

TARTU ÜLIKOOL  
Arvutiteaduse instituut  
Informaatika õppekava

**Marko Tsengov**  
**Väike õppeotstarbeline kaheveoline robot**  
**Bakalaureusetöö (9 EAP)**

Juhendajad:  
Janno Jõgeva, MSc  
Eva Mõtshärg, MSc

Tartu 2025

## Väike õppeotstarbeline kaheveoline robot

### Lühikokkuvõte:

Töös antakse lühiülevaade mõnedest olemasolevatest õppeotstarbelistest platvormidest fookusega nende anduritel ja mõõtmistel ning kirjeldatakse töö käigus loodud uut robotplatvormi, mis sobib samuti õppeotstarbel kasutamiseks. Platvormi osana disainiti vajalik mehaanika, elektroonika ja kolm kihti rakendusliideseid roboti juhtimiseks. Loodud platvormi testiti voolutarbimise ja sõiduomaduste osas. Disainitud robot on seni Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi robotikakursustel kasutusel olnud robotist mõõtmelt vähemalt kolmandiku võrra väiksem ning kasutab juhtmoodulina uuemat arvutit Raspberry Pi 5. Platvorm võimaldab eri oludes liikumist vähem kui 1% vea ulatuses ning on vastupidav vastu takistusi sõitmisel.

**Võtmesõnad:** Haridusrobotika, robotidisain

**CERCS:** T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika; P170 Arvutiteadus, arvutusmeetodid, süsteemid, juhtimine (automaatjuhtimisteooria)

# **A Small Educational Two-Wheel-Drive Robot**

## **Abstract:**

The thesis gives a short overview of some existing educational robotic platforms with a focus on their sensors and dimensions. A new robotic platform also suitable for educational use was designed, including the mechanics, electronics and three layers of APIs for controlling the robot. Tests involving the robot's current draw and driving characteristics were performed. The created robot's dimensions are at least a third smaller than the robot's that is in use in robotics courses in the Institute of Technology of the University of Tartu and uses a newer Raspberry Pi 5 as its controller. The platform enables movement with less than 1% of error in different ways and is durable when driving into obstacles.

**Keywords:** Educational robotics, robot design

**CERCS:** T125 Automation, robotics, control engineering; P170 Computer science, numerical analysis, systems, control

# Sisukord

Sissejuhatus .....	5
Kasutatud mõisted ja terminid .....	6
1. Kirjanduse ülevaade .....	8
2. Töö eesmärgid.....	16
3. Mehaaniline lahendus .....	17
3.1 Teine versioon .....	17
3.2 Esimene versioon.....	21
4. Elektriline lahendus .....	25
5. Tarkvaraline lahendus.....	28
5.1 Draiver .....	28
5.2 Madala taseme rakendusliides .....	29
5.3 Kõrge taseme rakendusliides .....	30
5.4 Operatsioonisüsteemi lisaseadistus .....	31
6. Testimine .....	32
6.1 Voolutarbimine .....	32
6.2 Aku kestvus.....	34
6.3 Mootori kiirus .....	34
6.4 Roboti liikumise kõrvalekalle.....	35
6.5 Vastupidavus .....	38
7. Arutelu .....	40
7.1 Järeldused .....	40
7.2 Edasised plaanid.....	41
8. Kokkuvõte.....	43
Viited .....	46
Lisad .....	47
Lisa 1. Platvormide toorandmete tabel .....	47
Lisa 2. Roboti komponentide loend .....	48
Lisa 3. Tarkvaralise lahenduse kood .....	50
Lisa 4. Ühendusplaadi elektriskeem .....	51
Lihtlitsents.....	52

## Sissejuhatus

Robotika on valdkond, mis sisaldab endas eriotstarbeliste robotite disaini, tootmist ja juhtimist. See valdkond kujutab tihtipeale endast segu inseneeriast ja rakenduslikust arvutiteadusest, kusjuures viimast rakendatakse ka muudes osades peale ainult robotite juhtimise. See on omakorda suurendanud nende valdkondade õppurite huvi omandada teadmisi mõlemast valdkonnast.

Robotika õpetamiseks kasutatakse lisaks teoreetilisele materjalile ja arvutipõhiste harjutustele käelisi ülesandeid, mis nõuavad vastavate vahendite olemasolu. Eri teemade katmiseks kasutatakse vastavaid vahendeid, näiteks elektroonikaskeemide koostamiseks maketeerimislaudu ja elektroonikakomponente, ning niisamuti on vaja vahendeid roboti liikumise katsetamiseks ja sellele lisatavate andurite kasutamiseks. Selleks sobivad hästi pigem väiksemõõtmelised (võrreldes mitmete tööstusrobotitega) liikuvad haridusrobotid, kuna toovad esile mitmed teemaspetsiifilised probleemid, näiteks liikumise ja juhtimise ebatäpsuse ning andurite andmete töötlemise iseärasused.

Sellist tüüpi haridusroboteid pakuvad mitmed erinevad tootjad ning uute konkreetsete robotite loomise kohta on kirjutatud mitmeid töid. Samas on autorile teadaolevalt platvorme käsitlevatest töödest vaid väike osa sellised, kus on toodud ülevaade olemasolevate platvormide disainist ja/või võrreldud platvormide suuruseid.

Selles töös uuritakse põgusalt olemasolevaid haridusroboteid ja kirjeldatakse loodud uut robotplatvormi, mis kasutab kaasaegset riistvara Raspberry Pi 5 arvuti näol ning mis on mõõdetelt eelnevalt Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis ühest laialdaselt robotika õpetamiseks kasutatud robotist väiksem. Lisaks katsetatakse uue platvormi toimimist eri testide põhjal.

Töö esimeses peatükis on toodud erinevate haridusrobotite võrdlus. Töö teises peatükis on toodud töö eesmärgid. Töö kolmandas peatükis on kirjeldatud platvormi mehaanilise lahenduse kahte versiooni. Töö neljandas peatükis on kirjeldatud platvormi elektroonikat ja moodulite ühendusi. Töö viiendas peatükis on kirjeldatud tarkvaralist lahendust eri kihtide kaupa. Töö kuuendas peatükis on kirjeldatud platvormi vastu läbi viidud teste. Töö seitsmendas peatükis on arutletud testide tulemuste üle, tehtud järeldusi ning kirjeldatud edasised plaanid platvormiga. Töö lisades on toodud analüüsitud platvormide toorandmed, tarkvaralise lahenduse kood ning elektroonika ühendusplaadi elektriskeem.

## Kasutatud mõisted ja terminid

Diferentsiaaljuhtimine — ingl *differential drive*; juhtimine, mis põhineb rataste omavahelise kiiruse muutmisel.

EEPROM — ingl *electrically erasable programmable read-only memory*, elektriliselt kustutatav programmeeritav püsिमälu; püsिमälukiip, mille sisu saab kustutada ja muuta<sup>1</sup>.

FDM — ingl *fused deposition modeling*, ka FFF (ingl *fused filament fabrication*); tootmistehnoloogia, mis põhineb materjali riba- ja kihthaaval lisamises ning ribade ja kihtide kokkusulatamises.

GPIO (viik) — ingl *general-purpose input/output*, universaalport; port (viik), mida saab programmeerida signaali saatjaks või vastuvõtjaks<sup>2</sup>.

I<sup>2</sup>C / I2C — ingl *Inter-Integrated-Circuit*; konkreetse sünkroonse jadasiini spetsifikatsioon.

Jootesillus — ingl *solder (bridge) jumper*; jootmise abil ümber seadistatav ühendus (trükkplaadil).

Leed — LED, ingl *light emitting diode*, valgusdiod.

IMU — ingl *inertial measurement unit*, inertsiaalandur; andur, mis kogub andmeid andurile mõjuva jõu ning anduri nurkkiiruse kohta.

Juhtmoodul — ingl *controller*; kasutaja programmeeritav elektroonikamoodul, mis rakendab ülejäänud mooduleid soovitud eesmärgi realiseerimiseks.

Järsakuandur, kaljuandur — ingl *cliff sensor*; andur, mis tuvastab (roboti teel) suure kauguse maast; näiteks alla suunatud lühikese vahemaa kaugusandur.

Li-Po / LiPo (aku) — liitiumpolümeeraku.

MPC — ingl *model predictive control*, mudelipõhine juhtimine; sisendi varieerimise ja süsteemi mudeli põhjal süsteemi edasise käitumise ennustamisel põhinev juhtimisalgoritm.

Omniratas — ingl *omni wheel*; ratas, mis lisaks tavapärasele käitumisele libiseb peamist ratast pööramata hõlpsasti pöörlemistasandiga ristisuunas, enamasti väikeste rullikute abil.

---

<sup>1</sup>Allikas: <https://akit.cyber.ee/term/9074-eprom>

<sup>2</sup>Allikas: <https://akit.cyber.ee/term/10345-gpio>

PWM — ingl *pulse width modulation*, pulsilaiusmodulatsioon; modulatsioon, mille puhul varieeritakse kindla sagedusega esinevate impulsside pikkust osana perioodist (täitetegurit).

ROS — ingl *Robot Operating System*; robotite rakenduste loomist abistav teekide ja tööriistade kogumik<sup>3</sup>.

