

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Martin Kaur

Servodel põhinev sotsiaalse robotkäe süsteem SemuBotile

Bakalaureusetöö (12 EAP)
Arvutitehnika eriala

Juhendaja:
spetsialist Leonid Zinatullin

Tartu 2025

Resümee/Abstract

Servodel põhinev sotsiaalse robotkäe süsteem SemuBotile

Lühikokkuvõte: Sotsiaalsed humanoidrobotid on kasutusel erivajadustega laste taastusravis. Selliste robotite käed peavad olema turvalised ning nendel robotkätel peab olema võimekus väljendada emotsioone. Töö käigus analüüsitakse mõnda eksisteerivat arendust robotkäte valdkonnas, et leida võimalikke lahendusi. Praeguse seisuga ei ole arendatud välja üldist avatud lähtekoodiga süsteemi, mida saaks kasutada mitme erineva ehitusega robotkäe juhtimiseks. Kirjeldatud süsteem peaks olema ka modulaarne ja lihtsasti kasutatav. Sobiv lahendus pakutakse välja ning kirjeldatakse käesolevas töös. Välja pakutav lahendus hõlmab draiverit ehk disainitud trükkplaati püsivaraga. Samuti on süsteemi osaks lihtne kasutajaliides. Suhtluse pidamiseks draiveri ja kasutajaliidesega pardaarvuti vahel kasutatakse jadaühendust. Kasutades servomootoreid ning 3D printitud mehaanilisi osasid, valmistatakse robotkäe prototüüp. Töö tulemusena loodud servode juhtimise süsteem sobib kokku SemuBoti nõuetega ning on valmis elektriliseks, digitaalseks ja mehaaniliseks integreerimiseks ülejäänud SemuBotiga. Süsteemi sobitamiseks SemuBoti tulevaste versioonidega või teiste robotkätega on vaja süsteemis mõningaid täiendusi.

CERCS: T120 Süsteemitehnoloogia, arvutitehnoloogia; T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika;

Märksõnad: arvutid, robotika, humanoidrobot, mikrokontroller, mehaanika, elektroonika

Servo Based Social Robotic Arm System for SemuBot

Abstract: Social humanoid robots are used in rehabilitation for children. The robotic arms used for this purpose need to be safe and must have the capability to be emotionally expressive. A few existing developments in the field of robotic arms are discussed to analyse possible solutions for this work. Currently there is no generic open-source system developed for controlling many different robotic arms. The described system should also be pointed towards modularity and ease of use for many different robotic arms with similar purposes. A suitable solution is proposed and described in this thesis. The proposed system includes a driver in the form of a circuit board and a simple user interface. A serial connection is utilised to exchange information between the onboard computer and the driver. A prototype of the robot arm is manufactured using servo motors and 3D printed mechanical parts. Overall, the requirements established for the system were met and the system is suitable for integrating with SemuBot mechanically, digitally and electrically. A few improvements are needed to better integrate the solution with future iterations SemuBot and for use with other robotic arms.

CERCS: T120 Systems engineering, computer technology; T125 Automation, robotics, control engineering

Keywords: computers, control, robotics, humanoid robot, microcontroller, mechanics, electronics

Sisukord

Resümees/Abstract	2
Jooniste loetelu	6
Tablelite loetelu	7
Lühendid, konstandid, mõisted	8
1 Sissejuhatus	9
2 Suhtlemiseks mõeldud robotid	11
2.1 Suhtlemisrobot	11
2.2 Sotsiaalne humanoidrobot	11
3 Humanoidroboti käed	13
3.1 Võimalikud lahendused	13
3.1.1 Robotkäe arhitektuur	13
3.2 Robotkäe liigutamine	15
3.2.1 Käe juhtimine	15
3.2.2 Liigutused ja žestid	15
4 Nõuded disainitavale robotkäele	17
4.1 Kasutaja- ja süsteeminõuded	17
4.1.1 Ühilduvus SemuBotiga	17
4.1.2 Kasutaja nõuded	17
4.1.3 Süsteemi nõuded	18

5	Loodud lahendus	21
5.1	Elektroonika disain	21
5.1.1	Komponentide valik	21
5.1.2	Loodud trükkplaat	23
5.2	Mehaaniline lahendus	25
5.2.1	Mootorite valik	25
5.2.2	Materjalide valik	25
5.3	Tarkvara	26
5.3.1	Püsivara trükkplaadile	26
5.3.2	Kasutajaliides	28
6	Tulemused ja järeldused	32
6.1	Tulemuste analüüs	32
6.2	Võimalikud edasiarendused	32
	Kokkuvõte	34
	Viited	36
	Lisad	38
	Lihtlitsents	41

Jooniste loetelu

2.1	Eesti esimene humanoidrobot SemuBot.	12
3.1	SemuBotile loodava robotkäe pöörlemisteljed.	14
5.1	Elektriskeemi signaalide ja toite plokkiagramm.	22
5.2	Trükkplaadi 3D-mudel.	24
5.3	Trükkplaatide lõplik kuju.	24
5.4	Robotkäe valminud katseksemplar.	26
5.5	Andmed, mis jõudsid draiverilt tagasi juhtarvutisse.	27
5.6	Draiveri tarkvara töö käigu lihtsustatud diagramm.	28
5.7	Kasutajaliidese tarkvara töö lihtsustatud diagramm.	31

Tablelite loetelu

4.1	Kasutaja nõuded	18
4.2	Süsteemi nõuded	20
5.1	Draiverile saadetavad andmed	30
6.1	Ühe trükkplaadi komponentide nimekiri (BOM).	40

Lühendid, konstandid, mõisted

CERCS - Common European Research Classification Scheme

UID - unikaalne identifikaator

F - funktsionaalne

MF - mittefunktsionaalne

ROS - Robotic Operating System

PWM - Pulse Width Modulation

BOM - Bill Of Materials

1 Sissejuhatus

Probleemi tutvustus

SemuBot on sotsiaalne humanoidrobot, millele on vaja uusi robotkäsi liigutuste ja žestide tegemiseks. Eelmine käe disain õlast randmeni oli võrdlemisi kõrge maksumusega ja kaugelt liiga suure massiga. Samuti tarbiks eelnev samm-mootoritel põhinev lahendus tööajal väga palju voolu ning piiraks sellega märkimisväärselt roboti aku eluiga. Vaja on elegantsemat ning paremini roboti nõuetele vastavat robotkäsi.

Sobivat süsteemi ei ole paraku seni tehtud arenduste seast leida. Mitmete servomootorite lihtne ühte süsteemi ühendamine ja nende mootorite kasutajasõbralik juhtimine on probleem, millele pole seni head lahendust või selline lahendus pole kättesaadav. Manussüsteemid, mis on loodud nimetatud eesmärgiga, on tihti väga kallid või vajavad süsteemi töö süvitsi mõistmist. Näiteks ei ole otseselt vajalik kasutajal, kes peab kõigest robotkäsi liigutama, õppida kõigepealt tundma robotkäe draiveri püsivara. Teisalt jällegi on olemas lihtsaid ning vähekulukaid süsteeme, mis välistavad liigse keerukuse, kuid neid ei saa kasutada näiteks mootorite voolu mõõtmiseks.

Tavaliselt arendatakse robotkäsi kui tervikut ning mõeldakse vähe disaini modulaarsusele ja laiendatavusele või kasutatavusele teistsuguste nõuetega süsteemides. See jätab paljud arendajad oma disaini ellu viima arendusplaatidel, millel on tihti mõned puudused, sealhulgas voolu mõõtmise võimekus ja integreeritud toide servodele.

SemuBotile ja ka muudele sotsiaalsetele robotitele võiks leida lihtne lahendus servomootoritest koosnevate süsteemide juhtimiseks, mille keerukus ja maksumus ei ületa keskmise roboti juhtija või disainija võimeid. Samuti peab kindlaks tegema, et robotkäe voolutarve ning avaldatav jõud oleks proportsionaalsed robotkäe eesmärgiga. Samas ei tohi robotkäe või muu servosüsteemi juhtimissüsteem olla nii keeruline, et seda poleks mõistlik toota või rakendada.

Töö eesmärk

Töö käigus vaadeldakse üksikuid seni kasutatud variante robotkäe koostamiseks ning võrreldakse neid käesoleva töö fookuses oleva süsteemiga.

Robotkäe arendamisel ning selle toetavate süsteemide loomisel keskendutakse modulaarsusele, laiendatavusele ja käe madalale kulukusele nii arendaja kui ka roboti jaoks. Töö eesmärgid on saavutatud, kui on loodud süsteem, mis vastab nõuetele, mis on esitatud tabelites 4.1 ja 4.2.

Disainitav robotkäe süsteem peab sobima ka humanoidrobotile SemuBot. Kirjeldatava süsteemi kooslusesse kuuluvad kindlasti robotkäe mootoreid juhtiv trükkplaat püsivaraga ja käe mehaaniline disain. Lisandub juhtimistarkvara, mis on kirjutatud programmeerimiskeeles Python ning kujutab endast lihtsat kasutajaliidest.

Lisaks on töö kontekstis oluline, et robotkäsi oleks turvaline ja võimeline sotsiaalselt käituma. Eelnev tähendab, et käega saab teha liigutusi, näiteks lehvitada või viibata mingis suunas. Samal ajal peab käsi töötama kindlates füüsilistes piirides, et mitte kahjustada ümbritsevat keskkonda.

Töö õnnestumisel valmib modulaarne juhtimissüsteem humanoidroboti kätele, mis on avatud lähtekoodiga ning mida saab kohaldada sobivaks vabalt valitava servodel põhineva robotkäe või muu servomootoreid kasutava mehaanilise süsteemi jaoks. Töö käigus valmib ka robotkäe prototüüp SemuBotile, mille abil saab robotkäe juhtimissüsteemi võimekust katseliselt kinnitada.

