

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Kristjan Madis Kask

Käe mehaanika disain sotsiaalsele humanoidrobotile

SemuBot

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja: Robotika kaasprofessor Karl Kruusamäe

Tartu 2024

Resümee/Abstract

Käe mehaanika disain sotsiaalsele humanoidrobotile SemuBot

Lühikokkuvõte: Sotsiaalseid humanoidroboteid kasutatakse lisaks teistele kasutusvaldkondadele ka laste neurorehabilitatsioonis. Tudengiprojekt SemuBot on loodud olema avatud lähtekoodiga sotsiaalne humanoidrobot, mida saaks samuti kasutada laste neurorehabilitatsioonis. Käesolev töö on aluseks SemuBoti esimese iteratsiooni tekkimisele. Lõputöös disainiti robotile kaks kätt õlast randmeni ning realselt toodeti humanoidi parem käsi. Valminud lahendus suudab jäljendada inimese käe liikumist viie liikumisvabadusega ning sooritada kätlemise ning plaksutamise asendeid. Disain vajab veel parandamist, et liikumised oleks sujuvamad, kuid tööle esitatud nõuded said täidetud.

CERS (Common European Research Classification Scheme): T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika, T130 Tootmistehnoloogia

Märksõnad: robotika, mehaanika, humanoidrobot

Arm mechanics design for social humanoid robot SemuBot

Abstract: Social humanoid robots are used, among other applications, in children's rehabilitation. The student project SemuBot is designed to be open-source social humanoid robot that could be also used in children's rehabilitation. This work serves as the foundation for the development of SemuBot's first iteration. In the thesis two arms from shoulder to wrist were designed for the robot and the right arm of the humanoid was actually produced. The resulting solution can mimic the movement of human arm with five degrees of freedom and perform handshake and clapping motions. The design still needs some modifications for smoother movements, but the requirements of the project were met.

CERS (Common European Research Classification Scheme): T125 Automation, robotics, control engineering, T130 Production technology

Keywords: robotics, mechanics, humanoid robot

Sisukord

Resümees/Abstract	2
Sissejuhatus	5
1. Avatud lähtekoodiga sotsiaalne humanoidrobot.....	6
1.1. Sotsiaalne humanoidrobot.....	6
1.1.1. Sotsiaalsed humanoidrobotid Pepper ja NAO.....	7
1.2. Avatud lähtekoodiga robot.....	8
2. Motoriseeritud käed ja inimesesarnane käeliikumine	10
2.1. Inimesesarnane käeliikumine	10
2.2. Olemasolevad inimesesarnased motoriseeritud käed	12
3. Töö eesmärgid ja nõuded.....	15
3.1. SemuBot.....	15
3.2. Eesmärgid	15
3.2.1. SemuBoti käeliigete taastoodetava disaini loomine.....	15
3.2.2. SemuBoti käeliigete tootmiseks seadistuse väljatöötamine	15
3.3. Nõuded.....	16
4. Disain ja loodud lahendus.....	17
4.1. Disain	17
4.1.1. Mootorite valik	19
4.1.2. Õlaliiges	21
4.1.3. Õlavarre pööramine	21
4.1.4. Küünarnukk.....	22
4.1.5. Randme pööramine.....	23
4.2. Tootmine.....	24
4.3. Koostamine	26
4.4. Maksumus	26
5. Testimine ja järeldused.....	27

5.1. Testimine.....	27
5.2. Järeldused ja puudused	28
Kokkuvõte	29
Tänuavaldused	30
Viidatud kirjandus.....	31
Lisa 1: Käe disaini- ja tootmisfailid.....	35
Lisa 2: Käe jõumomendi arvutused	36
Lisa 3: Käe ja käeosade loomiseks vajalike osade maksumus	37
Lisa 4: Käe liigutamise testimise video.....	39
Lisa 5: Käe tootmisjuhised	40
Lihtlitsents	41

Sissejuhatus

Inimese ja roboti koostöövõimalused erinevates valdkondades suurenevad iga aastaga. Olgu selleks koristamine robottolmuimejate ja aknapesurobotitega või tootmisprotsesside automatiseerimine. Roboteid luuakse muuhulgas korduvate ülesannete lahendamiseks või keerulisemate tööülesannete täitmiseks. Samuti kasutatakse roboteid juba laste rehabilitatsioonis [1]. Sellised abistavad robotid ei väsi ega tüdine ning suudavad sama kvaliteetselt terve tööpäeva lapsi õpetada. Seetõttu on oluline arendada sotsiaalseid roboteid, kes suudavad inimese käitumist mõista ja ise seda ka väljendada, et ravi ei jääks kellelgi saamata.

Robotist, kes ainult suhtleb, kuid ei mõju füüsiliselt inimesele sarnaselt, võib jääda väheseks, et tekiks usaldus ja alus vabale suhtlemisele. Edasiarendusena on liigutud kaugemale ning lisatud eelnevale inimesesarnane väljanägemine ja suhtlemine. Sellist sotsiaalset robotit, mis mõjub nii füüsiliselt kui ka sotsiaalselt inimesele sarnaselt nimetatakse humanoidrobotiks. Humanoide arendatakse ning nad muutuvad ühe enam inimesele sarnasemaks.

Uute seadmete loomisel on hea kasutada avatud lähtekoodiga lähenemist. Sellisel juhul saavad kõik soovijad panustada kvaliteetsemasse masina toimimisse ning suletud seltskonna asemel saavad insenerid üle maailma lahendusi pakkuda. Samuti on võimalik uutel liitujatel õppida eelmistest vigadest ning kiiremini jõuda parema lahenduseni. Avatud lähtekoodiga arendamise puhul on ka õpilastel ja tudengitel võimalus ennast arendada ja olemasolevaid lahendusi õppida.

Disainitud mehaaniliste osade tootmiseks on mitmeid tehnoloogiaid ning tööstuslikke seadmeid. Tavakasutaja jaoks on enamus neist liiga kallid ning kasutamine vajab eelnevaid teadmisi ja koolitusi. Probleemi lahenduseks on loodud kasutajasõbralikud 3D-printerid, mis teevad tootmisvõimekuse kättesaadavaks. Seetõttu on avatud lähtekoodiga arendamisel mõistlik mõelda ka 3D-prinditavuse peale, et võimalikult paljud huvilised saaksid panustada.

SemuBot on tudengiprojektiraames loodav avatud lähtekoodiga sotsiaalne humanoidrobot, mis sarnaselt Pepperile on mõeldud kasutamiseks laste rehabilitatsioonis. Käesolev töö keskendub SemuBoti käe mehaanika loomisele. Arendamisel disainitakse suures osas 3D-prinditav robotkäsi, mis suudab jäljendada inimese käe liikumist.

1. Avatud lähtekoodiga sotsiaalne humanoidrobot

1.1. Sotsiaalne humanoidrobot

Sotsiaalsed robotid [2] (Joonis 1) on loodud inimestega suhtlemiseks nii verbaalselt kui mitteverbaalselt. Lisaks lihtsalt kõnele ja vestlusele peaks sotsiaalne robot aru saama tunnetest ning suutma väljendada emotsioone ka näoilme ning kehakeelega [2]. Oluline on sügavam arusaamine inimhõimusest ning tugev analüüsimisvõime, et füüsiliste, kognitiivsete, sotsiaalsete ja veel paljude andmete põhjal otsuseid langetada [2]. Lisades eelnevale inimesesarnase välimuse ja suhtlemisstiili, on tulemuseks sotsiaalne humanoidrobot.



Joonis 1. Inimese ja roboti vaheline interaktsioon humanoididega Pepper (A), Talos (B) ja iCub (C ja D) [3]

Humanoidide arendamisel ei pea alati kohe terviklikku lahendust pakkuma. Näiteks robot Epi [4] puhul loodi torso koos kätega, kuid iseseisvalt ruumis liikuda ta ei oska. Sarnaselt läheneti ka realistliku näo loomisel Eva [5] humanoidile, mille tulemusel valmis inimsuuruses pea, mis suudab liigutada ennast 25 muskliga. Erinevalt eelnevatest disainiti humanoid NICO [6] võimalikult inimesele sarnaselt koos käte jalgade ning peaga. Sellist lähenemist kasutati ka robotite Pepperi ja NAO juures.

1.1.1. Sotsiaalsed humanoidrobotid Pepper ja NAO

SoftBank Robotics avalikustas 2014. aastal sotsiaalse humanoidroboti Pepper [7] (Joonis 2). Algselt vaid äriliseks kasutamiseks kavandatud toode kohandati hiljem ka tavakasutajale sobivaks. See masin on võimeline väljendama end kehakeeles, kohanduma vastavalt keskkonnale ning analüüsima kõne emotsioonide tuvastamiseks. Pepper suudab suhelda inimestega enda ümber. Lisaks disainiti 1,2 m pikkusele ratastel robotile 17 liigest, et jäljendada inimesele sarnaseid liigutusi ja lisati lapselik ning mõlemasuguliselt kuuldav hääl.



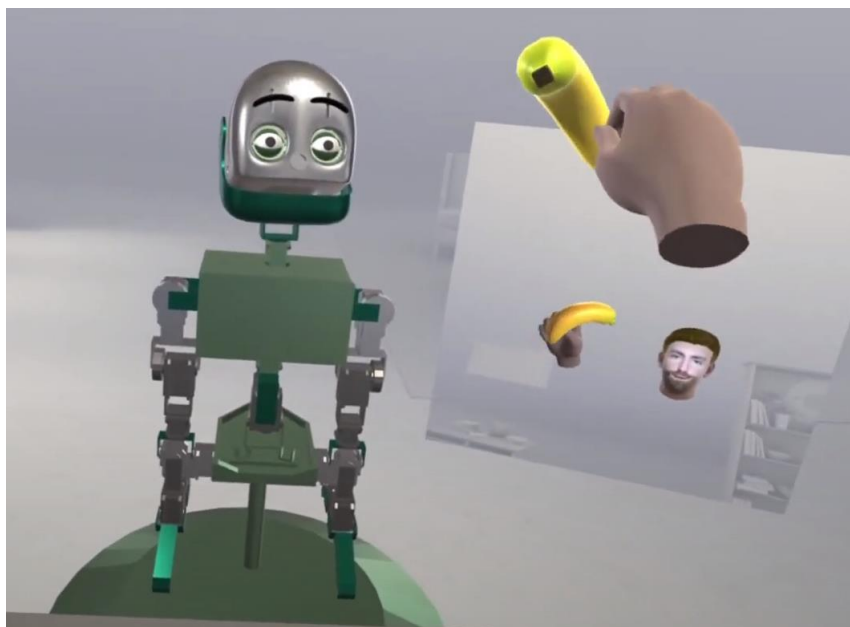
Joonis 2. Pepper (vasakul) ja NAO (paremal) humanoidrobotid [8]

Suhtlemisroboteid kasutatakse ka laste taastusravis rehabilitatsioonikeskustes [1]. Roboteid saab programmeerida nii, et nad näitaks emotsioone ja liigutusi ning suhtleks läbi dialoogi lastega [1]. Näiteks laste rehabilitatsioonis kasutusel olevad robotid Pepper ja NAO (Joonis 2) mõistavad patsientide emotsioone, oskavad neile kõnes vastata ning empaatiline kontakt tekib kergesti [1]. NAO ja Pepper on inimesele omase käitumisega, tõmbavad tähelepanu ja arendavad vestlust. Läbi suhtluse edendavad nad lapse kognitiivseid ja funktsionaalseid võimeid ning oskusi [1].