RPi — Raspberry Pi arvuti, näiteks Raspberry Pi 4 (RPi 4) või Raspberry Pi 5 (RPi 5)<sup>4</sup>.

ToF — ingl *time-of-flight*, ajapõhine; millegi, näiteks valgus- või heliimpulsi, liikumise aja mõõtmise põhine (mõõtmise).

---

<sup>3</sup>Allikas: <https://www.ros.org>

<sup>4</sup>Töös kasutatakse kohati lühinime konkreetsele mudelile viitamata, kuna mitmed vastavate arvutite omadused on üle töös mainitud mudelite (RPi 4 ja RPi 5) väga sarnased.

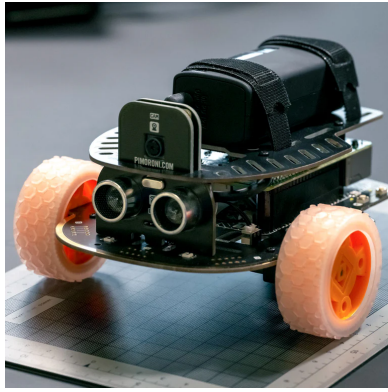
## 1. Kirjanduse ülevaade

Konkreetsete laialt kättesaadavate robotite võrdlemise osas ei näi olevat palju teaduskirjandust. Palju leidub töid, kus on uuritud üldiselt robotite kasutamist haridusvaldkonnas [1, 2] või uuritud teema populaarsuse muutumist näiteks andmebaasipäringute abil [3, 4].

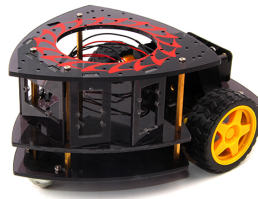
Kalomiros *et al* võtsid kokku mitmete peamiselt õppeotstarbeliste platvormide olemuse, kirjeldades muuhulgas igal platvormi andureid, liikumismudelit ning protsessorit / juhtmoodulit [5]. Artiklis järeldati, et tähtis on ROS või muu levinud vahetarkvara tugi, levinud võrgupõhise ligipääsu (sealhulgas veebilehitsejapõhise programmeerimise) võimaldamine ning et platvormi edu võtmeks on madal maksumus ja eri programmeerimistööriistade olemasolu. Ka Raudmäe andis ülevaate mõnest olemasolevast platvormist [6]. Märkimisväärselt on töödes viidatud platvormide juhtimismeetodiks kahe erandiga kahe rattaga diferentsiaaljuhtimine. Järgnevalt on koostatud sarnased kokkuvõtted mõnede platvormide kohta, mida eeltoodud töödes ei esinenud.

Pimoroni Trilobot [7] (joonis 1a) on kahe vedava rattaga ja ühe kuulrattaga diferentsiaaljuhtimisega robotplatvorm. Tootelehe põhjal koosneb kere trükkplaatidest, millest enamik on vaid struktuursed, kuid põhiplaati kasutatakse mootorite ja erinevate leedmoodulite juhtimiseks ning anduritega liidestamiseks. Juhtmooduliks on Raspberry Pi 4 (edaspidi RPi 4), põhilisteks anduriteks on kaamera (Raspberry Pi kaamera), ultraheli kaugusandur ning neli nuppu. Platvorm on disainitud nii, et see hõivab kõik RPi 4 GPIO viigud, kuid põhiplaadil on mitmed ühenduskohad lihtsate 3,3 V I<sup>2</sup>C seadmete ja 5 V servo lisamiseks. Platvormi juhtimiseks ja anduritega suhtlemiseks on antud ka avatud lähtekoodiga teek, milles on implementeeritud lihtsad mootorite juhtimise ning nuppude, leedmoodulite ja ultrahelianduriga liidestamise funktsioonid [8].

Seed Studio Tricycle Bot [9] (joonis 1b) on lihtne kahe vedava rattaga ja ühe kuulrattaga diferentsiaaljuhtimisega robotplatvorm. Põhikomplektis ei sisaldu juhtmoodulit ega mootorikontrollerit, lubades kere suuruse piirides ise vastavad komponendid valida. Platvormil pole põhikomplektis kaasas mitte ühtegi andurit, kuid eri mehaanilistele tasanditele on jäetud andurite paigutamiseks ruumi ning kinnitamiseks auke. Kaasas olevatel mootoritel pole juures tagasidestamise võimekust, muutes täpse juhtimise keerukaks.



(a) Pimoroni Trilobot.  
Allikas: [7]



(b) Tricycle Bot. Allikas: [9]



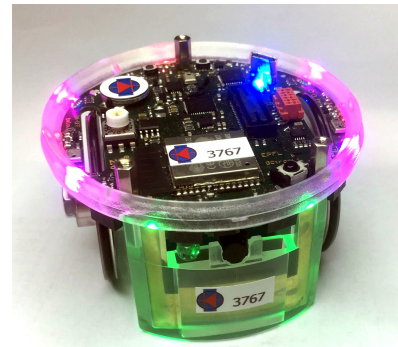
(c) Yahboom MicroROS-Pi5.  
Allikas: [10]



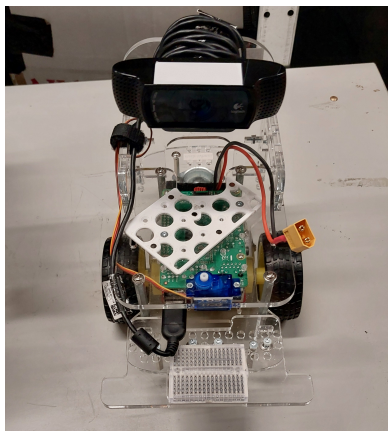
(d) iRobot Create 3. Allikas: [11]



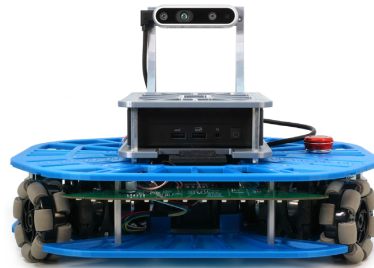
(e) Pololu 3pi+ 2040.  
Allikas: [12]



(f) e-puck2. Allikas: [13]



(g) Modifitseeritud GoPiGo3.



(h) Robotont 3.  
Allikas: [14]

Joonis 1. Analüüsitud robotplatvormid.

Yahboom MicroROS-Pi5 [10] (joonis 1c) on nelja sõltumatult vedava rattaga diferentsiaaljuhtimisega robotplatvorm. Roboti kere on peaaegu terves ulatuses kaetud alumiiniumist kattega, mis on vähemalt osaliselt eemaldatav lubades otsese ligipääsu juhtmoodulile. Platvormi juhtmooduliks on MicroROS toega mootorite ja enamiku anduritega liidestuv plaat, samas on tugevalt viidatud, et plaadi käitamiseks on vajalik mõni teine plaat, ning peaaegu eksklusiivselt keskendunud Raspberry Pi 5 plaadile. Platvormi toimimiseks on rangelt vajalik vaid arvuti, mil on ühilduv toitelahendus, USB-liidese abil kaamera ja juhtmooduliga ühenduvus ning arendamise mugavuseks kaugühenduse võimekus. Platvormi anduriteks on lidar, kaamera, IMU ning iga veomootori küljes olev enkooder; aktuaatoriteks on lisaks veomootoritele kaamerat kahes teljes pööravad servomootorid ning sumisti (ingl *buzzer*). Juhtmoodulil endal on lisaks põhikomplekti andurite juhtviikudele eraldatud kaks indikaatoritule viiku ning kaks vabalt kasutatavat (GPIO) viiku [15]. Platvormi mitmete komponentide lähtekood on kättesaadav, ehkki minimaalselt dokumenteeritud.

iRobot Create 3 [16] (joonis 1d) on lapik silindrikujuline kahe vedava rattaga ja ühe pöördrattaga diferentsiaaljuhtimisega robotplatvorm. Platvormi adapterplaat annab ühendumiseks USB-C liidese ning eraldi ühenduse akuga. Robotiga liidestumine toimub adapterplaadil töötava ROS 2 vahetarkvara abil. Ligipääsetavad andurid on jagatud takistuste tuvastamise ning liikumise jälgimise eesmärkide järgi. Takistuste tuvastamiseks on platvormil 4 infrapuna järsakuandurit, 7 infrapuna kaugusandurit, pörkeraud ja rataste asendi andurid (ingl *wheel drop sensors*; määramaks, kas ratas on vastu maad või mitte). Liikumise jälgimiseks on robotil mootorite enkoodrid, IMU ning optiline hiir (andur). Lisaks on kasutajaga suhtlemiseks valgusring, nupud ja kõlarid. Lisaseadmete lisamiseks on keres eraldi sahtel ning adapterplaadil võimekus eri arendusplaate käitada. Platvormi juhtmoodulit ega selle ühendusi pole ametlikult dokumenteeritud, samuti pole see hõlpsasti ligipääsetav. Platvormi põhjal on loodud ka platvormid TurtleBot 4 ja TurtleBot 4 Lite, mis lisavad sügavustajuga kaamera ja lidari, kuid muudavad roboti kõrgemaks [17].

