

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Kertrud Geddily Küüt

KÕRGUST REGULEERIV MEHHANISM ROBOTONDILE

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad:
Karl Kruusamäe
Renno Raudmäe

Tartu 2023

Lühikokkuvõte

Kõrgust reguleeriv mehhanism Robotondile

Robotite kontseptsioon on eksisteerinud mitmeid aastaid, kuid viimaste aastakümnete jooksul on nende kasutusala laienenud ja nende disain on muutunud märkimisväärselt keerukamaks. Bakalaureusetöö eesmärgiks oli luua elektrooniliselt juhitud tõstemehhanism Robotondile, mis võimaldaks sellel reguleerida oma kõrgust vastavalt erinevatele kasutajatele. Töö käigus uuriti erinevaid tõstemehhanismi lahendusi ja nende omadusi erinevates valdkondades nagu robotika, tööstusmasinad ja mööbel, et leida sobiv lahendus Robotondi jaoks. Tõstemehhanismi disainimisel kasutati erinevaid tehnoloogiaid nagu 3D-printimine ja freesimine. Töö tulemusena valmis elektriliselt juhitud kõrgust muutev mehhanism, mis võimaldab Robotondil muuta oma kõrgust vahemikus 58 - 124 cm.

CERCS: T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika; T210 Masinaehitus, hüdraulika, vaakumtehnoloogia, vibratsioonakustiline tehnoloogia

Märksõnad: robotika, mobiilne robot, tõstemehhanism, haridusrobot

Abstract

Height adjusting mechanism for Robotont

The concept of robots has existed for many years, but in recent decades, their usage has significantly expanded and their design has become considerably more complex. The aim of this bachelor's thesis was to create an electronically controlled lifting mechanism for Robotont, which would allow it to adjust its height according to different users. During the project, various lifting mechanism solutions and their properties in different fields such as robotics, industrial machinery, and furniture were studied to find a suitable solution for Robotont. The design of the lifting mechanism used various technologies such as 3D printing, and milling. The result of the work is an electrically controlled height-adjustable mechanism that allows Robotont to change its height in the range of 58 to 124 cm.

CERCS: T125 Automation, robotics, control engineering; T210 Mechanical engineering, hydraulics, vacuum technology, vibration acoustic engineering

Keywords: robotics, mobile robot, lifting mechanism, educational robot

Sisukord

Lühikokkuvõte.....	2
Abstract.....	3
Sisukord.....	4
Lühendid ja mõisted.....	6
Jooniste loetelu.....	7
1. Sissejuhatus.....	8
2. Kirjanduse ülevaade.....	9
2.1 Mobiilsed robotid.....	9
2.1.1 Robotont.....	12
2.2 Kõrgust muutvad robotid.....	13
2.3 Käärtõstuk ja selle tehnoloogia.....	15
2.3.1. Käärtõstuki osad.....	15
3. Tõstemehhanismi disain.....	18
3.1 Eesmärk.....	18
3.2 Nõuded tõstemehhanismile.....	18
3.3 Disain.....	18
4. Tõstemehhanismi prototüüpimine.....	21
4.1 Käärtõstuki mehaanika konstrueerimine.....	21
4.2 Käärtõstuki mehaanika ehitus ja selle testimine.....	23
4.2.1 Esimeste mehaanika detailide loomine ja testimine.....	23
4.2.2 Mehaanika stabiilsemaks muutmine.....	25
4.2.3 Siini süsteemi kasutamine rataste asemel.....	26
4.2.4 Puutetundlikule ekraanile korpuse loomine.....	27
4.2.5 Tõstemehhanismi disaini muudatused.....	28
5. Tulemus ja arutelu.....	31
6. Ettepanekuid tõstemehhanismi arendamiseks.....	34
7. Kokkuvõte.....	35
Kasutatud kirjandus.....	36

Lisad.....	39
Lisa 1. Robotondi dokumentatsioon.....	39
Lihtlitsents.....	40

Lühendid ja mõisted

ROS - *Robot Operating System*, roboti operatsioonisüsteem

AMR - *autonomous mobile robots*, autonoomne mobiilne robot

LiDAR - *Light Detection and Ranging*, Valguse tuvastamine ja ulatus

HEPA filter - *high-efficiency particulate air filter*, Kõrgtõhus osakeste eemaldamise õhufilter

UV-C - *Ultraviolet-C*, ultraviolet-C (180-280nm)

PLA - *Polylactic acid*, polüpiimhape

HDMI - *High-Definition Multimedia interface*, Kõrglahutusega multimeedia liides

USB - *Universal Serial Bus*, Universaalne jadasiin

Jooniste loetelu

Joonis 2.1. Roomba robot J7/J7+ vältimas lemmiklooma väljaheiteid [9].....	10
Joonis 2.2. Ecovacs õhupuhastus robot AIRBOT Z1 [10].....	11
Joonis 2.4. Robotondi 3D mudel [14].....	12
Joonis 2.5. Hello robot Stretch [16].....	13
Joonis 2.6. Flexispot E5 laua mootorite asukohad [18].....	14
Joonis 2.7. IMA-X operatsiooni laud lateraal nurga all [19].....	15
Joonis 2.8. Käärtõstuki osad (1. Platvorm; 2. Käärjalad; 3. Silinder; 4. Alus, 5. Toiteallikas)[21].....	16
Joonis 3.1. (a) Robotont idee number 1; (b) Idee nr 1 külgvaade.....	19
Joonis 3.2. Robotondi idee number 2.....	20
Joonis 4.1. Papp paberist valminud tõstemehhanism.....	21
Joonis 4.2. Kõrgust muutev mehhanism Robotondile 3D mudel.....	22
Joonis 4.3. Ahelketi 3D mudelid.....	22
Joonis 4.4. (a) kolmanda korruse siinide 3D printimine; (b) paremal alusplaadi freesimine...23	
Joonis 4.5. (a) Käärtõstuki testimine manuaalselt; (b) Tõstemehhanismi testimine toiteallikaga Rigol DP832.....	24
Joonis 4.6. Käärjalgade kinnitus A-Nailon polt (valge), B- Nailon mutter (valge), C- PLA mutter (hall).....	25
Joonis 4.7. Mehhanismi stabiliseerimine stopperõngaste abil.....	26
Joonis 4.8. (a) Rataste süsteem; (b) siini süsteem.....	27
Joonis 4.9. Ekraanile loodud korpus.....	28
Joonis 4.10. Horisontaalselt paigutatud juhtkurvi mehhanismil.....	29
Joonis 4.11. Nurga alla pandud juhtkruvi.....	29
Joonis 4.12. Mootori ja juhtkruvi erinevad asendid vastavalt ekraani asendile: A) Kui ekraan on all B)Kui ekraan on üles tõstetud.....	30
Joonis 5.1. Ekraani kõrguse testimine.....	31
Joonis 5.2. Valminud tõstemehhanism Robotondi peal.....	32
Joonis 5.3. Toiteallikaga võimsuse mõõtmine mehhanismi tõstmisel.....	33

1. Sissejuhatus

Robotite kontseptsioon on eksisteerinud mitmed aastaid, kuid viimaste aastakümnete jooksul on robotite kasutusala oluliselt kasvanud ning nende komplekssus märgatavalt muutunud. Tänapäeva robotitel on palju praktilisi kasutusalasid erinevates valdkondades, milleks on näiteks tööstus-, meditsiini-, meelelahutus-, teenindus- ja sõjaväe valdkond [1].

Tootmises, logistikas, tervishoius ja inimese ning roboti vahelises interaktsioonis kasutatakse roboteid, millel on võime reguleerida enda kõrgust vastavalt keskkonnale ja ülesannetele. Kõrgust reguleerivad robotid on spetsiaalselt loodud võimaldamaks enda vertikaalset asendit muuta vastavalt vajadusele. Nende robotite konstruktsioon sisaldab mehhanisme, mis võimaldavad kõrgust reguleerida kas käsitsi või automaatselt, sõltuvalt rakendus valdkonnast ja kasutus vajadustest.

Robotont on avatud robotplatvormiga haridusrobot, mis on mõeldud nii robotika alase hariduse kui ka teadustööde jaoks. Tartu Ülikoolis arendatav Robotont on omniliikuv mobiilne robot, millel kasutatakse ROS (*Robot Operating System*) tarkvara [2].

Robotont on hetkel kompaktne robot, mille kõrgus on 25 cm kui sellele on paigaldatud Intel RealSense D435 kaamera. Ilma kaamerata on Robotondi kõrgus 13,5 cm. Robotondil puudub kõrgust reguleeriv tõstemehhanism, mis võimaldaks kõrgust muuta vastavalt erinevate inimeste kehapikkustele. Kõrgust reguleeriva tõstemehhanismi lisamine Robotondile laiendaks selle kasutusvõimalusi erinevates keskkondades ja ülesannetes, võimaldades sellel olla efektiivne ja mugav erinevate kasutajate jaoks. Lisaks tõstemehhanismi lisamine suurendaks Robotondi mitmekülsust, võimaldades sellel kohanduda erinevate kasutusolude ja -vajadustega.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on uurida hetkel olemasolevaid tõstemehhanismi lahendusi, disainida vastav tõstemehhanism Robotondi jaoks ning viia läbi põhjalikud katsetused, hindamaks loodud tõstemehhanismi stabiilsust ja võimekust.