2 Suhtlemiseks mõeldud robotid

2.1 Suhtlemisrobot

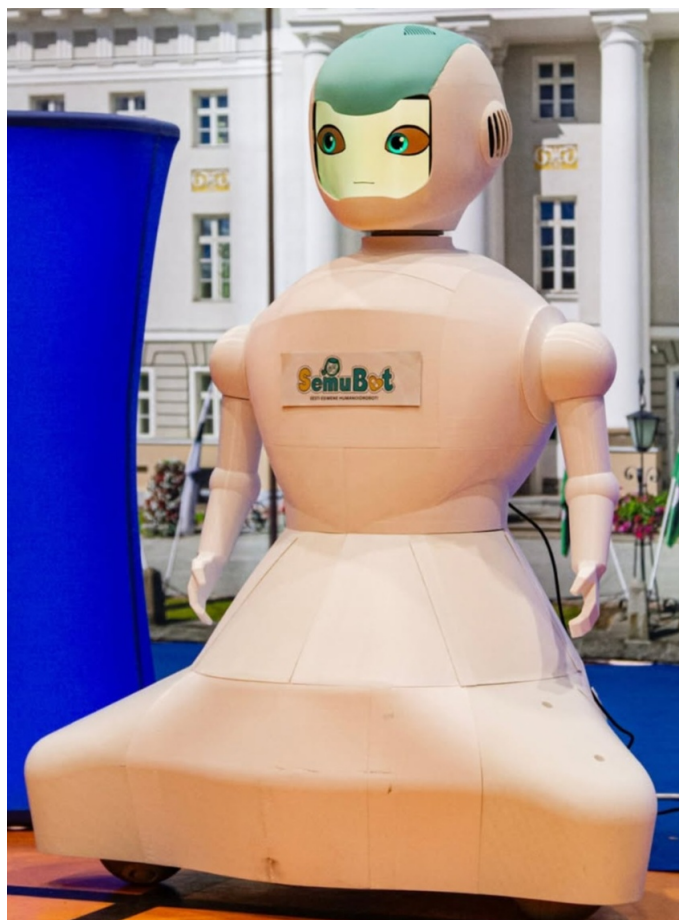
On olemas palju erinevaid suhtlemiseks sobivaid roboteid. Sellistel robotitel ei pea olema olulist sarnasust inimesega ning need võivad esineda mitmetes erinevates kujudes. Laias laastus eristatakse vähemalt kahte erinevat haru suhtlevaid roboteid: sotsiaalne robot ja ühiskondlik robot. Toodud eristuse järgi on sotsiaalne robot selline robot, mis suhtleb teiste robotitega, aga ühiskondlik robot see, mis suhtleb inimestega [1].

Käesoleva töö kontekstis on aga kasutusel levinum kirjeldus sotsiaalse ja ühiskondliku roboti jaoks. Nimelt on sotsiaalne robot eelduste kohaselt autonoomne ja võimeline suhtlema nii inimeste kui ka teiste sotsiaalsete robotitega.

SemuBot on mõeldud kasutamiseks laste rehabilitatsioonis, mistõttu on sotsiaalne aspekt oluline. Lisaks verbaalsele vastamisele peab robot suutma ka näidata tundeid ning osaleda mängus [4]. Eelnevast lähtuvalt on sellisel robotil tihti tähtis osata mitteverbaalset suhtlust lisaks verbaalsele. Järelikult on SemuBotil kindlasti vaja suhtlemiseks võimelisi robotkäsi.

2.2 Sotsiaalne humanoidrobot

Humanoidrobot on robot, millega üritatakse jäljendada inimest. Samas ei pea humanoidroboti kuju olema täpselt sama inimese omaga. Seda, kuivõrd sarnane on valitud robot inimesega, saab kvantifitseerida, vaadeldes roboti välimust ja käitumist [5]. SemuBot on samuti humanoidrobot ja on kujutatud joonisel 2.1. SemuBot sarnaneb inimesega, kuid on mitmeti erinev inimese täpsest kujust ja välimusest. Näiteks liigub SemuBot ratastel ning SemuBoti keha ei ole täpselt inimkehale omaste proportsioonidega. Täpne inimese jäljendamine robotiga polegi tihti mõistlik ning võib kohati viia ka soovimatute tulemusteni, näiteks tunduda hirmutav [2] [3].



Joonis 2.1: Eesti esimene humanoidrobot SemuBot.

Sotsiaalne humanoidrobot on kombinatsioon sotsiaalsest robotist ning humanoidrobotist ja vastab kirjelduse poolest mõlemale, kuigi mitte alati rangelt. Selliseid roboteid on muuhulgas kasutatud erivajadustega laste ravis ning nende tõhusust on analüüsitud [6]. Uurimustes on leitud, et mõned mitmete saadaolevate robotite tunnusjoontest, näiteks liigutuste tegemise viis, välimus või tähelepanu suunamise võime soodustavad autismispektrisse kuuluvate laste taastusravi [6]. Samas teised robotite tunnused võivad rehabilitatsiooni segada, nende seas laste ülestimuleerimine ja potentsiaalselt ohtlikud olukorrad kokkupuutel autonoomselt liikuva robotiga [6].

3 Humanoidroboti käed

3.1 Võimalikud lahendused

3.1.1 Robotkäe arhitektuur

Robotkäe mehaaniline disain on võrdlemisi lai teema. Selle alla kuulub nii robotkäe skelett, mootorika kui ka robotkäe kate või korpus. Robotkäe kõige tavalisemaks kattmaterjaliks on metallid ning kõvad plastikud. Metalsed kattmaterjalid on olnud vajalikud eelkõige käe sees oleva mehaanilise süsteemi kaitseks. Teatud meetoditega on võimalik 3D-printida tahkele pinnale pehme kate või ühendused, mille paindlikkus on mitmetes olukordades kasulik [8]. Eelnevalt saab järeldada, et pehmest plastikust 3D-prinditud robotkeha kattmaterjal on tõhus variant roboti sisemiste süsteemide kaitseks.

Antropomorfse robotkäe disainil kasutatakse laialdaselt kunstlikke lihaseid. Kasutatakse näiteks pneumaatilisi täitureid, mis lubavad koostada mehaaniliselt lihtsa disaini, samas saavutades inimese liikuvusele sarnase liikumisulatuse [7]. Teine põhiline võimalus robotile liikumisvõimekuse andmiseks on elektrimootorite kasutamine [7]. Kunstlihaste süsteemi keerukus ning roboti liikuva skeleti struktuur on seda keerukam, mida keerukamaid ülesandeid selline süsteem täitma peab. Näiteks võib robotkäe skelett seada märkimisväärseid piiranguid kunstlihaste ja -kõõluste ühendamisele [8]. See omakorda vähendab liikumisulatust ning võib piirata süsteemi vabadusastmete arvu [8].

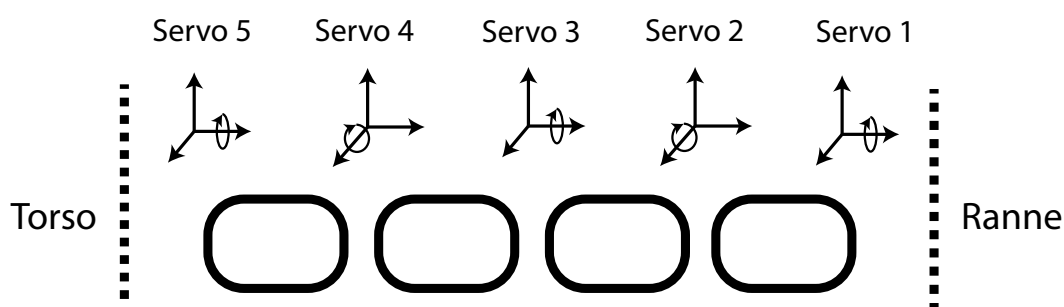
Laiemas vaates saab robotkätele anda liikumisvõime, kasutades paljusid erinevaid täitureid või nende kombinatsioone. Võimaluste hulka kuuluvad mitmed erineva keerukusastmega täituriid: lihtsad alalisvoolumootorid, samm-mootorid, erinevad pneumaatilised või hüdraulilised täituriid, harjasteta alalisvoolumootorid ja servomootorid. Sisuliselt saab kasutada robotkäe koostamiseks mistahes juhivat täituriit.

Lisaks on loodud mitmeid muid süsteeme liigutuste tegemiseks. Näitena võib tuua inimlihastest inspireeritud kiulised kunstlihased, mis suudavad liigutusi teha kokkutõmbe abil [9]. SemuBotil pole vajadust nii täpselt jäljendada inimese liigutusi. Seetõttu saab kasutada lihtsamat servo-mootoritega lahendust põhilisemate liigutuste või žestide tegemiseks robotkäega.

Käesolevas töös kasutatakse robotkäe liigutamiseks elektrimootoreid (servomootoreid). Need annavad piisava täpsuse ja liikumisvabaduse žestide tegemiseks. Robotkäe mootorite ühendamiseks sobib selle töö raames kasutada 3D-prinditud plastikut.

Inimese käele omistatakse 7 vabadusastet, millest 5 jäävad keha ja randme vahele [10]. Nimetatud vabadusastmeid saab realiseerida erinevate täituritega. Käesolevas töös disainitakse robotkäe skelett selliselt, et kõik keha ja randme vahele jäävad 5 vabadusastet oleks kasutusel.