Pololu 3pi+ 2040 [12] (joonis 1e) on väike silindrikujuline kahe vedava rattaga ja ühe kuulrattaga diferentsiaaljuhtimisega robotplatvorm. Juhtmoodul põhineb RP2040 mikroprotsessoril, plaadil on anduriteks infrapuna jooneandurid, pörkeraud, mootorite enkoodrid, IMU ning nupud. Plaadi väljundseadmeteks on OLED (orgaaniline leed) ekraan, sumisti ja RGB leedid. Plaadil on eraldi välja toodud neli GPIO viiku, kuid jäetud ka võimalus jooneanduri kasutatavaid viike ümber ühendada. Lehel on viidatud on ka repositooriumile, kus on näidiskood roboti juhtimiseks.

e-puck2 [18] (joonis 1f) on väike silindrikujuline kahe vedava rattaga diferentsiaaljuhtimisega robotplatvorm. Kolmanda tugipunktina kasutatakse roboti kere. Rattaid käitatakse stepper mootoritega, ilma enkoodriteta. Platvormi juhtmooduliks on 32-bitine STM32F407 protsessor, mille taktsagedus on 168 MHz ning millel on 192 kB muutmälu. Sisseehitatud anduriteks on 8 infrapuna kaugusandurit, üks ToF infrapuna kaugusandur, IMU, 160 × 120-piksliline kaamera<sup>5</sup>, neli mikrofoni ja pöördlüliti. Väljunditeks on 10 leedi (sh neli RGB leedi) ja kõlar. Platvormil on Bluetooth- ja WiFi-ühenduvus ning sellele on disainitud ühilduvaid laiendusmooduleid.

Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi robootikakursustes kasutatav tugevalt modifitseeritud GoPiGo3 (joonis 1g; edaspidi ka GoPiGo3 (mod.)) on kahe vedava rattaga ja ühe kuulrattaga diferentsiaaljuhtimisega robotplatvorm. Platvorm kasutab GoPiGo3 riistvara mootorite ja mootorite juhtplaadi näol, kuid on selle kere kuju on muudetud, lisades kaamera ning Raspberry Pi Pico paigutamise võimaluse. Platvormi peamiseks juhtmooduliks on Raspberry Pi 3, mille viigud on otse ühendatud GoPiGo3 kontrollplaadiga. Platvormi anduriteks on kaamera ja mootorite enkoodrid, väljundseadmeks rataste mootorid ning GoPiGo3 juhtplaadi leedid. Raspberry Pi Pico lisamisel on võimalik juhtida rohkem seadmeid ja andureid, näiteks platvormile lisatud servomootorit.

Tartu Ülikoolis välja töötatud võrdlemisi suuremõtmeline Robotont 3 [14] (joonis 1h) on kolme eri fikseeritud nurga all oleva vedava omnirattaga suures mahus 3D-prinditud robotplatvorm. Roboti juhtmooduliks on 13. generatsiooni Intel NUC (ingl *Next Unit of Computing*), mis liidestub valdava osaga teistest komponentidest läbi suure trükkplaadi. Platvormi aktuaatoriteks on rataste mootorid, anduriteks mootorite enkoodrid ja sügavuskaamera. Platvormi kerele on jäetud palju ruumi lisaelektronika ja -mehaanika jaoks.

Kahe vedava rattaga diferentsiaaljuhtimine on nii teiste tööde kui ka uurimiseks leitud platvormide põhjal haridusrobotite seas kõige populaarsem juhtimise vorm. Õppeotstarbeks on selline juhtimismeetod sobilik, kuna võimaldab vaid kahte väärtust muutes suuremate arvutusteta kohapeal pöörast ja (pöörates) edasi-tagasi sõitmist. Mehaanika poolelt on selline juhtimine üsna hõlpsasti teostatav, nõudes vaid kahte fikseeritud teljega ratast. Samas ei võimalda see lähenemine robotit liigutada ristisuunas (vasakule-paremale), muutes selliste liigutuste tegemise

---

<sup>5</sup>märgitud "tavakasutuse" resolutsiooniks; riistvara maksimaalne resolutsioon on suurem.

üsna kohmakaks. Et aga diferentsiaaljuhtimist leidub ka kommertskasutuses, võimaldab see piirang õpetada limiteeritud liikuvusega robotiga manööverdamist.

Põhja gabariitmõõtmelteil väikseimate platvormide puhul on kasutatud mikroprotsessoreid, mille jõudlus on üldjoontes märgatavalt väiksem, kui üldotstarbelistel (sealhulgas väikesemõõtmelistel) arvutitel. See piirab suurema andmete mahuga andurite, näiteks kaamerate ja lidarite, ja keerulisemate algoritmide, näiteks MPC, kasutamise võimekust. Samuti ei võimalda piiratud jõudlus jookсутada platvormi peal tavapärasest operatsioonisüsteemi, nõudes enamasti platvormispetsiifilisi tööriistu. Viimasest murest on võimalik mööda töötada, kasutades näiteks ROS raamistikku ja protokolle, kuid ka ROS kasutamine vajab eraldi harjutamist.

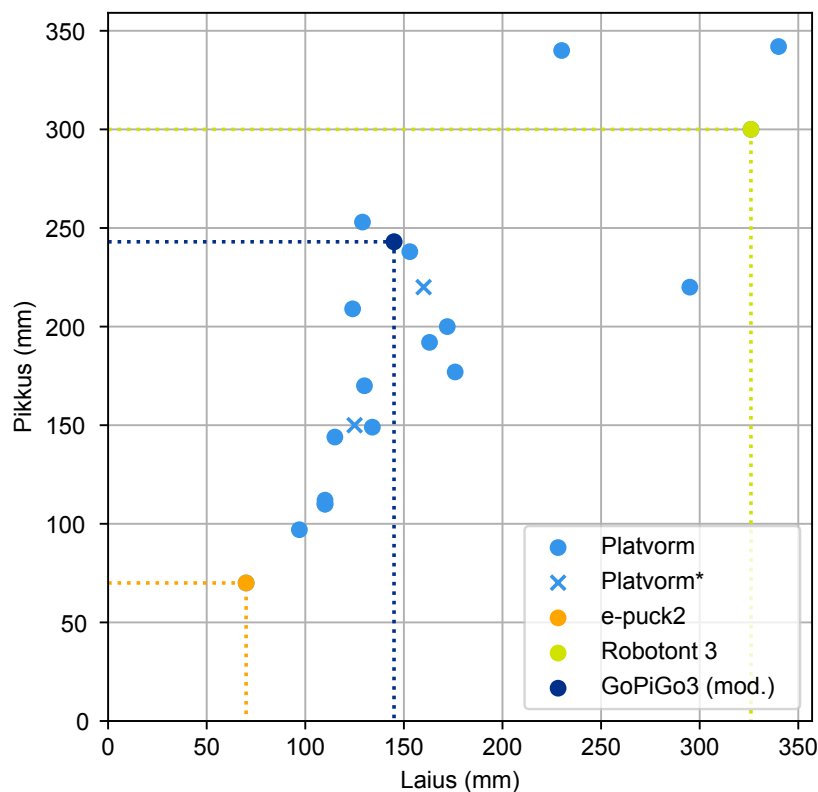
Kaamera- või lidarpildi töötlemise võimekus annab platvormile hea võimekuse enda ümber olevat keskkonda kaardistada (lisaks näiteks ultraheliandurile). Mitmel uuritud platvormidel pole kaamerat (ega lidarit), kuid enamik neist on disainitud nii, et võimaldavad siiski selle lisaandurina paigaldada. Samas pole vastavatel platvormidel sisseehitatud võimekust USB-seadmega liidestuda, seega on sellistel juhtudel vajalik lisaplaat (kui vastavat plaati pole platvormi juhtimiseks vaja), mis lisab USB-toe ning millel on piisavalt töötlemis- või saatmisvõimsust, et pilti otstarbekalt kasutada.

Väiksemad robotplatvormid piiravad ka andurite hulka, mida vastava robotiga kasutada saab. Uuritud platvormidel oli suurimaks anduriks lidar, mis on mõõtmelteil võrreldav väiksemate uuritud platvormidega. Seega peab selliseid andureid lisades arvestama roboti mõõtmete suurenemisega ning raskuskeskme nihkumisega, mis võib roboti ebastabiilseks või raskesti juhitavaks muuta.

Raskuskeset mõjutab oluliselt ka platvormi toitelahendus. Et robot oleks lihtsasti manööverdatav, ei tohiks see sõltuda välisest (juhtmega robotini veetud) toiteallikast, vaid kasutama pardal olevat akut. Ehkki mitmel uuritud platvormil pole toiteallikat ega selle asukohta määratud, on enamik asukoha määranud platvormidest asetanud aku madalale, mis omakorda aitab viia roboti raskuskeset allapoole. Märkimisväärselt on mõne platvormi (näiteks Triloboti) puhul aku ette nähtud olema roboti üks kõrgemaid punkte, mille põhjuseks on ilmselt ebapiisav ruum ülejäänud kere all.

