

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Rasmus Soome

Robotvesiliuguri disain

Bakalaureusetöö (12 EAP)
Arvutitehnika eriala

Juhendaja:
Pehmerobootika dotsent Indrek Must

Tartu 2019

Resümee/Abstract

Robotvesiliuguri disain

Miniatuursed robotid pakuvad suurt huvi rakendamiseks päästetöödel, kuid ka riigikaitstes ning ehituses. Sentimeetriskaalas autonoomsete robotite tootmine on väljakutsuv ülesanne kaasaegse masinaehitustehnoloogia abil, kuid osutub oluliselt lihtsamini lahendatavaks tehislihaste abil. Tehislihased liigutavad kuju muutmise kaudu, sarnanedes sellega bioloogilistele lihastele ning võimaldavad disainida bioinspireeritud pehmeroboteid.

Selle bakalaureusetöö raames luuakse vee peal liikuva roboti disain, mis on inspireeritud vesiliugurist. Kasutatakse mitmeid tehnoloogiaid, mida pehmerobotite disainis varem kasutatud ei ole: roboti elektriskeem disainitakse painduvale trükkplaadile. See võimaldab trükkplaadi kasutamist tehislihaste kinnitusena. Töö raames valitakse tehislihased, mille elektroodis on katkestus ning mis on koolutatud, et võimaldada kahes teljes tehislihase liigutamist.

Märksõnad: putukamõõtmetes robot, tehislihas, vesiliugur, pehmerbootika

Design of a robotic water strider

Miniature robots are of great interest in the fields of rescue, military defense and construction. Manufacturing of centimeter scale autonomous robots is a challenging task using modern assembly technologies but is a lot simpler using artificial muscles. Artificial muscles move by changing their physical shape, which makes them similar to biological muscles and allow for design of bioinspired soft robots.

During this Bachelor's thesis a design for a robot that can move on water is made. The design is inspired by water strider. Many technologies are used that have not been used in soft robotics before: the electronics are designed on a flexible circuit board, which allows to use the structure of the circuit board to fasten the artificial muscles, the artificial muscles to be used in this design have a cut in their electrodes and are bent so they could be actuated in two dimensions.

Keywords: insect scale robot, artificial muscle, water strider, soft robotics

CERC: T125, T150, T170, T171

Sisukord

Resümee/Abstract.....	1
1. Sissejuhatus.....	4
2. Kirjanduse ülevaade.....	5
2.1 Bioinspireeritud robotid.....	5
2.2 Tehislihased täituritena robotikas.....	7
3 Töö eesmärk.....	9
4. Nõuded.....	10
5. Roboti disain.....	11
5.1 Kasutatavad tehislihased.....	12
5.2 Elektroonika.....	13
5.3 Trükkplaat.....	18
5.3.1 Programmeerimisühenduste disain.....	20
6. Tehislihase kinnitus- ja kontaktilahendus painduva trükkplaadi vahenditega.....	21
6.1 Kontaktilahendus tehislihasele.....	21
6.1.1 Jootmine läbi trükkplaadi.....	22
6.1.2 Jootmine kuuma õhuga.....	22
6.1.3 Jootmine madalatemperatuurse joodisega.....	23
6.1.4 Jootalade isoleerimine.....	23
6.2 3D kinnituslahendus.....	24
6.2.1 Kontakti- ja kinnituslahenduse verifitseerimine.....	24
6.3 Kontakti- ja kinnituslahenduse verifitseerimine polüpürrooltäituriga.....	27
6.3.1 Täituri kirjeldus.....	27
6.3.2 Esialgsete katsete tulemused.....	27
7. Kokkuvõte.....	28
Viited.....	29
Lisa 1: disainitud roboti elektroonikakomponentide nimekiri.....	31
Lisa 2: Esialgse disaini trükkplaadi pealne kiht.....	32
Lisa 3: Esialgse disaini trükkplaadi alumine kiht.....	33

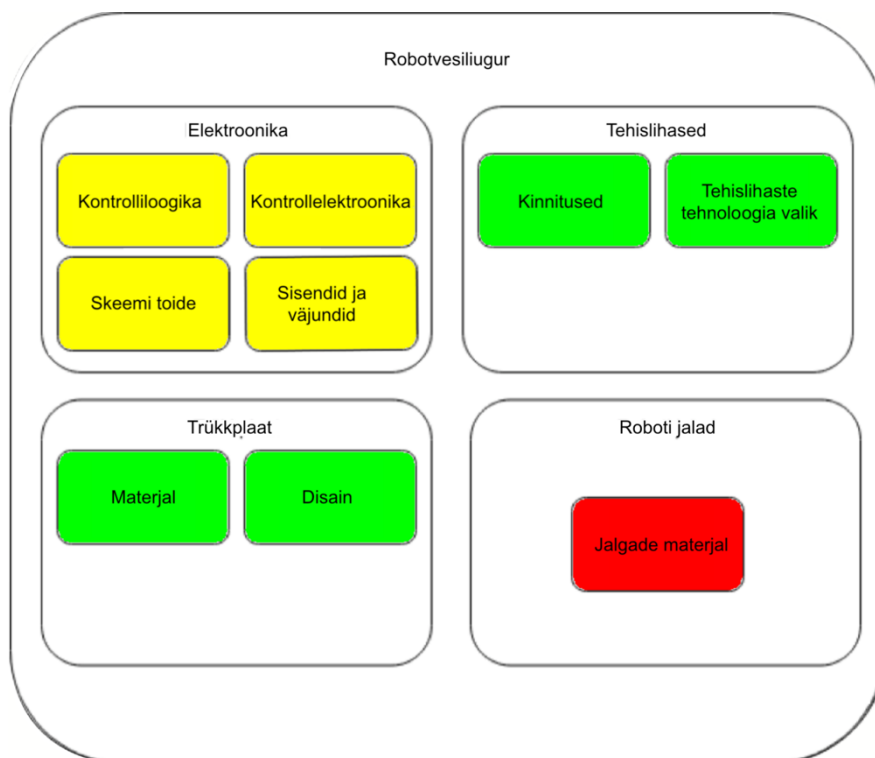
<i>Lisa 4: Järgmise versiooni disaini trükkplaadi pealmine kiht</i>	<i>34</i>
<i>Lisa 5: Järgmise versiooni disaini trükkplaadi alumine kiht</i>	<i>35</i>
<i>Lisa 6: Disainitud roboti elektroonikaskeem</i>	<i>36</i>
<i>Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks</i>	<i>37</i>

1. Sissejuhatus

Pehmerobotika (ingl *soft robotics*) on võrdlemisi uus ning arenev suund robotikas. Pehmerobotika põhielemendiks on robotitel kasutatavad tehislihased. Tehislihaste kasutamine võimaldab roboti füüsilised mõõtmed viia oluliselt väiksemaks kui teised täiturite tehnoloogiad. See lubab robotitel liikuda kitsamates oludes.

Väikeseid roboteid saab kasutada kitsastes kohtades liikumiseks. See võib olla vajalik ehitus-, pääste- ja militaarvaldkonnas. Pääste- ja militaarvaldkonnas näitab teema olulisust näiteks *The Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) korraldatud konkurs väikeste robotite välja töötamiseks: konkursi kirjelduses on öeldud järgmist: "Eesmärk on luua lühimaa mikro- ja millimeetri suuruses robotplatvormid, mis on võimelised täitma keerulisi ülesandeid katastroofi- ja hädaolukordade leevendamisel, kui ka koguma infot ohtlikes keskkondades, mis on suurematele robotitele ligipääsematud." [1].

Selle bakalaureusetöö raames kasutatakse ja arendatakse bioinspireeritud ja pehmerobotite tehnikaid, et disainida robotplatvorm, mis oleks võimeline liikuma vee peal. Töö käigus disainitakse trükkplaat ja elektroonikaskeem, katsetatakse disainilahenduste toimimist, kasutades selleks Georg Niidi



Joonis 1: Ülevaade robotvesiliuguri projektist; Rohelisega: Lahendust katsetatakse eksperimentaalselt antud töös; Kollasega: Disain luuakse, aga ei katsetata tööolukorras; Punasega: disain jääb järgmistesse etappidesse

poolt valmistatud polümeerrooltäiturit ning antakse soovitusid järgmiseks disainiversiooniks. Robotvesiliuguri disain on mahukas projekt ning antud töö on aluseks platvormi edasisele arendusele. Jooniselt 1 on näha ülevaade robotvesiliuguri projektist.

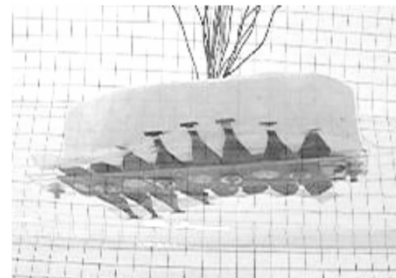
2. Kirjanduse ülevaade

2.1 Bioinspireeritud robotid

Bioinspireeritud robotite mõne disainiaspekti aluseks on mõni looduses leiduv organism. Otar Akanyeti jt. poolt avaldatud artiklis on öeldud: "Sellise lähenemise põhjuseks on uskumus, et evolutsiooni poolt välja töötatud lahendused on juba optimeeritud ning see lähenemine viib arenenumate tehnoloogiate ja sedamateni" [2]. Varasemalt on bioinspireeritud roboteid uuritud näiteks Tartu ülikoolis [3] [4], Tallinna Tehnikaülikoolis [2] ja mitmetes teistes ülikoolides [5] [6] [7].

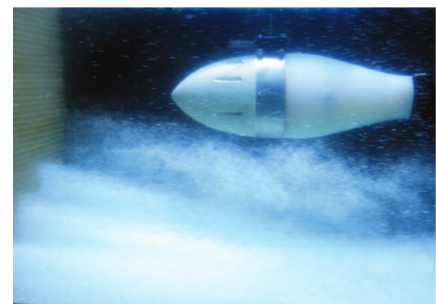
Järgnevalt antakse ülevaade erinevatest bioinspireeritud robotitest. Tuuakse erinevaid näited varem tehtud bioinspireeritud robotitest, näidates sellega bioinspireeritud lähenemise laiapõhjalisust ja ulatust.

Tartu Ülikoolis A. Punningu jt. poolt töötati välja raikalast inspireeritud robot. Robot kasutab liikumiseks rinnauimesid. Kummagil pool robotit on 8 rinnauime, mis on kontaktidega kinnitatud roboti orgaanilisest klaasist toodetud keha külge. Roboti juhtelektroonika on robotist eraldi ning juhtsignaalid saadetakse robotisse juhtmetega. [4]



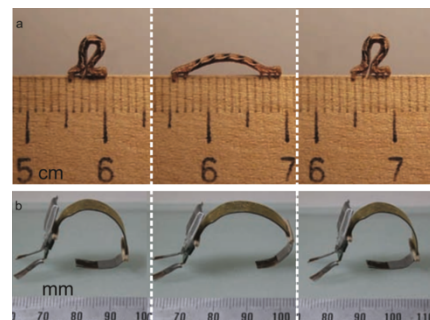
Joonis 2: Raikalast inspireeritud robot [4]

Otar Akanyeti jt. poolt välja töötatud FILOSE robot kasutab veevoolu selleks, et vees liikumisel vähem energiat kasutada. Sarnaselt kasutavad ka kalad veevoolu, et energiaefektiivsemalt liikuda. FILOSE on sensoritega võimeline tuvastama veevoolu suuna, ennast selles õigesti positsioneerima ning saba liigutamise sagedust muutes kasutama veevoolu ja vee turbulentsi edasiliikumiseks, kulutades liikumisele vähem energiat kui robotid, mis veevoolu liikumisel segavaks faktoriks peavad. [2]



Joonis 3: FILOSE robot [2]

Tartu Ülikoolis Indrek Musta jt. poolt välja töötatud bioinspireeritud roboti liikumistehnika jäljendab vaksiku liikumist. Robot koosneb tehislhasest, mis moodustab roboti keha, keha külge kinnitatud trükkplaadist ja akust. Selle roboti esi- ja tagaosas külge kinnitatud harjased põhjustavad kummagis otsas erinevat hõõrdumist ja see aitab vältida roboti kahe-suunalist liikumist. Liikumiseks robot kõige pealt painutab oma keha ning seejärel liigutab selle algasendisse tagasi. [3]



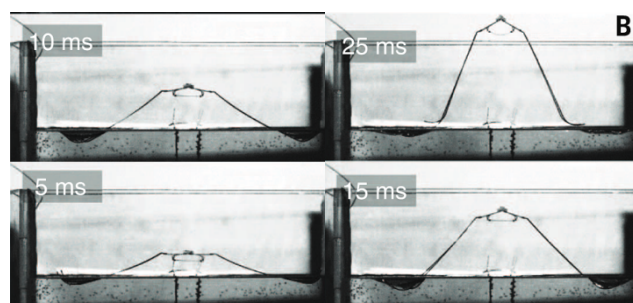
Joonis 4: Robotvaksik [3]

Paul Glicki jt. robotharaja nakkumismeetod on inspireeritud gekodest. Haraja kasutab haaramiseks vedelikelastomeertäiturit, õõnes elastomeerist struktuur, mille õõnsust survestatakse vedeliku või gaasiga. See tehnoloogia on osutunud kasulikuks seetõttu, et haraja on võimeline oma kuju muutma vastavalt haaratava eseme kujule. Samas on sellise hõõrdejõul tugineva täituri haardejõud piiratud täituri jäikuse, hõõrdekoefitsendi ja täituri võimega tekitada normaalisuunalist jõudu. Väike haardejõud vähendab sellise haraja võimekust taluda suuri kiirendusi, rippumisi või vibratsioone. Nende probleemide adresseerimiseks töötati välja materjal, mis nakkub *van der Waals*'i jõudude abil, samal põhimõttel suudab ka geko mööda seinasid liikuda. [5]



Joonis 5: Robotharaja hoidmas tassi [5]

Je-Sung Koh jt. poolt välja töötatud vee peal hüppava roboti hüppamismehhanism on inspireeritud vesiliuguri hüppamismeetodist. Robot kasutab bioinspireeritud katapultmehhanismi, mis on inspireeritud kirbust.