1.2. Avatud lähtekoodiga robot

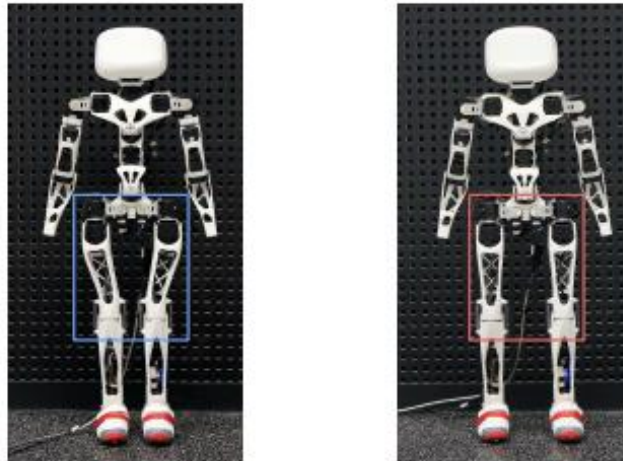
Avatud lähtekoodiga arendamine on kasulik nii konkreetse süsteemi loomisel kui ka tulevaste seadmete planeerimisel. Avatud lähtekoodiga arendamisel on olulisel kohal läbipaistvus, mis tähendab, et iga soovija saab süsteemi tööga tutvuda ja panustada nii palju kui tahab, et paremat lahendust pakkuda [9]. Kui uut süsteemi planeerides on raske tühjalt kohalt alustada, siis avatud lähtekoodiga lähenemise korral saab alustada osalisest lahendusest [9]. See tähendab, et avatud lähtekoodiga arendamisel on ka hea õpetamise ja õppimise alus, sest huvilised saavad tutvuda juba olemasolevate lahendustega ning neid implementeerida ka oma süsteemides.

Avatud lähtekoodiga valmis ka Jaapanis sotsiaalne robot Jubileo [10] (Joonis 3). Roboti keha on võetud samuti avatud lähtekoodiga kättesaadavalt Dimitri robotilt [11]. Jubileo on sotsiaalne humanoidrobot, mis suudab inimesega suhelda ja nii jäljendada kui ka ise sooritada õigeid näoilmeid [10]. Jubileo projektiga näidatakse, et virtuaalreaalsust kasutades saab efektiivselt katsetada roboti ja inimese vahelist suhtlust, et hiljem realselt seda rakendades oleks protsessid testitud [10]. Kuna humanoidi näo struktuur on 3D-prinditav [10], siis vastavalt materjali valikule saab kasutaja valida endale sobiva lahenduse. Tulemusena valmis avatud lähtekoodiga kättesaadav robot, mida kõik soovijad saavad edasi arendada [10].



Joonis 3. Jubileo humanoidrobot virtuaalkeskonnas [10]

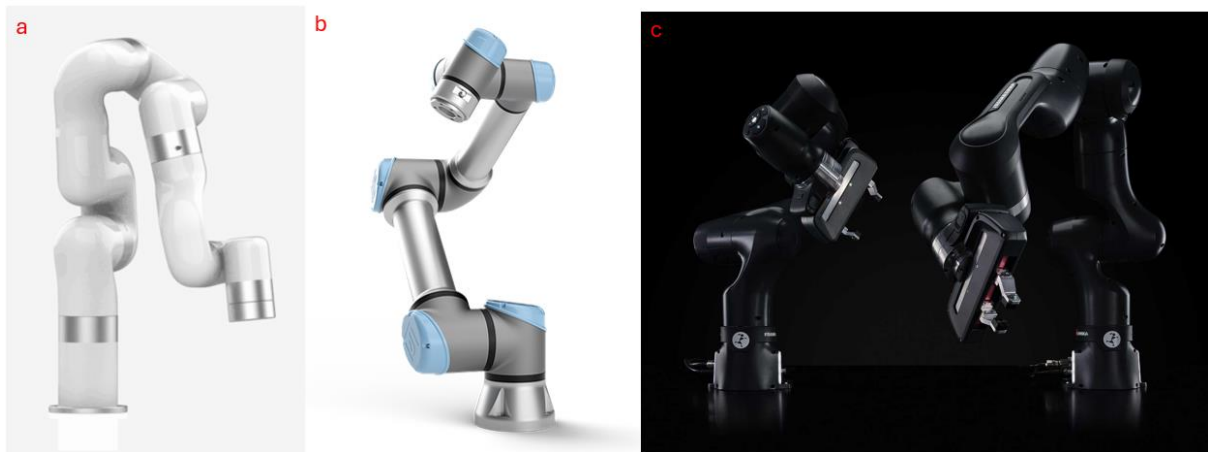
Jubileo puhul on näha, et juba avalikustatakse roboteid avatud lähtekoodiga nende kiiremaks ja efektiivsemaks arenguks. Teaduslike eksperimentide lihtsaks ja kiireks läbiviimiseks loodi ka robot Poppy [12] (Joonis 4). Õppimiseks loodud robot disainiti laialt levinud komponentide ja 3D-prinditavate detailidega, et see oleks kõigile kättesaadav. Poppy on esimene täielikult avatud lähtekoodiga 3D-prinditav humanoidrobot [12]. Kättesaadav õppimisplatvorm on võimaldanud juba teha katsetusi parima jalakuju leidmiseks.



Joonis 4. Poppy humanoidrobot painutatud (vasakul) ja sirgete (paremal) reitega [12]

2. Motoriseeritud käed ja inimesesarnane käeliikumine

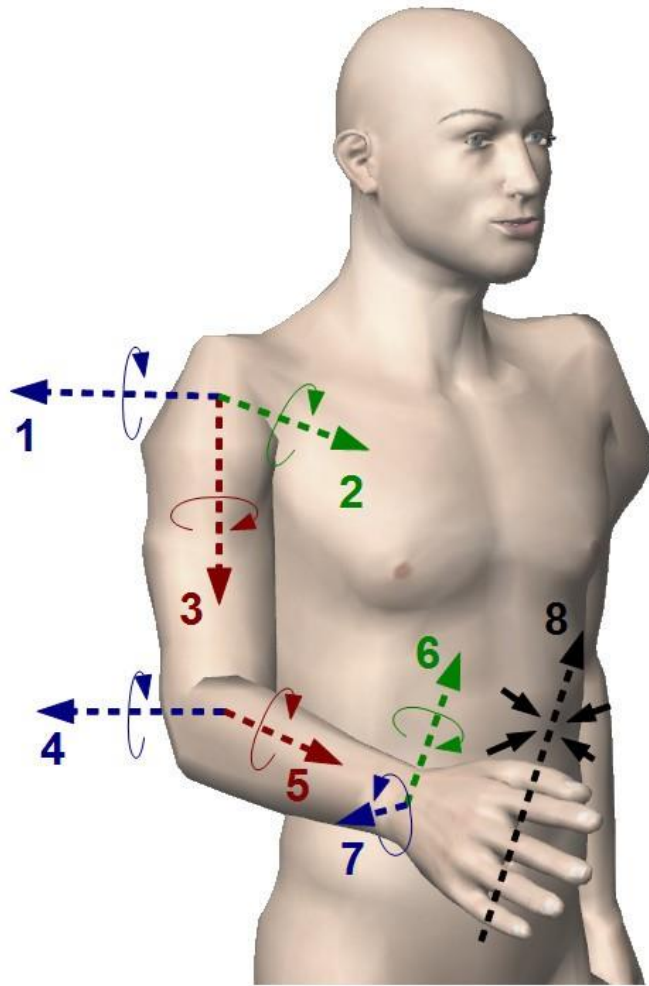
Erinevaid motoriseeritud robotkäsi on maailmas palju ning neid saab programmeerida kindla ülesande täitmiseks. Selleks on loodud näiteks manipulaatorrobotid UFACTORY xArm7 [13] (Joonis 5-a), Universal Robots UR5e [14] (Joonis 5-b) ja Franka Production 3 [15] (Joonis 5-c). Üks populaarsemaid kasutusalasid sellistele seadmetele on korduvate operatsioonide sooritamine [16]. See tähendab, et seadme väljanägemine ja töökäik on vähem oluline kui see, et reaalne töö saaks tehtud. SemuBoti puhul on rohkem oluline inimese käe sarnane liikumine ja väljanägemine kui päevast-päeva ühe korduva liigutuse tegemine.



Joonis 5. Manipulaatorrobotid UFACTORY xArm7 (a), Universal Robots UR5e (b) ja Franka Production 3 (c) [13–15]

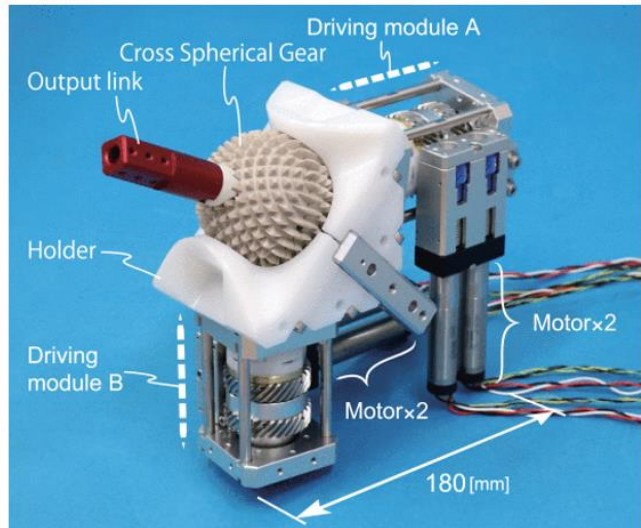
2.1. Inimesesarnane käeliikumine

Inimese käe jäljendamiseks õlast randmeni on vaja viit [17] liikumisvabadust (Joonis 6).



Joonis 6. Inimese käe liikumisvabadused [17]

Selliste liikumisvabaduste jäljendamiseks on mitu erinevat viisi, näiteks kasutada liigutuse motoriseerimiseks elektrilisi, hüdraulilisi või pneumaatilisi täitureid [17]. Elektrimootoreid kasutades saab liigutusi teha motoriseeritud keraliigestega [18] ning pneumaatiliste täituritega on võimalik luua lihaseid jäljendavad pehmerbootika lahendused [19] (Joonis 7).