Järgnevalt on analüüsitud uuritud robotite gabariitmõõtmete sõltuvusi. Eraldi on välja toodud uuritud platvormidest väikseima põhja pinnaga e-puck2, võrdlemisi suuremõõtmeline Robotont 3 ning Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi robotikakursustes kasutusel olev tugevalt

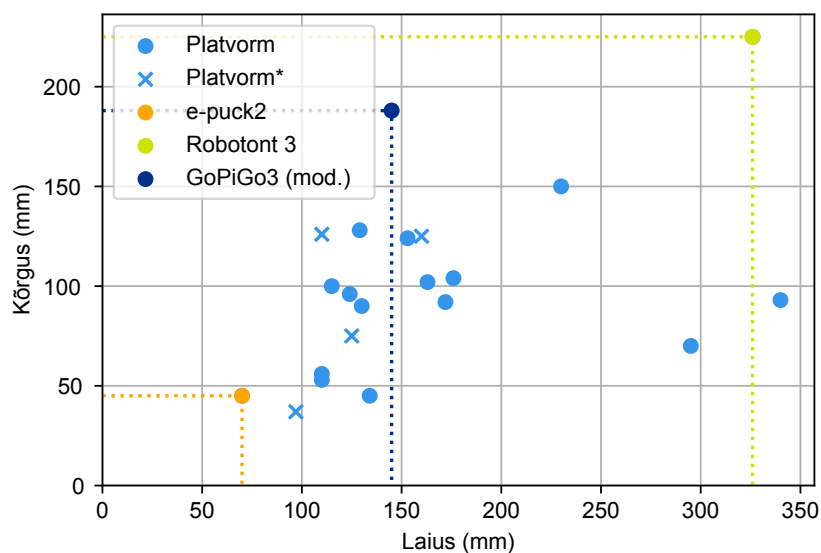
modifitseeritud GoPiGo3. Ristidega on märgitud platvormid, mille mõni näidatud mõõt hinnati pildilt. Algandmed on toodud lisas 1.



Joonis 2. Põhja gabariitmõõtmised pealtvaates. Platvorm\* tähistab platvorme, mille mõni näidatud mõõt on pildilt teiste alusel hinnatud.

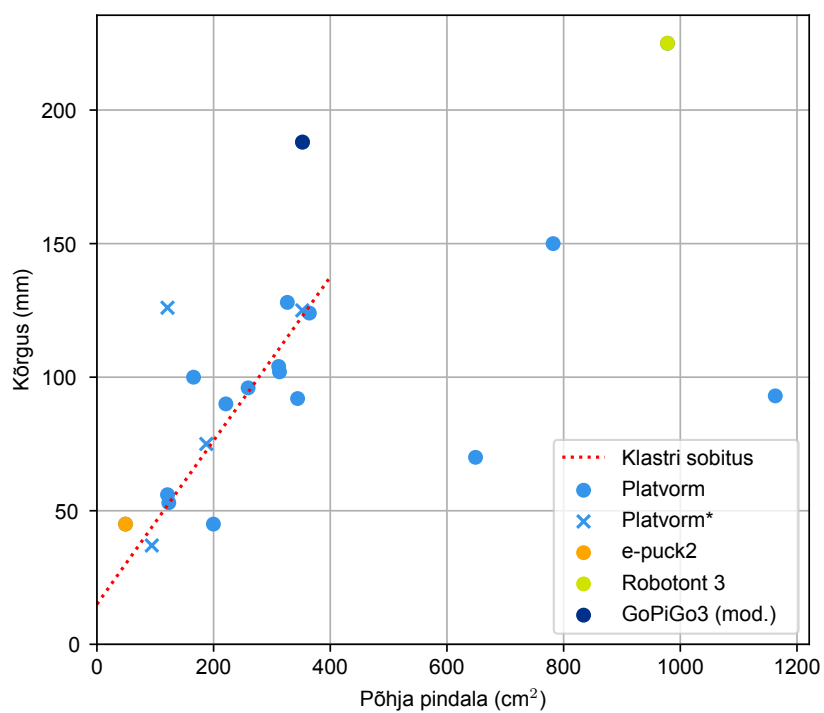
Joonisel 2 on toodud platvormide põhja mõõtmised. Valdavalt on platvormide põhja pikkus vähemalt sama suur kui laius, kusjuures märkimisväärselt on ka võrdsete mõõtmega juhte, millele vastavad ruudukujulised ja ringikujulised põhjad. Iga punkti puhul näitab koordinaatide alguspunktist sellesse punkti tõmmatud telgedega paralleelsete külgedega ristkülik ligikaudu põhja pinna kuju.

Joonisel 3 on toodud platvormide gabariitmõõtmised eestvaates. Valdava osa platvormide vastav mõõde jääb klastrisse, kus roboti laius on ligikaudu 100 kuni 190 mm ning kõrgus ligikaudu 40 kuni 130 mm. Ülejäänud platvormidest on modifitseeritud GoPiGo3 enda laiusest märksa kõrgem, kaks platvormi (Viam Rover 2 ja iRobot Create 3) aga enda kõrgusest palju laiemad.



Joonis 3. Platvormi gabariitmõõtmised eestvaates. Platvorm\* tähistab platvorme, mille mõni kujutatud mõõt on pildilt teiste alusel hinnatud.

Joonisel 4 on toodud platvormide kõrguse ja põhja pindala võrdlus. Siin esineb suur platvormide klaster põhja pindalaga alla  $400 \text{ cm}^2$  ja kõrgusega alla 130 mm, mis näib olevat ligikaudu lineaarne (joonisel näidatud punase katkendjoonega). Samas on sellest vahemikust väljas väga erikujulisi platvorme, kombineerides erineva põhja pindala ja kõrguse.



Joonis 4. Platvormi kõrgus ja põhja pindala. Platvorm\* tähistab platvorme, mille mõni kujutatud mõõt on pildilt teiste alusel hinnatud.

## **2. Töö eesmärgid**

Töö eesmärgiks on luua õppeotstarbeline robotplatvorm, mis kasutab kaasaegse võimekusega juhtmoodulit ning mahutab kogu kasutatava riistvara, kuid hoiab seejuures kere mõõtmed võimalikult väikestena. Selleks, et robot oleks praktilises kasutuses töökindel, peab see vastu pidama mõningasele väärkohtlemisele, näiteks eri kiirustel vastu takistust sõitmisele ja põrutustele. Õppetöö käigus on korduv probleem olnud ka roboti laualt põrandale kukkumine, kuid vastav juht jääb peamistest eesmärkidest välja.

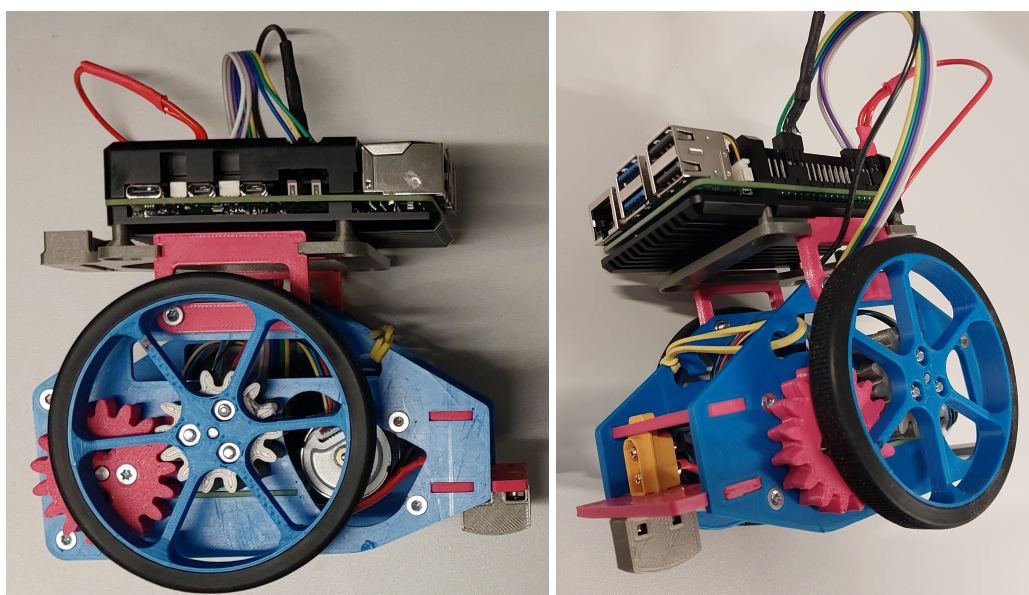
Kõrvalisteks eesmärkideks on roboti sõitmistäpsus, -kiirus ja aku kestvus (ühe laadimisega). Peamiseks võrdlusaluseks nende eesmärkide osas on juba Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis kasutusel olev modifitseeritud GoPiGo3 platvorm.

### 3. Mehaaniline lahendus

Roboti mehaaniline lahendus seisneb roboti kere ning jõuülekandemehhanismi detailide disainis, detailide tootmises ja koostamises. Kere ja jõuülekandemehhanismi disainimiseks kasutati FreeCAD ning mudelite printimisjuhisteks teisendamiseks PrusaSlicer tarkvara.