Joonis 6: Je-Sung Koh jt. robotvesiliugur hüppamas [8]

Katapultmehhanism on koostatud komposiitmaterjalidest ja kujumäluga sulamist täituritest. [8]

2.2 Tehislihased täituritena robotikas

Tehislihaseid kasutatakse robotikas seetõttu, et neid on võimalik toota väiksemas skaalas kui teisi täitureid. Erinevalt teistest täituritest, mis koosnevad erinevatest komponentidest, vajades seetõttu koostu, on tehislihas üks komponent ja see võimaldabki neid toota palju väiksemas skaalas kui teisi täitureid. Lisaks jälgendavad tehislihased lihaste liikumist, mis võimaldab bioinspireeritud roboteid toota väiksema keerukusega.

Tehislihaste tootmiseks on viimaste aastate jooksul välja töötatud erinevaid meetodeid ja tehnoloogiaid [9]. Tehislihaste tootmisel on kasutatud näiteks ioonseid mahtuvuslikke laminaate, ferroelektrilise polümeere kui ka elektromehaaniliselt aktiivseid geele.

Ferroelektrilised polümeerid on kristalsed polümeerid, mis on võimelised muutuma polaarse ja mittepolaarse oleku vahel. See võimaldab neil elektrivälja mõjul oma kuju muuta [9]. Selliste tehislihaste üheks suurimaks probleemiks on fakt, et kuju muutmiseks on vaja võrdlemisi tugevat elektrivälja [9]. See nõuab kõrget tööpinget, mis on tavaliselt mõnisada kuni mõnikümmend tuhat volti. Kõrgpingesüsteemid on võrdlemisi rasked ja suured [10]. Seega ei ole optimaalne ferroelektrilisi polümeere siinse töö raames kasutada.

Elektromehaaniliselt reageerivad geelid on senistest tehnoloogiatest võimelised oma ruumala kõige rohkem muutma. Nende toimimise põhimõte toimib vedeliku imamisel ja väljatõrjumisel [9]. Elektriliselt reageerivate geelide tehnoloogia eeldab, et robot liigub vedelas keskkonnas. Seetõttu ei sobi see tehnoloogia siinse bakalaureusetöö raames kasutamiseks, sest loodav robot liigub vedeliku pinnal, kasutades pindpinevust.

Ioonsed mahtuvuslikud laminaadid on polümeerid, mis muudavad elektrivälja rakendamisel oma kuju või suurust ja seetõttu on neid võimalik kasutada tehislihastena [9]. Ioonsed mahtuvuslikud laminaadid sobivad pehmerobotikas kasutamiseks, sest nende asendit saab kontrollida elektroodile salvestatava laenguga, sellised tehislihased töötavad pingega, mida annab välja ühelemendiline liitiumaku. See muudab kogu kasutatava elektroonika lihtsamaks ja efektiivsemaks: kaob vajadus lisaelektronika järele, mis pingevahemiku tehislihasele sobivaks muudaks, tehislihased saavad liigutamiseks vajaliku energia otse akult.

Varasemalt loodud ioonsed mahtvuslikud laminaadid on pehmerobotikas kasutamiseks olnud ebasobivad: täiturid, mille liikuvus võrdlemisi on hea, on vaevu võimelised iseendagi raskust edasi liigutama. Samas, jäigemad täiturid, mis suurema massiga objekte liigutada suudavad, ei ole piisavalt liikuvad [10]. Indrek Musta jt. tehtud täiturid on väga liikuvad ning suudavad lisaks robotile endale liigutada edasi ka lisamassi, mis on samas suurusjärgus roboti enda massiga [3].

Ioonne mahtvuslik laminaat on struktuuri ja aset leidvate füüsikaliste protsesside poolest superkondensaatoriga sarnane: kummalgi poolioonjuhtivat membraani on elektrod. Elektripinge rakendamisel elektrodide vahele migreeruvad membraanis sisalduvad mobilised ioonid elektrivälja toimel elektrodidele ning põhjustab laminaatse materjali paindumise, kus migreerunud (elektrodide pinnale liikunud) ioonide hulk määrab paindeulatuse. [10]. Kui kondensaatorite puhul püütakse kuju muutumise nähtust võimalikult palju vähendada, siis ioonsete mahtvuslike laminaatide puhul püütakse seda nähtust võimendada.

3 Töö eesmärk

Töö eesmärk on disainida lahendused, mis võimaldaksid toota vesiliuguri-sarnase roboti. Robot oleks võimeline vee peal liikuma. Töö käigus püütakse minimeerida roboti massi: selleks disainitakse robot, kasutades laias kasutuses olevat mikroelektroonikat ja ionseid tehislühaseid väiksemas suuruskaalas kui varasemalt demonstreeritud. Konkreetselt töötatakse välja tehniline lahendus painduva trükkplaadi rakendamine ionsete tehislühastega miniatuurse pehmeroboti struktuurse ja funktsionaalse komponendina. Vesiliugurist inspireerituna disainitakse lahendus mitteplanaarse tehislühase rakendamiseks kahes vabadusastmes liigutuse tekitamisel.

Roboti disaini saab kasutada alusplatvormina, et luua roboteid, mida saaks kasutada päästetöödel, kus ei ole võimalik liikuda vee all ning suuremate robotite kasutamine vee peal liikumiseks on kitsaste tingimuste tõttu välistatud. Selline väikese suurusega vee peal liikuv robot aitaks päästetöödel koguda olulist informatsiooni kriisiala tingimuste kohta. Lisaks leiaks robot kasutust ka militaarvaldkonnas: kui see ilma lähema uurimiseta looduses elavatele vesiliuguritele piisavalt sarnane on, saab seda kasutada luuramisel. Kolmandaks oleks taoline robot kasutatav ehituses näiteks torude seisukorra uurimisel.

4. Nõuded

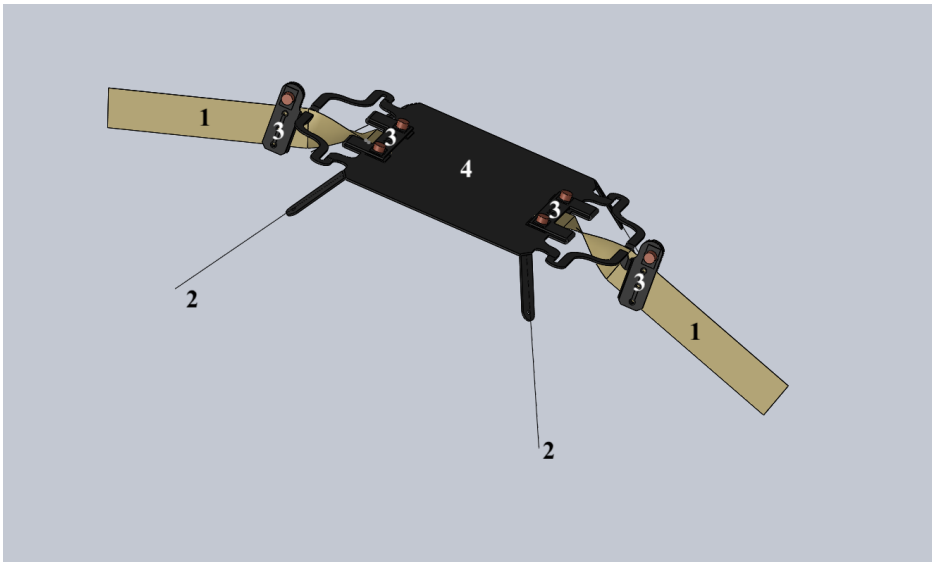
Kuna töö eesmärgiks on disainida robot, mis mõõtmelt, välimuselt on sarnane vesiliugurile ja mille liikumismehanism on vesiliuguri liikumismehanismist inspireeritud, seab see süsteemile üsnagi ranged piirangud. Roboti mass peab olema võimalikult väike, et minimeerida kokkupuutepind veega. See võimaldab robot välimuselt teha vesiliuguriga sarnaseks, võimaldades roboti panna vee peal seisma jalgadel. Lisaks peaks disainitava roboti keha pikkus olema lühem kui 25 mm, sest ka looduses elavate vesiliuguri kehapikkus on ligikaudu selline [11]. Sarnaselt vesiliugurile peab robotil olema kokku 6 jalga, millest kahte jalga kasutatakse aerutamiseks.

Roboti mõõtmed seavad omakorda piirangu elektroonika keerukusele: niivõrd väiksele trükkplaadile pole võimalik väga palju komponente mahutada ning komponendid peavad mõõtmelt ja kaalult võimalikult väikesed olema. Kusjuures ülimalt oluline on komponentide valik - kui mõõtmed liiga väikesed on, ei pruugi komponent vastata mõnele teisele disaininõudele. Roboti elektroonika ja trükkplaadi disainimisel kasutatakse juba turul levinud tehnoloogiaid ja komponente.

Disainitav robot peab olema võimeline liikuma autonoomselt ning kandma kaasas enda energiaallikat. Roboti väikeste mõõtmete ja massipiirangu tõttu ei saa kaasaskantava energiaallika mahutavus olla väga suur. Seega peavad valitud elektroonikakomponendid tarbima võimalikult vähe energiat ja elektriskeemi disainimisel tuleb disaini efektiivsust silmas pidada.

5. Roboti disain

Selles peatükis antakse kogu robotvesiliuguri disain, välja arvatud roboti jalad. Räägitakse tehislihaste valikust, elektroonika disainist ja trükkplaadi disainist. Disainitava roboti ülevaatlik 3D mudel on nähtav jooniselt 7.



Joonis 7: Robotvesiliuguri ülevaatlik 3D mudel. 1: Tehislihased; 2: Roboti jalad; 3: Tehislihaste kinnituse, 4: trükkplaat

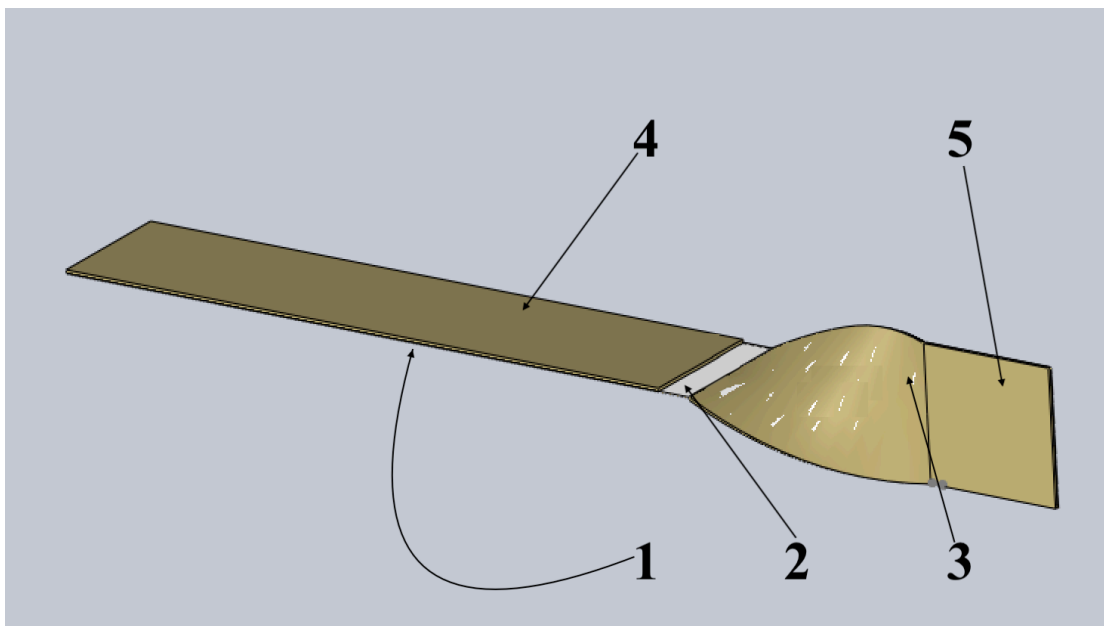
Töö raames valitakse nõuete rahuldamiseks sobivad täiturid ja täiturite roboti külge kinnitamiseks disainitakse uudne kinnituslahendus. Roboti juhtelektroonika disainimisel on arvestatud valitud tehislihaste tüübiga ning püütud hoida komponentide kogukaal võimalikult kerge. Lisaks pakutakse välja välismaailmaga suhtlemise lahendus.