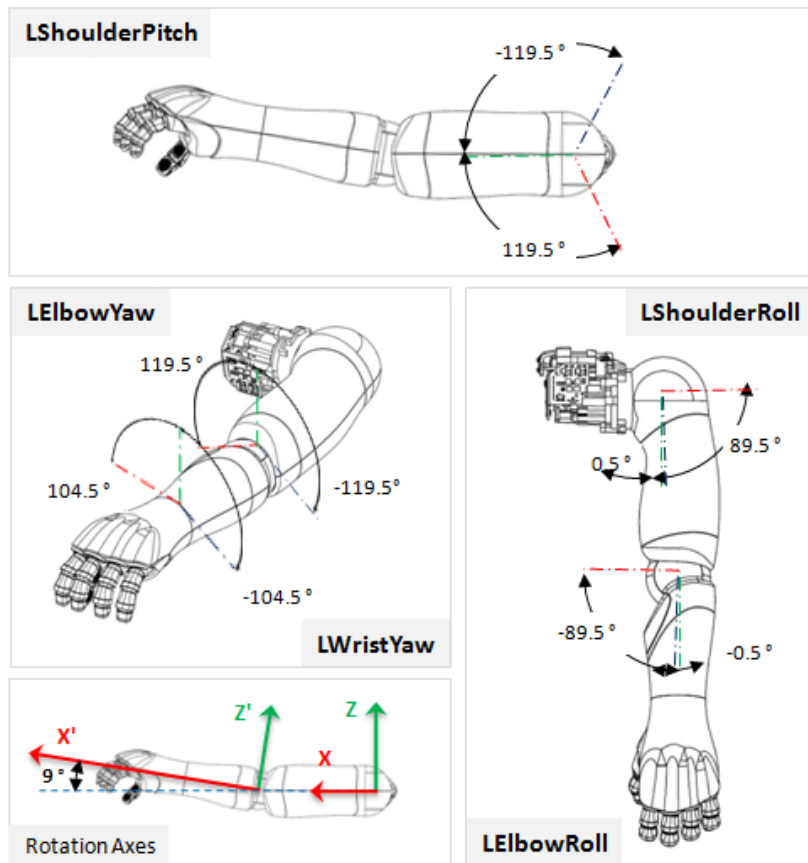


Joonis 7. Liigutuste sooritamine pneumaatiliste täituritega [19] (vasakul) ja keraliigesega [18] (paremal)

Mootorite puhul võib probleemiks kujuneda nende endi mass, sest viie liikumisvabaduse tekitamiseks on vaja ka viit täiturit ning raskemate mootoritega on vaja liigutamiseks ka suuremat jõumomenti, mis omakorda tähendab, et on vaja kasutada võimsamat täiturit. Teistpidi see-eest pneumaatilise lahenduse puhul on küll täiturid kergemad, kuid nõuavad spetsiaalset kompressorit või suruõhku, mis muudab käed kergemaks, aga rasked seadmed tuleb paigutada mujale. Hüdraulika puhul võib probleemiks kujuneda erinevate vedelike lekked ning hooldamine [17].

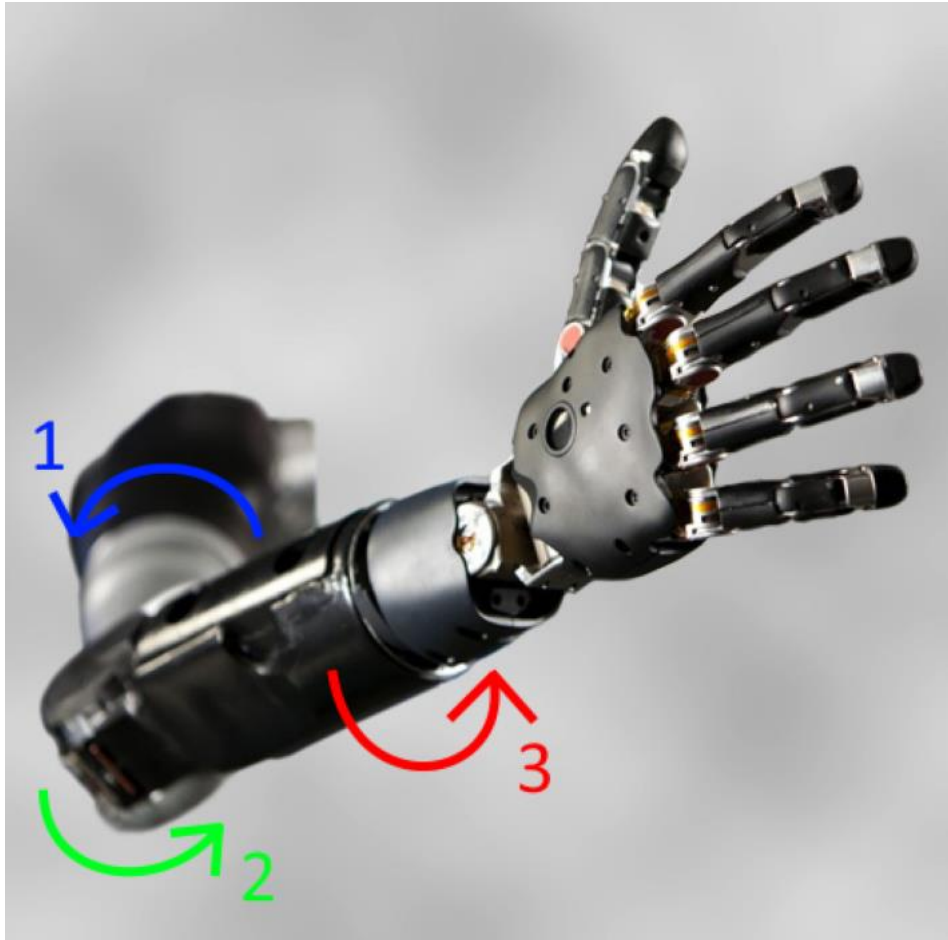
2.2. Olemasolevad inimesesarnased motoriseeritud käed

Kuigi robotite käte liigutamiseks on erinevaid võimalusi, siis eelmises peatükis tutvustatud humanoidrobotid kasutavad ikkagi iga liigutuse sooritamiseks eraldi mootorit. Näiteks humanoidrobot Pepperi käsi (Joonis 8) kasutab viit täiturit [20] käe tõstmiseks ja langetamiseks ette ja kõrvale, küünarnuki painutamiseks ning käsivarre ja õlavarre pööramiseks. Selle käe puhul on nii õlas kui ka küünarnukis motoriseeritud kaks liikumisvabadust ning randme juurde on paigutatud käsivarre pööramine. Kuna robot on disainitud sümmeetriliselt, siis ka parem käsi liigub sarnaselt.



Joonis 8. Humanoidrobot Pepperi vasak käsi [20]

Inimese käe liikumist jäljendavad lisaks humanoidrobotitele ka käeproteesid, mis on mõeldud asendama inimese kätt. Ameerika ühendriikides arendati DARPA raames proteeskäsi [21], millel on peaaegu kõik samad liikumisvabadused, mis inimkäel. Sellel seadmel on õlavarre pööramine paigutatud õlavarre keskele (Joonis 9-1), küünarliigesesse on jäetud üks liikumisvabadus (Joonis 9-2) ning randme pööramine disainitud käsivarrele (Joonis 9-3). Käe ette ja küljele tõstmise liigutused on paigutatud õlaliigesesse.



Joonis 9. HDT proteeskäe [21] mugandatud joonis kolme liikumisvabadusega: õlavarre pööramine (1), küünarnuki painutamine (2) ja randme pööramine (3).

Eelnevast võib järeldada, et käe liigutamiseks õlast randmeni piisab viiest liikumisvabadusest. Kui inimese käe puhul on õlas kolm liikumissuunda, siis Pepperi ja HDT käte puhul on sealt pöörlemise liigutus eraldatud ning paigutatud vastavalt küünarliigesesse või õlavarrele. Mõlemal robotil on randme pööramine disainitud käsivarrele, nagu inimese käelgi. Kaks sirutamise ja painutamise liigutust on jäetud õlaliigesesse ning üks küünarnukki. Järelikult saab viie liikumisvabadusega imiteerida inimese käe liikumist õlast randmeni, isegi kui liigutamise asukohad ei ühti inimese käega.

3. Töö eesmärgid ja nõuded

3.1. SemuBot

SemuBot on tudengiprojektina valmiv avatud lähtekoodiga sotsiaalne humanoidrobot, mis suudab sooritada inimesele sarnaseid liigutusi ning suhelda eesti keeles. Projekti eesmärk on luua Eesti esimene humanoidrobot ning pakkuda töö käigus tudengitele praktilist kogemust. Projekti suurem eesmärk on see, et valmiks täielik lahendus, mille saaks võtta kasutusele laste taastusravis, nagu seni on kasutatud robotit Pepper [7]. See aga tähendab, et SemuBot peab olema inimesele ohutu ning nii füüsiliselt kui tarkvaraliselt modulaarne, et võimalda Pepperist lihtsam hooldatavus ja laiendatavus.

3.2 Eesmärgid

Töö üldisem eesmärk on luua humanoidroboti käsi, mis aitab kaasa SemuBoti esimese iteratsiooni tekkimisele. Enne käesolevat tööd oli SemuBot idee ja kontseptsiooni faasis ning füüsiliselt midagi veel valmis polnud. Humanoidi valmimisel on üheks kriitiliseks osaks tema käed ning nende mehaanilise osa disainimisele töö keskendubki. Robotkäsi tuleb disainida modulaarseks, et robotit saaks vastavalt vajadusele ümber seadistada ja igat osa eraldi modifitseerida.

3.2.1. SemuBoti käeliigeste taastoodetava disaini loomine

Avatud lähtekoodiga sotsiaalne humanoidrobot SemuBot on loodud kõigile kasutamiseks ning arendamiseks. Laia kasutajaskonna kaasamiseks võiks seade olla lihtsasti ja võimalikult odavalt taastoodetav, ehk kõik huvilised peavad saama tootmisprotsessi korrata. Seetõttu on töö üheks eesmärgiks SemuBoti käeliigeste taastoodetava disaini loomine.

3.2.2. SemuBoti käeliigeste tootmiseks seadistuse väljatöötamine

Selleks, et oleks võimalik samasuguseid detaile ainult dokumentatsiooni põhjal toota, peab lisaks joonistele olema kirjeldatud ka tootmiseks vajalikud seadistused. Nende väljatöötamine nõuab erinevate lahenduste katsetamist ning parima variandi valimist. Testimine ja katsetamine on disainimisprotsessi lahutamatu osa ning töö teine eesmärk ongi tootmiseks vajaliku seadistuse väljatöötamine.

