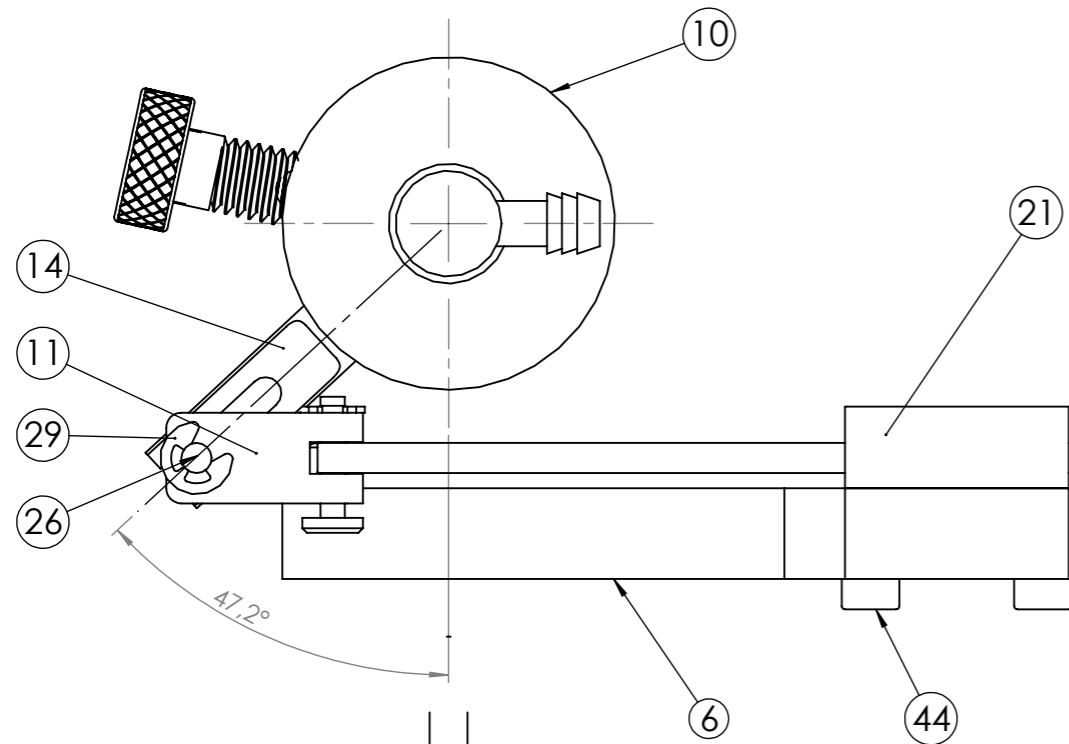
43	Vijak M2x12	3	DIN 912	Čelik		0,18
42	Vijak M2x6	3	DIN 912	Čelik		0,12
41	Zatik ø2x7	4	DIN 7979	Čelik		0,64
40	Zatik ø5x7	1	DIN 7979	Čelik		0,94
39	Zatik ø2x7	2	DIN 7979	Čelik		0,32
38	Vijak M3x10	4	DIN 912	Čelik		0,84
37	Zatik ø2x4	2	DIN 7979	Čelik		0,18
31	Tlačna opruga potisnika	1		Čelik	HENNLICH	0,03
24	Opružni klip	1			McMASTER	3,2
22	Senzor sile NANO 17	1			ATI	9,07
13	Potisnik	1	DU_DIPL_13	6061-T6	10x10x6	0,5
9	Kvadratni prsten sonde	1	DU_DIPL_09	6061-T6	25x25x10	6,68
8	Spojni element senzora sile	1	DU_DIPL_08	6061-T6	42x30x20	12,42
7	Nosivi stol	1	DU_DIPL_07	6061-T6	48x30x25	36,64
6	Podnožje nosivog stola	1	DU_DIPL_06	6061-T6	55x42x8	18,69