2. Kirjanduse ülevaade

2.1 Mobiilsed robotid

Mobiilne robotika on lahendustele orienteeritud tööstusharu, mis areneb pidevalt ja kiiresti [3]. Robot koosneb erinevatest anduritest, millega robotid oma ümbrust tuvastavad, kaugjuhtimise operaatoritest ja automaatselt juhitavatest funktsioonidest [5,6].

Mobiilsed robotid on tehisintellekti poolt juhitavad robotid, mis on võimelised liikuma iseseisvalt keerukates keskkondades, omavad autonoomset planeerimisvõimet ning täitma erinevaid ülesandeid [3,5]. Nende robotite tõhus toimimine tugineb rohkele tehisintellektile ja pilvearvutusele, mis võimaldab neil täita ka kõige keerukamaid ülesandeid. Mobiilne robot erineb fikseeritud robotist selle poolest, et fikseeritud robotid on tavaliselt loodud spetsiifiliste korduvate ülesannete jaoks, mille puhul on täpsus ja kiirus esmatähtsad [6].

Mobiilsed roboteid saab liigitada kahte põhitüüpi: autonoomsed ja mitteautonoomsed mobiilsed robotid. Mitteautonoomsed robotid sõltuvad liikumisel juhtimissüsteemist või välisest juhendamisest, samas kui AMR-id suudavad iseseisvalt liikuda, tuvastades oma ümbrust vastavate andurite abil [5]. Anduriteks saavad olla näiteks 2D- ja 3D-kaamerad, radarid, infrapunasensor ja fototransistorid [7].

Roomba (joonis 2.1) on iRoboti valmistatud autonoomne robottolmuimeja. Robottolmuimejal on erinevad andurid, mis võimaldavad neil iseseisvalt navigeerida kodu põrandapinna ulatuses. Andurid suudavad tuvastada takistuse olemasolu, määrdunud kohti põrandal ja järske langusi nagu näiteks trepid [8].



Joonis 2.1. *Roomba robot J7/J7+ vältimas lemmiklooma väljaheiteid [9].*

Ecovacs on loonud kompaktse õhupuhastus roboti AIRBOT Z1 (joonis 2.2), mille eesmärk on tagada puhas ja tervislik õhk kodudes. Õhupuhastus Robot kasutab HEPA H13 filtrit, mis suudab kinni pidada kuni 99.9% õhus leiduvatest osakestest, sealhulgas viirused, bakterid, tolmulestad ja allergeenid. Lisaks kasutab robot UV-C valgust, mis hävitab tõhusalt kõik patogeensed mikroorganismid. AIRBOT Z1 on varustatud TrueMapping 2.0, mis võimaldab robotil luua täpse kaardi kodust ning navigeerida seal autonoomselt. AIVI 3D takistuse vältimise süsteem võimaldab robotil sujuvalt liikuda kodus ning vältida takistusi [10].



Joonis 2.2. *Ecovacs õhupuhastus robot AIRBOT Z1 [10].*

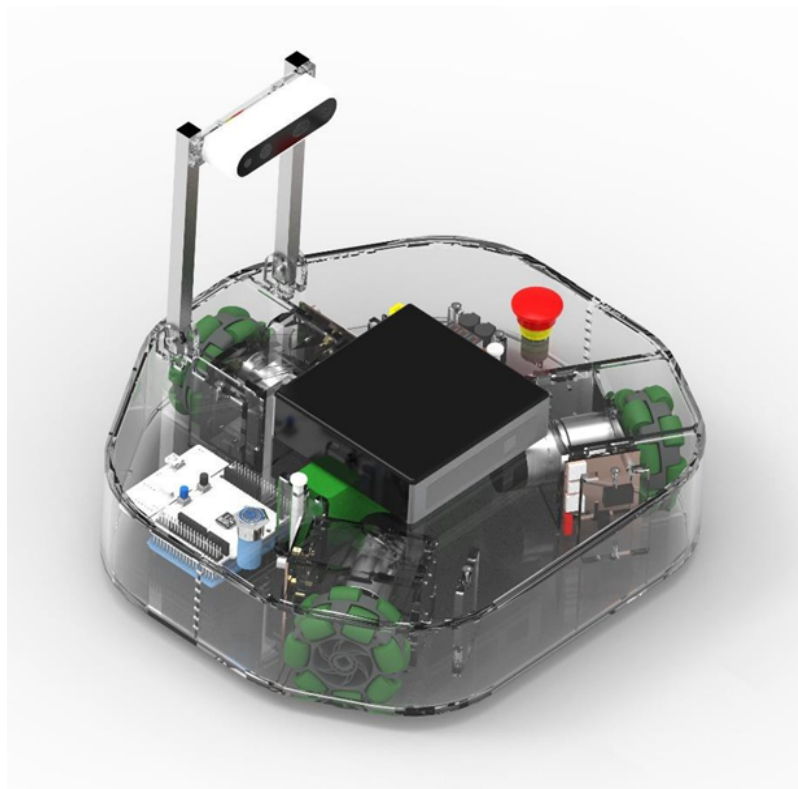
Clearpath Robotics, mis tegutseb Kanadas, toodab AMR-i Clearpath Dingot (joonis 2.3). Dingo on kompaktne ja kerge robot, millel on erinevad sensorid, sealhulgas LiDAR, kaamerad ja kooderid. Dingo võib kanda kuni 20 kg raskuseid koormaid ning seda saab kohandada erinevate sensorite ja lisaseadmetega, nagu näiteks Kinova Gen 3 Lite käega. Dingo peamiseks kasutusala on teadus- ja haridusvaldkonnad [11, 12].



Joonis 2.3. *Clearpath Dingo [11].*

2.1.1 Robotont

Robotont on Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudis alates 2017. aastast välja arendatud avatud robotplatvorm, mis on mõeldud nii robotika-alaseks õppetööks kui ka teadustööks. Robotont on omniliikuv mobiilne robot, millel on integreeritud ROS tarkvara. ROS on avatud lähtekoodiga tarkvara platvorm, mis võimaldab tõhusat robotite arendamist ja juhtimist [16, 2].



Joonis 2.4. Robotondi 3D mudel [14].

Robotont koosneb mitmest moodulist, sealhulgas keremoodulist, rattamoodulist ja elektroonikamoodulist. Keremoodul koosneb kahest polükarbonaat plaadist - ülemisest ja alumisest plaadist. Rattamoodulis kasutatakse Pololu reduktormootorit [18], mis on kinnitatud polükarbonaadist otsaplaatidele ja omniratastele. Elektroonika mooduli alla kuuluvad pardaarvuti, milleks on Intel NUC7i5BNK, juhtkontrolleriks on NUCLEO-L476RG ning kaameraks on Intel RealSense D435. Mootorite kontrollid põhinevad MC3887-1 [17].

2.2 Kõrgust muutvad robotid

Kõrgust reguleerivad robotid on võimelised muutma oma kõrgust vastavalt ümbritseva keskkonna või ülesannete vajadustele, kasutades erinevaid mehhanisme ja tehnoloogiaid, nagu näiteks elektrilised, hüdraulilised või pneumaatilised süsteemid [15].

Robot Stretch RE1 (joonis 2.5) on mitmekülgne mobiilne manipulaator robot, mis on spetsiaalselt loodud pakkuma automatiseerimislahendusi erinevatele ülesannetele. Selle roboti üles-alla liikumisulatus on 109 cm ning kõrgust reguleeritakse elektrilise mootoriga. Roboti maksimaalne kiirus üles ja alla liikumisel on 0.2 m/s. Stretch-i LiDAR süsteem on äärmiselt tundlik, mis võimaldab robotil navigeerida keerulistes keskkondades ja vältida takistusi. Lisaks on robotil täiustatud haarats (ingl *gripper*), mis on varustatud kaameraga ja jõumomendi anduriga, mis võimaldab robotil haaramist ja manipuleerimist täpselt teostada. Robot suudab täita ülesandeid nagu esemete sorteerimine ja liigutamine. Stretch kasutab avatud lähtekoodiga platvormi, mis võimaldab arendajatel kohandada roboti käitumist vastavalt nende konkreetsetele vajadustele [16].



Joonis 2.5. *Hello robot Stretch [16].*

Flexispot on bränd, mis valmistab ergonoomilisi kontorimööbleid, sealhulgas kõrgust reguleerivaid kontorilaudu. Ettevõtte laud on kavandatud pakkuma mugavat ja tervislikku töökeskkonda, võimaldades kasutajatel mugavalt vahetada istuvat ja seisvat tööasendit päeva jooksul, soodustades sellega paremat tervist ja heaolu. Flexispot E5 laudadel kasutatakse kahe mootoriga tõstesüsteemi koos kahekordse põiktala konstruktsiooniga (joonis 2.6), mis tagab sujuva ja stabiilse tõstmise kogemuse vahemikus 60 kuni 125 cm. Lisaks on laua alla paigutatud juhtpaneel, mis võimaldab kasutajal hõlpsalt reguleerida laua kõrgust ja salvestada sobivad kõrguse seaded vastavalt individuaalsetele vajadustele [17].