3.3. Nõuded

Humanoidrobotile SemuBot on esitatud erinevad nõuded väljanägemise ja käitumise jaoks:

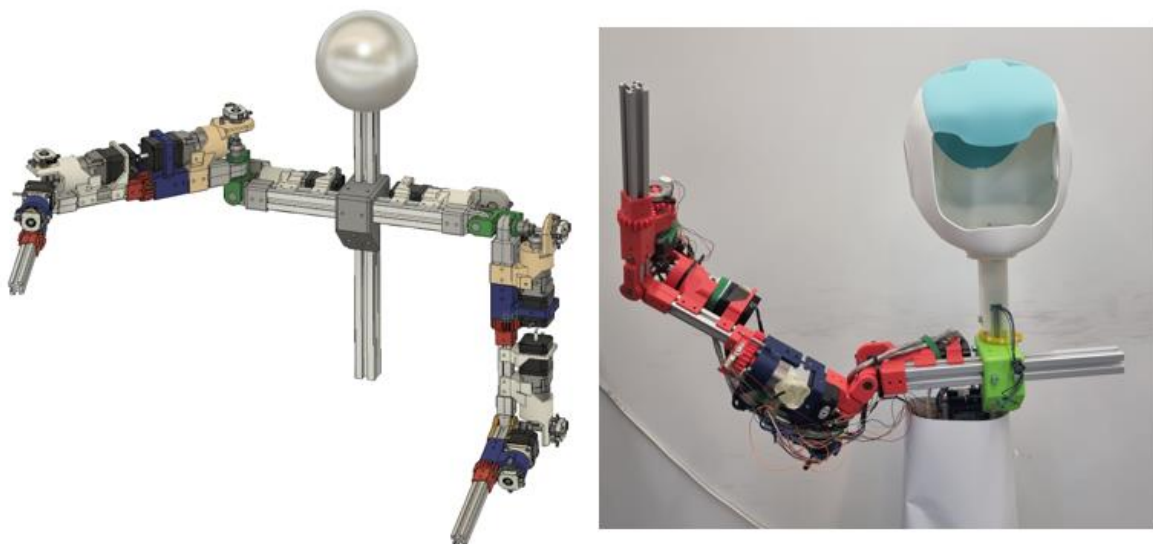
1. Kuna humanoidrobot SemuBot on loodud põhiliselt laste abistamiseks haiglates, siis roboti üheks kriitiliseks nõudeks on ohutu kasutamine lastele.
2. Humanoid peab olema sõbralik ning liigutused peavad olema sujuvad.
3. Selleks, et mõjuda loomulikult ja naturaalselt, peab robot suutma kehakeeles suhelda, näiteks kätelda või plaksutada.
4. Samuti võiks rääkimise ajal humanoid enda käsi inimese kombel liigutada.

Kokkuvõtvalt peab SemuBot oma olemuselt, väljanägemiselt ja käitumiselt meenutama inimest ning olema kasutajale ohutu.

4. Disain ja loodud lahendus

4.1. Disain

Töö raames valmisid humanoidroboti SemuBot käed (Joonis 10), mis suudavad inimese käte liikumist õlast randmeni jäljendada viie liikumisvabadusega. Lahendus võimaldab käsi tõsta ette ja kõrvale ning sooritada käe surumise ning plaksutamise asendeid. Selle jaoks disainiti mõlemal käel kaks liikumisvabadust õlaliigesesse, üks õlavarrele, üks küünarnukki ning viimane käsivarrele. Käe planeerimisel otsustati liigutuste sooritamiseks kasutada samm-mootoreid koos käigukastiga ning liigese asendi asukoha tuvastamiseks absoluutseid enkoodreid. 3D-prinditud detailide kinnitamiseks alumiiniumprofiili külge on plastiku sisse sulatatud sisekeermed ning need on seadekruvidega monteeritud profiilile.








Joonis 10. Humanoidroboti kahe käe koost (vasakul) ja valminud lahendus ühe käega (paremal)







Mehaaniliste osade disainimiseks kasutati raalprojekteerimist (CAD, ingl *Computer-Aided Design*), mis võimaldab arvutis mudelid valmis joonestada ning vajalikke liikumisvabadusi visualiseerida. Sedasi disainides saab juba töö algfaasis tuvastada vigu ning vähendada aja- ja materjalikulu printimisel. Samuti on arvutis joonestamise eeliseks täpsete jooniste kasutamine ja muutmine erinevates seadmetes läbi pilvelahendust pakkuvate programmide. Käesoleva töö raames kasutati tarkvara Autodesk Fusion 360 [22], sest selle rakendusega on kogu lahendus pilve-põhine ning teistele SemuBoti liikmetele näha.

Seadme disainimisel ja tootmisel on eelistatav kasutada olemasolevaid standardseid vahendeid ning nende puudumisel paremaks pidada 3D-prinditavaid lahendusi. Kasutades näiteks kindla keermega polte või laialdaselt kättesaadavaid kuullaagreid, on robot võimalikult paljudele kättesaadav ning vajadusel remonditav ja hooldatav. Lisaks saab 3D-printimise puhul lihtsamini erinevaid materjale katsetada. Töö raames loodud humanoidroboti käsi on kõigile toodetav ja arendatav.

SemuBoti käe valmistamiseks kasutatud osad (Tabel 1) on standardsed ning laialdaselt kättesaadavad. Üldise struktuuri ja skeleti ehitamiseks kasutati alumiiniumprofiili, millele disainiti 3D-prinditavad ühendused (Lisa 1) erinevate elementide vahele. Kinnitusvahenditena kasutati M3, M4 ja M8 polte, *nylock* mutreid, alumiiniumprofiili kinnitusi, sulatatavaid sisekeermeid ja seadekruve ning pöörlevate liigutuste kinnitamiseks rakendati kuullaagreid.

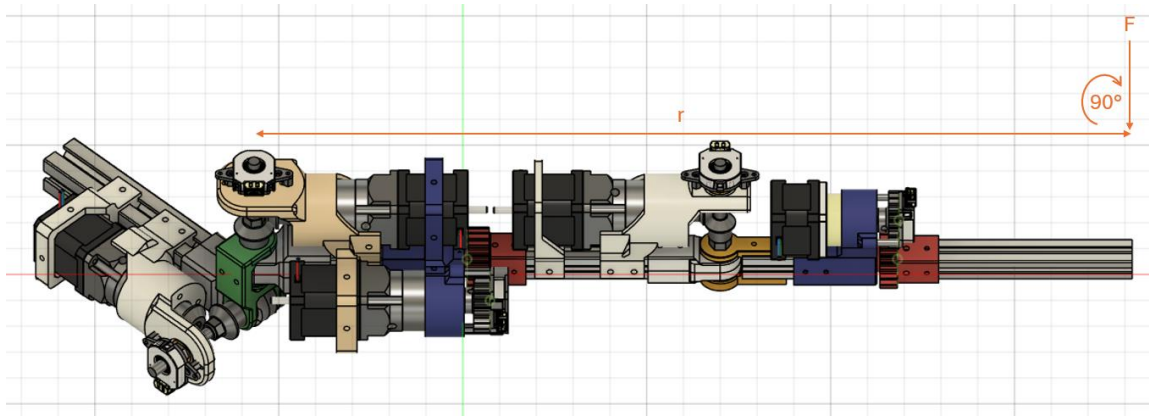
Tabel 1. Laialdaselt kättesaadavad mehaanilised osad

Nimetus	Pilt
30 mm ja 20 mm alumiiniumprofiilid	
M3 ja M4 polt	
M8 polt	
M8 mutter <i>nylock</i>	
M3 seadekruvi	

Pikk M3 mutter	
30 mm ja 20 mm alumiiniumprofiili kinnitused	
M3 sulatatav sisekeere	
Kuullaager	
Väiksem 45° koonushammasratas 20 hambaga	
Suurem 45° koonushammasratas 20 hambaga	

4.1.1. Mootorite valik

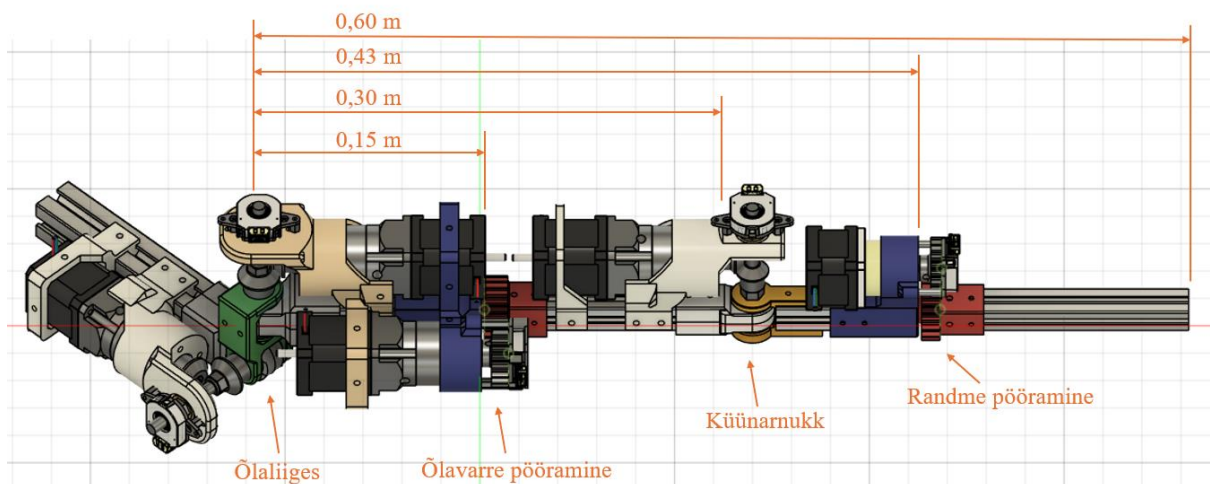
Töö planeerimisfaasis viidi läbi konservatiivsed arvutused sobivate täiturite valimiseks. Samm-mootorite valikul arvutati vajalik jõumoment valemiga $\tau = rF\sin\theta$, kus F tähistab jõudu, r jõu rakendamise kaugust ning θ on nurk F ja r vahel. Kuna jõumoment mõjub käele kõige tugevamalt siis, kui käsi on maaga paralleelselt ja raskusjõu vektor on maaga risti (Joonis 11), siis arvutused viidi läbi eeldusel, et käsi on sirge ning nurk käe ja jõuvektori vahel on 90° . Selleks, et kätt tõstmisel kiirendada ning langetamisel aeglustada, kasutati arvutusel 1,5-kordset gravitatsioonikonstanti $1,5g \approx 15 \text{ N/kg}$. Kuna $\sin(90) = 1$ ja $F = mg$, siis jõumomendi valem lihtsustub kujule $\tau = 15rm$.



Joonis 11. Sirge käe asend kõige tugevamalt mõjuva jõumomendiga

Esiteks otsustati, et randme pööramiseks on piisav 6,75 Nm jõumomendiga mootor Nema 17 koos 27:1 käigukastiga [23], mis kokku kaalub 0,42 kg ja randmest edasi ei lisandu rohkem kui 1 kg. Lisaks planeeriti kasutada teiste liigutuste sooritamiseks samm-mootoreid Nema 17 [24] koos 50:1 käigukastiga [25], mis kokku kaaluvad 0,781 kg. Efektiivsusega 94% suudab viimane komplekt välja anda 20,68 Nm.