Trükkplaadi mõõtmete aluseks on võetud kasutatava aku mõõtmed, sest aku on disainitava roboti suurim komponent. Trükkplaat toodetakse painduvast materjalist selle pärast, et seda saab voltida ning seega kasutada tehislihaste kinnituslahenduse osana, toimides nii elektroonikakomponentide kandjana kui tehislihase kinnitusena.

5.1 Kasutatavad tehislihased

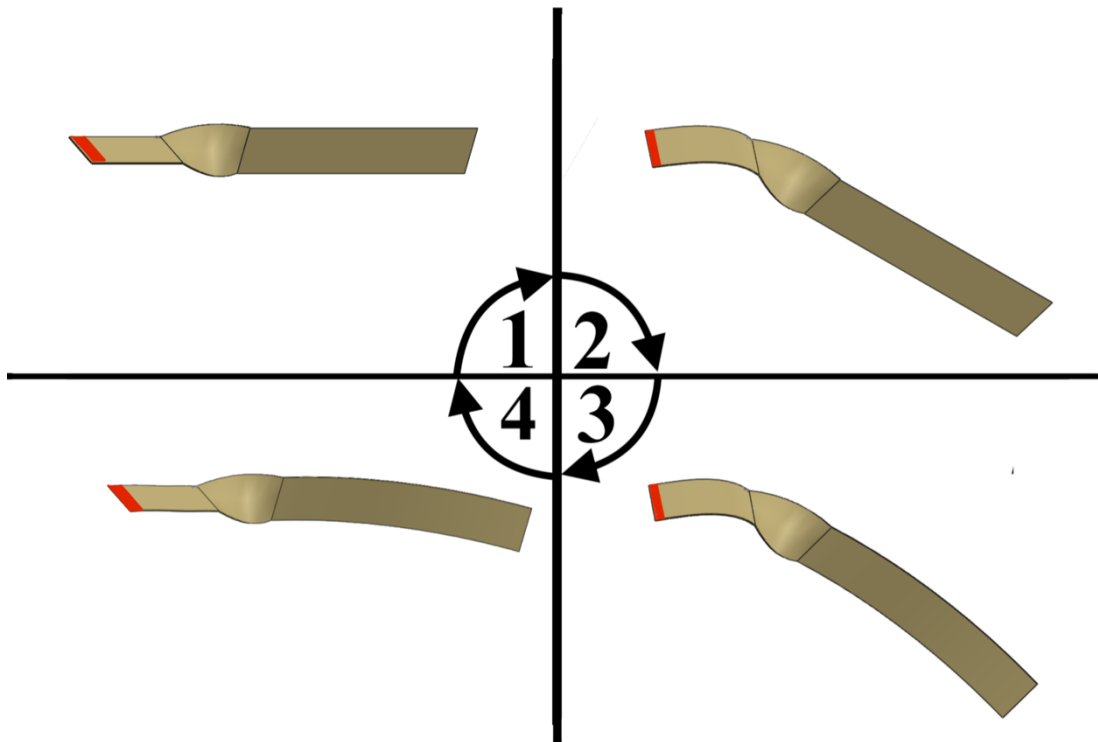
3. peatükis analüüsitud tehislihaste tehnoloogiatest siinse töö jaoks sobivaim ioonse mahtuvusliku laminaadi tehnoloogia, see on pehme laminaat, mis pinge rakendamisel paindub laadimisel elektrivooluga. Selline tehislihas on võrdlemisi lihtne ja efektiivne antud suuruskaalas.

Roboti disainis kasutatavad tehislihased toodetakse spetsiaalse kujuga: tehislihas on koolutatud nii, et see saab liikuda kahes teljes. Selleks, et kummaski teljes oleks võimalik tehislihast eraldi kontrollida, on ühel elektroodil erinevates telgedes liikuvate tehislihaste osade vahel elektrood jäetud peale kandmata, mis võimaldab kumbagi osa eraldi laadida (joonis 8). Teine elektrood on eri telgedes liikuvatel osadel ühtne.



Joonis 8: Disainis kasutatava tehislihase 3D mudel. 1: Vastaselektrood(teisel pool tehislihast); 2: Katkestus elektroodis; 3: Koold, mis keerab tehislihast 90 kraad; 4: Esimene elektrood; 5: Teine elektrood

Kummalgi küljel on robotil üks selline tehislihas. Lihase otsa on kinnitatud elektrit mittejuhtiv aer. See võimaldab robotil aerud vette lasta, ennast edasi tõugata, tehislihased veest välja tõsta ja need algasendisse tagasi liigutada (joonis 9). Selline liikumismehhanism on inspireeritud vesiliuguri liikumismehhanismist [12].



Joonis 9: Tehislihase liigutamise staadiumid. 1: Algasend, 2: Aer on lastud vette, 3: Robot on ennast edasi tõuganud, 4: Aer on veest välja tõstetud. Punasega on näidatud ala, mis roboti külge on fikseeritud.

5.2 Elektroonika

Robotvesiliiguri elektroonika on disainitud tehislihaste tehnoloogiast lähtuvalt. Kasutatavat ionset mahtuvuslikku laminaati saab laadida pingega, mis on üherakulise liitiumaku väljundpingega samas vahemikus: 3-4,2 V. Seetõttu kasutatakse selle töö raames loodavas roboti disainis liitiumakut (joonis 10). Aku mahutavuseks on 10 mAh ning see kaalub ligikaudu 300 mg.

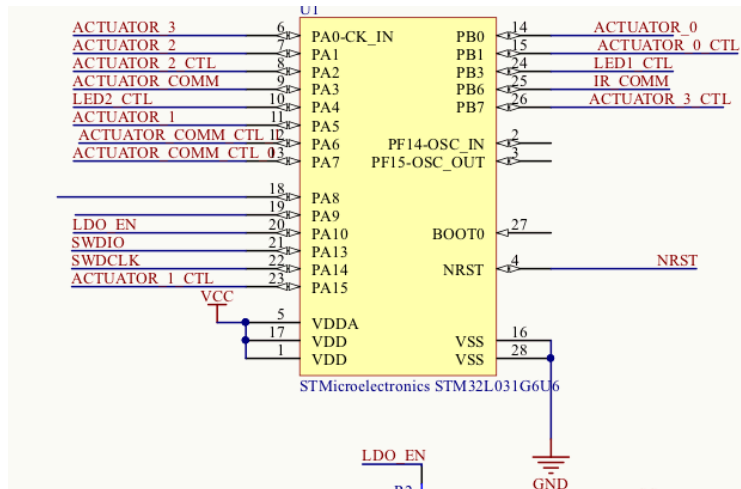


Joonis 10: Robotil kasutatav aku

Roboti juhtimisloogika implementeerimiseks

kasutatakse ARM Cortex M0+ (STM32L031G6) protsessorit. Sellel protsessoril on piisavalt sisendeid ja väljundeid, et vajalik funktsionaalsus saavutada [13], praeguses disainis on vaja 14 sisend-väljundit: 2 PWM väljundit

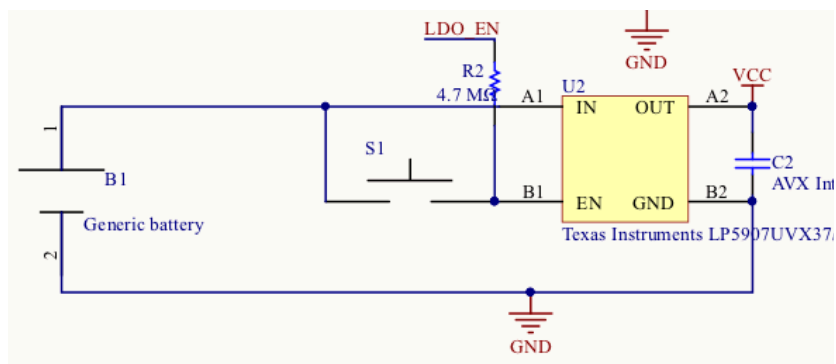
tehislihaste kokku ühendatud elektrodide laadimise kontrollimiseks, 4 digitaalväljundit ülejäänud elektrodide pinge määramiseks, 5 analoogsisendit tehislhastel oleva pinge mõõtmiseks, 1 analoogsisend infrapunatransistori signaali mõõtmiseks, 1 väljund infrapuna valgusdiodi kontrollimiseks ja 1 väljund valgusdiodi kontrollimiseks. Samas on valitud protsessoril piisavalt väikesed mõõtmed, et trükkplaadile ära mahtuda. Joonisel 11 on näha kasutatav mikroprotsessor elektriskeemis.



Joonis 11: Disainis kasutatav mikroprotsessor elektroonikaskeemis

Selles töös käsitletava disaini jaoks valitud mikroprotsessori maksimaalne tööpinge on 4 V [13], täis laetud liituimaku väljundpinge on ligikaudu 4,2 V.

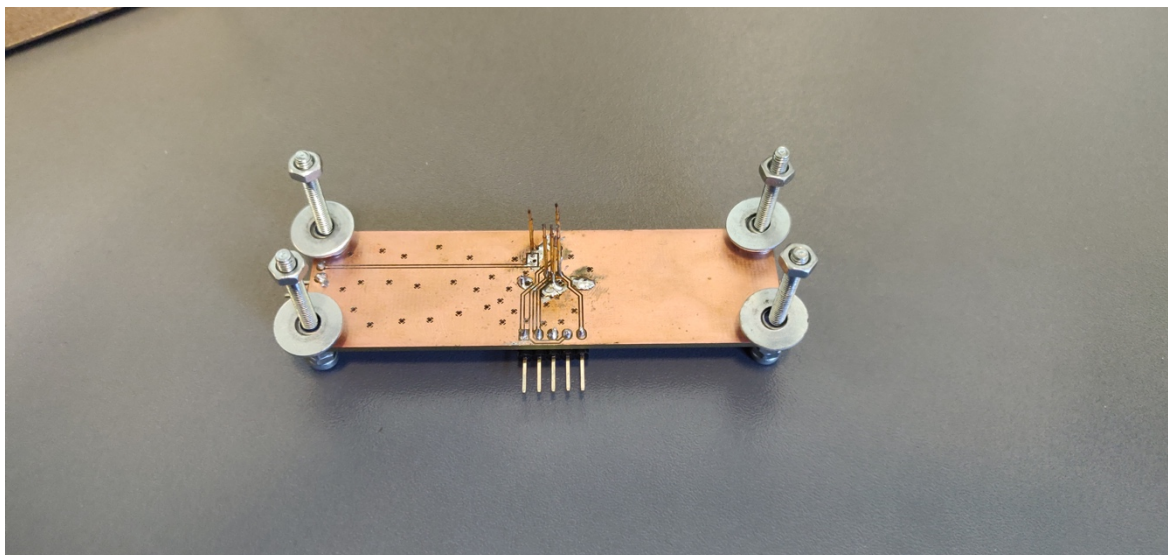
Seetõttu on



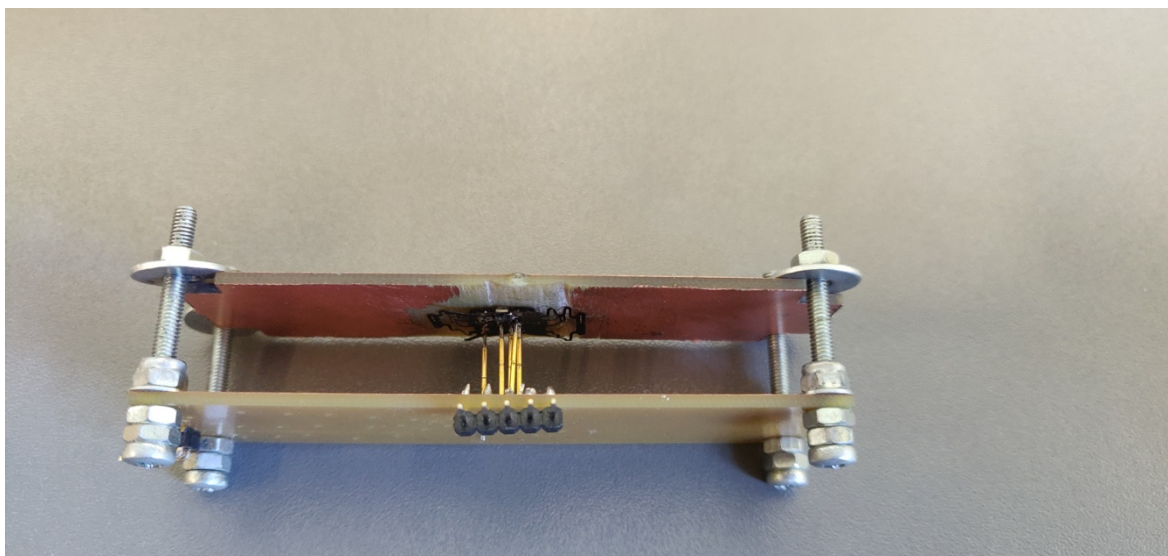
Joonis 12: Roboti toiteelektroonika elektroonikaskeem

elektriskeemi disainis kasutatud 3,7 V väljundpingega pingeregulaatorit(LP5907UUVX37). Selle pingeregulaatori väljundpinge oli disaini väljatöötamise hetkel nii väikese suurusega pingeregulaatoritest lähim protsessori maksimaalsele tööpingele. Selline valik suurendab süsteemi kasutegurit. Roboti toiteelektroonika skeem on näha joonisel 12.