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa[g]
Broj naziva - code		Datum		Ime i prezime		Potpis
Projektirao				Domagoj Uremović		 FSB Zagreb Studij strojarstva
Razradio				Domagoj Uremović		
Crtao		27.11.19		Domagoj Uremović		
ISO - tolerancije		Pregledao				
8.8H7	+0.015 0.0 -0.020	Mentor		Bojan Jerbić		
Ø 2S6/h8	+0.024 0.0 -0.002 -0.028	Objekt:		Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:
Ø 2H7/h8		Napomena:				R. N. broj:
Ø 4U6/h8		Materijal:		Masa: 90,45g		Smjer: Računalno inženjerstvo
Ø 4H7/h8		Mjerilo originala		Naziv: Stražnji držač		Kopija
Ø 5U6/h8				Crtež broj: DU_DIPL_17		Format:
Ø 5H7/h8						Listova: 19
						List: 17

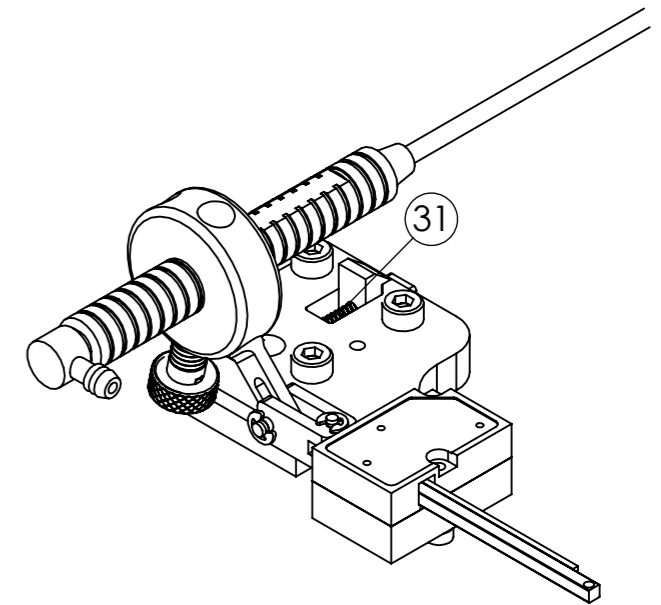
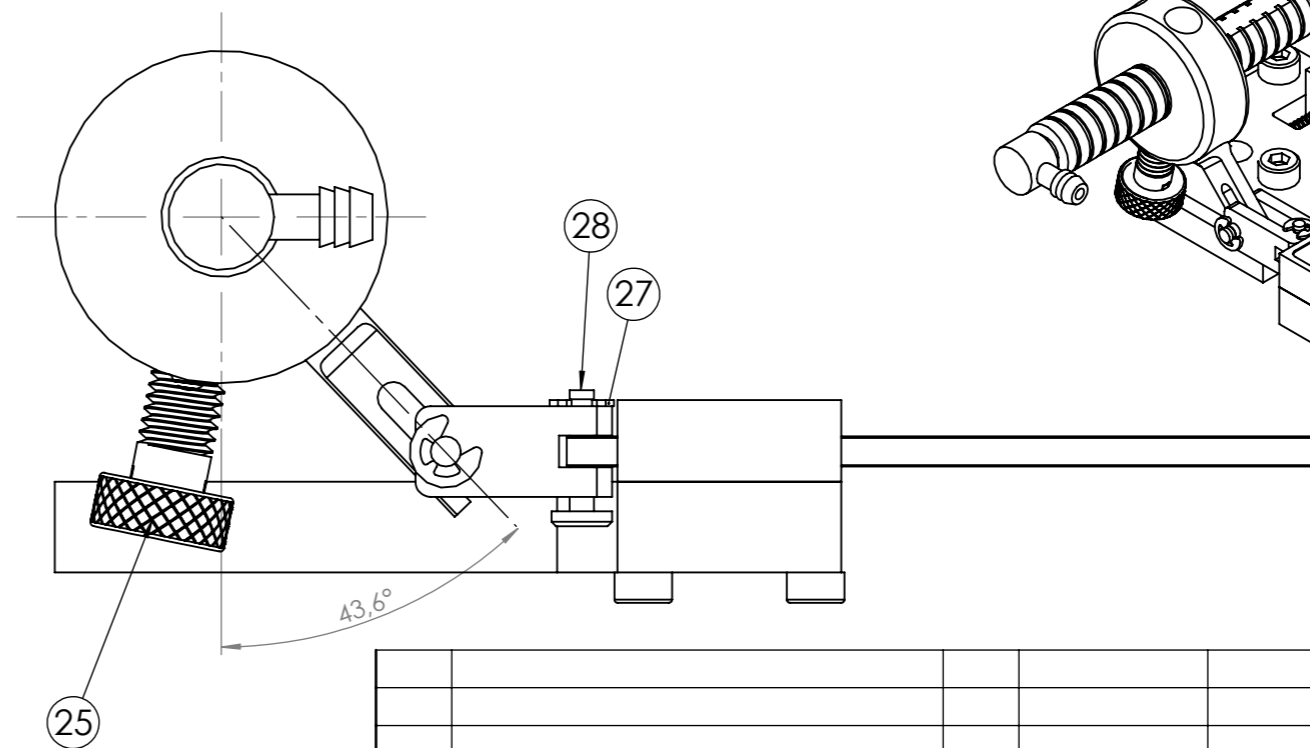