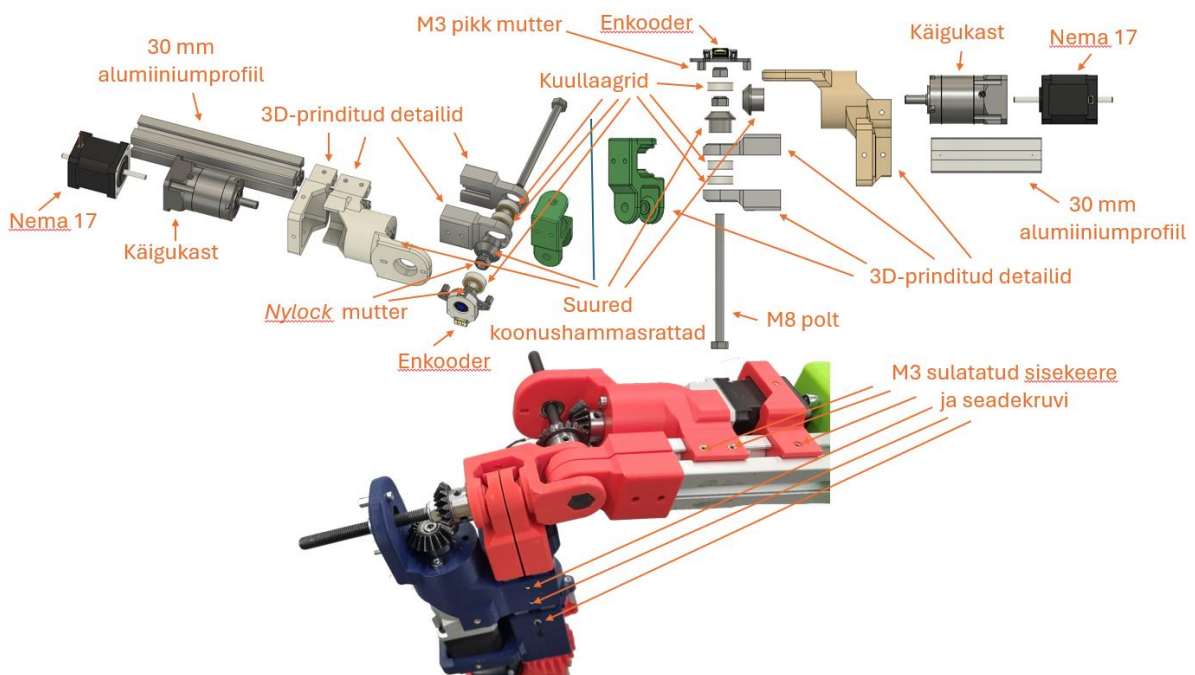
Jõumomendi arvutamiseks (Lisa 2) mõõdeti planeeritavate mootorite maksimaalsed kaugused (Joonis 12) ning arvutati iga liikumisvabaduse kohta vajalik jõumoment. Muude komponentide tarbeks liideti igale mootori massile veel juurde 0,2 kg. Arvutuste käigus selgus, et küünarnuki painutamiseks ja õlavarre pööramiseks on tarvis ~13 Nm ja käe tõstmiseks ette ja kõrvale ~17 Nm. Kuna valitud mootorid jäid vajaliku jõumomendi piiridesse, siis otsustati nende rakendamise kasuks.



Joonis 12. Mootorite maksimaalsed kaugused õlast

4.1.2. Õlaliiges

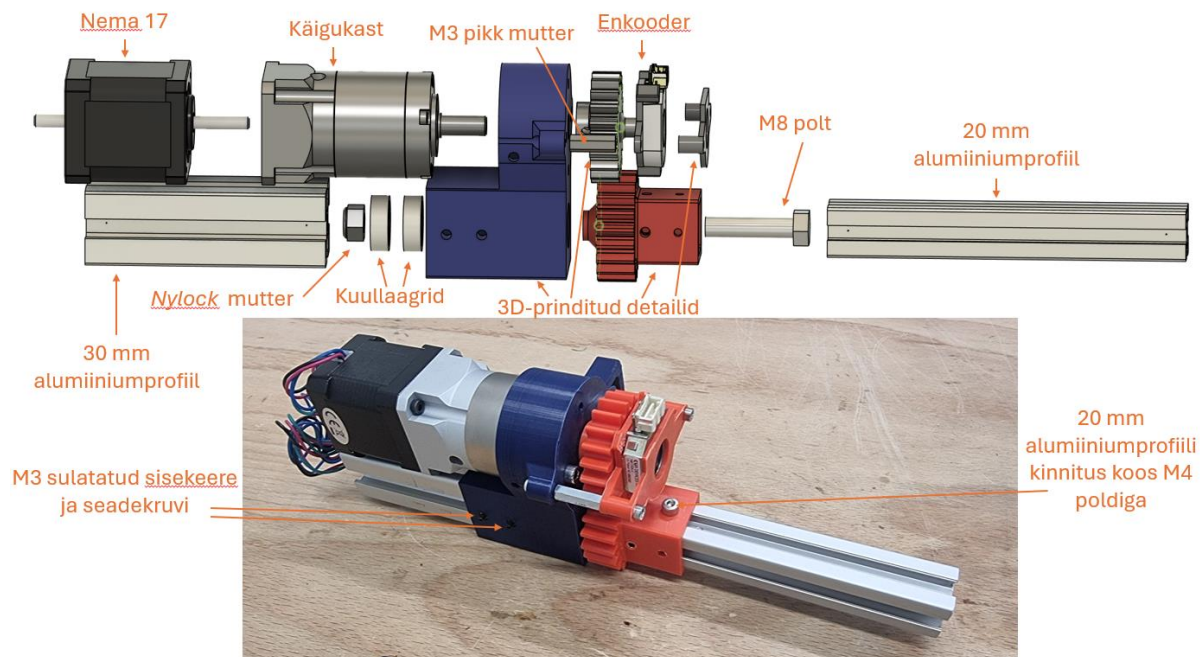
Õlaliigeses (Joonis 13) on loodud käel võimalik sooritada tõstmisliigutusi ette ja kõrvale. Selleks on paigutatud Nema 17 sammootorid koos 50:1 käigukastiga rangluule ning õlavarrele. Mõlemal pool on rakendatud 30 mm alumiiniumprofiili. Ülekande jaoks on kasutatud suuremaid 45° koonushammasrattaid, et mootor oleks paigutatud paralleelselt käega mitte risti. Liiges on fikseeritud kuullaagrite ning M8 poldiga, mis on hammasratta kinnituskohast siledaks lihvitud.



Joonis 13. Õlaliigese CAD joonise plahvatusvaade ja valminud detail. Mootori paigutus rangluul (vasak ülemine), mootori paigutus õlavarrel (parem ülemine) ja valminud detail (alumine)

4.1.3. Õlavarre pööramine

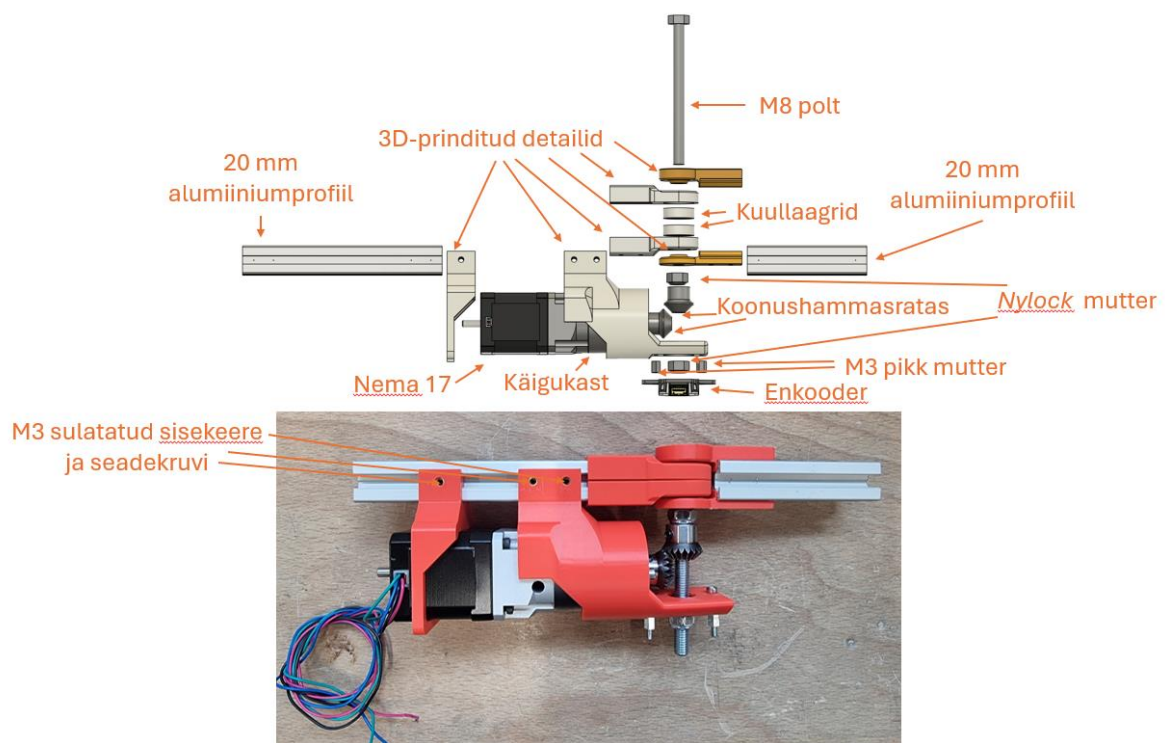
Kolmas liikumisvabadus (Joonis 14) on paigutatud õlavarrele ning see pöörab küünarnuki asendit. Selle tarbeks disainiti Nema 17 sammootori ja 50:1 käigukasti kinnitus 30 mm alumiiniumprofiili külge ning hammasrattaga kinnitus 20 mm alumiiniumprofiili külge. Lisaks loodi sobilik 1:1 hammasratas käigukasti teljele ja enkoodri kinnitus hammasrattale ja mootoriraamile.