Roboti programmeerimiseks on disainitud ja toodetud rakis (joonis 13, joonis 14), sest pistiku otse trükkplaadile ühendamise lisaks robotile massi. Robot paigutatakse programmeerimise ajaks rakisesse nii, et rakise vedrukontaktid oleks ühenduses vastavate kontaktidega trükkplaadil ning rakis ühendatakse prototüüpimisjuhtmetega ST-link programmeerimiskõlge. Selleks, et kõik kontaktid rakisega hea ühenduse saaksid, pannakse roboti peale surveplaat, mis mutritega paika fikseeritakse.

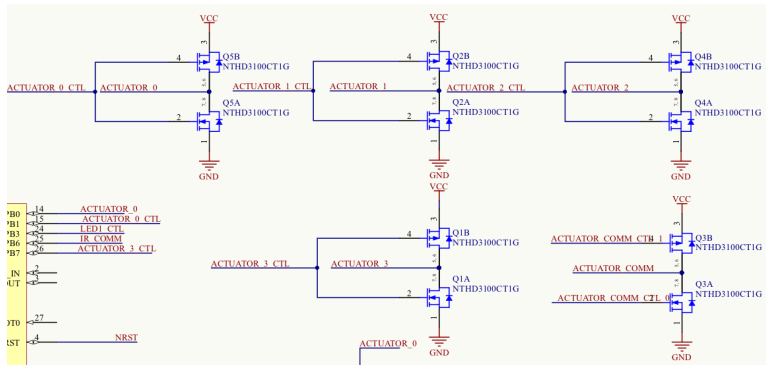


Joonis 13: Kasutatav programmeerimiskõlge



Joonis 14: Robotvesiliugur programmeerimiskõlges

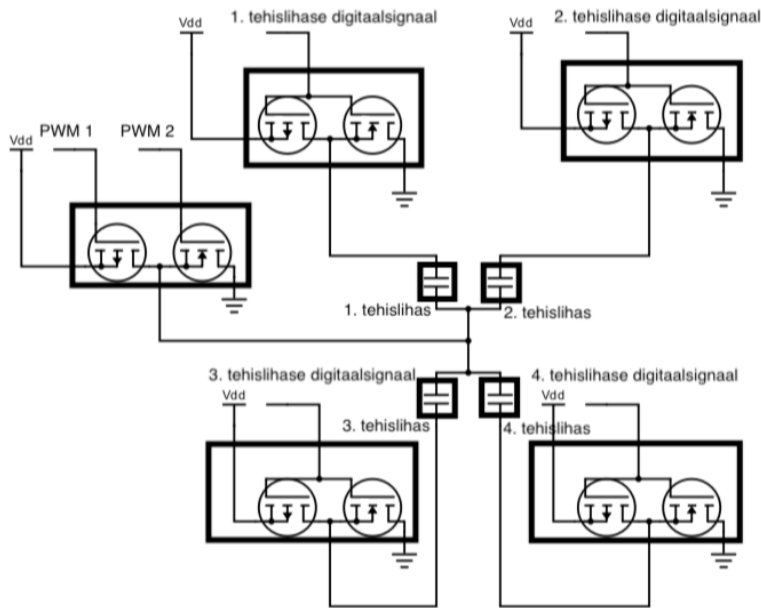
Tehislihast laetakse bipolaarselt ja laadimisvoolu reguleeritakse pulsilaiusmodulatsiooniga (PWM). Tehislihase mõlema polaarsusega laadimise võimekuse saavutamiseks on vajalik H-silla kasutamine.



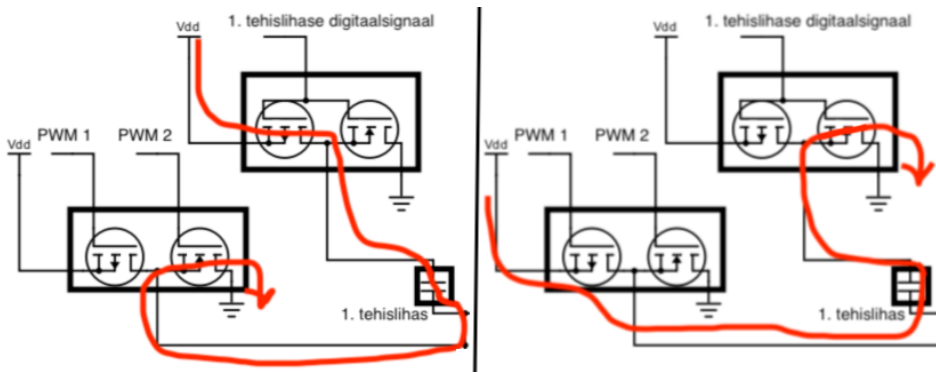
Joonis 15: Tehislihaste bipolaarse laadimise elektroonikaskeem

Selleks, et vähendada

tehislihaste kontrollimiseks vajalike ühenduste arvu, on tehislihased ühendatud sellises konfiguratsioonis, et kõigi nelja tehislihase üks elektroodidest on kokku ühendatud (joonis 16) ja tehislihaste laadimise polaarsust kontrollitakse H-poolsildadega (joonis 17). Joonisel 15 on näha bipolaarse laadimise elektroonikaskeem.



Joonis 16: Tehislihaste kontrollelektronika põhimõtteskeem, mahtuvuslikku tehislihast on skeemil kujutatud kondensaatorina

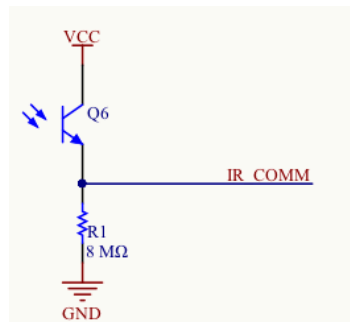


Joonis 17: Tehislihas bipolaarne laadimine. Punasega on tähistatud positiivse laengu liikumise suund.

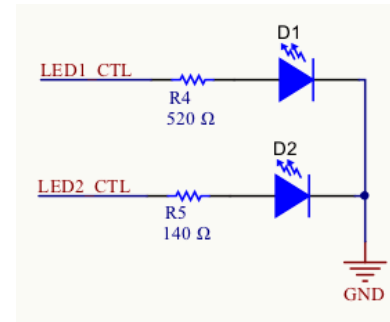
Ühendades tehislihased sellises konfiguratsioonis ning kasutades H-poolsildu on võimalik nelja tehislihas kontrollimiseks vajalike PWM-ühenduste arv viia neljalt kahele. Kokkuvõttes on sellise konfiguratsiooni juhtimiseks vaja kuut kontrollsignaali: iga tehislihas H-poolsilla juhtimiseks piisab ühest digitaalsignaalist ning tehislihas ühissiini H-poolsilla kontrollimiseks on vaja kahte PWM signaali.

Tehislihas elektrodid on ühendatud ka protsessori analoogpinge mõõtmise jalgade külge. See võimaldab teha programmirakenduse, millega saab mõõta elektroodidel olevat pinget ja sellega hinnata tehislihas asendit.

Välismaailmaga suhtlemiseks on disainis infrapunatransistor infrapunasiinade vastu võtmiseks ning infrapuna valgusdiod signaalide saatmiseks. Suhtlusprotokolli defineerimine toimub roboti tarkvaras. Lisaks on elektroonikaskeemi lisatud indikaatorvalgusdiodid.



Joonis 18: Infrapunatransistor elektroonikaskeemis



Joonis 19: Infrapuna valgusdiod (D1) ja indikaatorvalgusdiod (D2) elektroonikaskeemis

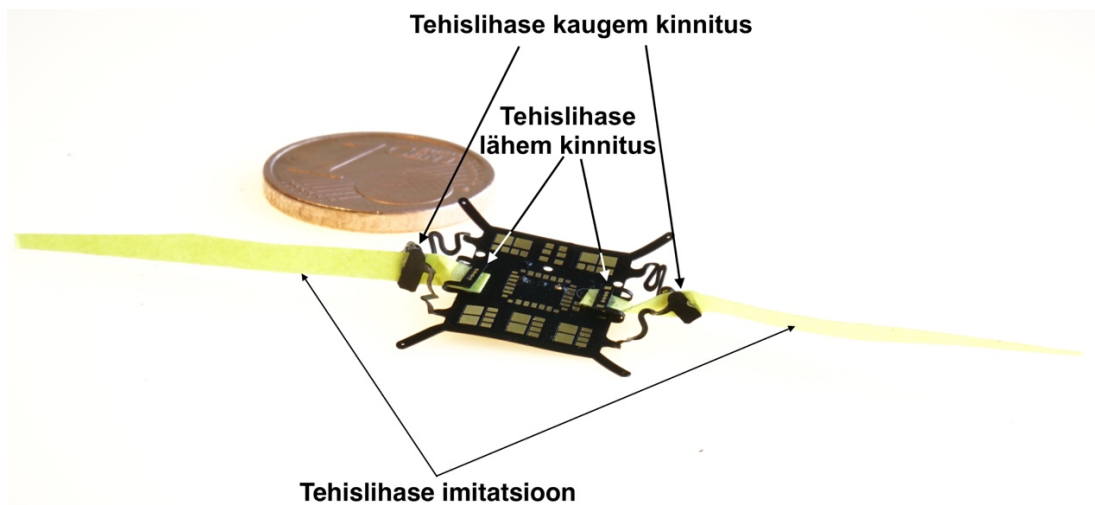
Infrapunatransistor elektroonikaskeemis on näha joonisel 18 ja kasutatavad valgusdiodid joonisel 19.

5.3 Trükkplaat

Trükkplaat toodetakse painduvast materjalist polüümiidalusele, trükkplaadi tootjaks on PCBWay (SHENZHEN JDB TECHNOLOGY CO.,LTD). See võimaldab trükkplaadist painutada kolmemõõtmelisi struktuure ruumis. Sellega tekib võimalus tehislhaste kinnituse ja kontaktilahendused disainida trükkplaadi osana. See võimaldab vähemate komponentide arvu tõttu roboti kogukaalu väiksemana hoida. Roboti trükkplaadi suurus on 14x10 mm. Selliste mõõtmete põhjuseks on see, et nii suur on ka robotil kasutatav aku, mis on mõõtmetelt roboti suurim komponent. Roboti trükkplaat on näha joonistel 20 ja 21.



Joonis 20: Roboti trükkplaat

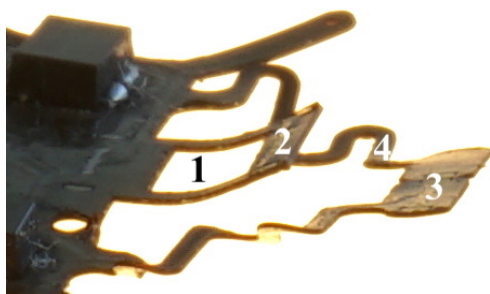


Joonis 21: Roboti trükkplaat sinna kinnitatud tehislhaste imitatsioonidega

Trükkplaat on disainitud nii, et seda saaks kasutada tehislühase kinnitusena komponente lisamata. Lähema tehislühase kinnitamiseks on trükkplaati lõigatud ava, millest tehislühaste niimoodi läbi pannakse, et tehislühase elektrood oleks vastu trükkplaadil olevat kontakti. Seejärel painutatakse trükkplaat tagasi, kontaktiga vastu tehislühase teist elektroodi. Kui tehislühase kinnitus paigas on, joodetakse see, kerges mehaanilises pinges, kinni. See võimaldab trükkplaadi elastsust tehislühasele sobivat kontaktsurvet hoida.

Kaugema tehislühase kinnitamine toimib võrdlemisi sarnaselt lähema tehislühase kinnitamisele, siiski on kinnituslahenduses mõned erinevused. Kaugem tehislühaste on võrreldes esimese tehislühase ja trükkplaadiga 90 kraadi (trükkplaadi tasandiga risti) pööratud ja tagumine kinnitus on vaja samale tasandile pöörata. Seetõttu on kaugem kinnitus ühendatud ülejäänud trükkplaadiga peenikese serpentiinina.