Joonis 2.6. *Flexispot E5 laua mootorite asukohad [18].*

Meditšiini valdkonnas kasutatakse IMA-X angiograafia operatsiooni lauda (joonis 2.7), mis on välja töötatud patsiendi hoidmiseks kirurgiliste ja diagnostiliste protseduuride ning meditsiinilise piltagnostika jaoks. Operatsioonilaud on varustatud elektrohüdraulilise või elektromehhaanilise ajamiga, mis täidab mitmeid funktsioone, milleks on kõrguse reguleerimine vahemikus 740 mm kuni 1185 mm, lateraal kaldenurga, Trendelenburgi ja tagurpidi Trendelenburgi kaldenurga muutmine. Lauaplaadi reguleerimine on sujuv, mitmesuunaline ja astmeteta ning seda saab teostada juhtpuldi abil, sealhulgas on võimalus reguleerida liigutuste kiirust [19].



Joonis 2.7. *IMA-X operatsiooni laud lateraal nurga all [19].*

2.3 Käärtõstuk ja selle tehnoloogia

Käärtõstuk on mehaaniline tõsteseade, mida kasutatakse ajutiseks juurdepääsuks inimestele ja seadmetele kõrgematele ja ligipääsmatutele aladele. Seadme vertikaalne liikumine saavutatakse risti asetatud voltimise struktuuride kasutamisega, kus ülespoole liikumisel rakendatakse survet madalamatele toetustele, põhjustades ülejäänud konstruktsiooni pikendamise (joonis 2.8). Allapoole liikumisel väheneb surve madalamatele toetustele, mis põhjustab teiste toetuste taandumist [20]. Tõstuki liikumismehhanism sõltub selle energiaallikast, mis võib hõlmata hüdraulikat, pneumaatikat, diisel- või elektrimootorit [21]

2.3.1. Käärtõstuki osad

Käärtõstuki osade all mõistetakse erinevaid komponente, hõlmates platvormi, hüdraulikasüsteemi, juhtimissüsteemi ja konstruktsioonelemente, mis koos moodustavad käärtõstuki - mitmekülgse seadme, mida kasutatakse raskete koormate vertikaalseks tõstmiseks.



Joonis 2.8. Käärtõstuki osad (1. Platvorm; 2. Käärjalad; 3. Silinder; 4. Alus, 5. Toiteallikas)[21].

Platvormid on erinevate kujudega ja suurustega. Rööbastel olevad platvormid on tavaliselt mõeldud inimeste transportimiseks, kuid rööbasteta platvormid on suunatud materjalide transportimiseks [21].

Käärjalad ulatuvad alusest platvormini ning tõstavad platvormi kokkutõmbumisel, samas kui platvormi langetamisel jalad laienevad. Jalad on paigutatud pantograafi või risti-rästi mustrisse [21].

Alus toimib tõstuki aluskonstruktsioonina ning on valmistatud vastupidavast metallist. Alusel on rajad, mis juhivad rullikuid käärjalgade all. Need rullikud koos tugeva alusega tagavad stabiilse tõusu ja laskumise protsessi [21].

Silindri sisu võib erinevatel tõstukitel varieeruda: nt hüdraulilisel käärtõstukil on silinder täidetud hüdraulilise vedelikuga, samas kui pneumaatilise silindri sisu täitub suruõhuga, et käärjalgu liigutada [21].

Toiteallikas võib olla kas integreeritud iseseisev mootor, mis asub otse tõstuki konstruktsioonis, või kaugjuhitav toiteplokk, mis on paigaldatud eraldi ja juhitakse tõstukit juhtiva seadme kaudu [21].

Laskumisventiil reguleerib suruõhu või hüdraulilise vedeliku voolu, võimaldades sellel naasta tagasi oma algse olekusse. See tagab, et käärtõstuk ei liiguks laskumisel liiga kiiresti, tagades sellega stabiilse ja kontrollitud liikumise [21].

Vooluhulga reguleerimisventiil vastutab platvormi laskumise kiiruse juhtimise eest, kontrollides hoolikalt, kui kiiresti vedelik või suruõhk voolab välja silindrist. See võimaldab täpset reguleerimist ja kontrolli platvormi liikumise üle ning tagab soovitud laskumiskiiruse [21].

3. Tõstemehhanismi disain

3.1 Eesmärk

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on välja töötada juhitava kõrgusega tõstemehhanism Robotondile, mis on varustatud puutetundliku ekraaniga. Lisaks on oluline tagada, et puutetundlik ekraan oleks mugav kasutada erineva pikkusega inimestel, sealhulgas nii väikestel lastel kui ka täiskasvanutel.

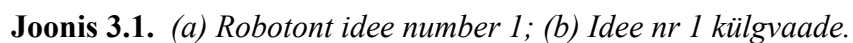
3.2 Nõuded tõstemehhanismile

1. Mehhanism on kergem kui 3 kg
2. Kõrgust reguleeriv mehhanism, mille kõrgus madalamas seisus oleks ligikaudu 50 cm ning kõrgemas seisus 130 cm
3. Mehhanism ei ole laiem kui robotont (< 33 cm)
4. Mehhanismi peale saab paigutada puutetundliku ekraani
 - a. Kasutatakse Waveshare 7-tollist puutetundlikku ekraani, mille resolutsioon on 1024 x 600 pikslit. Ekraani füüsilised mõõtmed on 164,90 x 124,27 mm.
5. Elektriliselt juhitud Pololu mootoriga
 - a. Kasutatakse 12 V Pololu 19:1 käigukastiga reduktormootorit, mis on varustatud integreeritud kvadratuurkooderiga. Selle konkreetse mootori kasutamine on soovitatav nõue, kuna see tagab lihtsa integreeritavuse Robotondil olemasoleva elektroonika lahendusega.

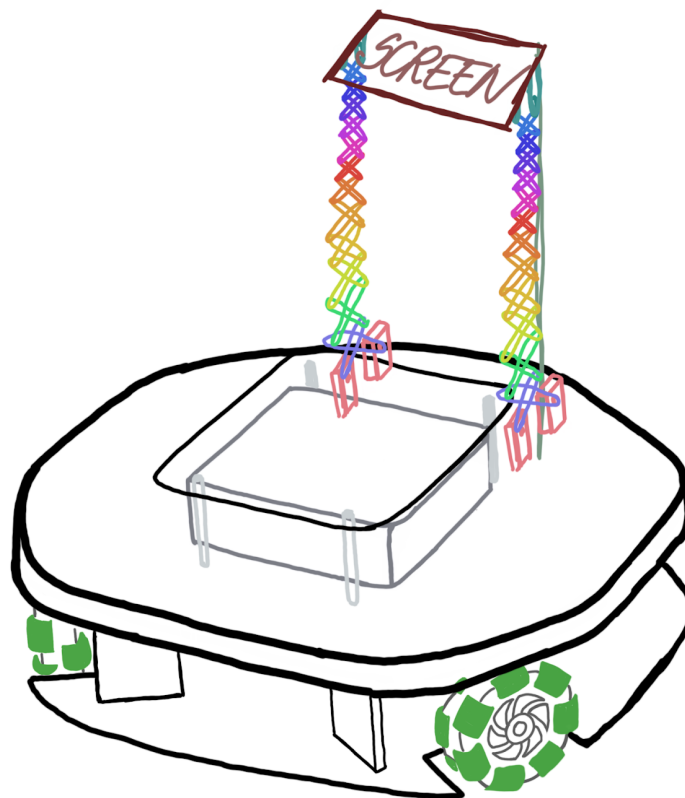
3.3 Disain

Käesolevat bakalaureusetöö valmimise protsessi on võimalik jaotada mitmeks faasiks. Esimene faas hõlmab erinevate kõrgust reguleerivate mehhanismide uurimist. Teises faasis keskendutakse ideede koostamisele, mis oleksid sobilikud töö eesmärkide saavutamiseks. Lõpuks jõutakse kolmandasse faasi, kus valitakse välja sobivam idee.

Tõstemehhanismi esimene kontseptsioon, mida illustreeritakse joonisel 3.1, on saanud inspiratsiooni kahveltõstukist. Kontseptsiooni konstruktsioon koosneb vähemalt kolmest polükarbonaatplaadist, millest kaks plaati (sinine ja roheline) liiguvad vastavalt üles-alla. Igal plaadil on paigaldatud kaks hammasratast (lilla), mille peale on paigutatud hammasrihm (pruun). Hammasrihm on kinnitatud sinise polükarbonaatplaadi ülemise ratta ja mootor oleks kui vints, mis kerib hammasrihma trumlile. Kui soovitakse tõstemehhanismi üles tõsta, siis mootor tõmbab hammasrihma pingule ja kerib samal ajal rihma trumile peale ning alla lastes antakse hammasrihm tagasi. Tõstemehhanismi peal paikneb 7-tolline puutetundlik ekraan.