Kõik roboti kere komponendid peale poltide, mutrite, laagrite, rehvide ja kummipaela on disainitud 3D-prinditavaks. Vastavate komponentide disainis on arvestatud FDM printimise piirangutega, valides komponentidele sobivad printimissuunad ning hoides toestamist vajavate detailide hulga madala. Demonstreeritud roboti vastavad komponendid on prinditud PLA plastikust, kuid kere jaoks sobivad ka teised materjalid. Roboti komponentide loend (koos elektroonikakomponentidega) on toodud lisas 2.

#### 3.1 Teine versioon



(a) Vaade vasakult.

(b) Vaade nurga alt.

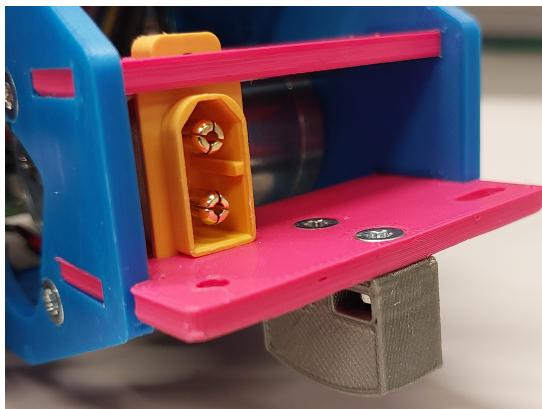
Joonis 5. Kokku pandud robot.

Teine mehaanilise lahenduse versioon on see, mida kasutati järgnevate osade alusena. Selles versioonis on sisse viidud suur hulk muudatusi võrreldes esimese versiooniga, mis on kirjeldatud järgmises alapeatükis. Kahe versiooni vahel toimusid mitmed detailide katsetused ja ümberdisainimised, mida eraldi välja ei tooda.

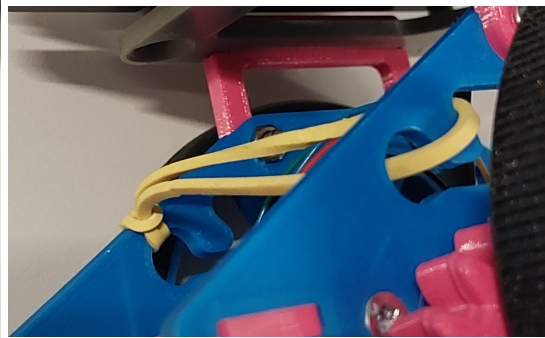
Füüsilise roboti (joonis 5) mõõtmed kokkupanduna juhtmeid arvestamata on 87 mm × 127 mm × 117 mm (laius × pikkus × kõrgus).

Roboti kere koosneb üksteisega liidestatud erikujulistest plaatidest. Külgmised plaadid on omavahel ühendatud nelja keermestatud distantspuksi abil, mis on väljast plaatide külge poltidega kinnitatud. Külgede vahel olevad kolm horisontaalset plaati on kinnitatud risti külgedega ning püsivad külgedes nendes olevate pilude abil.

Akut toetab üks distantspüksidest ning kaks horisontaalset plaati keres, moodustades liikumatu nurga. Teiselt poolt toetab akut kummipael (joonis 6b), mis fikseerib aku kahes suunas vastu kere. Kummipael on kinnitatud kere külge läbi kahe keres oleva augu, aku vertikaalset liikumist piirab ka juhtmooduli kinnitusraam.



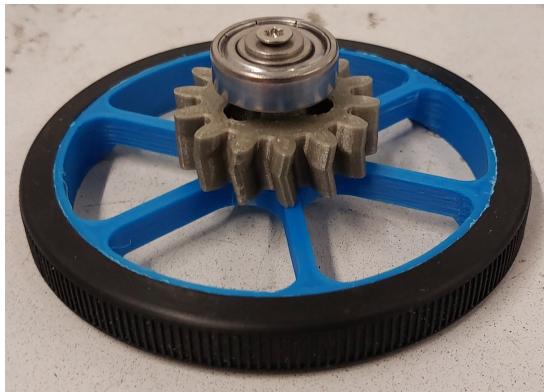
(a) Tagaosa detailid.



(b) Kummipaela kinnitus.

Joonis 6. Roboti tagaosa.

Tagumine toes (joonis 6a) on ühendatud otse kerest välja ulatuva plaadi külge kahe poldiga ning mutritega toeses. Toes on fikseeritud detail kuulratta asemel, kuna kuulrattad kipuvad ajapikku mõnes teljes kinni kiiluma, muutes need samuti efektiivselt fikseeritud detailiks. Toese tekitatud takistus ei ole roboti väikese massi ning raskuskeskme asukoha tõttu kuigi suur ning toes töötab siledal pinnal sõites sama hästi kui kuulratas. Samas on tagumisel plaadil avad ka kuulratta kinnitamiseks.



(a) Ratta telje koost.

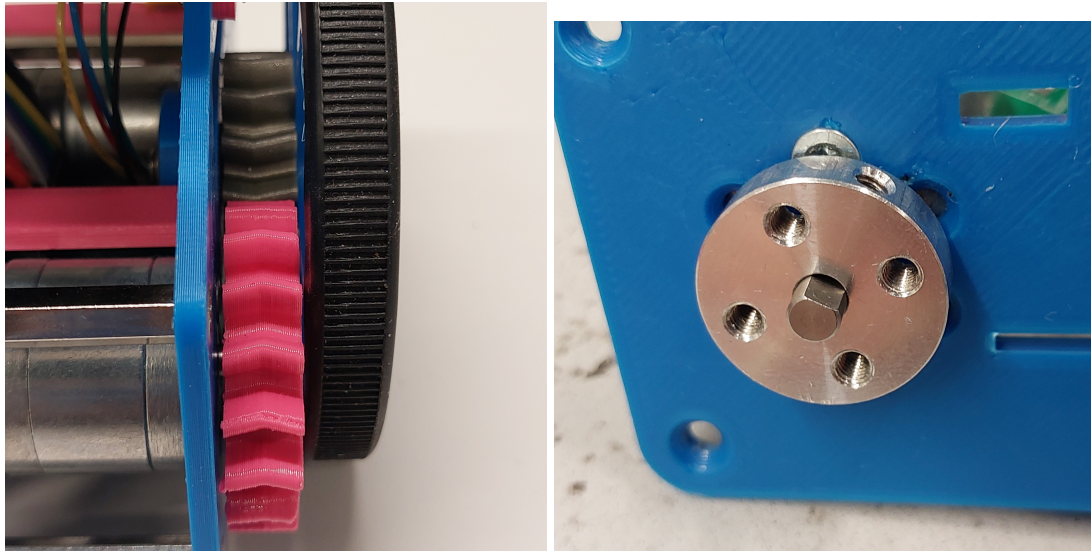


(b) Ratas.

Joonis 7. Roboti ratas ja telje konstruktsioon.

Ratta telg (joonis 7a) koosneb laagrist, ühes tükis hammasrattast ja telje osast ning rattast. Hammasratas on kinnitatud laagri külge telje osa läbiva poldiga, mis siseneb seibiga laagri poolt ning kinnitub teljel süvendis oleva mutriga. Ratas kinnitub hammasrattale kolme poldiga, mis kinnituvad ratta süvendites (joonis 7b) olevate mutritega. Laager on surutud kere küljel seespool olevasse pesasse, kust see ei saa märkimisväärset jõudu avaldamata väljuda pesa kuju tõttu. Ratta ühenduste kuju on disainitud sobituma ka Pololu rolleri (ingl *scooter*) ratta kinnitusega (Pololu #2672), võimaldades kasutada ratastena ka sobivaid rollerirattaid.

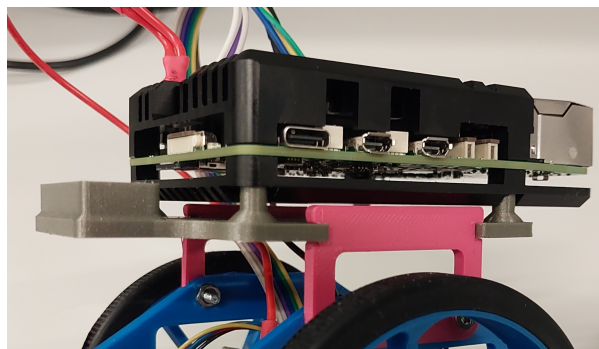
Ratas (joonis 7b) on disainitud Pololu  $80 \times 10$  mm rataste (Pololu #1432) põhjal, võimaldades samas rummu hästi 3D-printida ning ühildudes disainitud kinnitusega. Ratta rehvi on sama tootja toode (Pololu #3410) ning tagab kõvast plastikust palju parema haarduvuse maapinnaga. Ratas on valitud väikese laiusega nii roboti mõõtude vähendamiseks kui ka diferentsiaaljuhtimisega pööramise täpsemaks muutmiseks ratta efektiivse keskpunkti fikseerimiseks.



(a) Ülekandemehhanismi vaade sõidusuunas. (b) Mootori hammasratta ühendusdetail.

Joonis 8. Roboti jõuülekandemehhanism.