Serpentiinina disainitud lahendus võimaldab ka kaugema kinnituse asukohta muuta. Lisaks võimaldab serpentiinühenduse väike paindejäikus seda tehislühase abil trükkplaadi suhtes liigutada, mis on vajalik, et tehislühast vette lasta ja veest välja tõsta. Selline tehislühase ja painduva trükkplaadi funktsionaalne kooskasutus pehmerobotikas on uudne.



Joonis 23: Tehislühase kinnituse lähivõte. 1: Trükkplaadi lõigatud ava, millest tehislühaste läbi pannakse, 2: Tehislühase kinnitus, mis tehislühaste peale painutatakse ja kinni joodetakse, 3: Kaugem tehislühase kinnitus, 4: Serpentiinühendus



Joonis 22: Tehislühase kinnituse lähivõte painutatud asendis

5.3.1 Programmeerimisühenduste disain

Roboti programmeerimine käib üle SWD (serial wire debug), seetõttu on plaadile välja toodud vajalikud ühendused: 3.3V, GND, SWDIO, SWCLK ja NRST. Pistiku kasutamine programmeerimisühenduse loomiseks suurendaks roboti massi, seega on programmeerimisühendused disainitud trükkplaadi osana.

Esialgses disainis olid ühendused välja toodud 0,2 mm läbimõõduga puuravadesse. Nii väikeste kontaktide puhul osutus aga roboti programmeerimiseks rakisesse asetamine väga keerukaks ja aeganõudvaks tegevuseks.

Seetõttu on järgmises trükkplaadi disaini versioonis soovitatud teha programmeerimisliidese ühendused oluliselt suuremate jootepatjadena. Suuremad ühendused on ära proovitud esimesel prototüübil, kus joodeti puuritud kontaktide külge juhtmekiu tükid, et programmeerimisliidese pindala oluliselt suurendada. See lihtsustas oluliselt roboti rakisesse asetamist.

6. Tehislihase kinnitus- ja kontaktilahendus painduva trükkplaadi vahenditega

Selles peatükis kirjeldatakse roboti tehislihaste kinnitus- ja kontaktilahendust. Seejärel antakse ülevaade prototüüplaadi ja ioonse tehislihasega tehtud katsest verifitseerimaks disainitud lahendusi. Lõpuks analüüsitakse katsetulemusi ning tehakse roboti järgmise versiooni disainiks ettepanekud.

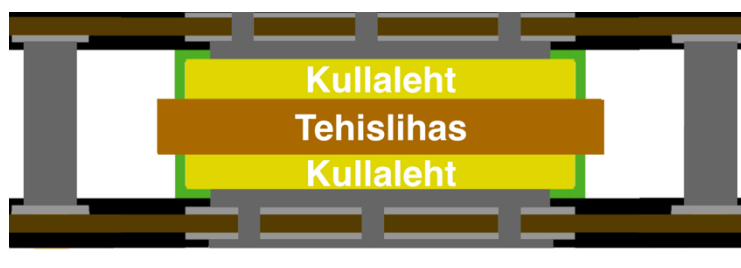
6.1 Kontaktilahendus tehislihasele

Selle töö raames disainitaval robotil kasutatavatest tehislihastest võib lekkida elektrolüüti (näiteks ioonvedelikku), mis söövitab vaske ja tina. Seetõttu on vaja lahendust, millega trükkplaadi kontakte ja joodist elektrolüüdi eest kaitsta. Tehislihasega kokku puutuv elektriline kontakt peab olema inertsest materjalist (väärismetallid). Lisaks, elektrolüüt migreerub mööda väärismetallist elektroodi pinda ja joodiseni jõudes korrodeerib seda. Seega on vaja trükkplaadi ja inertse materjali vahelist ühendust kaitsta.

Selle probleemi lahendamiseks kasutatakse selle töö raames õhukest kullalehte, mis trükkplaadile joodetakse. Joodetud kullalehe äärtele kantakse liimi, mis tagab, et elektrolüüt joodiseni ei imbuks (joonis 24, joonis 25). Kullalehe trükkplaadile kinnitamise erinevatest lahendustest räägitakse järgnevas alapeatükides.

6.1.1 Jootmine läbi trükkplaadi

Disainitud trükkplaadil on iga tehislühase kontakt mõlemal pool trükkplaati ning kontaktist on läbi puuritud avad. Selline valik disainis võimaldab kullalehti läbi plaadi joota, jootes kontakti peale joodise, asetades kullalehe kontakti peale ja seejärel kontakti teiselt poolt kuumutades. Esialgu kasutati jootmiseks



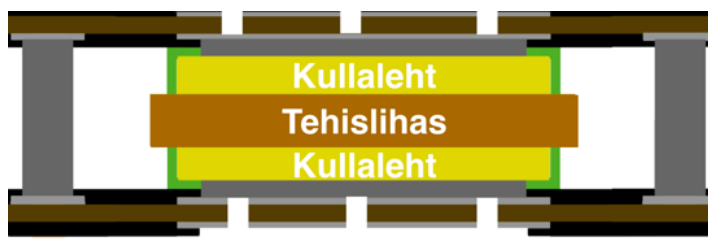
Trükkplaadi jootemask
Joodis
Jootepadi
Kaitsev jootemask
Polümiid

Joonis 24: Kontaktilahenduse läbilõige läbi trükkplaadi joodetud kullalehega

60%Sn/40%Pb jootetina. Toodetud esimesel prototüübil sellist jootmistehnikat kasutades selgus, et see on liialt keeruline: jootmise ajal nihkub tihtipeale kullaleht paigast ning joodise sulamistemperatuuril võib kuld joodise sisse ära lahustuda.

6.1.2 Jootmine kuuma õhuga

Kuuma õhuga jootes on kullalehte oluliselt lihtsam paigas hoida. Kuuma õhuga on võimalik kullaleht kiiremini paika ja trükkplaadi kontakti külge kinni saada. Siiski oli kasutatud joodise sulamistemperatuur nii kõrge, et pikemal kuumutamisel lahustus kuld joodise sisse. Samas, liiga



Trükkplaadi jootemask
Joodis
Jootepadi
Kaitsev jootemask
Polümiid

Joonis 25: Kuuma õhuga joodetud kontaktilahenduse läbilõige

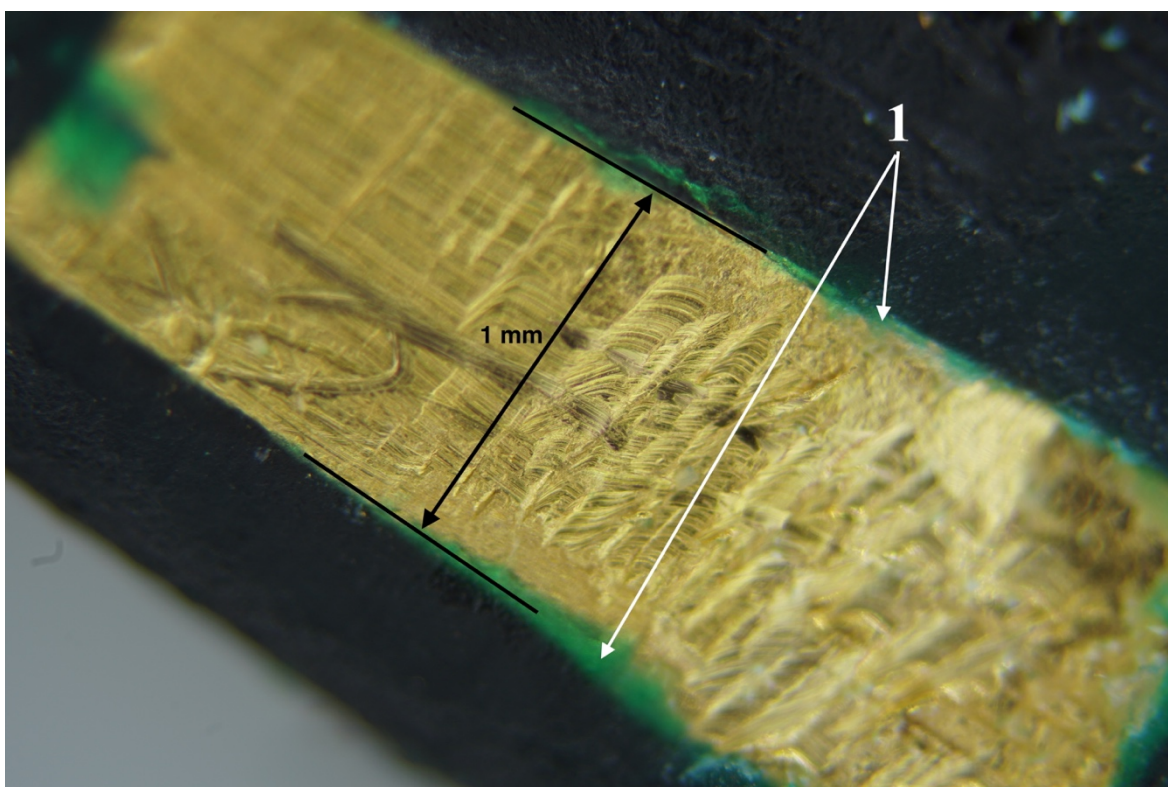
lühikesel kuumutamisel ei sulanud kogu joodis ära ja kontakt jäi mehhaaniliselt nõrgaks.

6.1.3 Jootmine madalatemperatuurse joodisega

Suurimaks probleemiks eelnevate meetoditega oli kulla lahustumine joodises liiga kõrge jootmistemperatuuri tõttu. Seetõttu kasutatakse selle töö raames disainitud roboti kuldkontaktide jootmiseks 97° C sulamistemperatuuriga joodist. Joodis kantakse trükkplaadil olevatele kontaktidele, pannakse kullaleht paika ning kuumutatakse kullalehte. Sellise jootmistehnikaga sulab kogu joodis ning ühendus jääb mehhaaniliselt piisavalt tugev.

6.1.4 Jootealade isoleerimine

Joodetav kullaleht ei suuda siiski trükkplaadi jootepatja tehislhasest lekkivast elektrolüüdist täielikult isoleerida. Selle disaini raames kasutatakse jootepatjade isoleerimiseks UV-kivistuvat jootemaski. Jootemaski kaitsev põhimõte on nähtav kontaktilahenduste joonistelt (joonis 26 ja joonis 24).



Joonis 26: Plaadile joodetud ja jootemaskiga isoleeritud kullaleht. 1: Kullalehe äärtele kantud jootemask

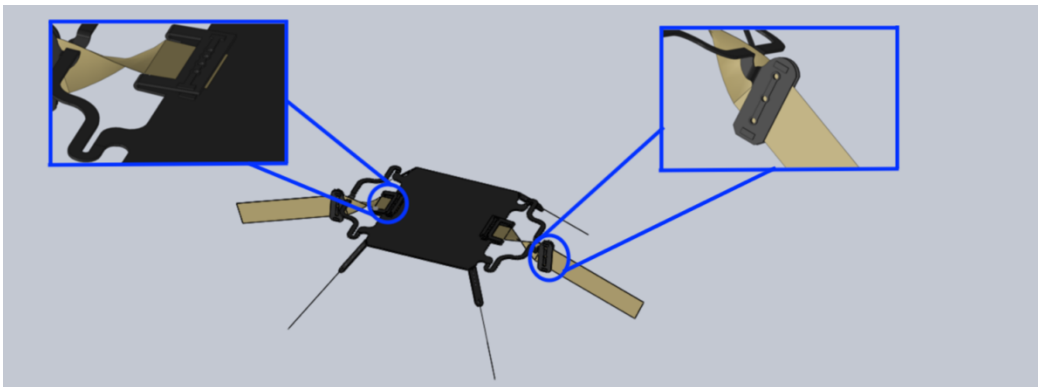
6.2 3D kinnituslahendus

6.2.1 Kontakti- ja kinnituslahenduse verifitseerimine

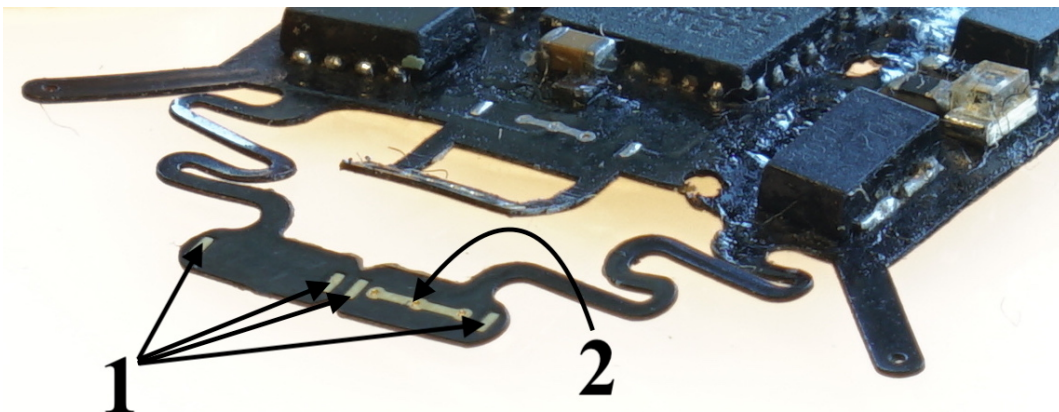
Toodetud prototüüptrükkplaati kasutati disainitud kinnituslahenduse verifitseerimiseks. Selle käigus leiti, et trükkplaati painutades on võimalik saavutada kontakt trükkplaadi ja tehislühase vahel. Lisaks selgus, et disainitud serpentiinühendused võimaldavad reguleerida kaugema tehislühase kinnituse asukohta.