Tõstemehhanismi teine idee on inspireeritud käärtõstukist (joonis 3.2), mis koosneb mitmest jadamisi ühendatud käärjalgadest. Tõstemehhanismi üles liikumisel käärjalad tõmbuvad kokku, kui soovitakse ekraani kõrgemale ning alla laskmisel käärjalad laienevad. Käärjalgu liigutab Pololu 19:1 12V reduktormootorit, mida kasutatakse ka Robotondi rattamoodulis. Mootori külge on kinnitatud ühendusdetail, millel on omakorda juhtkruvi (ingl *lead screw*). Juhtkruvi liigutab käärjalgade vahel olevat 3D-prinditud tükki, mis omakorda liigutab käärjalgu vastavalt. Tõstemehhanismi platvormile on kinnitatud ekraan, millele on lisaks paigaldatud ekraani korpus ja korpuse jalad.



Joonis 3.2. Robotondi idee number 2.

Prototüüpimist otsustati jätkata ideega nr 2, kuna eeldati, et käärtõstuki lahendus on kompaktsem ja stabiilsem võrreldes kahveltõstukist inspireeritud idee. Samuti eeldati, et idee nr 1 mehhanismi kaal võib ületada 3 kg, kuna kasutatakse suuri polükarbonaatplaate, mille pikkus võib ulatuda üle 50 cm, et saavutada 120 cm tõstekõrgus.

4. Tõstemehhanismi prototüüpimine

4.1 Käärtõstuki mehaanika konstrueerimine

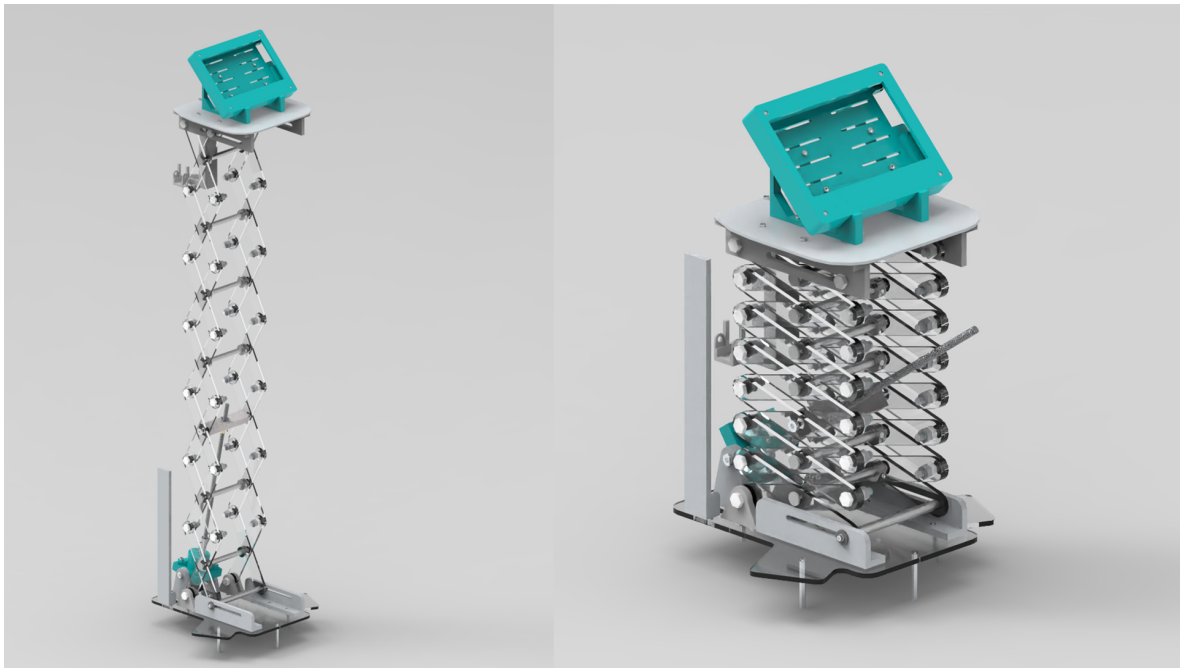
Prototüüpimise käigus viidi läbi mitmed etapid, mille hulka kuulusid papp-paberist eskiisi loomine tõstemehhanismi jaoks, mehaaniliste detailide joonestamine Solid Edge tarkvaraga ning sobiva ahelketi lahenduse otsimine UltiMaker Thingiverse veebilehelt.

Enne mehaaniliste konstruktsiooni projekteerimist tarkvaras loodi papp-paberist eskiisi käärtõstuki tõstemehhanismist, eesmärgiga paremini mõista mehhanismi ja selle kokkupanekut Solid Edge programmis. Papp-paberist lõigati välja 20 ristküliku taolist tükki mõõtmetega 150 x 25 mm, millel on kolm auku - üks keskel ja kaks servades. Tükke hoiti koos rulli keeratud papitükkide ja bambusest grill pulkadega (Joonis 4.1).



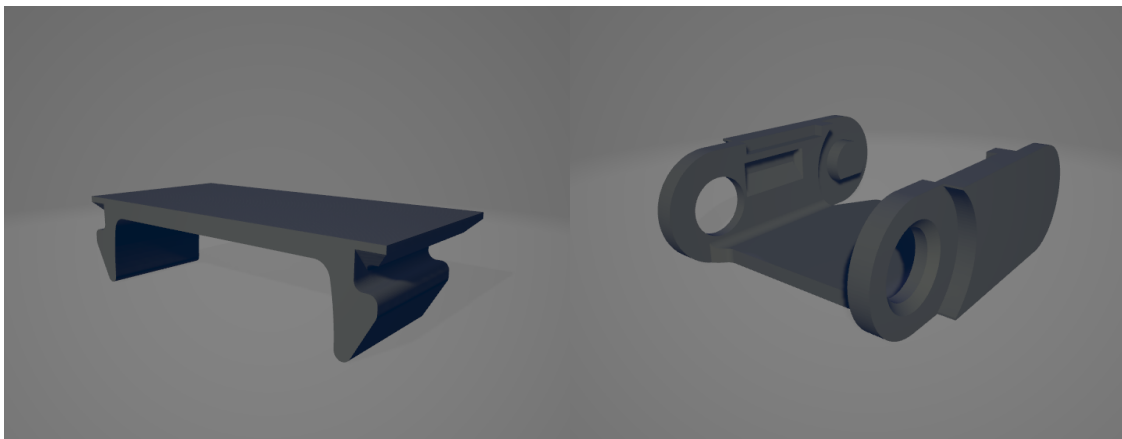
Joonis 4.1. Papp paberist valminud tõstemehhanism.

Mehaaniliste detailide joonestamisel kasutati Solid Edge projekteerimistarkvara [22]. Kõigi loodud detailide nimekiri ja eelvaated asub Lisas 1.



Joonis 4.2. *Kõrgust muutev mehhanism Robotondile 3D mudel.*

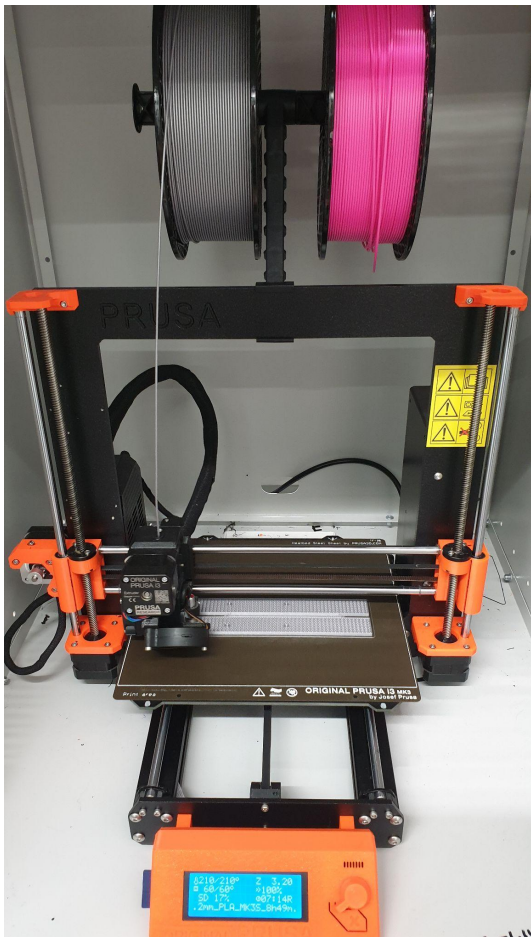
Robotondi ehitamisel kasutati UltiMaker Thingiverse veebilehelt leitud ahelketi lahendust (joonis 4.3), mis on valmistatud kasutaja Riddeeni poolt [23]. Ahelketi lahendus leiti internetist eesmärgiga leida sobiv viis, kuidas turvaliselt transportida juhtmeid Robotondil nii, et need ei jääks mehhanismi vahele kinni ega kisuks ekraani või arvuti küljest juhtmeid lahti.