Ülekanne (joonis 8) koosneb mootori hammasrattast, mis on kinnitatud mootori teljele lapiku silindrikujulise ühendusdetaili abil, ning ratta telje hammasrattast. Ülekanne on vajalik, kuna samale teljele ei mahu roboti laiusesse mõlemad mootorid. Hammasrattad asuvad rattast ja kerest minimaalsel kaugusel, minimeerides seeläbi roboti laiust. Hammasrattaste hammaste arvu suhe on  $17 : 14$ , muutes roboti ratta teoreetilise maksimaalse nurkkiiruse mootori maksimaalsest nurkkiirusest pisut suuremaks

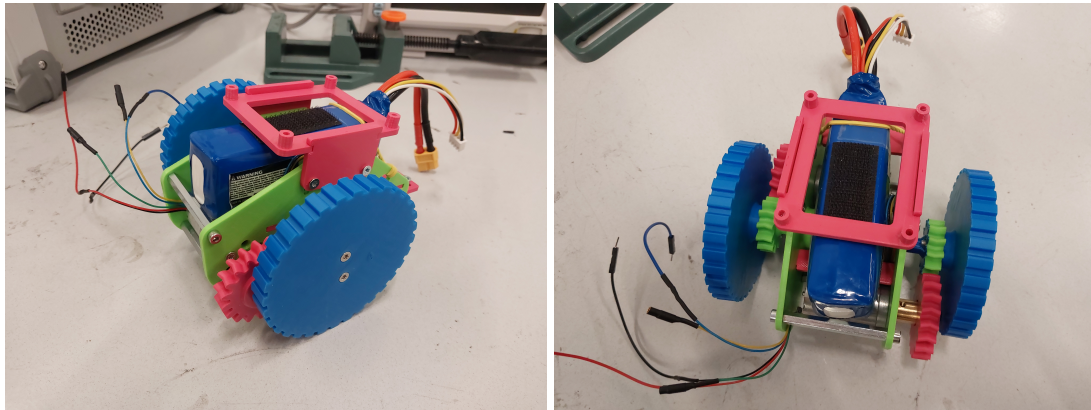


Joonis 9. Roboti juhtmooduli raam juhtmooduli ja külgmiste kinnitusplaatidega.

Juhtmooduli kinnitusraam (joonis 9) kinnitub poltide abil juhtmooduliga ning külgmistele kahe külgmise kinnitusplaadiga. Kumbki külgmise kinnitusplaat on kerega ühendatud kahe poldiga, mis kinnituvad teiselt poolt kere süvendites olevate mutritega. Juhtmooduli raamis on pilu Raspberry Pi kaamera lisamiseks, mis on sobivas asukohas Pi'ga ühendumiseks.

Roboti kokkupanekuks on vaja kinnitada 30 polti, nendest neljateistkümnele on vaja lisada ka mutter. Igal mutril on ka pesa, kuhu see asetub, mislābi pole koostamisel ega lammutamisel vaja pidevalt mutreid kinni hoida.

### 3.2 Esimene versioon



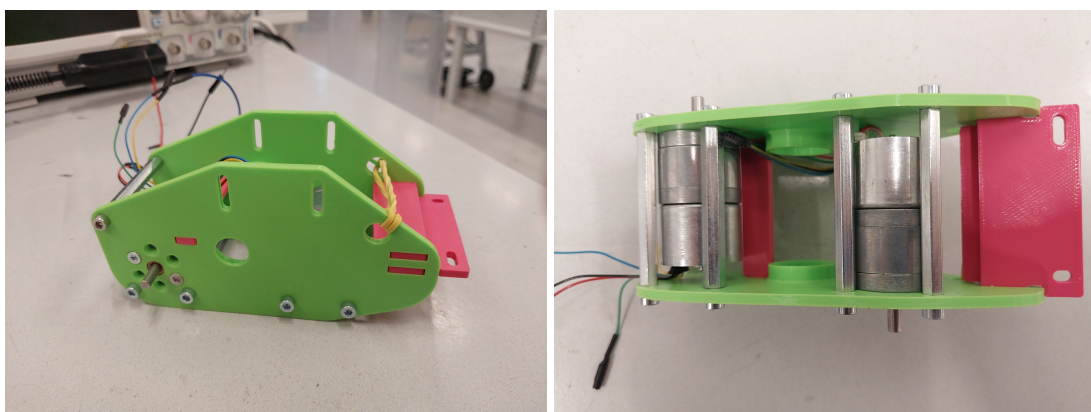
(a) Vaade nurga alt.

(b) Pealtvaade.

Joonis 10. Kokku pandud esimese iteratsiooni robot.

Esimese iteratsiooni (joonis 10) peamiseks eesmärgiks oli katsetada läbi seni valminud mudeli kasutuskõlblikkus, sealhulgas ülekandemehhanismi pädevus ning koostatavus. Järgnevalt on toodud erinevused teise versiooni robotist.

Füüsilise roboti mõõtmed kokku panduna (ilma juhtmoodulita) on 118 mm × 145 mm × 92 mm (laius × pikkus × kõrgus).

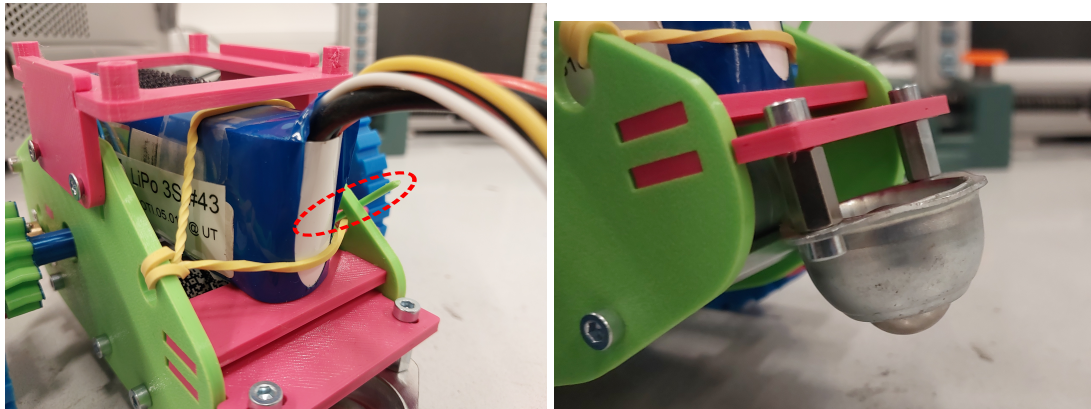


(a) Külgvaade.

(b) Altvaade.

Joonis 11. Roboti esimese iteratsiooni kere.

Roboti kere (joonis 11) koos hoidvad poldid ulatuvad külgedest välja, mis polnud probleem selles iteratsioonis kasutatud mehhanismi asukoha puhul, kuid muutus segavaks teguriks teise versiooni mehhanismi puhul.



(a) Aku kinnitus kummipaelaga. Esile on tõstetud kummipaela kinnitav plastikpulk.

(b) Tagumine kuulratas.

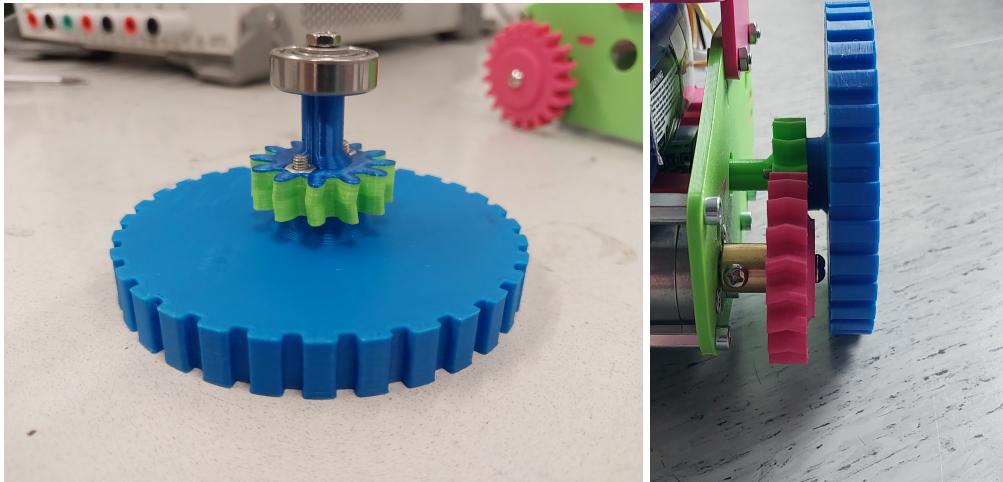
Joonis 12. Roboti esimese iteratsiooni tagaosa.

Aku kinnitus (joonis 12a) on sarnane teise versiooni roboti vastava kinnitusega, kuid on kinnitatud ühelt poolt plastikpulgaga, mis on eraldi detail. See kinnitus töötab hästi, kuid jäaks teise versiooni roboti ülekandemehhanismile ette.

Tagumine ratas (joonis 12b) on ühendatud kerest välja ulatuva plaadi külge kahe lühikese keermestatud distantspuksiga, mille mõlemal pool on poldid. Ratta kinnitusavade paiknemise varieerumise puhul ühenduse võimaldamiseks on vastavas plaadis poltide jaoks eri suundades pilud, mis läbi saab poltide vahekaugus paari millimeetri ulatuses muutuda. See võimalus jäeti, kuna kasutatav ratas polnud valitud ning aukude keskmine vahekaugus põhines ühe konkreetse ratta mõõtmisest.