Verifitseerimise käigus ilmnisid mõned puudused, mida järgnevalt analüüsitakse ning tehakse muudatusettepanekud.

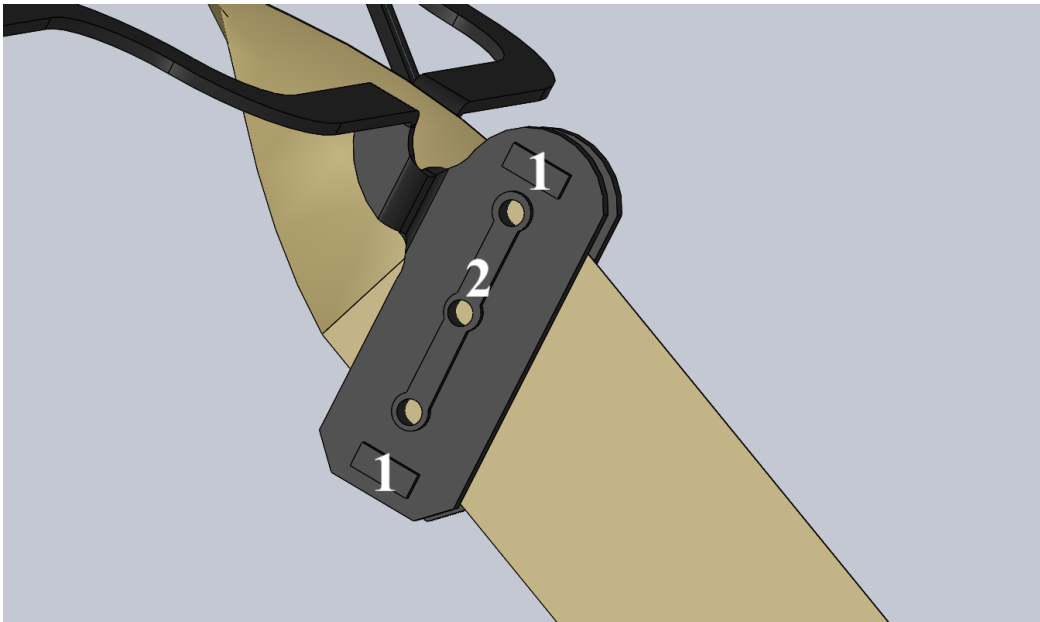
Esialgse disaini (joonis 27) olid jootepadjad (joonis 29 ja joonis 30) liialt väiksed: need ei pidanud mehhaanilisele pingele vastu ja tulid seetõttu trükkplaadi küljest liiga kergesti lahti.



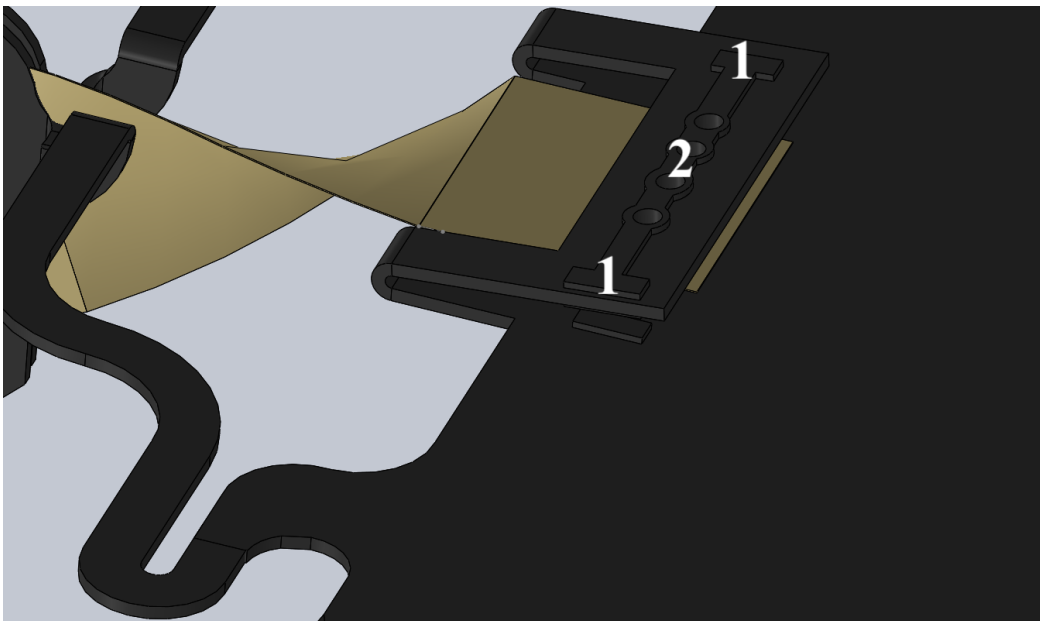
Joonis 27: Roboti esialgse disaini 3D mudel



Joonis 28: Tehislühaste kinnitused kinnitamata olekus. 1: Kinnituse jootepadjad, 2: Trükkplaadi ja tehislühase kontaktiala

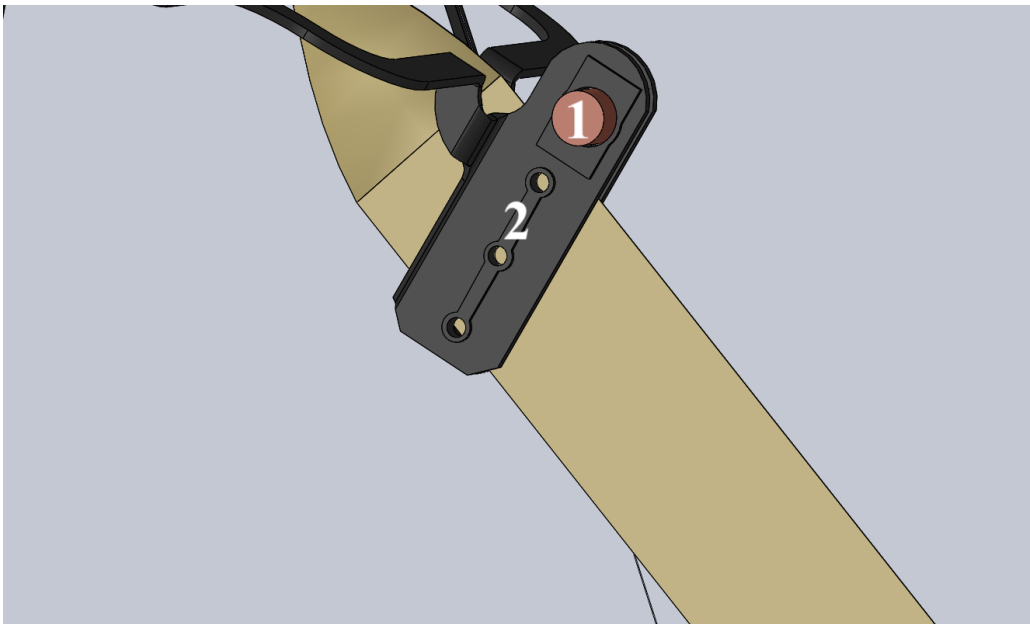


Joonis 29: Esialgse disaini kaugem tehislühase kinnitus sinna vahele kinnitatud tehislühasega. 1: Tehislühase kinnituse asukohad, 2: Tehislühase kontakti asukoht

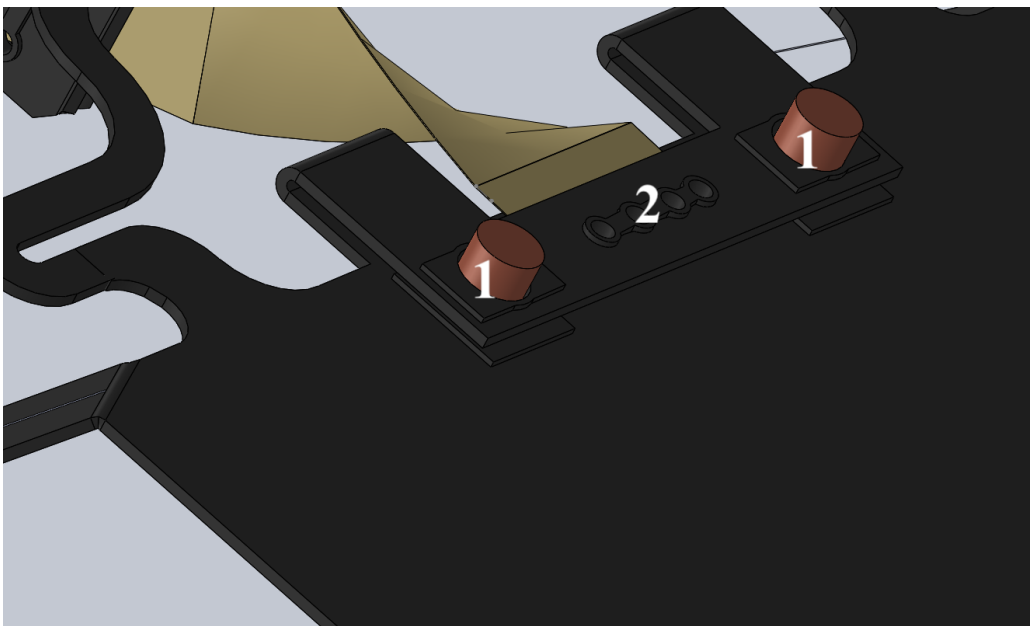


Joonis 30: Esialgse disaini lähem tehislühase kinnitus sinna vahele kinnitatud tehislühasega. 1: Tehislühase kinnituse asukohad, 2: Tehislühase kontakti asukoht

Järgmise versiooni on probleemi lahendamiseks disainitud suuremad jootepadjad (joonis 31 ja joonis 32) ning nende keskele puuravad, millest saab enne jootmist ühenduse tugevdamiseks juhtmekiu läbi panna.



Joonis 31: Järgmise versiooni disaini kaugem tehislühase kinnitus. 1: Tehislühase kinnituse asukoht sealt läbi pandud juhtmega, 2: Tehislühase kontakti asukoht



Joonis 32: Järgmise versiooni disaini lähem tehislühase kinnitus. 1: Tehislühase kinnituse asukohad sealt läbi pandud juhtmetega, 2: Tehislühase kontakti asukoht

6.3 Kontakti- ja kinnituslahenduse verifitseerimine polüpürrooltäituriga

Selle töö raames disainitud kontaktilahenduse testimiseks kasutati polüpürrooltäiturit. Siinses peatükis kirjeldatakse kasutatud täiturit ning antakse esialgsete katsete tulemusi.

6.3.1 Täituri kirjeldus

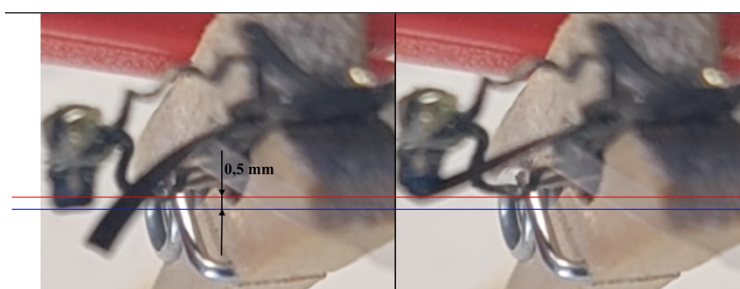
Kasutatud kolmekihilise tehislhase tootjaks oli Georg Niit.

Täituri ehitus on lihtsustatult järgnev. Alusmaterjaliks valiti 110µm paksune PVDF membraan (Immobilon®-P, Merck millipore), millele sünteesiti elektrokeemiliselt polüpürroolelektroodid. Elektrolüüdina kasutati liitiumtetrafluorosulfaati. Valminud laminaatmaterjali kogupaksuseks oli 142 µm. Kontrolliti takistust piki elektroodi, mis oli keskmiselt 700 Ω, samuti takistust läbi erinevate kihtide, mis oli >MΩ; sellest võis järeldada, et puuduvad lühiseid elektroodide vahel ning materjal on sobilik kasutamaks täiturina.