Üks käsi vajab vabadusastmete arvuga võrdset arvu mootoreid, millest igaüks käitub ühe teljena, mille ümber kätt või selle osa saab pöörata. Inimkäe õlaliigese jäljendamiseks grupeeritakse kaks mootorit nimedega Servo 5 ja Servo 4 joonisel 3.1. Nimetatud mootoritest ühe telg on suunatud käega samas suunas ning teine sellega risti. Sarnaselt toimitakse küünarliigese jäljendamiseks mootoritega Servo 3 ja Servo 2 joonisel 3.1. Viimaks jäljendab mootor Servo 1 joonisel 3.1 küünarvarre pööramist. Viie mootori käeks ühendamiseks on vaja nelja skeletina toimivat lüli. Joonisel 3.1 olev Servo 5 on otse kinnitatud roboti torso külge, servod 4 ja 3 on koondatud koos esimese kahe lüliga üheks skeleti osaks ning servod 2 ja 1 skeleti teiseks osaks koos viimase kahe lüliga. Robotkäe skeleti lülide kahekaupa grupeerimine ei mõjuta antud juhul robotkäe vabadusastmete arvu.



Joonis 3.1: SemuBotile loodava robotkäe pöörlemisteljed.

3.2 Robotkäe liigutamine

3.2.1 Käe juhtimine

Käesoleva töö käigus loodava robotkäe jaoks on oluline, et robotkäel oleks inimese käe liikumisega sarnane ulatus ning võimekus teha põhilisi žeste. Kuna nõudmised on võrdlemisi avatud, on robotkäele vaja süsteemi, mille abil saab robotkäät juhtida. Lisaks on vaja kindlaks teha, et mainitud süsteemi oleks võimalikult lihtne kasutada.

Käe juhtimiseks koos tagasisidega saab näiteks kasutada süsteemi, mis põhineb MATLAB/Simulink tarkvaral, mis omakorda suhtleb draiverite ja tagasisideahelaga robotkäes Arduino kaudu [11]. On kasutatud ka Raspberry Pi-d kasutatavat lahendust, millel on lihtsam graafiline kasutajaliides [12]

Loodavale robotkäele on vaja teha nii riistvaraline lahendus kui ka tarkvaraline lahendus, et kätt saaks tõhusalt kasutada. Lihtsalt arendusplaadist ei piisaks selle tõttu, et soovitakse mõõta iga mootori tarbitavat voolu, eesmärgiga tuvastada võimalik mootori kinni jäämine. Arutelu käigus leiti näiteks, et erinevate mootorite juhtimine robotkäe kontekstis on vaja lahendada ka piisava täpsusega ning selleks on vajalik sobivate parameetritega riistvara. Näiteks on viie mootori juhtimiseks ideaalis vaja viit riistvaralist taimerit, mille töö ei sõltu teineteisest. Suurendatud täpsus on vajalik, et ei tekiks soovimatuid efekte, mille hulka kuuluvad näiteks robotkäe värisemine ja liigne lärmakus.

3.2.2 Liigutused ja žestid

Žestide näitamine tuleb lahendada eesmärgiga kujutada erinevaid liigutusi lihtsasti kõrgema taseme programmeerimiskeeles. Eelmainitud otsus sai vastu võetud välistamiseks olukorda, kus kogu käe juhtimise plaadi püsivara tuleb animatsioonide lisamiseks ümber kirjutada. Samuti sooviti välistada olukorda, kus iga käsu andmisel saadetakse käsitsi kirjutatud käsk läbi jadaühenduse, kirjeldades sel juhul kõiki käsus vaja minevaid parameetreid iga kord uuesti. Käesoleva töö tegemisel otsustati kasutada programmeerimiskeelt Python, kuid kasutada saab ka muid programmeerimiskeeli, mis toetavad jadaühenduse kaudu suhtlemist. Käesoleva töö kontekstis ei olnud graafilise kasutajaliidese loomine oluline.

Liikumine ei ole SemuBotil autonoomne. Selle tõttu grupeeritakse andmestruktuuridesse liiku-

mise info igale mootorile, et töö käigus loodav süsteem saaks need järjest käskudena edastada robotkäele. Iga žesti või muu liigutuse jaoks on vaja anda robotkäele käsk või hulk käske, kui tegu on keerulisema liigutusega. Eesmärk on iga käsu andmise järel oodata ka eelmise käsu lõpetamist, et liikumine oleks õigesti ajastatud ning näeks välja loomulik.

SemuBoti tulevikuiteratsioonides võib käe liikumine olla täielikult autonoomne ja seda juhib sel juhul roboti pardaarvuti. Liigutusi, mida robotkätega saab teha on suur hulk ning nende käsitsi kirjeldamine ka programmikoodis on ajamahukas töö. Liigse töö vältimiseks saab kasutada uuemat lahendust. Robotkäe liigutuste ja žestide õppimisel saab kasutada tehisnärvivõrku pöördkinemaatikat kasutavas lahenduses, mis oskab tõlkida soovitud asendi juhisteks robotkäele [13]. Sellisel juhul saab kaotada vajaduse liigutusi üksikasjalikult programmikoodis kirjeldada. Sarnast lahendust SemuBotil siiani kasutusel ei ole.

4 Nõuded disainitavale robotkäele

4.1 Kasutaja- ja süsteeminõuded

Töö käigus disainitakse käsi õlast randmeni koos tugisüsteemidega, mis hõlmavad riistvaralisi ja tarkvaralisi komponente. Sinna hulka kuuluvad käe mootoriga suhtlev trükkplaat koos kõige vajalikuga robotkäe toimimiseks ning tarkvara, mille abil inimene või robot ise saab juhtida robotkätt. Samuti kuulub spetsifikatsiooni trükkplaadile laetav püsivara. Edaspidi nimetatakse eelnevalt nimetatud trükkplaadi ja püsivara kombinatsiooni robotkäe draiveriks. Töö hulka ei kuulu robotkäe randme ja kämbla disain. Samuti ei disainita robotkäele lõplikku mehaanilist lahendust – seda ei võimalda tehtava töö maht ja ajalised piirangud.

4.1.1 Ühilduvus SemuBotiga

Nõuded robotkäele tulenevad üldisematset nõuetest ning eesmärkidest, mis on esitatud SemuBotile. Eelnevalt nimetatud nõudeid kirjeldas SemuBoti meeskond.

4.1.2 Kasutaja nõuded

Kasutaja ootused ja nõuded loodavale robotkäele on esitatud tabelis 4.1.

UID	Nõue	F/MF
U-01	Robotkäsi peab suutma jäljendada inimese žeste.	F
U-02	Robotkäe mõõtmed peavad olema proportsionaalsed roboti keha mõõtmetega.	MF
U-03	Robotkäsi ei tohi olla liialt lärmakas.	MF
U-04	Liikudes vastu füüsilist takistust, peab robotkäsi seiskuma.	F
U-05	Robotkäe juhtimine peab olema inimese jaoks võimaldatud.	MF

U-06	Robotkäe juhtimise süsteem peab olema inimese jaoks lihtne kasutada.	MF
U-07	Robotkäsi peab olema võimeline liikuma ühtlase kiirusega.	F
U-08	Robotkäe liikmeid peab saama liigutada erinevate kiirustega.	F
U-09	Paigalolekus peab robotkäsi oma asendit hoidma ja seda vajadusel korrigeerima.	F
U-10	Kõik robotkäät juhtivad süsteemid peavad mahtuma roboti külge/sisse	MF
U-11	Robotkäest peab saama läbi minna lisaks robotkäe kaablitele vähemalt üks USB kaabel.	MF
U-12	Kaablid robotkäes peavad olema kaitstud liigse painutamise eest.	MF
U-13	Kaablid robotkäes ei tohi käe liigutamisel kohalt liikuda ega puruneda.	MF
U-14	Robotkäe liikumine peab olema võimalik piirata nii, et liigutuste tegemine ei saaks vigastada robotkäät ega roboti teisi osi.	MF
U-15	Robotkäät peab saama juhtida, kui vahetada kõik mootorid robotkäes selliste vastu, mis erinevad eelnevatest mootoritest voolutarbe või toitepinge poolest.	MF
U-16	Robotkäe juhtimine peab töötama ainult servomootoriga.	MF

Tabel 4.1: Kasutaja nõuded

4.1.3 Süsteemi nõuded

Nõuded süsteemile on esitatud tabelis 4.2. Nende nõuete põhjal tuletatakse suunised robotkäe ja selle tugisüsteemide disainiks.

UID	Nõue	F/MF
S-01	Ühel Robotkäel peab olema liigutuste tegemiseks 5 vabadusastet.	MF
S-02	Ühel Robotkäel peab olema liigutuste tegemiseks 1 servomootor vabadusastme kohta.	MF
S-03	Robotkäät juhtiv trükkplaat peab juhtima ühe robotkäe kõiki mootoreid.	F

S-04	Robotkäät juhtiva trükkplaadi laius, pikkus ja kõrgus peavad olema väiksemad kui 100 mm.	MF
S-05	Robotkäe mootorid peab valima nii, et igaüks neist suudab liigutada robotkäe osa, mis algab sellest mootorist ja lõpeb robotkäe kämbлага. Nende mootorite käeks kombineerimine ei tohi ületada piiranguid mõõtmete.	MF
S-06	Robotkäe liigutamine ei tohi põhjustada üleliigset hõõrdumist.	MF
S-07	Robotkäe mootorid peavad liikumisel olema võimalikult vaiksed.	MF
S-08	Robotkäät juhtiva trükkplaadi püsivara peab vältima käe mootorite vibreerimise põhjustamist.	MF
S-09	Robotkäät juhtival trükkplaadil peab olema võimekus mõõta iga mootori tarbitava voolu tugevust eraldi.	F
S-10	Robotkäät juhtiva trükkplaadi püsivara peab seiskama käe, kui vähemalt ühe käe mootori voolutugevuse limiit on ületatud.	F
S-11	Käe juhtimissüsteem peab robotkäe seiskamisel hoidma käe asendit.	F
S-12	Tarkvara, mille abil inimene saab robotkäät juhtida, peab omama lihtsat kasutajaliidest.	F
S-13	Robotkäe juhtplaat peab käsu vastu võtma USB ühenduse kaudu.	MF
S-14	Roboti juhtimiseks mõeldud kasutajaliideses peab inimene saama täpsustada robotkäele antava käsu, kirjutades selle käsureale.	MF
S-15	Robotkäe juhtimissüsteem peab andma robotkäele uue asukoha vähemalt 100 korda sekundis.	F
S-16	Robotkäe juhtimissüsteem peab juhtima igat mootorit eraldiseisvalt.	F
S-17	Robotkäe juhtimissüsteem peab teadma, millise aja jooksul tuleb praegune liigutus lõpule viia.	F
S-18	Robotkäe juhtimissüsteem peab arvestama liigutusele kuluvat aega iga mootori jaoks eraldi.	F
S-19	Robotkäe liikumisel liiga suure välise jõu mõjul peab käe juhtimissüsteem kindlustama, et robotkäsi hoiab jõu ületamise hetke asendit.	MF
S-20	Robotkäät läbivad kaablid peavad olema paigutatud ja kinnitatud nii, et need kaablid saaksid kompenseerida paindumist pikkuse ülejäägi abil.	MF