Joonis 14. Õlavarre pööramise CAD joonise plahvatusvaade (ülemine) ja valminud detail (alumine)

4.1.4. Künarnukk

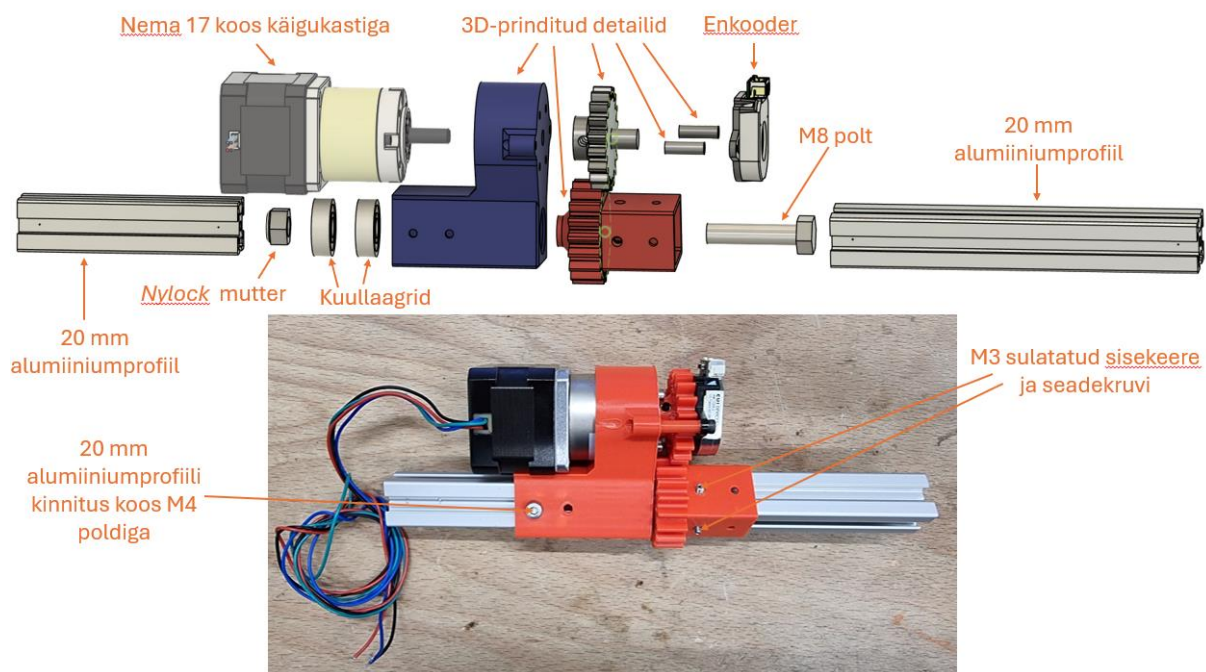
Künarnuki (Joonis 15) sirutamiseks ja painutamiseks kasutati samuti Nema 17 sammootorit koos 50:1 käigukastiga. Ülekanne toimub väiksemate 45° koonushammasratastega ning liiges on kinnitatud kuullaagrite abiga 20 mm alumiiniumprofiili külge. Liigese kinnitused ja kuullaagrid on ühendatud M8 poldiga, mis on koonushammasratta fikseerimiseks ühenduskohast siledaks lihvitud. Kahepoolse võlliga Nema 17 mootoril lõigati ära tagumine võll, et tagada kompaktsem disain ning vältida tahtmatuid interaktsioone liikuvate osade vahel.



Joonis 15. Küünarnuki CAD joonise plahvatusvaade (ülemine) ja valminud detail (alumine)

4.1.5. Randme pööramine

Randme pööramiseks on käsivarrele disainitud pööramise liigutus (Joonis 16), kasutades 3D-prinditud hammasrattaid. Täituriks valiti Nema 17 sammootor koos 27:1 käigukastiga ning see on paigutatud küünarnuki poole. Mootor on kinnitatud 20 mm alumiiniumprofiili külge ning kinnituse sisse on paigaldatud kaks kuullaagrit. Randme poole on paigutatud hammasrattaga ühendus 20 mm alumiiniumprofiilile ning see on M8 poldi ja kuullaagrite abil monteeritud küünarvarre külge.



Joonis 16. Randme pööramise CAD joonise plahvatusvaade (ülemine) ja valmistatud lahendus (alumine)

4.2. Tootmine

Tootmiseks kasutati peamiselt 3D-prinditavaid detaile, mis prinditi ASA filamendiga. Materjali valimisel lähtuti sellest, et materjal peaks sobima mehaaniliste detailide tootmiseks, omama tugevaid ja vastupidavaid omadusi ning olema erinevate printeritega prinditav. See tähendab, et filamendi printimiseks vajalikud temperatuurid peavad olema saavutatavad ning peab olema printimise võimekus standardse 0,4 mm düüsiga. Näiteks Bambu Lab X1 [26] printeriga on võimalik saavutada printimise temperatuur 300° ning aluse temperatuur 120° ning Prusa i3 MK3S [27] printeriga samuti vastavalt 300° ja 120°. Nendele kriteeriumitele vastas ASA filament, mille printimistemperatuur jääb vahemikku 255-265° [28], aluse temperatuur vahemikku 105-115° [28] ning see on 0,4 mm düüsiga prinditav. Kuna ASA vastab ka tugevuse ja kestvuse normidele [28], siis otsustati seda töös kasutada.

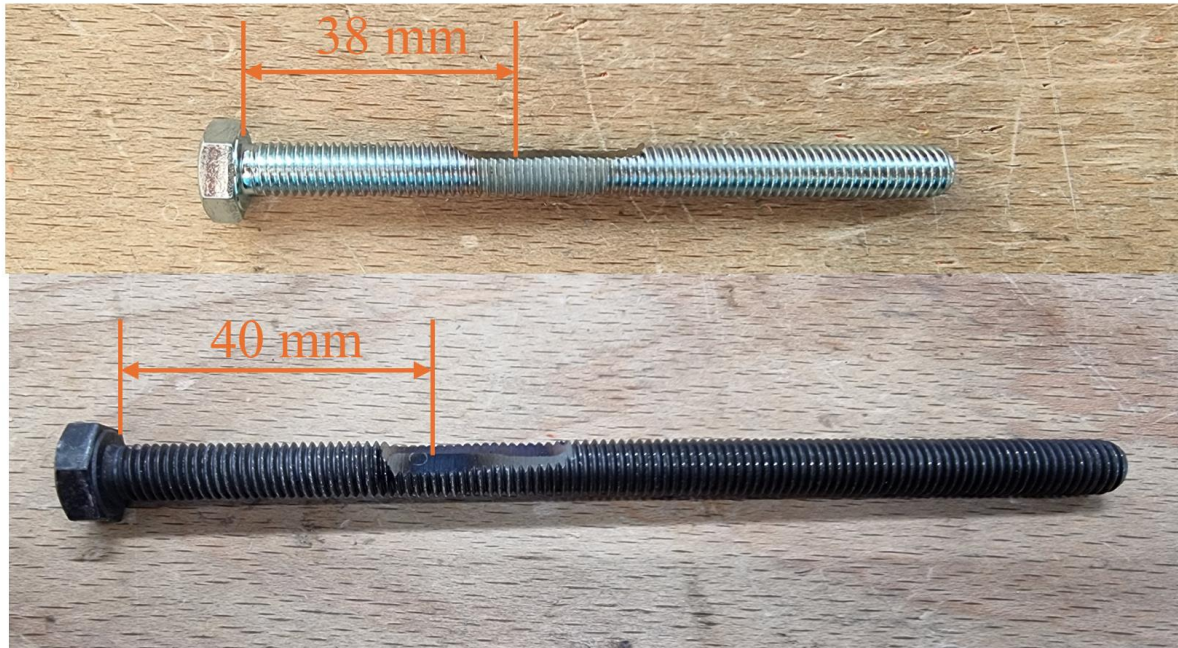
3D-printimiseks kasutati Bambu Lab X1 Carbon [26] ja Prusa i3 MK3S [27] printereid ning vastavalt Bambu Studio [29] ja PrusaSlicer [30] tarkvara. Printimise seadistamisel lisati ülemisi ja alumisi kihte 5, seinte ringe 7 ning 100% täitmist kontsentrilise valikuga. Lisaks rakendati automaatseid tugesid ning sisemist ja välimist *brim* kihti ning ühe kihi paksuseks valiti 0,2 mm.

Kogu käesoleva töö raames disainitud käe 3D-detailide tootmiseks Bambu Labi seadmega tuleb printida kolm komplekti, mis kokku võtavad aega 35 tundi ja 40 minutit (Tabel 2). Materjalikulu terve käe printimiseks on ~691 grammi, ehk tootmiseks piisab ühest 1 kg filamendipoolist. Samade komplektide printimiseks Prusa printeriga kulub aga 85 tundi ja 2 minutit ning materjalikulu on ~745 grammi.

Tabel 2. Humanoidi käe osade 3D-printimise aja- ja materjalikulu

Printer	Detail	Printimisaeg	Filamendikulu (g)
Bambu Lab X1 Carbon	Õlaliigese komplekt	12 h 5 min	359,17
	Õlavarre komplekt	15 h 51 min	132,21
	Küünarnuki ja randme komplekt	7 h 44 min	199,77
	Kokku	35 h 40 min	691,15
Prusa i3 MK3S	Õlaliigese komplekt	42 h 48 min	386,39
	Õlavarre komplekt	16 h 17 min	142,52
	Küünarnuki ja randme komplekt	25 h 57 min	215,78
	Kokku	85 h 2 min	744,69

Lisaks detailidele printimisele kohandati tootmise ajal mehaanilisi osi kokku sobituma. Koonushammasrataste kasutamiseks lihviti seadekrugi fikseerimiskohast M8 polt siledaks (Joonis 17). Küünarnuki puhul pidi siledaks lihvima 38 mm ning õlaliigeses 40 mm kauguselt. Töö raames kasutati selleks lauakäia, mistõttu on lihvitud lõik laiem, kui tegelikult vajalik. Samuti lõigati välja sobiva pikkusega alumiiniumprofiili tükid ning sulatati prinditud detailidele sisekeermed.



Joonis 17. Siledaks lihvitud M8 poldid õlaliigesesse (ülemine) ja kiiinarnukki (alumine)

4.3. Koostamine

Kui kõik vajalikud osad olid toodetud, siis ühendati osad omavahel, kasutades polte, mutreid ja seadekruve. Seadekrude kinnitamiseks sulatati eelnevalt 3D-prinditud detailide sisse M3 sulatatavad keermed. M8 polte ja mutreid kasutati liikuvate osade sidumiseks kuullaagritega, sest kuullaagri sisediaameeter on 8 mm. Mootorite fikseerimiseks kasutati M3 ja M4 polte ning mootoriühendused kinnitati alumiiniumprofiilikülge, kasutades seadekruve. Koostamisel probleeme ei tekkinud ning detailid sobitusid omavahel hästi.