6.3.2 Esialgsete katsete tulemused

Kontaktilahenduse verifitseerimiseks ühendati täiturite kontaktid potentsiostaat BioLogic BP300 külge, millega anti täiturite elektroodide laadmiseks sobiv signaal.

Saavutati kontakt trükkplaadi ja tehislhase elektroodide vahel, seega töötas trükkplaadi painduvust kasutav kontaktilahendus.



Joonis 33: Polüpürrooltäitur liigutamas kaugemat tehislhase kontakti

Polüpürrooltäitur

pikkusega 4 mm liigutas kaugemat tehislhase kontakti 0,5 mm võrra, seega on kaugema tehislhase kontakti serpentiinühendus piisavalt painduv, et seda tehislhase abil painutada. Kontaktala isoleerimine õnnestus - katsete käigus ei jõudnud trükkplaadi kontaktidele liigselt elektrolüüti, et kontakti hävitada. Prototüüp-trükkplaadi tehislhase kinnituslahendus ei töötanud, uus lahendus on välja pakutud järgmises disainis.

7. Kokkuvõte

Selle bakalaureusetöö raames töötati välja robotvesiliuguri disain. Kirjeldati ja põhjendati ära tehislühaste valik, disainiti trükkplaat, mis erinevalt varasematest töödest toodeti painduvale materjalile ja disainiti elektriskeem roboti juhtimiseks.

Trükkplaadi kaitsmiseks elektrolüüdi eest joodeti trükkplaadipoolsetele tehislühaste kontaktidele kuld. Katsetati erinevaid kinnituslahendusi, selle käigus leiti, et parimad tulemused on saavutatavad, jootes kulda madalatemperatuurse joodisega. Lisaks kaeti joodetud kullalehe ääred UV kivistuva jootemaskiga, et elektrolüüt kullalehe alla ei imbuks.

Painduvat trükkplaati kasutati tehislühaste kinnituse osana, vähendamaks vajalike komponentide arvu. Tellitud prototüüptrükkplaadil verifitseeriti tehislühaste kinnituse disaini ning selle käigus tuvastati puudused disainis. Ilmnenud puuduste parandamiseks tehti täiendustepanekud.

Tehislühaste juhtimiseks on robotil mikroprotsessor, mis on ühendatud tehislühaste juhtelektroonika külge. Selleks, et vähendada tehislühaste juhtelektroonika ja protsessori vaheliste ühenduste arvu, disainiti tehislühaste juhtimiseks uudne lahendus.

Viited

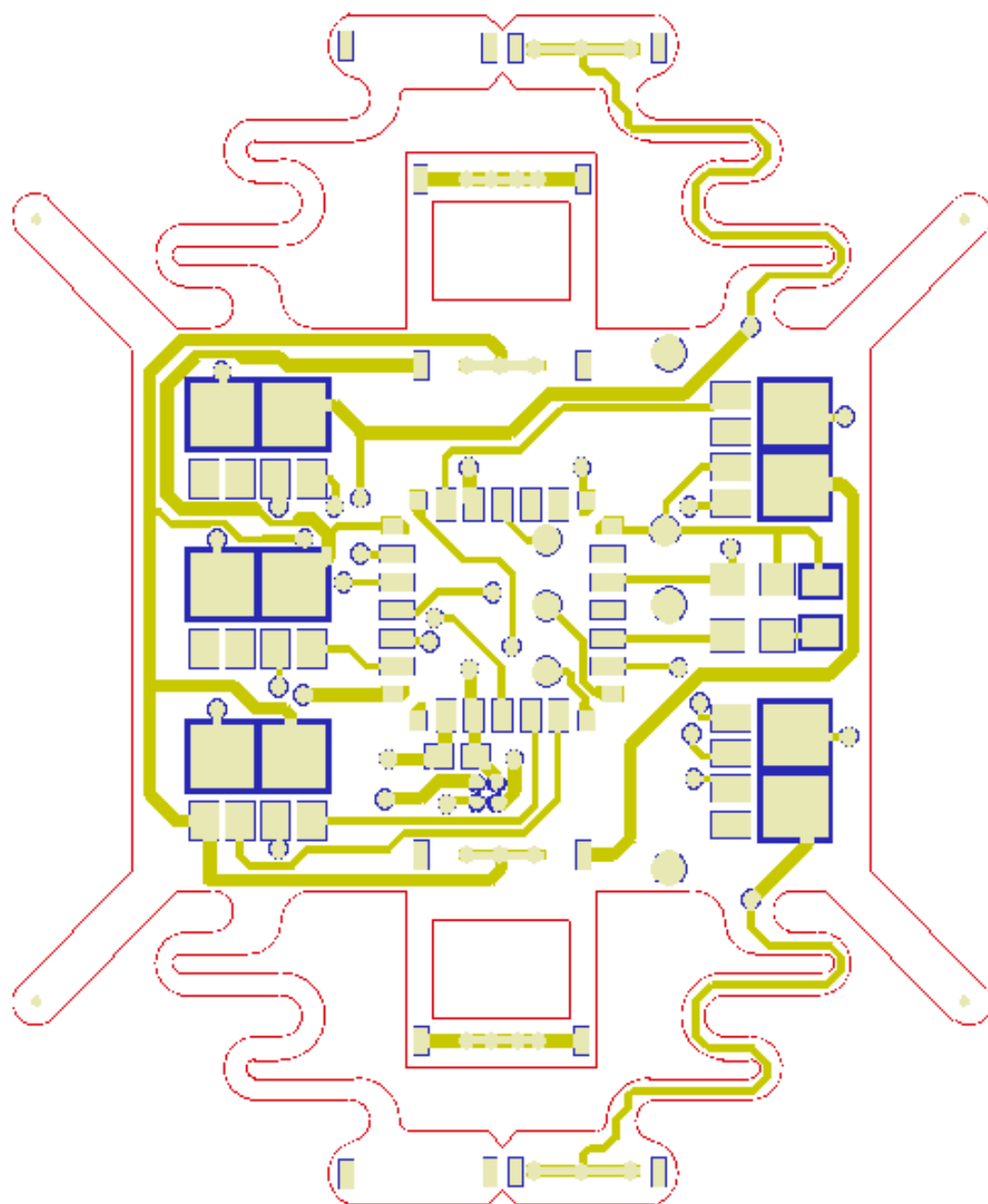
- [1] „Federal Business Opportunities,” 13 juuni 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=26d25ebbec24da3652ced04304fa1296&tab=core&_cvview=1. [Kasutatud 22 aprill 2019].
- [2] O. Akanyeti, J. C. Brown, L. D. Chambers, H. el Daou, M.-C. Fiazza ja teised, „FILOSE for Svenning: A Flow Sensing Bioinspired Robot,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, kd. 21, nr 3, pp. 51-62, 2014.
- [3] I. Must, F. Kaasik, I. Põldsalu, L. Mihkels, U. Johanson, A. Punning ja A. Aabloo, „Ionic and Capacitive Artificial Muscle for Biometric Soft Robotics,” *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS*, kd. 17, nr 1, pp. 89-94, 2015.
- [4] A. Punning, M. Anton, M. Kruusmaa ja A. Aabloo, „A biologically inspired ray-like underwater robot with electroactive polymer pectoral fins,” %1 *IEEE Conference "Mechatronics and Robotics 2004"*, Aachen, 2004.
- [5] P. Glick, S. A. Suresh, D. C. M. Ruffatto ja M. T. P. A. Tolley, „A Soft Robotic Gripper With Gecko-Inspired Adhesive,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, kd. 3, nr 2, pp. 903 - 910, 2018.
- [6] Y. Ma, S. Ma, W. Yang, B. Yu, X. Pei, F. Zhou ja W. Liu, „Sundew-Inspired Simultaneous Actuation and Adhesion/Friction Control for Reversibly Capturing Objects Underwater,” *Advanced Materials Technologies*, kd. 4, nr 2, pp. 1800467-1800475, 2019.
- [7] C. T. Nguyen, H. Phung, P. T. Hoang, T. D. Nguyen, H. Jung ja H. r. Choi, „Development of an Insect-Inspired Hexapod Robot Actuated by Soft Actuators,” *Journal of Mechanisms and Robotics*, kd. 10, nr 6, 2018.
- [8] J.-S. Koh, E. Yang, G.-P. Jung, S.-P. Jung, J. H. Son, S.-I. Lee, P. G. Jablonski, R. J. Wood, H.-Y. Kim ja K.-J. Cho, „Jumping on water: Surface tension–dominated jumping of water striders and robotic insects,” *Science*, kd. 349, nr 6247, pp. 517-521, 2015.
- [9] I. Must, F. Kaasik, I. Põldsalu, L. Mihkels, U. Johanson, A. Punning ja A. Aabloo, „Pulse-Width-Modulated Charging of Ionic and Capacitive Actuators,” %1 *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Besançon, 2014.

- [10] L. Hines, K. Petersen, G. Z. Lum ja M. Sitti, „Actuators for Small-Scale Robotics,“ *Advanced Materials*, kd. 29, nr 13, 2017.
- [11] N. M. Andersen, „A phylogenetic analysis of the evolution of sexual dimorphism and mating systems in water striders (Hemiptera: Gerridae),“ *Biological Journal of the Linnean Society*, kd. 61, nr 3, p. 345–368, 1997.
- [12] *This Is Why Water Striders Make Terrible Lifeguards | Deep Look*. [Film]. USA: PBS Digital Studios, 2017.
- [13] „STMicroelectronics,“ 1 Märts 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l031g6.pdf>. [Kasutatud 29 Aprill 2019].

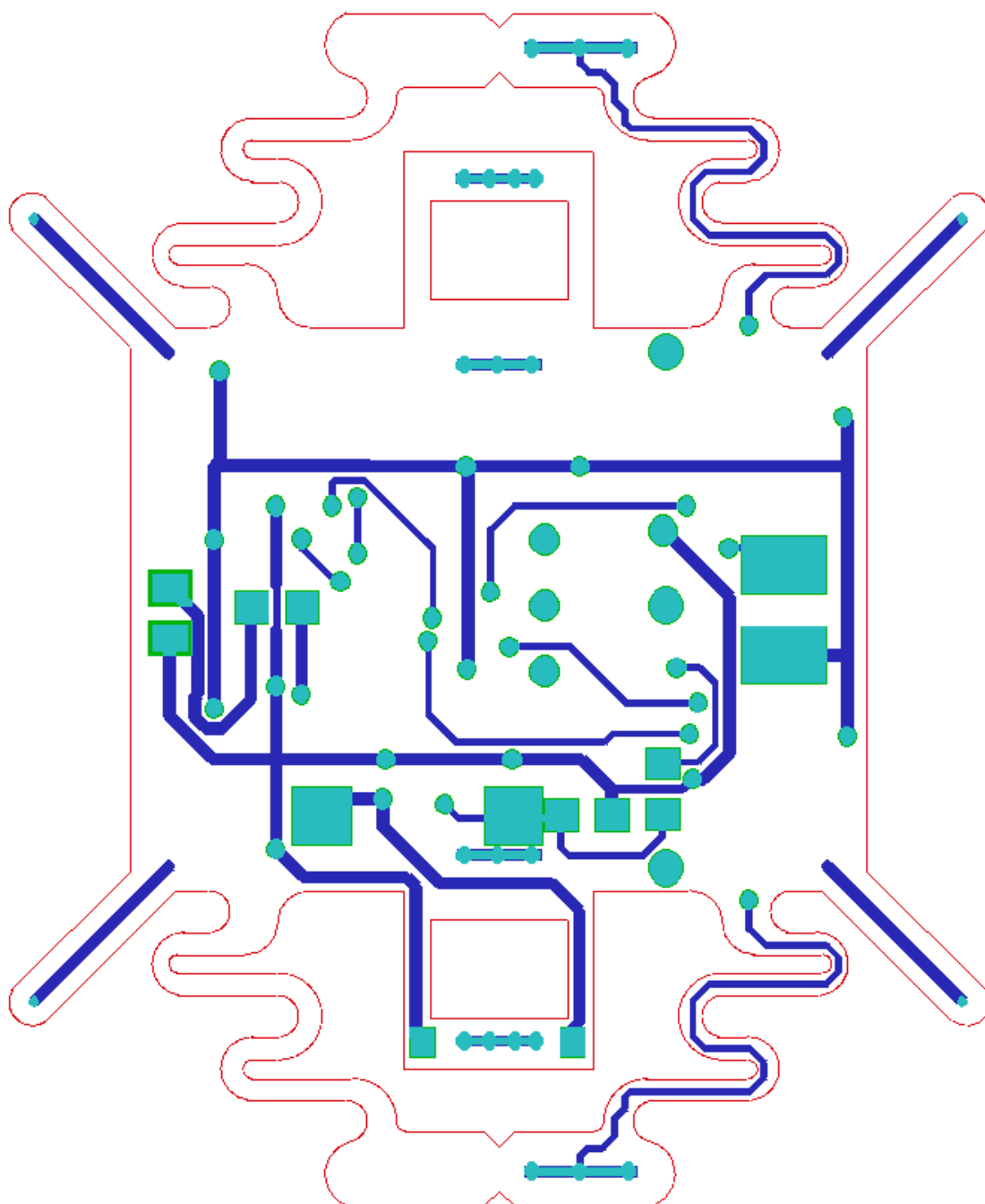
Lisa 1: disainitud roboti elektroonikakomponentide nimekiri