S-21	Robotkäät läbivad kaablid peavad olema paigutatud ja kinnitatud nii, et need ei saaks jääda kinni käe osade vahele ega külge.	MF
S-22	Robotkäät läbivad kaablid peavad olema piiratud robotkäe korpusega ja ei ulatu sellest välja.	F
S-23	Robotkäe draiver peab arvestama ette antud minimaalset ja maksimaalset asendit igale mootorile eraldi.	F
S-24	Robotkäe kasutajaliidesesse programmeeritud käsud peavad arvestama minimaalset ja maksimaalset asendit igale mootorile eraldi.	F
S-25	Draiver peab suutma toita ja juhtida erineva voolutarbega servomootoreid.	MF
S-26	Draiver peab suutma toita ja juhtida erineva toitepingega servomootoreid.	MF
S-27	Servomootorite toitepinge peab jääma vahemikku 0 V kuni 24 V.	MF
S-28	Draiver peab töötama ootuspäraselt, kui sellega on ühendatud viis mootorit või vähem.	MF
S-29	Draiver peab olema ehitatud nii, et sellega saaks ühendada kuni viis mootorit.	MF
S-30	Juhtplaat peab toetama maksimaalset hetkelist voolutarvet kuni 20 amprit kõigi mootorite peale kokku.	MF
S-31	Juhtplaat peab toetama maksimaalset voolutarvet 10 amprit mootori kohta.	MF

Tabel 4.2: Süsteemi nõuded

5 Loodud lahendus

Loodav lahendus jaguneb üldjoontes kolmeks mooduliks. Esimene moodul kirjeldab elektroonika komponente ja loodud lahendust trükkplaadil. Teine moodul kirjeldab mehaanilist disaini. Kolmas moodul on tarkvara, mis hõlmab kasutajaga liidestamist võimaldavat programmi ja trükkplaadi püsivara.

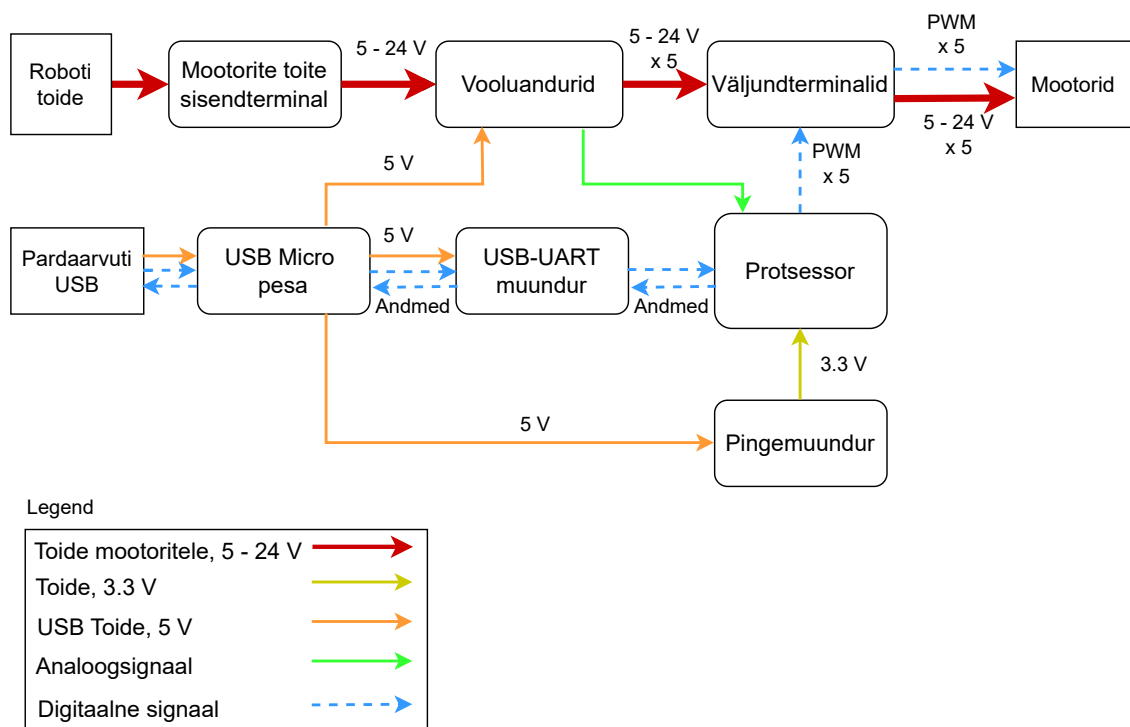
5.1 Elektroonika disain

5.1.1 Komponentide valik

Esialgne lahendus katsetuste tegemiseks ja võimalike probleemsete kohtade tuvastamiseks disainis tehti Nucleo-64 arendusplaadile (Lisa 6). Samas ei olnud arendusplaadi kasutamine lõplikus disainis ette nähtud. Arendusplaadi kasutamise põhiliseks piirajaks olid plaadi mõõtmed ning voolu mõõtmise võimekuse puudumine. Eelnevalt nimetatust järeldus, et on vaja valmistada trükkplaat, mis püstitatud nõuetele vastaks.

Trükkplaadile pandavad komponendid oli vaja valida selliselt, et süsteem saaks täita esitatud nõudeid. Komponentide valiku tegemiseks lahutati elektriskeemi disain plokkideks ning määrati, milliseid ülesandeid iga plokk täitma peab. Selle skeemi üldine plokkdiagramm on näidatud joonisel 5.1.

Lõpliku komponentide valiku tegemisel arvestati sellega, millised elektroonikakomponendid on lihtsasti saadaval ning sobiva funktsionaalsusega. Viimaks oli komponentide valikul oluline jälgida, et iga komponendi pakend toetaks käsitsi jootmist. Käsitsi joodetavus oli oluline, sest selle meetodiga valmistati töö käigus trükkplaadid.



Joonis 5.1: Elektriskeemi signaalide ja toite plokkdiagramm.

Trükkplaadi juhtivaks komponendiks valiti protsessor STM32F303RDT7 (Lisa 7). Määravateks põhjusteks selle protsessori valikul olid saadavus ja piisav arv taimerite väljundviike mootorite juhtimiseks.

Elektriskeemi on ühendatud ka Micro USB pesa, mille kaudu toimub andmete vahetamine protsessori ning juhtarvuti vahel läbi USB-UART muunduri MCP2221 (Lisa 8). Lisaks pakub USB kaabel toidet plaadil olevale protsessorile, vooluanduritele ja USB-UART muundurile. Kuna USB toitepinge on 5V ning protsessori toitepinge ülemine piir on 3.6 V, otsustati protsessori toitepinget madaldada 3.3 voldini lineaarse pingeregulaatori MAX8880EUT+T abil (Lisa 9).

Mootoreid läbiva voolu mõõtmiseks otsustati kasutada vooluandurit ACS712ELCTR-05B-T (Lisa 10), mille mõõtmispiirkond on -5 kuni 5 amprit. Valik tehti piisava täpsuse saamiseks võrdlemisi väikese voolutarbega mootorite puhul. Sama jalajälg sobib ka sarnaste parameetritega, kuid erineva mõõtepiirkonnaga vooluandur, näiteks nimetatud vooluanduriga samast seeriast ACS712ELCTR-20A-T.

Lisaks eelnevale on trükkplaadil üks juhtmeterterminal mootorite toite viimiseks plaadile ning viis väljundterminali, mille kaudu saab varustada mootoreid toitega ja PWM signaaliga. Kruvidega terminalid valiti eesmärgiga anda kasutajale võimalus ühendada plaadi külge mistahes servomootor, mille maksimaalne voolutarve ei ületa kümme amprit, nagu kirjeldatud nõuetes S-30 ja S-31 tabelis 4.2. Nimetatud maksimaalne voolutugevus kehtib ka valmistatud trükkplaadile.