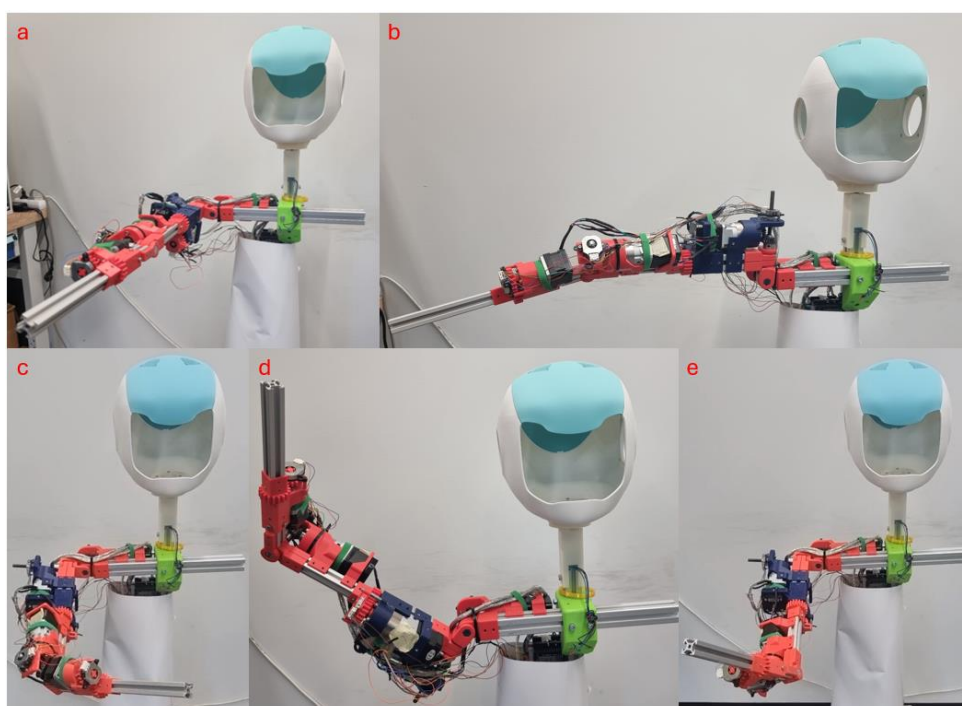
4.4. Maksumus

Humanoidroboti käe valmistamiseks kasutati erinevaid olemasolevaid ning 3D-prinditavaid detaile (Lisa 2), mille maksumus ilma poltide ja mutriteta kokku oli 510 eurot. Sellest 86% moodustasid elektroonikakomponendid, 4% kulus 3D-prinditavatele kinnitustele ning ülejäänud 10% poest ostetavatele mehaanilistele osadele.

5. Testimine ja järeldused

5.1. Testimine

Käesoleva töö raames valminud humanoidroboti käe liikumise testimiseks liigutati käe kõiki osi (Lisa 4) erinevates asendites (Joonis 18) vähemalt kolm korda. Arvutuste kohaselt on kõige raskemad liigutused sirge käe ette ja kõrvale tõstmine (Joonis 18-a ja Joonis 18-b), sest siis on jõumoment kõige suurem. Seetõttu sooritati neid liigutusi kümme korda. Selleks, et esitatud nõuded oleksid täidetud, testiti ka plaksutamise ja käe surumise asendeid (joonis 18).

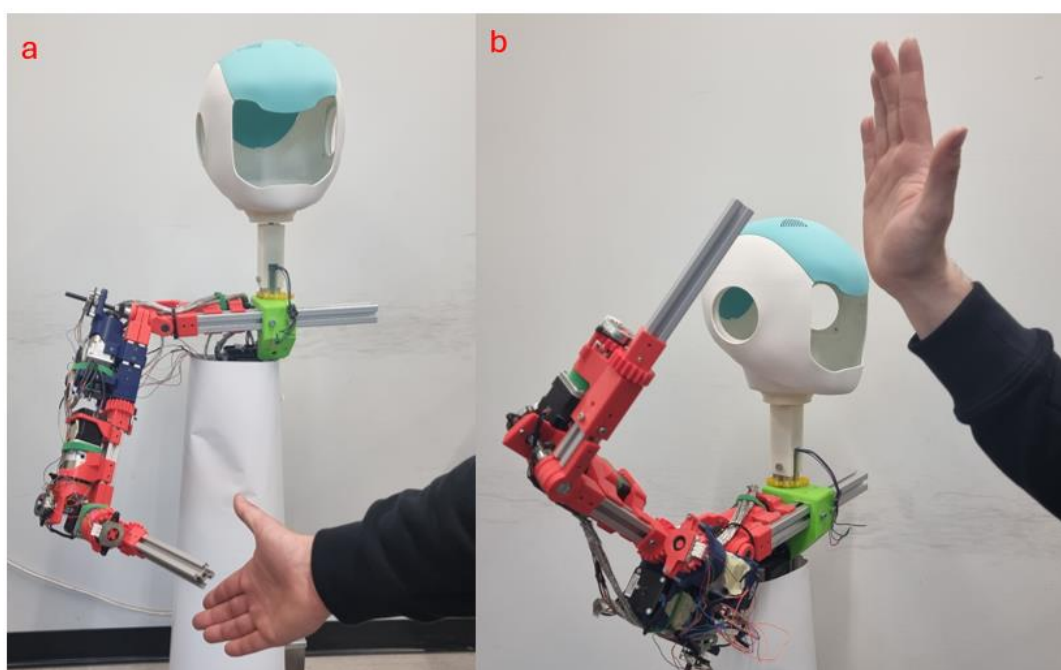


Joonis 18. Valminud humanoidroboti käsi ette sirutatult (a), kõrvale sirutatult (b), ette sirutatult koos käünarmuki painutusega (c), lehvitamise asendis (d) ja ette sirutatul koos randmega suunamisega kehast eemale (e)

Testimise käigus esines mõningaid kitsendusi sirge käe kõrvale tõstmisega, sest rangluule paigutatud mootorikinnitus oli nihkunud ning koonushammasrattad jätsid astmeid suure jõu tõttu vahele. Muude asendite sooritamisel probleeme ei esinenud ning vajalikud käeasendid olid valminud lahendusega sooritatavad.

5.2. Järeldused ja puudused

Töö raames loodud lahendus käitus ootustele vastavalt ning peaaegu kõik osad toimisid nii eraldiseisvalt kui ka koos korrektselt. SemuBoti käele esitatud nõuded said täidetud, sest valminud seadmega saab jäljendada inimese käe liikumist, sooritada käe surumise ja plaksutamise asendeid ning kasutajaga plaksu lüüa (Joonis 19). Kuna arvutuste põhjal valitud mootorid jäid täpselt vajalikku jõumomendi piiridesse, siis suurema jõu rakendamisel mootor enam edasi ei liigu. Seega ei ole ka ohtu, et käsi oleks liiga tugev, et kasutajat ohustada. Selleks, et oleks võimalik tehtud tööd ka teistel korrata, loodi käe tootmisjuhised (Lisa 5).



Joonis 19. Humanoidroboti käe kätlemise asend (a) ja kasutajaga plaksu löömise asend (b)

Loodud lahendusel on ka mõned kitsaskohad. Näiteks samm-mootorite suuruse tõttu on õlavarre diameeter lehvitamise asendis (Joonis 19-b) suhteliselt suur (õlavarre maksimaalne diameeter ilma pealmise katteta on 14 cm) ning ei ole enam visuaalselt proportsioonis inimese käega. Samuti on mootorid suhteliselt rasked ning seetõttu muutub humanoidi ülakeha samuti raskeks: üks käsi kaalub umbes 5,5 kg ning kaks kätt seega 11 kg. Kuigi loodud lahendusega saab vajalikud liigutused sooritatud, siis edasise arenduse käigus võiks õlaliigese asendada keralliigese, sest nii on käe liigutamisel erinevaid piiranguid vähem.

Kokkuvõte

Tudengiprojektina valmiv avatud lähtekoodiga sotsiaalne humanoidrobot SemuBot on loodud olema turvaline kaaslane abistamaks lapsi rehabilitatsioonis. Selleks, et mõjuda inimesele sarnaselt, peab ta välja nägema ja käituma nagu inimene. Oli vaja luua esimene iteratsioon humanoidi kätest nii, et neil oleksid samad liikumisvabadused nagu inimese kätel. Niimoodi on robotil võimalik kehakeeles suhelda, kätelda, plaksu lüüa ning rääkimise ajal käsi loomulikult liigutada.

Bakalaureusetöö tulemusena disainiti SemuBotile kaks kätt õlast randmeni ning realselt toodeti humanoidile parem käsi. Töös kirjeldati olemasolevaid motoriseeritud käsi ning erinevaid lähenemisi nende disainimiseks. Valminud lahendusel kasutab samm-mootoreid viie liikumisvabaduse täitmiseks. Loodud käsi on disainitud modulaarselt, mis võimaldab tänu avatud lähtekoodiga lähenemisele eri osasid täiendada või välja vahetada. Töö tulemusena suudab SemuBot parema käega kätelda, lehvitada ning kasutajaga plaksu lüüa.

Testimise käigus esines ka mõningaid probleeme. Rangluule disainitud mootorikinnitus andis suure jõu tõttu natuke järelle ning koonushammasratas jätab käe väljasirutatud asendis astmeid vahele. Samuti on samm-mootorite kasutamise tõttu õlavars suhteliselt jäme ning ei ole proportsioonis inimese käega. Kuna mootorid koos käigukastidega on rasked, siis roboti üks käsi kaalub 5,5 kg, mis muudab ülakeha samuti suhteliselt raskeks. Siiski suutis valminud käsi sooritada kõik ettenähtud liigutused ning tööle seatud nõuded ja eesmärgid said täidetud.

Tänuavaldused

Autor soovib tänada töö juhendajat Karl Kruusamäed heade soovitude ja kiire ning asjakohase tagasiside eest. Tema nõu ja tugi olid suureks abiks töö kirjutamisel. Samuti aitasid töö valmimisele kaasa Renno Raudmäe ja Leonid Zinatullin. Nende head soovitused panid aluse töötava humanoidroboti käe loomisele.

M. Kask

Viidatud kirjandus

- [1] A. Kolk, „Uute tehnoloogiliste lahenduste kasutamine laste neurorehabilitatsioonis“, *Eesti Arst*, 2020.
- [2] C. Breazeal, K. Dautenhahn, ja T. Kanda, „Social robotics“, *Springer Handb. Robot.*, lk 1935–1972, 2016.
- [3] L. Vianello *et al.*, „Human-humanoid interaction and cooperation: a review“, *Curr. Robot. Rep.*, kd 2, nr 4, lk 441–454, 2021.
- [4] B. Johansson, T. A. Tjøstheim, ja C. Balkenius, „Epi: An open humanoid platform for developmental robotics“, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, kd 17, nr 2, lk 1729881420911498, 2020.
- [5] Z. Faraj *et al.*, „Facially expressive humanoid robotic face“, *HardwareX*, kd 9, lk e00117, 2021.
- [6] M. Kerzel, E. Strahl, S. Magg, N. Navarro-Guerrero, S. Heinrich, ja S. Wermter, „Nico—neuro-inspired companion: A developmental humanoid robot platform for multimodal interaction“, *2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, IEEE, 2017, lk 113–120.
- [7] A. K. Pandey ja R. Gelin, „A mass-produced sociable humanoid robot: Pepper: The first machine of its kind“, *IEEE Robot. Autom. Mag.*, kd 25, nr 3, lk 40–48, 2018.
- [8] J. J. Bird, D. R. Faria, C. Premevida, A. Ekárt, ja P. P. Ayrosa, „Overcoming data scarcity in speaker identification: Dataset augmentation with synthetic mfccs via character-level rnn“, *2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, IEEE, 2020, lk 146–151.
- [9] E. Raymond, „The cathedral and the bazaar“, *Knowl. Technol. Policy*, kd 12, nr 3, lk 23–49, 1999.
- [10] J. A. Bottega *et al.*, „Jubileo: an open-source robot and framework for research in human-robot social interaction“, *2022 IEEE-RAS 21st International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, IEEE, 2022, lk 149–154.
- [11] C. Tatsch, A. Ahmadi, F. Bottega, J. Tani, ja R. da Silva Guerra, „Dimitri: an open-source humanoid robot with compliant joint“, *J. Intell. Robot. Syst.*, kd 91, lk 291–300, 2018.