Toode	Kogus
Kondensaator 0402 10uF	1
Sinine valgusdiod 0402	1
Infrpuna valgusdiod 0603	1
ON Semiconductor NTHD3100CT1G	5
0805 Fototransistor	1
Takisti 0402 8 MR	1
Takisti 0402 4,7 MR	1
Takisti 0402 520 R	1
Takisti 0402 140 R	1
STM32L031G6U6	1
Texas Instruments LP5907UVX37	1

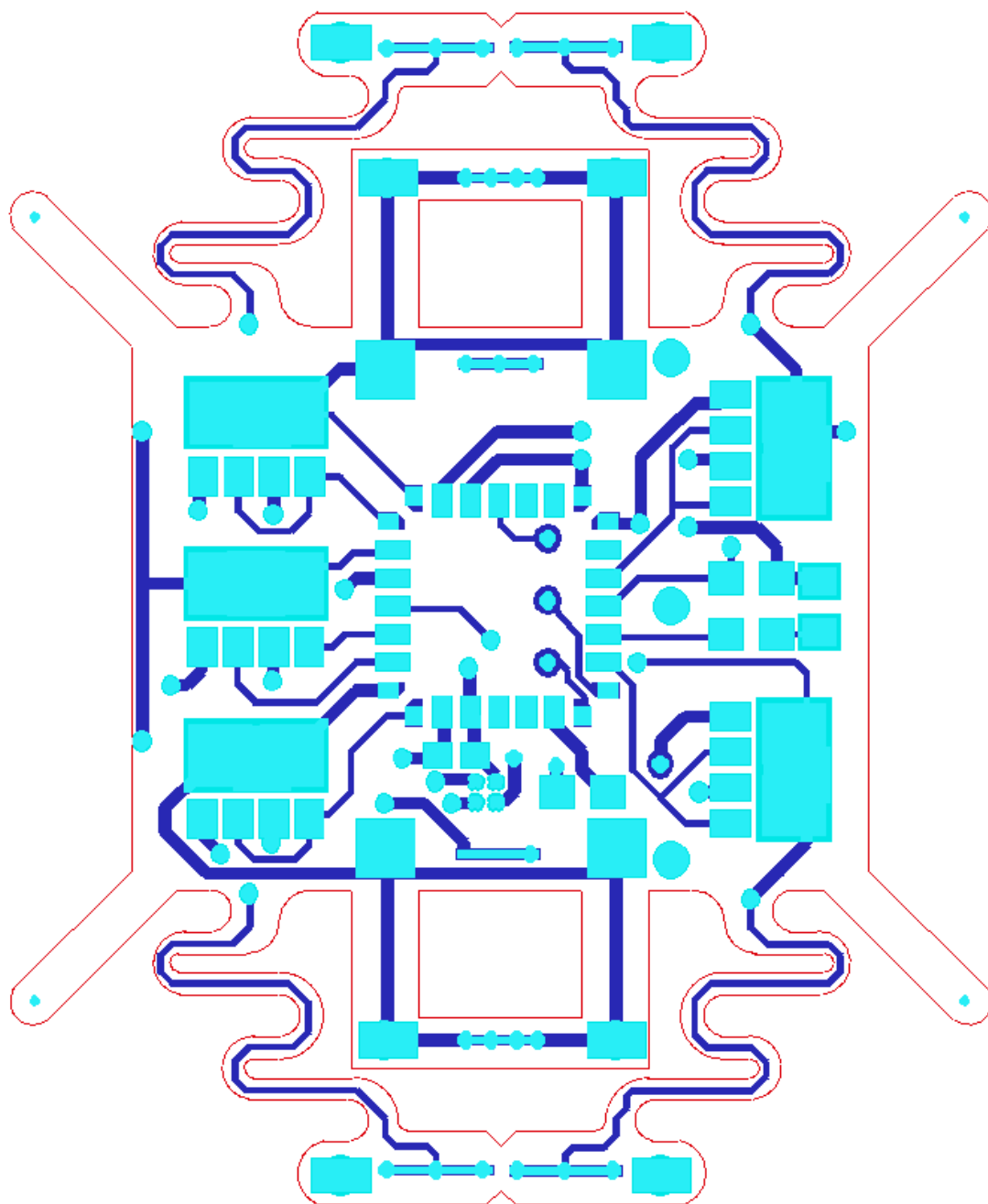
Lisa 2: Esialgse disaini trükkplaadi pealmine kiht



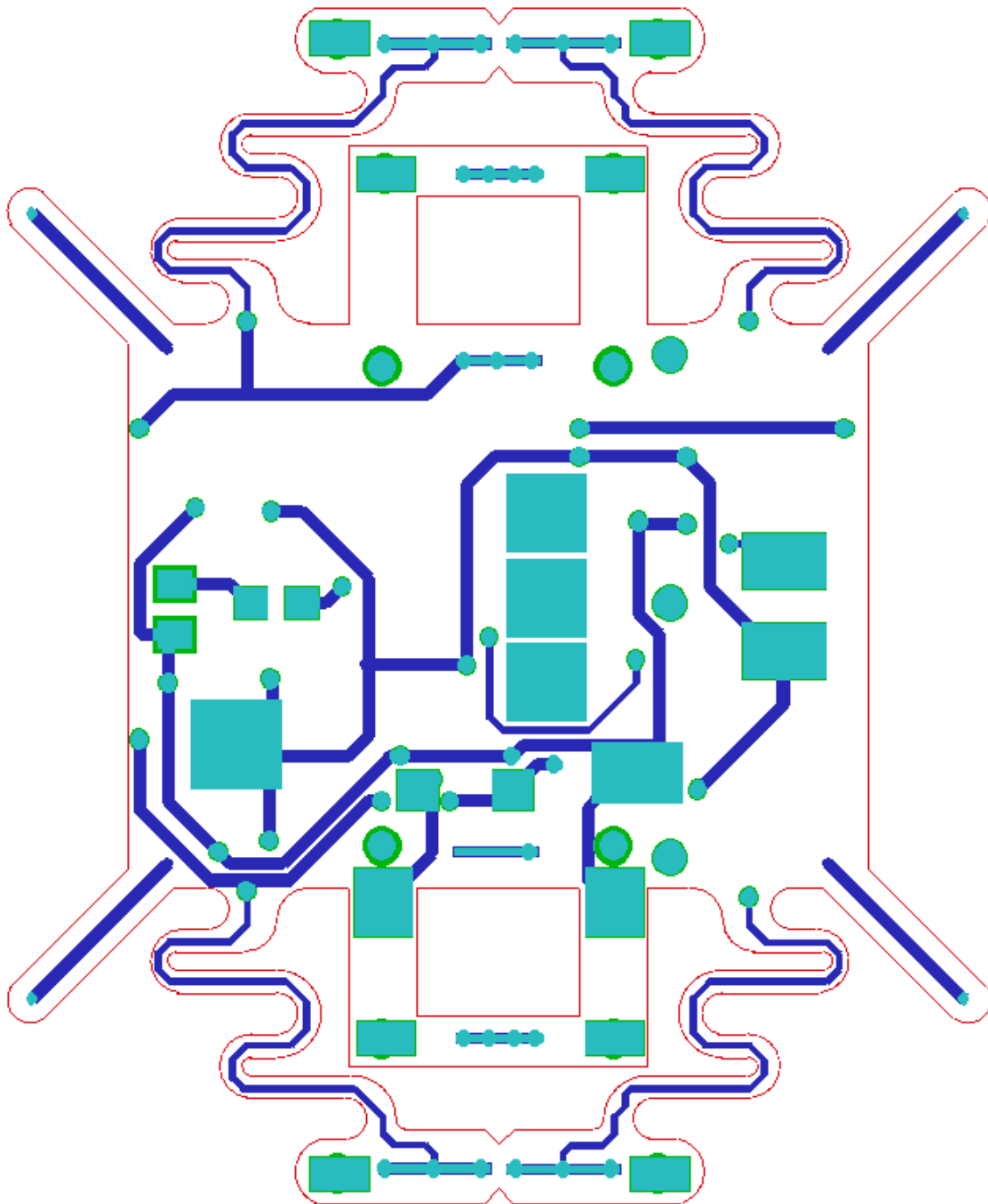
Lisa 3: Esialgse disaini trükkplaadi alumine kiht



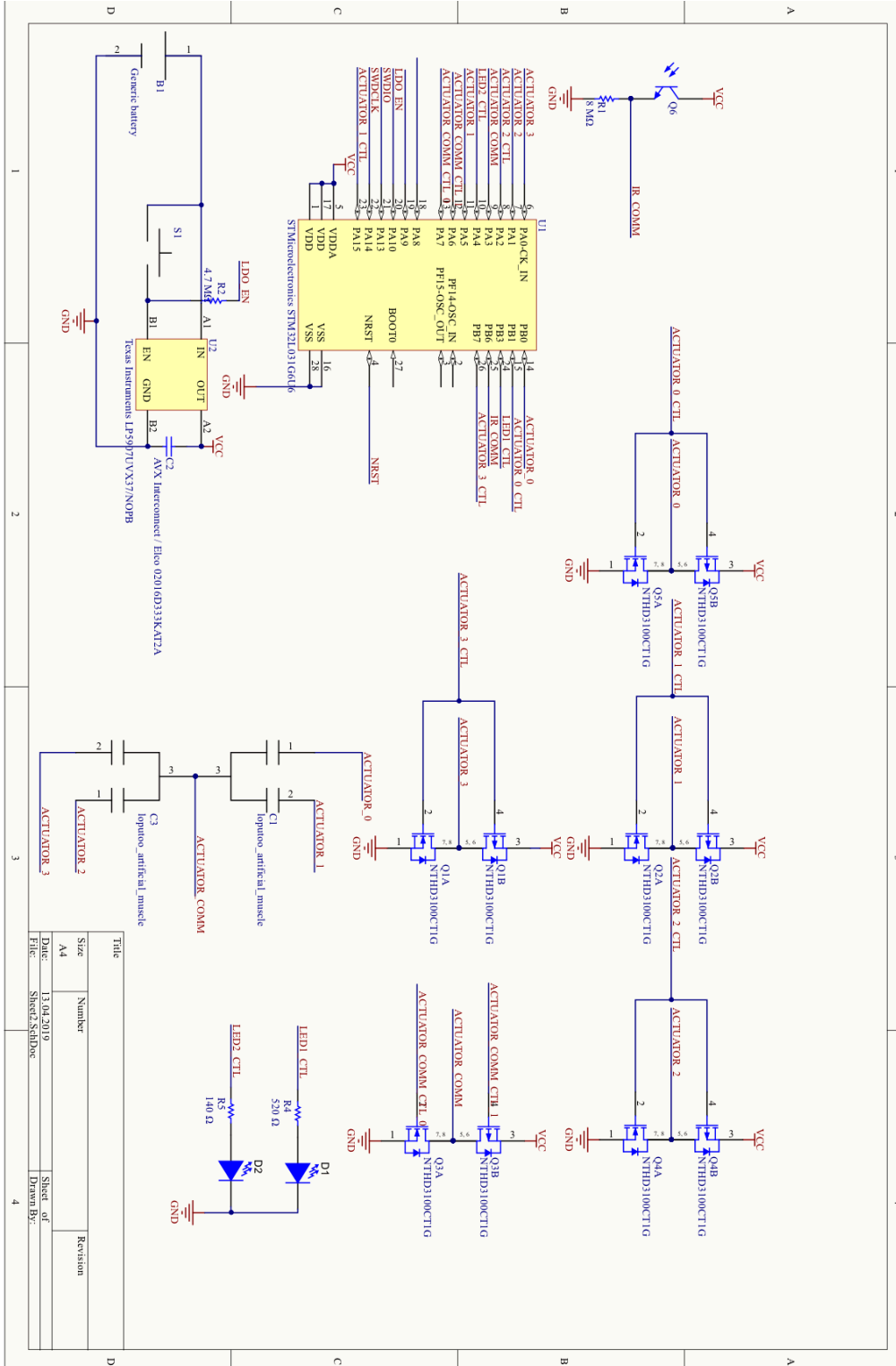
Lisa 4: Järgmise versiooni disaini trükkplaadi pealne kiht



Lisa 5: Järgmise versiooni disaini trükkplaadi alumine kiht



Lisa 6: Disainitud roboti elektroonikaskeem



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Rasmus Soome

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Robotvesiliuguri disain“

mille juhendaja on Indrek Must

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, alates 23.05.2022 kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Rasmus Soome

Tartus, 20.05.2019