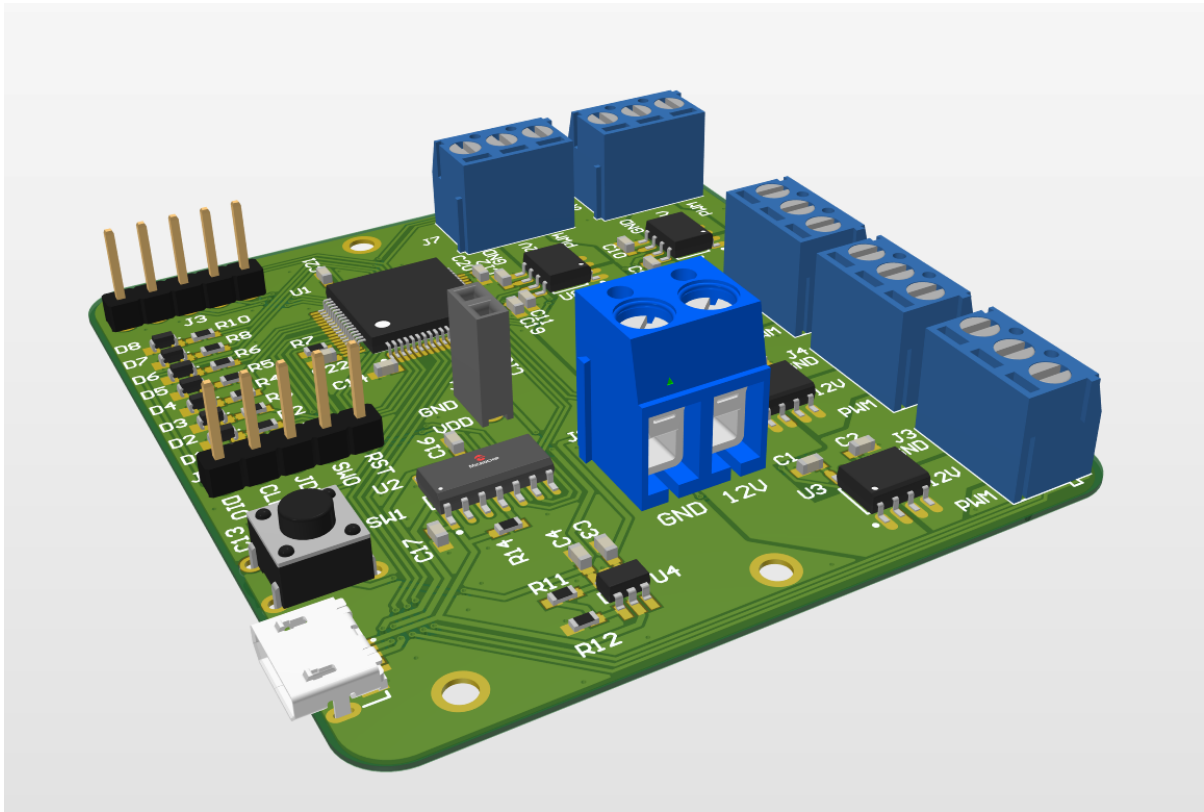
Trükkplaadi valmistamiseks vajalike komponentide nimekiri (BOM) koos seni nimetamata passiividega on toodud Lisas 11 tabelis 6.1.

5.1.2 Loodud trükkplaat

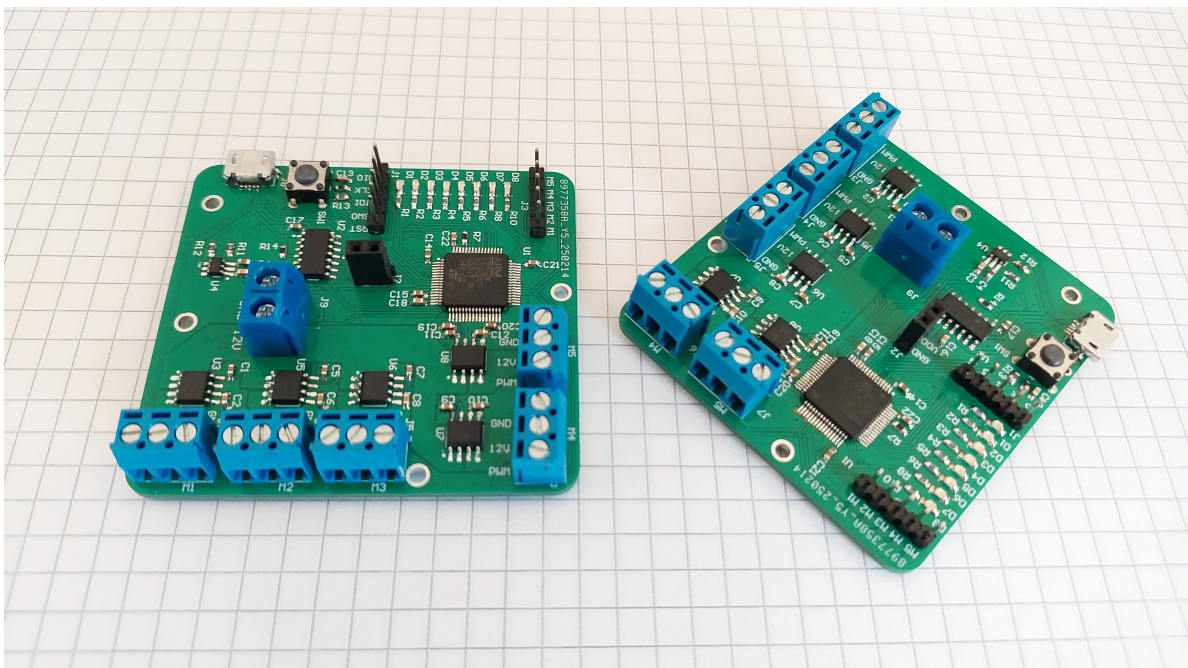
Trükkplaadi disainimisel lähtuti süsteeminõuetest, mille põhjal tuletati trükkplaadi parameetrid. Need parameetrid hõlmavad eelmises peatükis kirjeldatud komponentide jalajälgi ja paigutust nii, et see vastaks nõudele S-04 tabelis 4.2. Lisaks tehti trükkplaadi mõõtmed disaini pädevuse huvides võimalikult väikseks ning järgiti üldiselt tunnustatud disaini juhiseid elektriskeemi ja trükkplaadi jaoks. Täiesti töötava versioonini jõudmiseks oli vaja teha esimene versioon ning üks lisanduv iteratsioon kahe korrektuuriga elektriskeemi ja trükkplaadi disainile.

Disainimisel kasutati tarkvara nimega Altium Designer. Kasutatud tarkvaras avatavad lõplikud dokumendid on leitavad avalikus repositooriumis (Lisa 3). Nimetatud repositooriumis on kõik vajalikud Altium Designer-i projektidokumendid ning elektriskeemi PDF-dokument.

Komponentide lisamist trükkplaadile teostati käsitsi. Kokku valmis selle tootmismeetodiga kolm töökorras draiveri eksemplari, millest kaks viimast on lõpliku töö tulemus ning esimene on katseeksemplar. 3D-mudel valminud draiverist on nähtav joonisel 5.2. Töö tulemusena valminud trükkplaadid on näidatud joonisel 5.3.



Joonis 5.2: Trükkplaadi 3D-mudel.



Joonis 5.3: Trükkplaatide lõplik kuju.

5.2 Mehaaniline lahendus

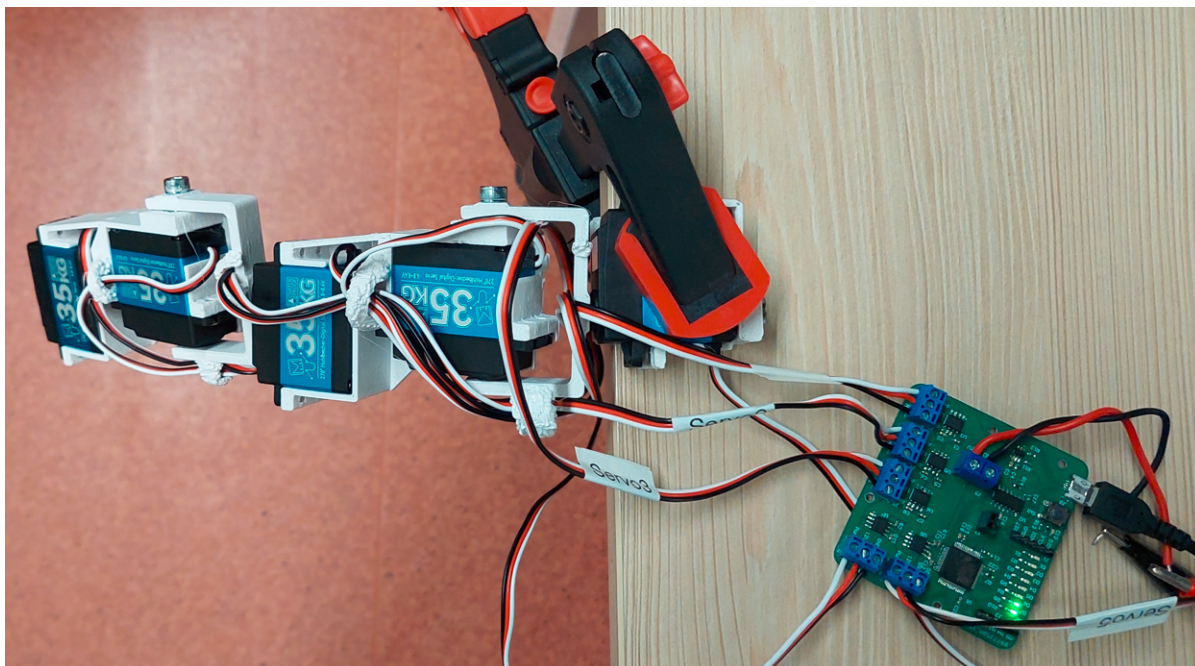
5.2.1 Mootorite valik

Mootorite valikul robotkäe jaoks lähtuti eelkõige sellest, kui suurt jõudu on vaja robotkäele rakendada selleks, et seda tervenisti liigutada. Esialgu katsetati mootoritega, mille jõumoment oli 1.5 Nm. Edaspidi leiti, et nii palju jõudu pole vaja. Lisaks olid mootorid, millega katsetati, liiga suured ja rasked.