Ratta telg (joonis 13a) koosneb laagrist, ühes tükis hammasrattast ja telje osast, vahelulist ning rattast. Hammasratas on kinnitatud laagri külge telje osa läbiva poldiga, mil on teisel pool laagrit seib ja kinnitav mutter. Vahelüli ja ratas kinnituvad hammasrattale kahe läbiva poldiga, mil on teisel pool mutter, mis sobitub hammasrattas olevasse mutrikujulisse süvendisse. Kasutuselolev ratas oli disainitud kohahoidjaks ning ei ole kuigi funktsionaalne.

Laager oli disainitud mahtuma täpselt kummaski pooles olevasse pesasse, seejuures pidi laagri sissepoole liikumist takistama ainult pesa ja laagri vaheline hõõrdejõud. Selgus, et pesad on selleks pisut liiga suure läbimõõduga, mistõttu on üsna lihtne laagrit pesas liigutada ning see pesast eemaldada.



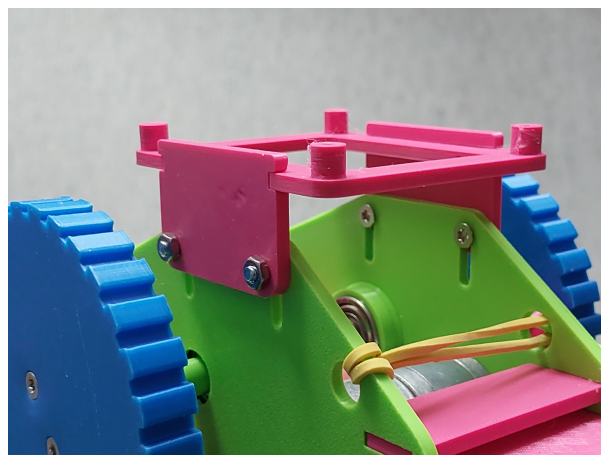
(a) Ratta telje koost.

(b) Ülekandemehhanism roboti sõidusuuna vaates.

Joonis 13. Roboti esimese iteratsiooni jõuülekandemehhanism.

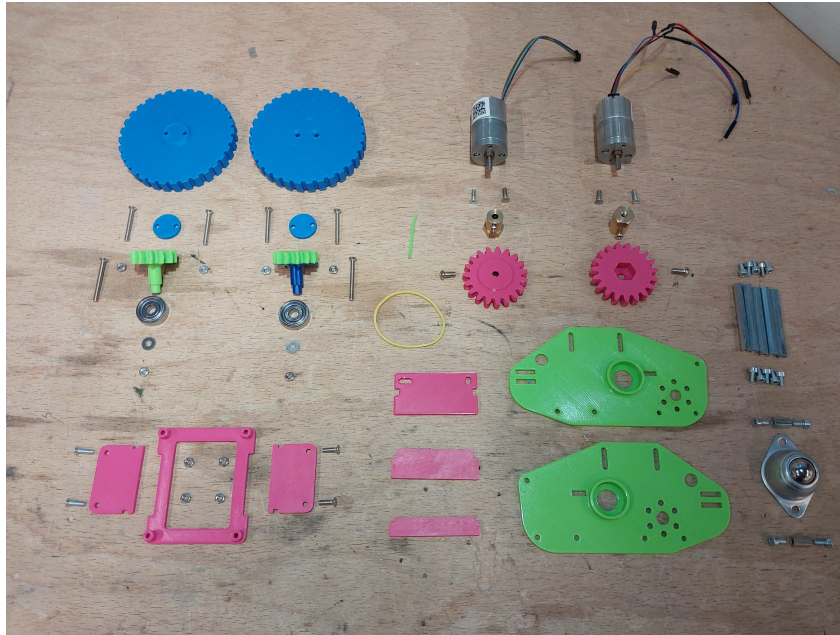
Kuna hammasratta ja kere vahe osutus plaanitud suuremaks, siis selgus, et kasutatav polt ulatub vaid paari millimeetri jagu üle laagri pinna. Selle tulemusena ei hoiu mutter tugeva pingutamiset konstruktsiooni hästi koos, samuti võis ratta telje ja hammasratta joendus laagriga just seetõttu kehv olla.

Ülekanne (joonis 13b) on mootori ja hammasratta ühendusdetaili kuju tõttu kerest märgatavalt eemal, kasutamata ruumi on kummalgi pool ligikaudu sentimeetri jagu. Selle piirangu järgi on vormitud ka ratta telg koos hammasrattaga, mis hoiab ratta telje hammasratta mootori hammasrattaga kerest samal kaugusel. Mootori hammasratta ühendusdetaili fikseerimiseks on sellele õhuke plaat, läbi mille minev polt kinnitab hammasratta liigendi külge. Ratas on omakorda vahelüliliga ratta telje hammasrattast eraldatud, et mitte mootori hammasrattaga kontaktis olla.



Joonis 14. Roboti esimese iteratsiooni juhtmooduli raam külgmiste plaatidega.

Juhtmooduli kinnitusraami (joonis 14) kinnituspoldid läbivad keres olevaid vertikaalseid pilusid, võimaldades raami pisut vertikaalteljes liigutada. Poldid on teiselt poolt kinnitatud mutriga. Et poldid saavad liikuda, lubab see juhtmooduli kõrgust muuta, võimaldades nii aku vertikaalset liikumist täpsemini piirata ja sõltuvalt akust muuta. Raam oli disainitud liikuma ainult vertikaalsihis, kuid et seda hoiavad kindlas sihis ainult ühel tasandil olevad poldid, siis saab raami märkimisväärselt ka sõidu sihis kallutada. Samuti on keeruline kokku pandud robotil neid polte pingutada (sõltumatult sellest, kas poldipead on kerest väljaspool või seespool).

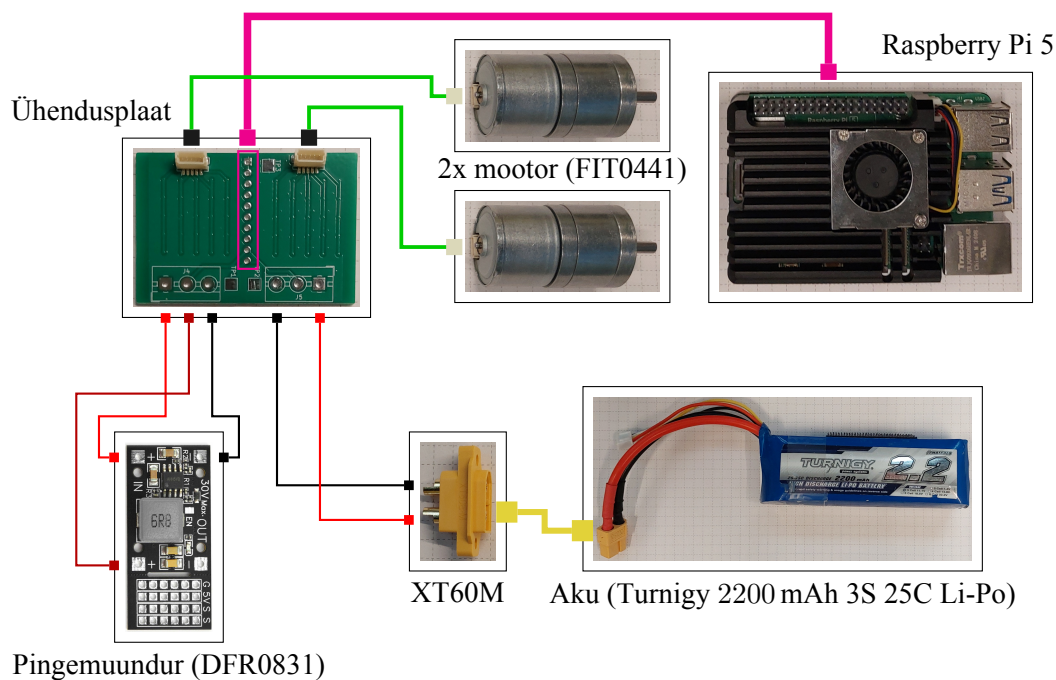


Joonis 15. Esimese iteratsiooni konstruktsiooni komponendid.

Roboti kokkupanekuks on vaja kinnitada 32 polti, nendest kümnele on vaja lisada ka mutter (joonis 15). Kokkupaneku käigus ilmnis, et mõned kinnitused on oodatust keerulisemad. Peamisteks probleemide allikaks olid mutrid, mida oli oma väiksuse ning ümbritsevate detailide tõttu keeruline paigal hoida ja keerata. Enim mõjutas see polte, mis kinnitavad ratta hammasratta külge, kuna vastav mutri süvend on piisavalt suur, et mutter ei püsiks seal iseseisvalt poldi sisestamisel, ning hammasratta ja kere vaheline kaugus on mutri hoidmiseks väike.

Selles iteratsioonis ei läinud katsetamisele juhtmooduli asetus ega elektroonika, kuna konkreetsed komponendid polnud veel kohale jõudnud. Juhtmooduli kättesaamisel ilmnis, et plaanitud disain vajab pisut muutmist, kuna juhtmoodulile lisatud radiaator lõikus detailiga, millele juhtmoodul kinnituma pidi.