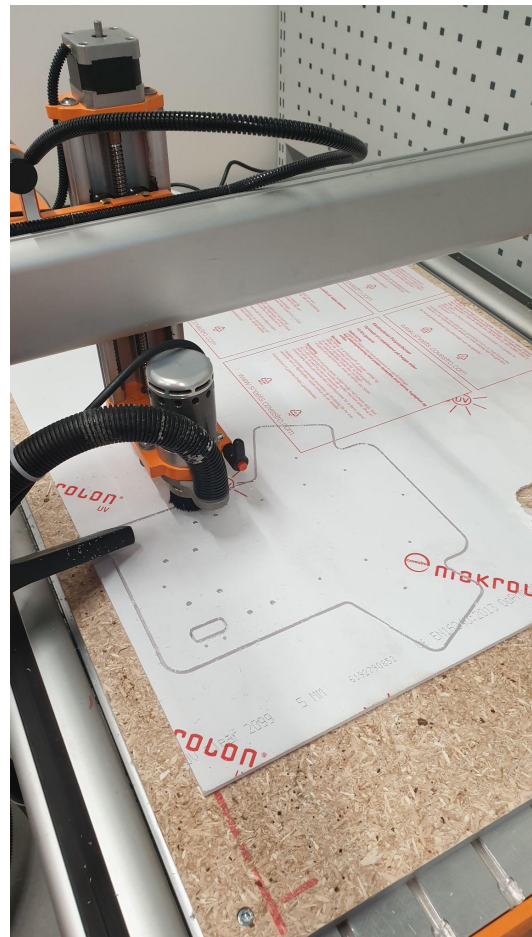
Joonis 4.3. *Ahelketi 3D mudelid.*

4.2 Käärtõstuki mehaanika ehitus ja selle testimine

Polükarbonaat tükkide välja lõikamisel kasutati joonestustarkvara Autodesk Fusion 360 [24], mille abil genereeriti CNC-freesile kood, mida kasutati polükarbonaadist detailide tootmiseks (joonis 4.4). 3D-mudelid loodi tarkvara Prusa Slicer [25] abil. 3D-detailide printimiseks kasutati Prusa I3 MK3S 3D-printerit [26]. 3D printimisel kasutati ainult PLA filamenti.



(a)



(b)

Joonis 4.4. (a) kolmanda korruse siinide 3D printimine; (b) paremal alusplaadi freesimine.

4.2.1 Esimeste mehaanika detailide loomine ja testimine

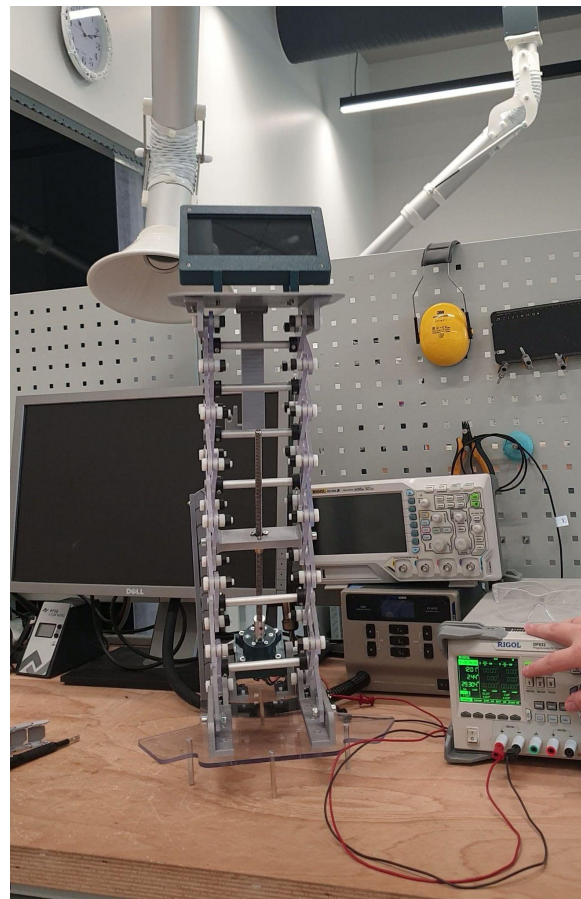
Bakalaureusetöö raames alustati mehaanika ehitamist ja testimist kohe pärast esimeste polükarbonaat käärgalgade freesimist. Käärgalgade testimise käigus tuli jälgida, kas poldid ja alumiinium toru liiguvad takistusteta vastavas avas, et tagada sujuv liikumine. Samuti tuli

vältida ava liiga suureks puurimist, kuna see võib põhjustada mehaanika ebastabiilsust üles-alla liikumisel, kuna lõtk on fikseerivate komponentide vahel liiga suur. Kui avastati, et polt või alumiinium toru ei liigu sujuvalt, tuli vastavat auku puurida mõne millimeetri võrra suuremaks.

Mehaanika järgmine testimine toimus pärast mootori, mootori kinnituse, käärjalgade, käärjalgade kinnituste, rataste, mehhanismi liigutava 3D prinditud tüki, alumiinium torude, juhtkruvi, juhtkruvi mootorikinnituse, poltide ja mutrite paigaldamist alusplaadile. Mehaanika funktsionaalsust testiti manuaalselt, kus käega keerati juhtkruvi, mis omakorda liigutas mootorit ja mehaanikat.



(a)



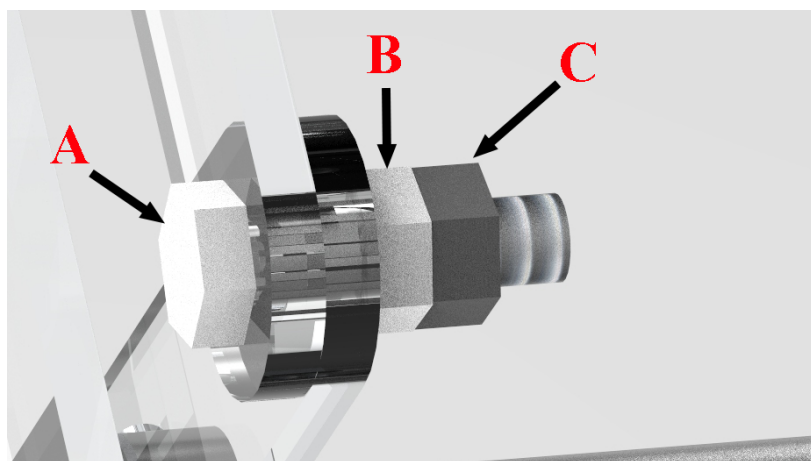
(b)

Joonis 4.5. (a) Käärtõstuki testimine manuaalselt; (b) Tõstemehhanismi testimine toiteallikaga Rigol DP832.

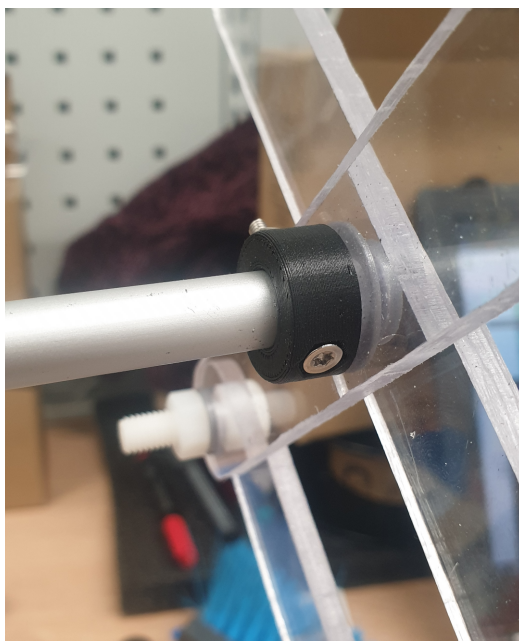
Pärast käsitsi testimist võeti kasutusele Rigol DP832 toiteallikas [29], mida kasutati edasistel testimistel. Toiteallikast väljastatud elektrivoolu tugevus oli piiratud 3 A-ga ning toitepinge oli 12 V.

4.2.2 Mehaanika stabiilsemaks muutmine

3D-printeriga valmistati alumiinium torule stopperrõngad (joonis 4.7) ja toru punnid, millest mõlemad on valmistatud PLA-st ning takistavad käärjalgade sisse-välja liikumist. Nailon poltidele loodi nailon mutritele lisaks ka PLA-mutrid (Joonis 4.6), et vältida nailon mutrite liikumist. Ilma PLA mutrita saab nailon mutter ennast lahti keerata, kui mehhanism liigub üles-alla, mis omakorda annab ebastabiilsust mehhanismile. Mutter sai valmistatud PLA-st, kuna mehhanismi jaoks oli vaja juurde rohkem mutreid. Lisaks ise keermestatud PLA mutter andis tihedamat keeret nailon poldile kui nailon mutter. Nailon mutter on mõeldud kui vahelülina (ingl *spacer*) ja PLA mutter kui lukustusmutrina (ingl *lock nut*).