Lõpplahenduses on kasutusel servomootorid, mille jõumoment on 0.35 Nm. See on piisav, et liigutada tervet kätt, samas tänu sellisele valikule on käsi palju väiksema massiga ning vastab ka paremini nõuetele U-02 tabelis 4.1 ja S-05 tabelis 4.2. Alternatiiviks oli kasutada võimsamaid servomootoreid, mille jõumoment on 1.5 Nm. Sellise valiku tegemisel oleks olnud mitu puudujääki. Nimelt on suurema võimsusega mootorid üle kahe korra suurema massiga ning liiga suured selleks, et sobida lapsemõõtu humanoidroboti kättesse. Kirjeldatud olukord eiraks nõuet U-02 tabelis 4.1. Samuti tarbiksid suuremad mootorid ka palju rohkem voolu, mis teeb need akutoitel töötava roboti jaoks ebatõhusaks.

5.2.2 Materjalide valik

SemuBot on käesoleva töö koostamise ajal veel prototüüpimise järgus, mis tähendab, et enamik roboti mehaanilistest komponentidest on valmistatud 3D printimise teel. Robotkäe mehaaniliste osade disainil lähtuti samadest põhimõtetest. Seetõttu on robotkäe prototüübi mootorid omavahel mehaaniliselt seotud kasutades 3D prinditud komponente. Robotkäe prototüüp on nähtav joonisel 5.4.



Joonis 5.4: Robotkäe valminud katseeksemplar.

5.3 Tarkvara

5.3.1 Püsivara trükkplaadile

Draiveri püsivara töötab riistvara poolt tekitatud katkestuste põhjal - on kaks erinevat katkestust, mida programm täidab. Mistahes katkestuse täitmise ajal on programmis keelatud kõik ülejäänud katkestused.

Esimene katkestus on mõeldud mootorite PWM signaali juhtimiseks. See töötab tänu riistvaralisele taimerile, mis käivitab nimetatud katkestuse 100 korda sekundis. Katkestuse eesmärk on seadistada PWM signaali genereerivatele taimeritele uued väärtused regulaarse ja mõõdetud intervalliga. Juhul, kui taimerite seadistuseks mõeldud andmetes on vigaseid muutujaid või piiridest välja jäävaid väärtusi, on programmi selle osa töö neid väärtusi korrigeerida. Korrigeerimise käigus väärtused kas piiratakse vastavale muutujale määratud vahemikku või jäetakse muutmata. Signaali genereerivad taimerid ei sõltu muu programmi tööst ning töötavad vastavalt iga taimerikanali hetkeseadistusele.

Usaldusväärse huvides on signaali genereerimisel välistatud mõne parameetri muutmine. Sinna hulka kuulub kõik, mis saab muuta signaali sagedust. Taimerite ainus muudetav parameeter on see, mida on vaja muuta signaali ühe pulsi kestvuse reguleerimiseks.

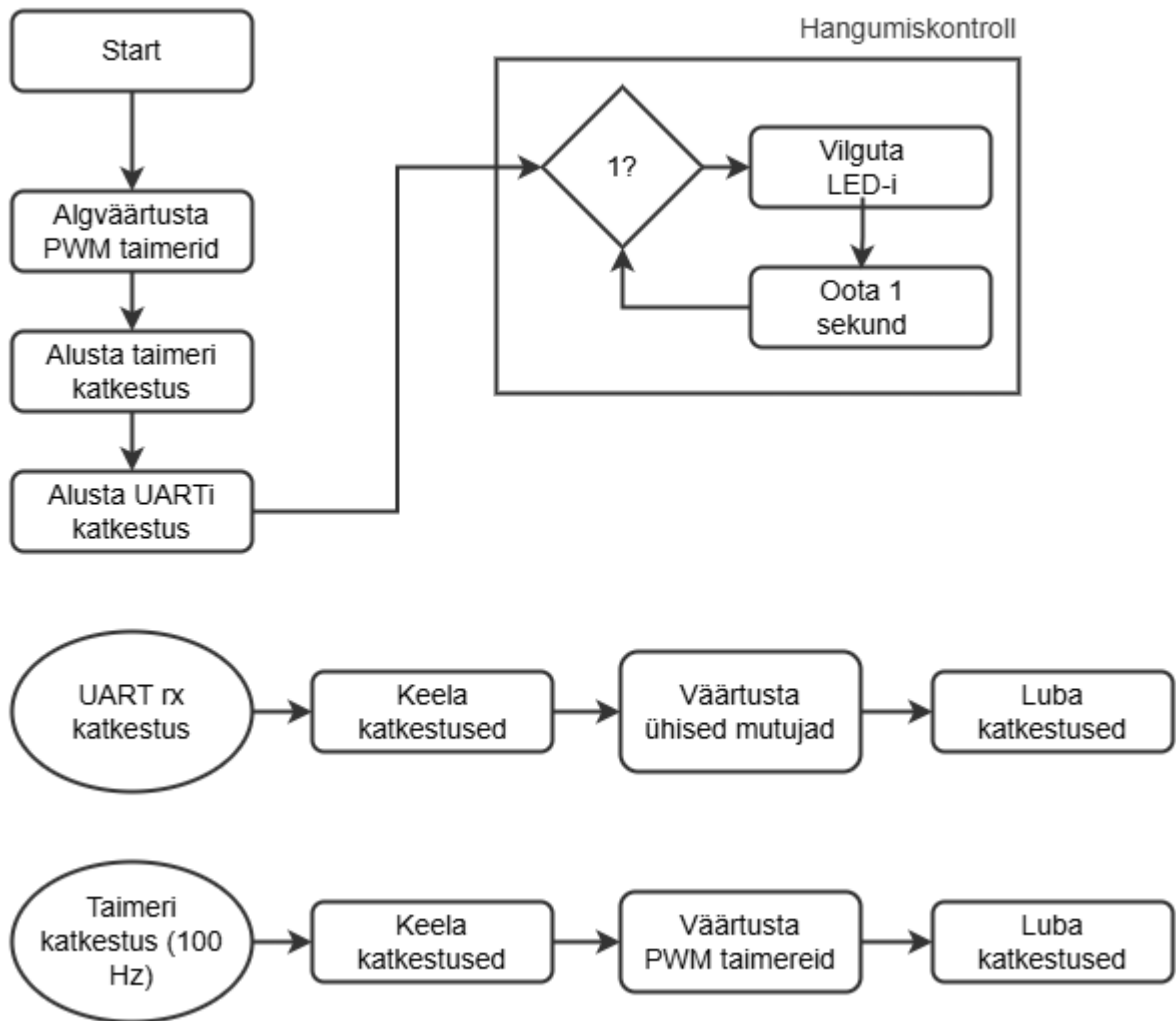
Teine katkestus käivitub siis, kui protsessori UART-i sisendpuhvrise on laekunud piisavas koguses andmeid. Laekunud andmete hulka loendatakse baitides. Katkestuse kutsumisel loetakse läbi jadaühenduse kohale jõudnud andmed UART-i puhvrist mälusse. Neid andmeid saab seejärel struktureerida ning nende abil väärtustada ühised muutujad, mida kasutab ka taimerite katkestus. Ka siin on äärmiselt oluline, et kaks katkestust ei saaks tööd teha samal ajal. Vastasel juhul võib katkestus toimuda baidist suurema muutuja kirjutamise ajal, mis juhul suure tõenäosusega ei ole muutuja väärtus enam korrektne.

Jadaühendusele keskenduva katkestuse programmile on antud veel kaks funktsiooni. Esimene neist on mootorite tarbitava voolu mõõtmise tulemuste kontroll. Kui voolutugevus ületab mingi määratud piiri, keelatakse mootorite liikumine uue käsuni. Teine funktsioon on draiveri info saatmine juhtarvutile jadaühenduse kaudu. Näidis draiverilt juhtarvutisse saadetavast infost on leitav joonisel 5.5.

```
ECHO ddeg: 1-0900, 2-0900, 3-0900, 4-0900, 5-0900  
ECHO I_lim: 1-03000, 2-03000, 3-03000, 4-03000, 5-03000  
ECHO time: 1-02000, 2-02000, 3-02000, 4-02000, 5-02000  
ST: 0, Currents(A): 1: 0.0124, 2: 0.0041, 3: 0.0414, 4: 0.0786, 5: 0.1778
```

Joonis 5.5: Andmed, mis jõudsid draiverilt tagasi juhtarvutisse.

Püsivara programmi töö diagramm on toodud joonisel 5.6. Püsivara lähtekood on leitav (Lisa 1). Programmi kood koostati C-keeles kasutades arenduskeskkonda STM32CubeIDE (Lisa 4).



Joonis 5.6: Draiveri tarkvara töö käigu lihtsustatud diagramm.

5.3.2 Kasutajaliides

Robotkätt juhtiva draiveriga suhtlemiseks oli vaja luua lihtne Pythoni kasutajaliides (Lisa 2), mille kaudu kasutaja saaks anda käsked robotkäele. Käskude andmiseks tuleb animatsiooni nimi käsureale kirjutada. Animatsioone on võimalik programmikoodi hõlpsasti ning programmi on väga lihtne kasutada.

Programm alustab tööd, proovides ühenduda programmis kirjeldatud USB pordiga. Kui ühendamine nurjub ehk vastavasse porti pole ühtegi seadet ühendatud, on kasutajal võimalus programmi töö lõpetada ja korrekture teha. Sellisel juhul programmi lõimesid ei käivitata.

Kui USB pordiga ühenduse loomine õnnestub, käivitatakse lõimed, mis haldavad erinevaid programmi osasid. Nendeks osadeks on andmete lugemine, kasutaja sisendi töötlemine ja käskude täitmine.

Andmete lugemise lõim peab sidet USB porti ühendatud draiveriga. Kui draiver saadab andmeid, võetakse need vastu, dekodeeritakse inimloetavale kujule ning väljastatakse käsureale.