Design by CADLab

Inicijalna konfiguracija
s poravnanim bočnim otvorima sonde

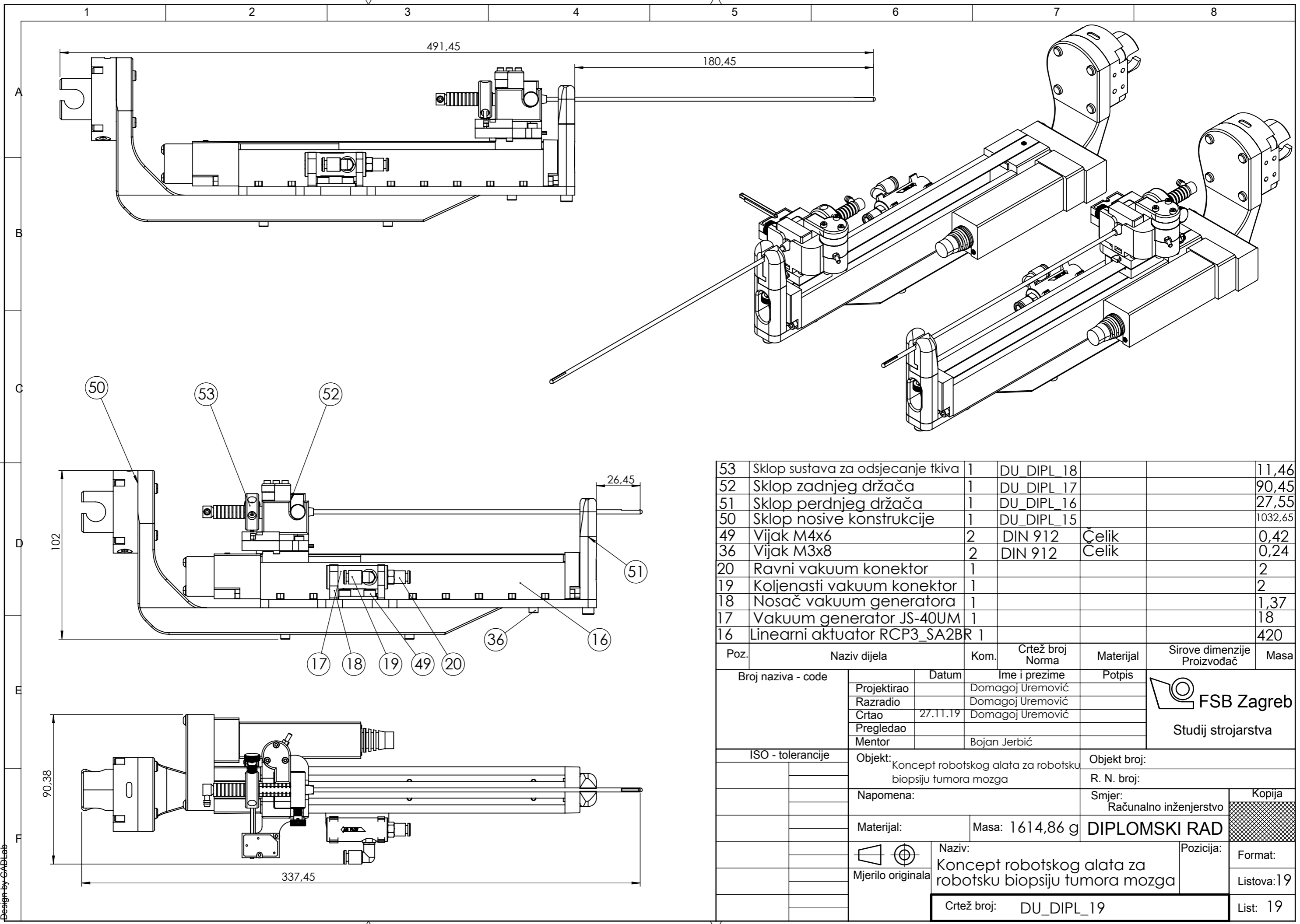


Završna konfiguracija
s otvorima sonde zakrenutim pod 90°



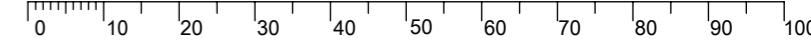
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa[g]
44	Vijak M2x8	2	DIN 912	Čelik		0,1
31	Tlačna opruga potisnika	1		Čelik	HENNLICH	0,03
29	Uskočnik svornjaka $\phi 2$	1	DIN 6799	Čelik		0,04
28	Svornjak $\phi 1,6 \times 8$	1	DIN 1436	Čelik		0,22
27	Uskočnik svornjaka $\phi 1,6$	1	DIN 6799	Čelik		0,03
26	Svornjak $\phi 2 \times 10$	1	DIN 1436	Čelik		0,31
25	Opružni klip	1		Čelik	McMASTER	3,2
14	Spojni element kružnog prstena	1	DU_DIPL_14	6061-T6	ATI	0,55
12	Vakuum konektor sonde	1	DU_DIPL_12	ABS	10x10x6	0,32
11	Dvostruki koljenasti zglob	1	DU_DIPL_11	6061-T6	25x25x10	0,76
10	Kružni prsten sonde	1	DU_DIPL_10	6061-T6	42x30x20	5,9
6	Podnožje nosivog stola	1	DU_DIPL_06	6061-T6	48x30x25	18,69

Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao		Domagoj Uremović	
Razradio		Domagoj Uremović	
Crtao	27.11.19	Domagoj Uremović	
ISO - tolerancije	Pregledao		
	Mentor	Bojan Jerbić	
Objekt:			Objekt broj:
Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga			R. N. broj:
Napomena:			Smjer:
			Računalno inženjerstvo
Materijal:			Masa: 11,46g
			DIPLOMSKI RAD
Naziv:			Pozicija:
Sustav za odsijecanje tkiva			
Crtež broj: DU_DIPL_18			Format:
			Listova: 19
			List: 18



53	Sklop sistema za odsjecanje tkiva	1	DU_DIPL_18			11,46
52	Sklop zadnjeg držača	1	DU_DIPL_17			90,45
51	Sklop prednjeg držača	1	DU_DIPL_16			27,55
50	Sklop nosive konstrukcije	1	DU_DIPL_15			1032,65
49	Vijak M4x6	2	DIN 912	Čelik		0,42
36	Vijak M3x8	2	DIN 912	Čelik		0,24
20	Ravni vakuum konektor	1				2
19	Koljenasti vakuum konektor	1				2
18	Nosač vakuum generatora	1				1,37
17	Vakuum generator JS-40UM	1				18
16	Linearni aktuator RCP3_SA2BR	1				420

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime		Potpis	
Projektirao			Domagoj Uremović			
Razradio			Domagoj Uremović			
Crtao		27.11.19	Domagoj Uremović			
Pregledao						
Mentor			Bojan Jerbić			
ISO - tolerancije		Objekt: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Objekt broj:		
				R. N. broj:		
		Napomena:		Smjer: Računalno inženjerstvo		Kopija
		Materijal:		Masa: 1614,86 g	DIPLOMSKI RAD	
		Naziv: Koncept robotskog alata za robotsku biopsiju tumora mozga		Pozicija:		Format:
		Mjerilo originala				Listova: 19
		Crtež broj: DU_DIPL_19				List: 19



Design by CADLab