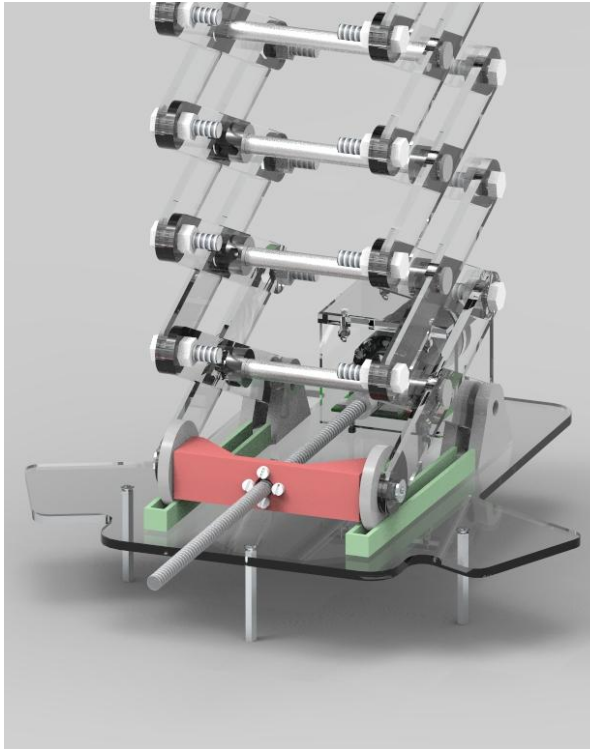
Joonis 4.6. Käärjalgade kinnitus A-Nailon polt (valge), B- Nailon mutter (valge), C- PLA mutter (hall).



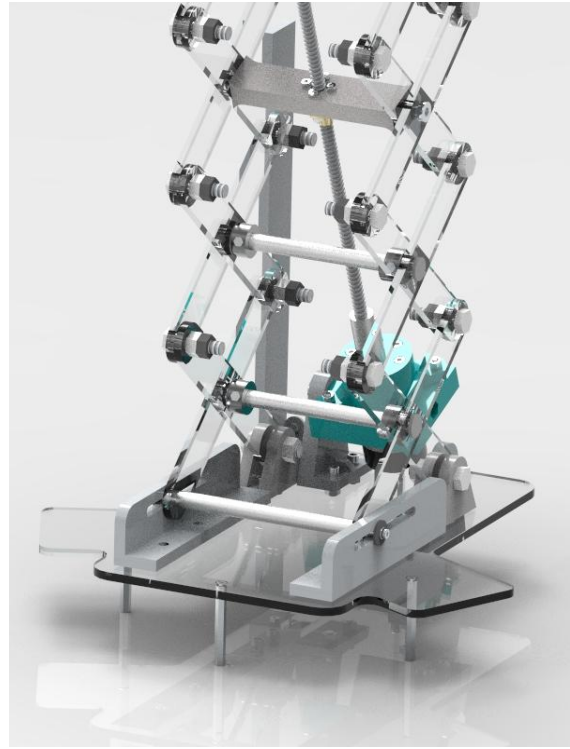
Joonis 4.7. *Mehhanismi stabiliseerimine stopperrõngaste abil.*

4.2.3 Siini süsteemi kasutamine rataste asemel

Alguses kasutati mehhanismi juhtimiseks rataste süsteemi (joonis 4.8 (a)), mis koosneb PLA ketastest, millele olid sisse lükatud laagrid. Ratastele paigaldati ka siinid, et piirata nende liikumist külgsuunas. Hiljem siiski otsustati kasutada ainult siinide süsteemi (joonis 4.8 (b)), kus siinide vahel oli keermestatud alumiinium toru, mille oli ise treitud. Mõlemal toru otsa on kinnitatud M3 poldid, millele on lisatud seibid. Selline muudatus võimaldas saavutada stabiilsema liikumise. Lisaks võimaldas siinide süsteem vältida rataste kinnikiilumist ja suurendada mehhanismi efektiivsust.



(a)

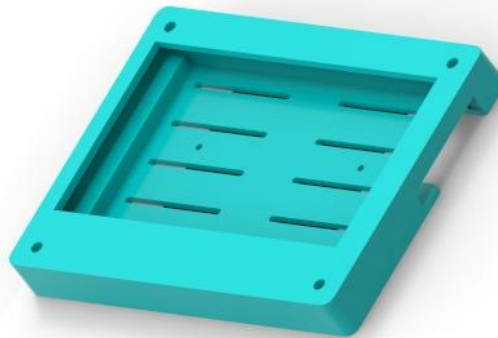


(b)

Joonis 4.8. (a) Rataste süsteem; (b) siini süsteem.

4.2.4 Puutetundlikule ekraanile korpuse loomine

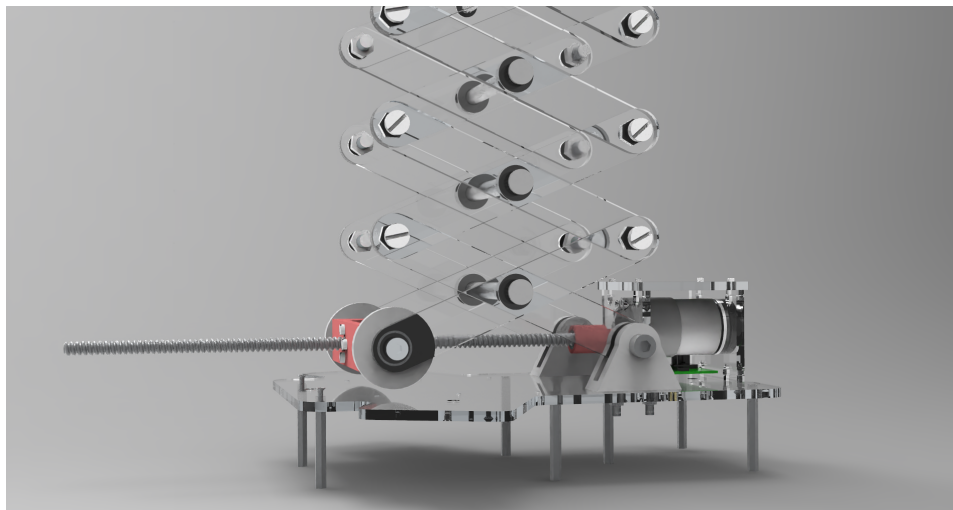
Waveshare puutetundlikule ekraanile loodi korpus (joonis 4.9) eesmärgiga kaitsta seda ning anda sellele esinduslik välimus. Ekraani korpuse disainimisel tehti HDMI ja Micro USB kaabli avad väga täpselt, mistõttu HDMI kaabli otsa ümbris ei mahtunud avasse, kuna paar millimeetrit oli puudu. Uue korpuse disainimisel arvestati kaablite sobivusega ning otsustati kasutada 90-kraadise nurga all olevat Micro USB kaablit ja 270-kraadise nurga all olevat HDMI kaablit. Kahjuks osutus valitud HDMI kaabel liiga jäigaks, kuna see on varjestatud. Varjestatud kaabel mõjutab ahel ketti, takistades selle vabat ja sujuvat liikumist.



Joonis 4.9. *Ekraanile loodud korpus.*

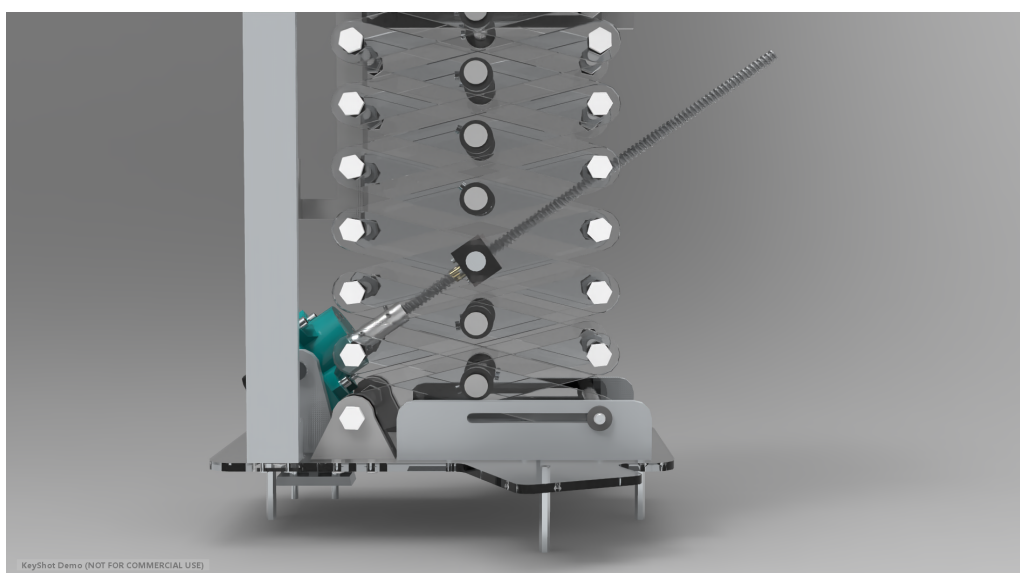
4.2.5 Tõstemehhanismi disaini muudatused

Järgmine probleem, mis osutus oluliseks, oli mehaanika üles-alla liikumine. Robotondi suhtes horisontaalselt paigutatud juhtkruvi pidi rakendama niivõrd suurt jõudu, et mootor ei suutnud sellega iseseisvalt hakkama saada. Mehhanism liikus üles ainult siis, kui seda käega tõsteti jalgade alusplaadi abil vähemalt poole teekonna võrra. Sellest lähtuvalt katsetati tõstemehhanismi juhtkruvi käega tõmbamist ilma mootorita, et selgitada välja, kas bakalaureusetöö autor suudab mehhanismi iseseisvalt tõsta. Kahjuks see katse ebaõnnestus, kuna tõstemehhanismi tõstmine juhtkruvist horisontaalselt oli raske.