Kasutaja sisendi töötlemise lõimes jälgitakse käsurea sisendit, kuhu kasutaja saab midagi kirjutada. Kui kasutaja midagi sisestab, töödeldakse seda käsuna, võrreldes sisestatud sõnet võimalike käskude nimedega. Kui mõni neist kattub, seadistatakse programmi muutujad vastavalt ja sellega lõime tsükkel lõpeb. On ka võimalik, et kattuvust kasutaja sisendi ja käsu nime vahel ei leita, mis juhul antakse sellest kasutajale teada. Programmi töö saab käsuga ka lõpetada. Samuti saab kasutaja täpsustada, kui palju infot mingi sündmuse juures peaks kasutajaliidesele saatma. Kasutajaliidese programm küsib draiverilt alati täieliku vastuse, kui kasutaja pole määranud teisiti.

Käsu täitmise lõimes kontrollitakse, kas on saabunud käsk, mida täita, ning vajadusel see täidetakse. Selles lõimes hallatakse kõike, mis on seotud käsu saatmisega jadaühendusse. Otse suhtlus robotkäe draiveriga toimub samuti käesolevas lõimes. Jadaühendusse saadetava info struktuur on esitatud tabelis 5.1.

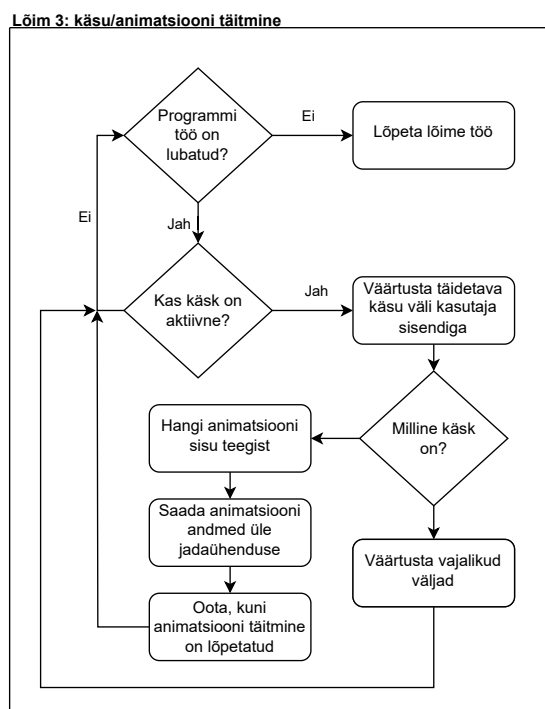
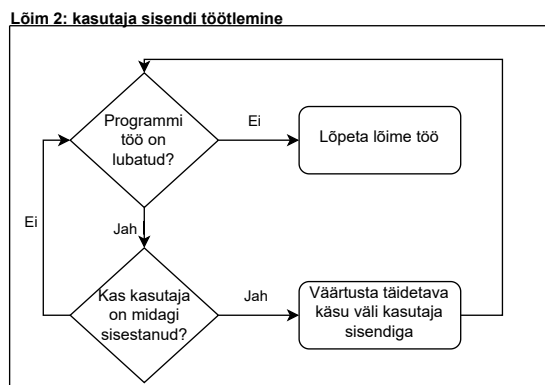
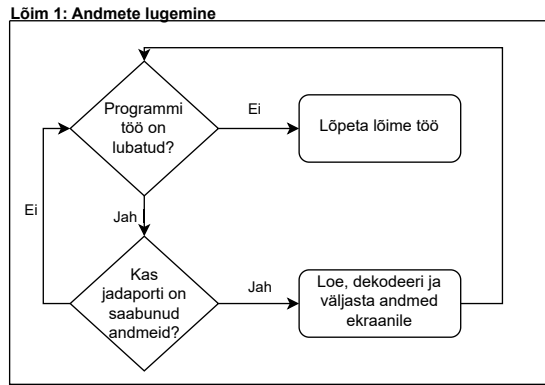
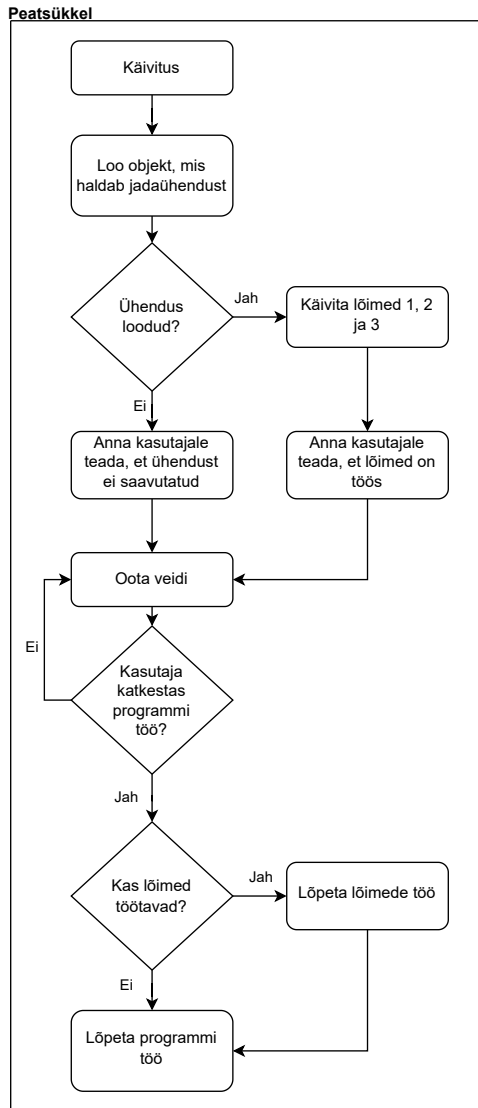
Baidid	Muutuja andmetüüp	Kirjeldus
0 - 9	uint16	Mootorite soovitud asend detsikraadides iga mootori jaoks. Väärtus 1800 väljendab maksimaalset ning väärtus 0 minimaalset asendit.
10 - 19	uint16	Maksimaalne mootori tarbitav voolutugevus iga mootori jaoks milliamprites.
20 - 29	uint16	Aeg, mille jooksul mootor peab jõudma soovitud asendisse millisekundites.
30 - 31	uint16	Väärtus, mille järgi määratakse, kas ja kui palju saadab draiver andmeid vastuseks.

Tabel 5.1: Draiverile saadetavad andmed

Lõimede käivitamisest alates haldab peatsükkel ainult programmi töö katkestamise kontrollimist ning vajadusel programmi töö lõpetamist. Programmi töötsükli diagramm on esitatud joonisel 5.7.

Kasutajaliidese programm suudab ka tuvastada USB porte, millega saab luua ühenduse. Samas ei oska programm selgeks teha, kas tegemist on korrektse pordiga. Parimaks lähenemiseks loeti hetkel olukord, kus kasutaja saab käsitsi määrata pordi nime, millega programm ühenduma peab.

Draiveriga suhtlemiseks mõeldud lihtsa kasutajaliidese tarkvara lähtekood on leitav Lisas 2. Programm koostati keeles Python ning keskkonnas Visual Studio Code (Lisa 5).



Joonis 5.7: Kasutajaliidese tarkvara töö lihtsustatud diagramm.

6 Tulemused ja järeldused

6.1 Tulemuste analüüs

Tehtud töö õnnestus eelduste kohaselt. Valmis süsteem, mis vastab esitatud nõuetele. Samuti on valminud iga töö eesmärgis nimetatud moodul.

Disainitud trükkplaadile oli vaja teha üks parandus pärast esialgse variandi kokkupanemist ja testimist. Kasutusele võetud elektroonikakomponentide seas väljavahetamisi ei pidanud tegema. Trükkplaat ning selle püsivara täidavad nendele määratud funktsionaalsust nõuete piires ning usaldusväärselt.

Sotsiaalse robotkäe süsteemile kirjutatud tarkvara töötab ootuspäraselt, turvaliselt ja usaldusväärselt. Samuti töötab iga robotkäes oleva mootori poolt tarbitava voolu mõõtmine.

Töö tegemise ajal ning käesoleva töö juhendaja abiga valmis ka robotkäe esimene prototüüp. Ideaalis oleks võinud robotkäe prototüüpi arendada veelgi kaugemale, kuid see oleks saanud toimuda ainult eeldusel, et saadaval on märkimisväärselt suurem ajaline ressurss. Sellegi poolest sai robotkäe draiveri ning kasutajaliidese koostööd põhjalikult testida robotkäe prototüübi abil.

6.2 Võimalikud edasiarendused

Disainitud süsteem on avatud lähtekoodiga (Lisa 1) ning avaliku ligipääsuga, tänu millele saab edasiarendusi teostada igaüks.

Robotkäe draiveri püsivara töötab eesmärgipäraselt, kuid edasiarendusteks on endiselt ruumi. Näiteks on võimalik draiveriga vahetada palju rohkem infot ning luua seeläbi põhjalikum silumislüüdes.

Kasutajaliides, mis aitab robotkäega suhtlemisel, on seni käsureal ja omab väga piiratud arvu käske. Liides ise on hea silumiseks, kuid ei oma ettenähtud funktsiooni roboti autonoomseks tegemisel. Sellisel juhul oleks mõistlik silumiseks luua ka kasutajaliides, mis visualiseerib robotkäe liigutusi ning aitab animeerimisel.

SemuBoti tulevikuversioonides võib käte liikumine põhineda masinõppe käigus omandatud oskusel. Selle jaoks on vaja kasutada pöördkinemaatikal põhinevat juhtimissüsteemi, mis tõlgib vajalikud liigutused mootoritele sobivateks käskudeks.

Lihtsamaks kasutajaliidese edasiarenduseks oleks automaatne sobiva USB pordi tuvastamine ning sellega ühendumine, mida seni pole lahendatud. Nimetatud arendus lihtsustaks veelgi kasutajakogemust ning kõrvaldaks vajaduse vastavaid juhiseid muuta kasutajaliidese programmikoodis.