- [12] M. Lapeyre *et al.*, „Poppy project: open-source fabrication of 3D printed humanoid robot for science, education and art“, *Digital Intelligence 2014*, 2014, lk 6.
- [13] „UFACTORY xArm“, UFACTORY. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 20. märts 2024] <https://www.ufactory.cc/xarm-collaborative-robot/>
- [14] „UR5e“, Universal Robots. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 20. märts 2024] <https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/>
- [15] „Franka Production 3“, Franka Robotics. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 20. märts 2024] <https://franka.de/production>
- [16] M. Plooi ja M. Wisse, „A novel spring mechanism to reduce energy consumption of robotic arms“, *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2012, lk 2901–2908.
- [17] P. Maciejasz, J. Eschweiler, K. Gerlach-Hahn, A. Jansen-Troy, ja S. Leonhardt, „A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation“, *J. Neuroengineering Rehabil.*, kd 11, lk 1–29, 2014.
- [18] K. Abe, K. Tadakuma, ja R. Tadakuma, „ABENICS: Active ball joint mechanism with three-DoF based on spherical gear meshings“, *IEEE Trans. Robot.*, kd 37, nr 5, lk 1806–1825, 2021.
- [19] P. Ohta *et al.*, „Design of a lightweight soft robotic arm using pneumatic artificial muscles and inflatable sleeves“, *Soft Robot.*, kd 5, nr 2, lk 204–215, 2018.
- [20] „Pepper - Joints“. Aldebaran Sware Documentation. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 9. märts 2024] http://doc.aldebaran.com/2-0/family/juliette_technical/joints_juliette.html
- [21] „Prosthetic Arm“, HDT Global. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 9. märts 2024] <https://www.hdtglobal.com/product/prosthetic-arm/>
- [22] „Autodesk Fusion 360 for personal use“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024] <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/personal>
- [23] „Nema 17 Stepper Motor Bipolar L=33mm w/ Gear Ratio 27:1 Planetary Gearbox“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024] <https://www.omc-stepperonline.com/nema-17-stepper-motor-bipolar-l-33mm-w-gear-ratio-27-1-planetary-gearbox-17hs13-0404s-pg27>

- [24] „Dual Shaft Nema 17 Bipolar 1.8deg 44Ncm(62.3oz.in) 1.68A 42x42x48mm 4 Wires“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024] <https://www.omc-stepperonline.com/dual-shaft-nema-17-bipolar-1-8deg-44ncm-62-3oz-in-1-68a-2-8v-42x48mm-4-wires-17hs19-1684d>
- [25] „EG Series Planetary Gearbox Gear Ratio 50:1 Backlash 20arc-min for Nema 17 Stepper Motor“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024] <https://www.omc-stepperonline.com/eg-series-planetary-gearbox-gear-ratio-50-1-backlash-20-arc-min-for-nema-17-stepper-motor-eg17-g50>
- [26] „Bambu Lab X1 Series“, Bambu Lab. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 13. mai 2024] <https://bambulab.com/en-eu/x1>
- [27] „Original Prusa i3 MK3S+“, Prusa research by Josef Prusa. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 13. mai 2024] <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/>
- [28] „Prusament ASA Sapphire Blue 850g“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 7. mai 2024] <https://www.prusa3d.com/en/product/prusament-asa-sapphire-blue-850g/>
- [29] „Bambu Studio“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024] <https://bambulab.com/en/download/studio>
- [30] „PrusaSlicer 2.7.4“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024] https://www.prusa3d.com/en/page/prusaslicer_424/
- [31] „WZYTEU Pack of 32 608zz Ball Bearings, Metal Double Shielded Miniature Deep Groove Ball Bearings for Skateboard and Roller Skates Inline Skates (8 mm x 22 mm x 7 mm, Silver)“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024] https://www.amazon.de/-/en/WZYTEU-Bearings-Shielded-Miniature-Skateboard/dp/B08MPR6HXW/ref=sr_1_42?crid=S756HY7I8KR3&keywords=608+bearing&qid=1701091819&sprefix=608+bearing%2Caps%2C171&sr=8-42
- [32] „mxfans 2 x Module 1.5 Silver 20T Steel Conical Bevel Gear Wheel with Top Screws 8 mm Silver“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024] https://www.amazon.de/-/en/mxfans-Module-Silver-Conical-Screws/dp/B07DWQTWGT/ref=sr_1_1?crid=TE8E2A9J15PW&dib=eyJ2IjoiMSJ9.KRJdG Gwsl85iAjeEK53KVmfyh9i4aLKLzOyEI7Wl1Bj7AHfQ5bxwrymg8smKmlv11yVZ-P3XL4ismXJr-LPwVFyVQE_ZRhkOAWtRWEXCXhZ0r9NJFZGs3PFurxAJCoEHBb2hrQBP4QO_RcIW

53RlErjwWvc6gn8VVbdF5ez-

dgg0U1ghlG848EAbMrjxQlX0o5S2xuNNgLiIUJs4ujmMIWd5XGK3WWX8Bh6wXVY9jB
k.86cQb3_GmjQrqBo9x6wvu_cS7tllfM5bA3IzLP5boBo&dib_tag=se&keywords=Bevel%2
BGear%2BWheel%2Bwith%2BTop%2BScrews%2B8%2Bmm&qid=1709111786&s=diy&s
prefix=bevel%2Bgear%2Bwheel%2Bwith%2Btop%2Bscrews%2B8%2Bmm%2Cdiy%2C18
3&sr=1-1-catcorr&th=1

[33] „Aluminium profiel 3030 extrusion lengte 1 m (123-3D huismerk)“. [Võrgumaterjal]
[Kasutatud: 7. mai 2024] <https://www.123-3d.nl/123-3D-Aluminium-profiel-3030-extrusion-lengte-1-m-123-3D-huismerk-i2331.html>

[34] „CUI Devices AMT232A-V“. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024]
<https://www.mouser.ee/ProductDetail/CUI-Devices/AMT232A-V?qs=f9yNj16SXrJ%2FuaJE2Zwe1w%3D%3D>

[35] „Aluminium profiel 2020 extrusion lengte 1 m (123-3D huismerk)“. [Võrgumaterjal]
[Kasutatud: 7. mai 2024] <https://www.123-3d.nl/123-3D-Aluminium-profiel-2020-extrusion-lengte-1-m-123-3D-huismerk-i1373.html>

[36] „Miter Gearbox 2pcs Bevel Gear 1 Shape 1 5t, 1m 20 Teeth 45# Steel Inner Hole
5mm/6mm/7mm/8mm Gear 90 Degree Meshing Angle Steel Gear Bolt M5 Sprocket
Mechanical (Color: 20 Teeth “. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10. aprill 2024]
https://www.amazon.de/dp/B0C4KWS7D3?ref=ppx_yo2ov_dt_b_product_details&th=1

Lisa 1: Käe disaini- ja tootmisfailid

Töö käigus loodud CAD joonised ja 3D-printimise failid asuvad veebiaadressil:

<https://github.com/SemuBot/Kask-thesis-2024-SemuBot-hand>

Lisa 2: Käe jõumomendi arvutused

Liikumine	Mass (kg)	Maksimaalne kaugus õlast (m)	Jõumoment 1,5 g korral	Jõumoment 1 g korral
Käe tõstmine ette	$0,781 + 0,2$ $= 0,981$	0	17,4135	11,609
Käe tõstmine kõrvale	$0,781 + 0,2$ $= 0,981$	0,15	17,4135	11,609
Õlavarre pööramine	$0,781 + 0,2$ $= 0,981$	0,15	12,999	8,666
Küünarnukk	$0,781 + 0,2$ $= 0,981$	0,3	12,999	8,666
Randme pööramine	$0,42 + 0,2$ $= 0,62$	0,43	-	-
Käsi randmest edasi	1	0,6	-	-

Lisa 3: Käe ja käeosade loomiseks vajalike osade maksumus

Käeosa	Detail	Mass (g)	Tüki hind (€)	Hind kokku (€)
Õlg	3D-prinditud detailid	359,17	29,99 [28]	10,77
	Kuullaagrid (4 tk)	-	0,41 [31]	1,64
	Koonushammasrattad (4 tk)	-	5,29 [32]	21,16
	30 mm alumiiniumprofiil	-	23,50 [33]	8,83
	Nema 17 sammootor (2 tk)	-	10,23 [24]	20,46
	50:1 käigukast Nema 17 mootorile (2 tk)	-	40,14 [25]	80,28
	Enkooder (2 tk)	-	42,02 [34]	82,04
	Kokku			
Õlavars	3D-prinditud detailid	132,21	29,99 [28]	3,96
	Kuullaagrid (2 tk)	-	0,41 [31]	0,82
	20 mm alumiiniumprofiil	-	11,50 [35]	1,50
	Nema 17 sammootor	-	10,23 [24]	10,23
	50:1 käigukast Nema 17 mootorile	-	40,14 [25]	40,14
	Enkooder	-	42,02 [34]	42,02
	Kokku			
Küünarnukk	3D-prinditud detailid	135,30	29,99 [28]	4,06
	Kuullaagrid (2 tk)	-	0,41 [31]	0,82
	Koonushammasrattad (2 tk)	-	5,43 [36]	10,86
	20 mm alumiiniumprofiil	-	11,50 [35]	1,50
	Nema 17 sammootor	-	10,23 [24]	10,23
	50:1 käigukast Nema 17 mootorile	-	40,14 [25]	40,14
	Enkooder	-	42,02 [34]	42,02
	Kokku			
Ranne	3D-prinditud detailid	64,76	29,99 [28]	1,94

	Kuullaagrid (2 tk)	-	0,41 [31]	0,82
	20 mm alumiiniumprofiil	-	11,50 [35]	3,83
	Nema 17 sammootor koos 27:1 käigukastiga	-	27,65 [23]	27,65
	Enkooder	-	42,02 [34]	42,02
	Kokku			76,26
Kokku				509,74

Lisa 4: Käe liigutamise testimise video

Töö raames valminud käe liikumise video on leitav veebiaadressilt:

https://github.com/SemuBot/Kask-thesis-2024-SemuBot-hand/blob/main/Videos/SB_complete_all_parts_moving.mp4

Lisa 5: Käe tootmisjuhised

Tööraames valminud käe tootmisjuhised on leitavad veebiaadressilt:

https://github.com/SemuBot/Kask-thesis-2024-SemuBot-hand/blob/main/SemuBot_assembly_instructions.pdf

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristjan Madis Kask,

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

„Käe mehaanika disain sotsiaalsele humanoidrobotile SemuBot“,

mille juhendaja on Karl Kruusamäe,

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 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, 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.

Kristjan Madis Kask

Tartus, **20.05.2024**