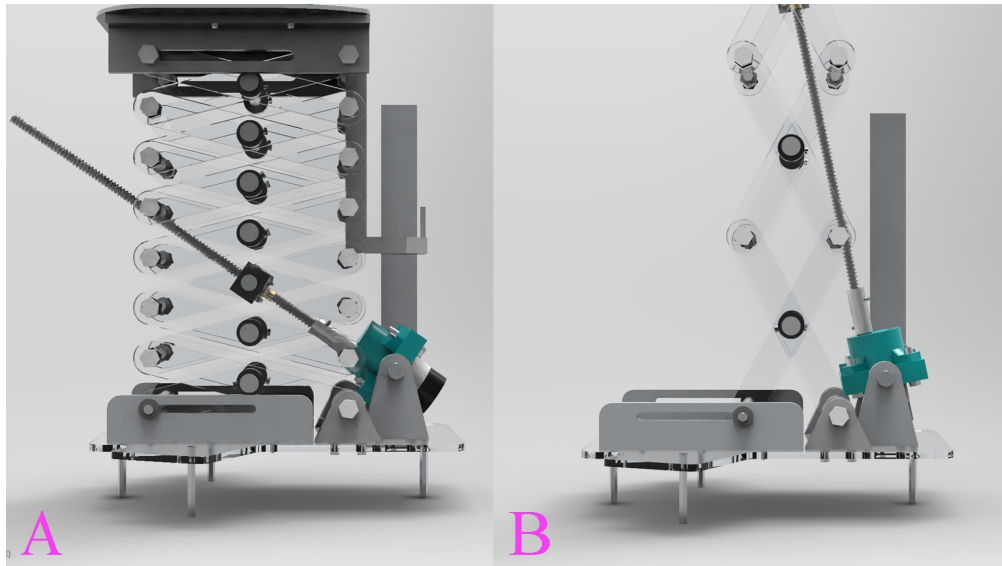
Joonis 4.10. *Horisontaalselt paigutatud juhtkurvi mehhanismil.*

Sobiv lahendus leiti tüüpilise käärtõstuki näitel, kus hüdrocilinder oli asetatud nurga alla [27]. Seetõttu tuli tõstemehhanismi disaini muuta selliselt, et juhtkruvi oleks kinnitatud nurga all. Disaini protsessis disainiti vastavad komponendid ning neid testiti visuaalselt Solid Edge tarkvaras, mille järel said komponendid välja printitud 3D printeriga. Pärast uue disaini valmimist prooviti käega juhtkruvist tõstemehhanismi tõstmist ning see katse õnnestus. Selgus, et tõstemehhanismi tõstmine juhtkruvist oli oluliselt lihtsam võrreldes olukorraga, kus juhtkruvi oli paigutatud horisontaalselt Robotondi suhtes. Kui juhktuvi on paigaldatud horisontaalselt, siis mehhanismil tekib alguses tohutu takistus, millest mootor ei saa jagu.



Joonis 4.11. *Nurga alla pandud juhtkruvi.*

Pärast muudatuste sisseviimist, milleks olid mootori vaba liikumine erinevate nurkade all ja 3D-prinditud tüki asukoha muutmine (joonis 4.12), mida juhtkrugi liigutab, et võimaldada mehhanismil üles-alla liikuda, saavutati toimiv käärtõstuki süsteem Robotondile.



Joonis 4.12. Mootori ja juhtkrugi erinevad asendid vastavalt ekraani asendile: A) Kui ekraan on all B) Kui ekraan on üles tõstetud.

Viimane muudatus Robotondi disainis hõlmas 2. korruse polükarbonaadist alusplaadi kohandamist eesmärgiga tagada Robotondi kaalu ühtlane jaotamine ratastele ning parandada seeläbi selle stabiilsust ja liikumisvõimet. Selline ühtlane kaalujaotus on oluline, kuna see aitab Robotondil paremini tasakaalu hoida ja liikuda stabiilselt erinevates suundades.

5. Tulemus ja arutelu

Käesoleva lõputöö raames loodi Robotondile spetsiaalne tõstemehhanism, mis sarnaneb käärtõstukile ning võimaldab puuetundlikku ekraani üles ja alla liigutada. Tõstemehhanismi kogukaal on alla 3 kg, vastavalt esimesele nõudele.

Kõrgust reguleeriv mehhanism võimaldab ekraani kõrgust muuta vastavalt kasutaja vajadusele. Madalamas seisus on mehhanismi kõrgus 58 cm ning kõrgemas seisus 124 cm. Ekraani kõrgus on 172 cm pikkusele inimesele sobiv, kui ekraan asub kõige kõrgemas asendis ehk 124 cm kõrgusel nagu joonisel 5.1 on näha.



Joonis 5.1. Ekraani kõrguse testimine.

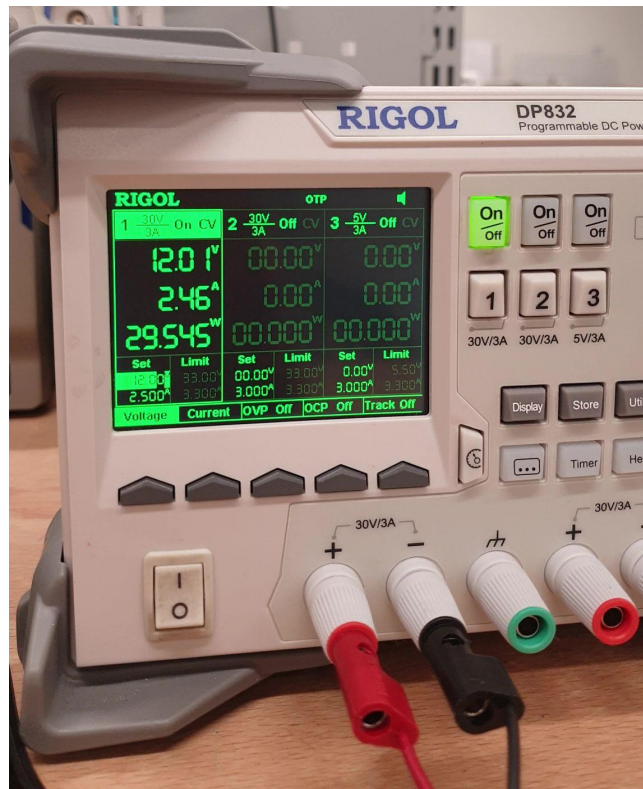
Tõstemehhanismi disaini edasiarendus toimus selle ehitusprotsessi käigus, kuid kahjuks ei jõutud ideaalse lahenduseni. Tulemusena saab öelda, et loodud tõstemehhanismi juhtkruvi ületab Robotondi enda piire, kui ekraan on all. Samas kui ekraan on üleval, siis juhtkruvi jääb Robotondi enda piiridesse. Nõue number 3 on osaliselt täidetud.

Tõstemehhanismi saab elektriliselt juhtida, kuna kasutatakse Pololu reduktormootorit, millel on olemas integreeritud kvadratuur kooder. Lisaks on mehhanismile paigaldatud Waveshare'i 7-tolline puutetundlik ekraan. Sellest tulenevalt saab järeldada, et tõstemehhanism vastab peatükis 3 kirjeldatud nõuetele, mis käsitlevad vastavalt nõuet 4 ehk ekraani olemasolu ja nõuet 5 ehk võimalust juhtida mehhanismi elektrooniliselt.



Joonis 5.2. Valminud tõstemehhanism Robotondi peal.

Tõstemehhanismi testimise käigus uuriti mootori võimsuse tarvet tõstmisel ja langetamisel. Mõõtmised sai tehtud Rigol DP832 toiteallikaga. Kaamera abil filmiti toiteallika ekraani, et andmeid koguda. Andmeid võeti iga poole sekundi pealt, et arvutada keskmine mehhanismi võimsus. Mehhanismi tõstmisel oli keskmine võimsuse tarve 19 W ja maksimaalne tarbimine oli 30 W juures, kui toitepinge oli 12 V ja voolutugevus 2,5 A. Mehhanismi langetamisel oli keskmine võimsuse näitaja 4 W ning maksimaalne tarbimine oli 6 W 12 V ja 0,6 A juures.