Kokkuvõte

Sotsiaalsetel humanoidrobotitel on oluline koht laste taastusravis. Sellistel robotitel on eelnevaks mitmeid häid eeldusi, kuid leidub ka mõningaid puudujääke. Et suhtlemine robotiga oleks sujuvam, on robotil vaja käsi, mis suudaksid abiks olla emotsioonide väljendamisel ja lastega mängimisel. Robotkäte ehitamisel on kasutatud mitmeid erinevaid motoriseerimis- ja mehaanikalahendusi. Käesoleva töö raames otsustati valmistada modulaarne ning laiendatav süsteem, mis juhib servomootoritel põhinevat robotkätt.


Töö tulemusena valmis 5-vabadusastmeline humanoidroboti käe prototüüp. Robotkäe juhtimiseks valmis süsteem, mida saab kasutada, saates sellele lihtsaid käsklusi üle jadaühenduse. Valminud süsteemi on võimalik kasutada ka teistsuguste robotkäte ja muude servodel põhinevate mehaaniliste lahenduste jaoks, mis tähendab, et antud disain on laiendatav. Ka robotkäe draiveri juurde kuuluv püsivara täidab draiverile esitatud nõudeid. Lisaks püsivarale ning elektroonikale valmis töö käigus kasutajaliides, mis liidestab kasutaja süsteemiga. Valminud lihtne kasutajaliides lihtsustab oluliselt robotkäe suhtlemist draiveriga ning käskude edasisaatmist. Loodud süsteem tervikuna vastab tööle püstitatud nõuetele, on avatud lähtekoodiga ning võimaldab laialdast kasutamist.

Edasiarendused on vajalikud selleks, et teha robotkätt juhtiv süsteem autonoomseks ning kasutajasõbralikumaks. Samuti pole robotkäe prototüüp valmis kasutamiseks ning robotkäe disain vajab edaspidi täiendusi. Süsteem on vaja integreerida SemuBotiga ja tuleb koostada lõplik mehaaniline lahendus.

Tänuavaldused

Suured tänud selle töö juhendajale Leonid Zinatullinile, kes oli põhjalikult abiks töö loomisel ning aitas töö käigule kaasa koostades ka robotkäe mehaanilise prototüübi.

Lisaks soovin tänada kõiki õppejõude, kes aitasid mul leida töö edukaks koostamiseks vajalikud teadmised vastavates õppeainetes.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'L. Zinatullin', written on a light-colored background.

Viited

- [1] F. Hegel, C. Muhl, B. Wrede, M. Hielscher-Fastabend, G. Sagerer, 2009, Understanding Social Robots, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 04.11.2024]
<https://www.researchgate.net/publication/220757949>
- [2] K. Berns, A. Ashok, 2024, “You Scare Me”: The Effects of Humanoid Robot Appearance, Emotion, and Interaction Skills on Uncanny Valley Phenomenon, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 13.05.2024]
<https://doi.org/10.3390/act13100419>
- [3] C. Shum, H. J. Kim, J. R. Calhoun, E. D. Putra, 2024, “I was so scared I quit”: Uncanny valley effects of robots’ human-likeness on employee fear and industry turnover intentions, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 13.05.2024]
<https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2024.103762>
- [4] A. Kolk, Uute tehnoloogiliste lahenduste kasutamine laste neurorehabilitatsioonis, *Eesti Arst 2020*, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 04.11.2024]
<https://ojs.utlib.ee/index.php/EA/article/view/16543/11484>
- [5] J. von Zitzewitz, P.M. Boesch, P. Wolf, R. Riener, 2013, Quantifying the human likeness of a humanoid robot, *International Journal of Social Robotics*, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 04.11.2024]
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12369-012-0177-4>
- [6] A. Puglisi, T. Caprì, L. Pignolo, S. Gismondo, P. Chilà, R. Minutoli, F. Marino, C. Failla, A. A. Arnao, G Tartarisco, A. Cerasa, 2022, Social humanoid robots for children with autism spectrum disorders: a review of modalities, indications, and pitfalls, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 07.04.2025]
<https://www.mdpi.com/2227-9067/9/7/953>

- [7] A. Hitzmann, H. Masuda, S. Ikemoto, K. Hosoda, 2018, Anthropomorphic musculoskeletal 10 degrees-of-freedom robot arm driven by pneumatic artificial muscles, *Advanced Robotics*, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 14.05.2024]
<https://doi.org/10.1080/01691864.2018.1494040>
- [8] D. Chowdhury, Y. Park, I. Jung, S. Lee, 2024, Characterization of Exterior Parts for 3D-Printed Humanoid Robot Arm with Various Patterns and Thicknesses, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 04.11.2024]
<https://www.mdpi.com/2073-4360/16/7/988>
- [9] I.H. Kim, S. Choi, J. Lee, J. Jung, J. Yeo, J.T. Kim, S. Ryu, S. Ahn, J. Kang, P. Poulin, S.O. Kim, 2022, Human-muscle-inspired single fibre actuator with reversible percolation, *Nature Nanotechnology*, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 04.11.2024]
<https://doi.org/10.1038/s41565-022-01220-2>
- [10] Zhiming Wang, Zhenglong Cai, Lizheng Cui, Changfu Pang, 2018, Structure Design And Analysis Of Kinematics Of An Upper-limbed Rehabilitation Robot, *MATEC Web of Conferences* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 20.03.2024]
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201823202033>
- [11] R. Chotikunnan, K. Roongprasert, P. Chotikunnan, P. Imura, M. Sangworasil, A. Srisirawat, 2023, Robotic Arm Design and Control Using MATLAB/Simulink, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 20.03.2024]
<https://cosmoscholars.com/phms/index.php/ijmst/article/view/1974>
- [12] Muhammad Zakwan Bin Abdul Karim and Norashikin M. Thamrin, 2022, Servo motor controller using PID and graphical user interface on Raspberry Pi for robotic arm, [Võrgumaterjal] [Kasutatud 20.03.2024]
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2319/1/012015/meta>
- [13] A.R. Almusawi, L.C. Dülger, S. Kapucu, 2016, A new artificial neural network approach in solving inverse kinematics of robotic arm, *Computational intelligence and neuroscience* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 20.03.2024]
<https://doi.org/10.1155/2016/5720163>

Lisad

Lisa 1. Dariveri püsivara lähtekoodi repositoorium.

<https://github.com/martinkaur/Servo-Arm-Driver>

Lisa 2. Robotkäe kasutajaliidese lähtekoodi repositoorium.

<https://github.com/martinkaur/Servo-controller-python-lib>

Lisa 3. Kõik robotkäe trükkplaadi disaini dokumendid.

<https://github.com/martinkaur/Servo-Arm-Controller-Design>

Lisa 4. Draiveri püsivara kirjutamise keskkond STM32CubeIDE.

<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>

Lisa 5. Kasutajaliidese programmeerimise keskkond Visual Studio Code.

<https://code.visualstudio.com/>

Lisa 6. Nucleo-64 tooteleht.

<https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f303re.html>

Lisa 7. STM32F303RDT7 tooteleht.

<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f303rd.html>

Lisa 8. Töös kasutatud USB-UART muunduri andmeleht. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/20005292c.pdf>

Lisa 9. Kasutatud pingemuunduri i MAX8880EUT+T andmeleht.

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max8880-max8881.pdf>

Lisa 10. Analoogväljundiga vooluanduri ACS712 andmeleht.

<https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>

Lisa 11. Trükkplaadi BOM.

Nimetus, mudel/väärtus	Kogus	Pakend või mõõde	Kasutatud veebipoe link
Protsessor, STM32F303RDT7	1	LQFP-64	https://ee.farnell.com/stmicroelectronics/stm32f303rdt7/mcu-arm-cortex-m4-72mhz-lqfp-64/dp/2850975
Vooluandur, ACS712ELCTR-05B-T	5	SOIC-8	https://ee.farnell.com/allegro-microsystems/acs712elctr-05b-t/ic-sensor-current-5a-soic8/dp/1329623
Pingemuundur, MAX8880EUT+T	1	SOT23-6	https://ee.farnell.com/analog-devices/max8880eut-t/lto-regulator-0-2a-adj-6sot23/dp/2519147
USB-UART muundur, MCP2221-I	1	SSOP-20	https://ee.farnell.com/microchip/mcp2221-i-sl/usb-2-0-to-i2c-uart-conv-soic/dp/2434893
LED, KP-1608ZGC	8	0603	https://ee.farnell.com/kingbright/kp-1608zgc/led-smd-0603-true-green/dp/2217973
USB Micro pesa, USB3076-30-A	1	type B	https://ee.farnell.com/gct-global-connector-technology/usb3076-30-a/micro-usb-2-0-type-b-receptacle/dp/2443117
Kruviterminal, 691103110003	5	3,5 mm	https://ee.farnell.com/wurth-elektronik/691103110003/terminal-block-wire-to-brd-3pos/dp/1841249
Kruviterminal, 691101710002	1	5 mm	https://ee.farnell.com/wurth-elektronik/691101710002/terminal-block-wire-to-brd-2pos/dp/1641932

Nupp, 430186043716	1	6,22 mm	https://ee.farnell.com/wurth-elektronik/430186043716/switch-tactile-0-05a-12vdc-tht/dp/2402405
<i>Pin header</i>	3	5 * 2.54 mm	
Kondensaator, 4,7 μ F	3	0603	
Kondensaator, 1 μ F	4	0603	
Kondensaator, 100 nF	9	0603	
Kondensaator, 10 nF	1	0603	
Kondensaator, 1 nF	5	0603	
Takisti, 160 k Ω	1	0603	
Takisti, 100 k Ω	1	0603	
Takisti, 10 k Ω	11	0603	
Takisti, 100 Ω	1	0603	

Tabel 6.1: Ühe trükkplaadi komponentide nimekiri (BOM).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Martin Kaur

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

“Servodel põhinev sotsiaalse robotkäe süsteem SemuBotile”

mille juhendaja on Leonid Zinatullin

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'i 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, 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.

Martin Kaur

15.05.2025