Joonis 5.3. Toiteallikaga võimsuse mõõtmine mehhanismi tõstmisel.

6. Ettepanekuid tõstemehhanismi arendamiseks

1. Muuta käärtõstuki tõstemehhanismi nii, et juhtkruvi ei ulatuks Robotondi piiridest välja.
 - a. Muutes polükarbonaadist käärjala pikkust 175 mm-lt 250 mm-le, võimaldab see kasutada vähem käärjalgu. Samas säilitatakse ekraani kõrgus sarnasena nagu 175 mm käärjalgade kasutamisel. Mootori asukohta muudetakse rohkem keskele teise korruse alusplaadil. Mehhanismi liigutav tükk paikneks kas teise või kolmanda käärjala paari vahel.
2. Lisada juurde stopper lülitid, et kontrollida, kas tõstemehhanism on täielikult all või üleval.
 - a. Stopper lülitite abil on võimalik jälgida süsteemi olekut. Näiteks, kui tõstemehhanism on täielikult all ja käärjalg puudutab stopper lülitit, siis mootor katkestab mehhanismi allapoole kerimise. Sarnast ideed rakendada ka mehhanismi üles liikumisel.
3. Katsetada idee nr 1, et hinnata selle potentsiaali, mõista kas see oleks parem, sujuvam, ja kasutaja mugavam.
4. Leida parem HDMI kaabli lahendus.
 - a. Hetkel on kasutusel 270-kraadise varjestusega kaabel, millel on mõju ahelketi liikumisele, põhjustades selle katkendlikkust ja tõrkeid. Soovitav oleks asendada see 270-kraadise HDMI adapteriga ja HDMI kaabliga, millel puudub varjestus.

7. Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli Robotondile elektrooniliselt juhitava tõstemehhanismi loomine. Selleks viidi läbi uurimistöö erinevates valdkondades, nagu robotika, tööstusmasinad ja mööbel, et saada ülevaade olemasolevatest tõstemehhanismidest ja nende omadustest ning võimalustest. Uurimistöö eesmärk oli leida sobivad lahendused Robotondile tõstemehhanismi loomiseks ning kavandada selle konstruktsioon ja elektrooniline juhtimissüsteem. Bakalaureusetöö käigus loodi tõstemehhanism, mida saab elektrooniliselt reguleerida kõrgust ning mis vastab erinevatele nõuetele.

Töö tulemusena valmis Robotondile kõrgust muutev mehhanism, mille peal asub Waveshare 7-tolline puutetundlik ekraan. Mehhanismile loomiseks disainiti, freesiti, treiti ja 3D prinditi detailid ning need paigaldati seejärel Robotondi külge. Kõrguse reguleerimiseks kasutatakse Pololu 12 V reduktormootorit, millel on 19:1 käigukast ja integreeritud kvadratuur kooder.

Kasutatud kirjandus

- [1] Fran, 'The future of robotics: How will robots change the world?', *FutureLearn*, Nov. 05, 2021. <https://www.futurelearn.com/info/blog/general/introduction-robotics-future-robots> (accessed Apr. 13, 2023).
- [2] 'Robotont'. <http://robotont.ut.ee/avaleht> (accessed Apr. 13, 2023).
- [3] 'Mobile Robotics', *Harmonic Drive SE*.
<https://harmonicdrive.de/en/glossary/mobile-robotics> (accessed Apr. 13, 2023).
- [4] 'Mis on mobiilne robot ja kuidas seda klassifitseerida? - Teadmised', *Shenzhen Manly Battery Co., Ltd.*
<http://ee.manly-battery.com/info/what-is-a-mobile-robot-and-what-are-the-ways-t-64436597.html> (accessed Apr. 13, 2023).
- [5] 'Mobile Robotics', *Techopedia*, Dec. 12, 2017.
<https://www.techopedia.com/definition/33065/mobile-robotics> (accessed Apr. 13, 2023).
- [6] 'Technology Differences: Stationary Robots vs Mobile Robots - Technical Articles'.
<https://control.com/technical-articles/technology-differences-stationary-robots-vs-mobile-robots/> (accessed Apr. 27, 2023).
- [7] 'Robotics 101: Sensors that allow robots to see, hear, touch, and move | Possibility | Teledyne Imaging'.
<https://possibility.teledyneimaging.com/robotics-101-sensors-that-allow-robots-to-see-hear-touch-and-move/> (accessed Apr. 13, 2023).
- [8] 'Roomba', *Wikipedia*. Apr. 03, 2023. Accessed: Apr. 13, 2023. [Online]. Available:
<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Roomba&oldid=1147954383>
- [9] 'Roomba® j7+ Self-Emptying Robot Vacuum Cleaner | iRobot® | iRobot'.
https://www.irobot.co.uk/en_GB/irobot-roomba-j7/J755840.html (accessed Apr. 13, 2023).
- [10] 'AIRBOT Z1', *ECOVACS Website*.
<https://www.ecovacs.com/global/airbot-air-purifier-robot/AIRBOT-Z1> (accessed Apr. 27, 2023).
- [11] 'Dingo Indoor Mobile Robot - Clearpath Robotics'.
<https://clearpathrobotics.com/dingo-indoor-mobile-robot/> (accessed Apr. 27, 2023).
- [12] 'Kinova Gen3 lite', *Clearpath Robotics*.
<https://store.clearpathrobotics.com/products/gen3-lite> (accessed Apr. 27, 2023).
- [13] M. Maidla, 'Avatud robotiarendusplatvormi Robotont omniloomise ja odomeetria

arendamine’.

- [14] R. Raudmäe, ‘AVATUD ROBOTPLATVORM ROBOTONT’.
- [15] ‘Height adjustment systems for sit stand desks’.
<https://www.suspa.com/uk/products/heightadjustment> (accessed Apr. 13, 2023).
- [16] ‘Stretch RE1’, *Hello Robot*. <https://hello-robot.com/product> (accessed Apr. 27, 2023).
- [17] ‘Electric Height Adjustable Standing Desk: Dual Motor Economical Option EC3/EC4’, *Flexispot*.
<https://www.flexispot.com/electric-height-adjustable-standing-desk-dual-motor-economical-option-ec3-ec4> (accessed Apr. 13, 2023).
- [18] ‘Height Adjustable Desk Frame E5’, *Flexispot*.
<https://flexispot.co.uk/3-stage-desk-frame-e5.html/?yoReviewsPage=11> (accessed Apr. 13, 2023).
- [19] ‘Operating carbon table’, *Ima-x*.
<https://www.ima-x.com/en/radiology-furnitures/391-operating-carbon-table.html> (accessed Apr. 14, 2023).
- [20] ‘What Is a Scissor Lift?’, *Genielift*.
<https://www.genielift.com/en-gb/aerialpros/what-is-a-scissor-lift> (accessed Apr. 17, 2023).
- [21] D. Eusebio, ‘How Does a Scissor Lift Work? | BigRentz’, <https://www.bigrentz.com>, Dec. 04, 2019. <https://www.bigrentz.com/blog/how-does-a-scissor-lift-work> (accessed Apr. 17, 2023).
- [22] ‘robotont/robotont-mechanics-addon-scissors-lift: Robotont Mechanics Addon Scissor Lift’. <https://github.com/robotont/robotont-mechanics-addon-scissors-lift> (accessed May 17, 2023).
- [23] Thingiverse.com, ‘Drag Chain for CR-6 SE V2.0 by Riddeen’.
<https://www.thingiverse.com/thing:4786780> (accessed Apr. 21, 2023).
- [24] ‘Fusion 360 | 3D CAD, CAM, CAE, & PCB Cloud-Based Software | Autodesk’.
<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview> (accessed Apr. 20, 2023).
- [25] ‘PrusaSlicer | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa’, *Prusa3D by Josef Prusa*. https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/ (accessed Apr. 20, 2023).
- [26] ‘Original Prusa i3 MK3S+ kit | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa’, *Prusa3D by Josef Prusa*. <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-kit-3/> (accessed Apr. 20, 2023).
- [27] ‘OPT8 - 7.77m Electric Scissor Lift’.

<https://www.nationwideplatforms.co.uk/en-gb/hire/scissor-lifts/opt8-8m-electric-scissor>
(accessed May 16, 2023).

Lisad

Lisa 1. Robotondi dokumentatsioon

Töö käigus valminud pildid, videod, tabelid ja renderdused asuvad aadressil:

<https://github.com/ut-ims-robotics/kyyt-thesis-2023-robotont-mechanics-addon-scissors-lift>

Lisaks leidub seal bakalaureusetöö käigus välja töötatud CAD ja tootmis failid.

Lihtlitsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kertud Geddily Küüt,
(*autori nimi*)

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

KÕRGUST REGULEERIV MEHCHANISM ROBOTONDILE
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Karl Kruusamäe ja Renno Raudmäe,
(*juhendaja nimi*)

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 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.

/Kertrud Geddily Küüt/

20.05.2023