## 4. Elektriline lahendus

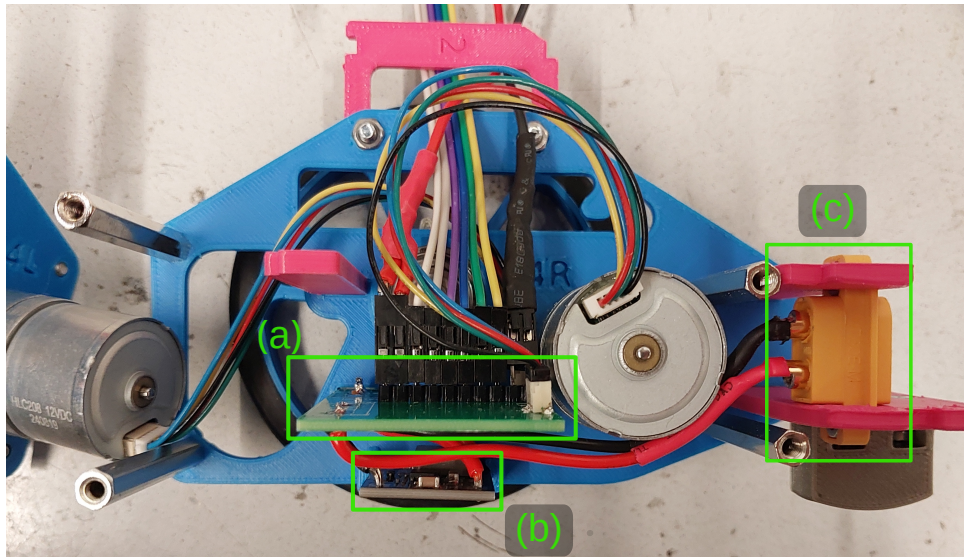


Joonis 16. Elektriskeem komponentidega. DFR0831 foto allikas: [19].

Roboti elektroonika funktsionaalseteks komponentideks on aku, pingemuundur, mootorid ning Raspberry Pi 5 (joonis 16). Elektroonikakomponentidest on aku ja RPi hõlpsasti (jootekolvi ja kruvide abita) ülejäänud elementidega kokku ja lahku ühendatavad (RPi jääb sel juhul ühendatuks vaid raamiga).

Roboti voollallikaks on robootika ainetes juba kasutusel olev kolmeelemendiline liitium-polümeer (Li-Po) aku (Turnigy 2200 mAh 3S 25C Li-Po), mis tagab süsteemile 12 V pingellika, mis on sobilik mootorite käitamiseks. Aku hõlpsa ümber ühendamise tarbeks on roboti tagaosas ligipääsetav XT60M pesa (joonis 6a), kuhu aku ühendatakse. Akut ei ole võimalik laadida roboti külge ühendatuna ning selline võimekus pole tavakasutuses ka vajalik.

Pingemuundur (joonis 17b; DFR0831) teisendab aku pinget RPi'le sobivaks 5 V pingeks. Vooluedastus RPi'le toimub üle RPi kahe 5 V viigu ning kahe maaviigu. Kasutatava RPi 5 elektriskeem pole Raspberry Pi ametlikel veebilehtedel [20, 21] 2025. a aprilli seisuga avaldatud, seega uuritakse RPi 4 elektriskeemi eeldusega, et toitelahendus on neil arvutitel sarnane. Elektriskeemi [22] põhjal on 5 V viigud ühendatud otse USB-C pordi vastava viiguga, seega on selline vooluedastus RPi 4 puhul elektriliselt korrektne ja USB-C toitega, mis on mooduli käitamiseks ettenähtud meetod, võrdväärne.



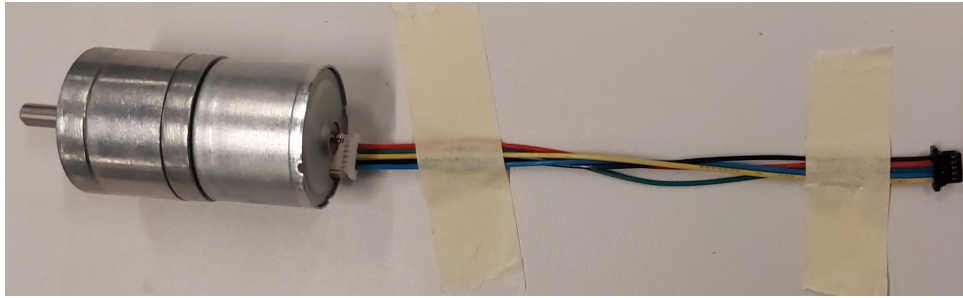
Joonis 17. Fikseeritud elektroonikakomponendid roboti kere sees külgvaates. (a) ühendusplaat, (b) pingemuundur, (c) XT60M.

Vooluedastuseks kasutatakse mitut sama pinget viiku paralleelselt, kuna erinevate allikate järgi on ühe klemmi maksimaalne voolutaluvus<sup>6</sup> 3 A, kuid RPi 5 soovituslik vooluallika voolutugevus [20] 5 A. Hetkese pingemuunduri tippvoolutaluvus on 5 A ja püsivalt 4 A, mis on piisav eeldusel, et juhtmooduliga ühendatud lisaseadmed ei tarbi pidevalt palju voolu.

Peaaegu kõigi liitumiste sõlmpunktiks on selle roboti jaoks töö autori disainitud ühendusplaat (joonis 19a), mis on trükkplaat koos sellele joodetud pesadega (2x JST SR 5 viiguga ja üks 2,54 mm sammuga 10 viiguga). Plaadi skeemi ja paigutuse disainimiseks kasutati KiCad tarkvara. Ühendusplaat võimaldab kompaktselt suure hulga eri viike kokku ühendada: plaat ühendab viie teise komponendi vooluviigid sobivalt ning ühendab mõlema mootori juhtsiinid RPi'ga. Ühenduste skeem on toodud lisas 4. Ühendusplaat on roboti kere laiune, võimaldades seda paigaldada sarnaselt kere külgsuunaliste ristuvate plaatidega (joonis 17a).

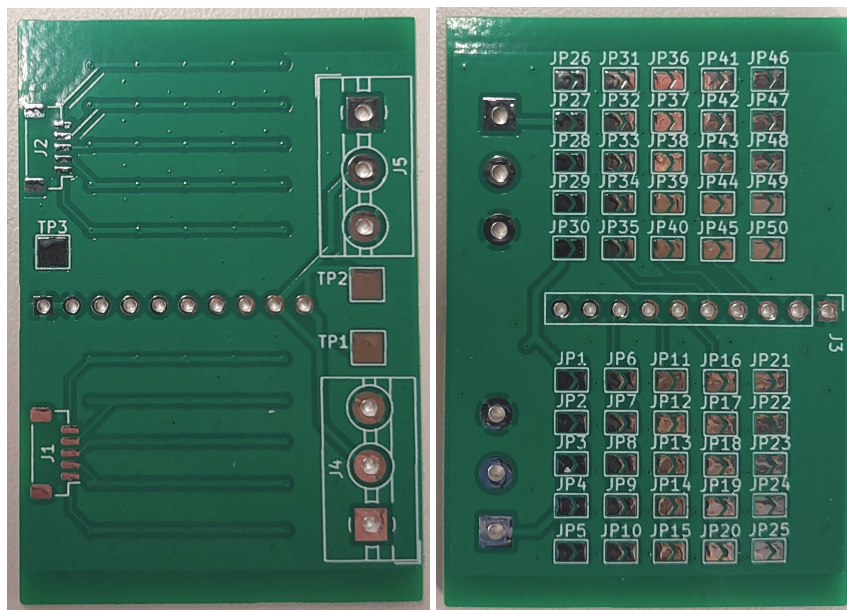
Mootoriga kaasa tulevat kaablit (joonis 18) pole mootori ametlikul vikilehel otseselt kirjeldatud [23], lisaks ei ühenda see eri poolte viike samas ega vastupidises järjekorras ning ühendused sõltuvad sellest, kumb kaabli ots ühendada mootoriga. Ka mõnes foorumipostituses [24] on avaldatud segadust selle üle, mis on õige viikude järjekord nii mootori pool kui ka juhtmeühenduse järel, kuid mootoripoolne ühendus on tänaseks vikilehel

<sup>6</sup>Leitud tootespetsifikatsioonidest (miinimum): A, B, C, D, E



Joonis 18. FIT0441 mootor kaasas olnud kaabliga, mille otsad on fikseeritud.

dokumenteeritud [24]. Et lisaks toodud segadusele on saadaval eraldi kaableid, mis ühendavad poolte viigud samas järjekorras, ei ole ühendusplaadi disainis vastavate pesade viikude ühendused fikseeritud. Ühenduste määramiseks on plaadil kummagi mootori pesa jaoks maatriks jootesillustest (joonis 19b), mis võimaldab silluseid ümber jootes üsna hõlpsasti iga pesa viigu ühendada iga vajaliku viiguga. See lisasamm annab täiendava võimaluse enne roboti käitamist kontrollida, kas saadud kaabel on õige ühenduste järjekorraga, ning ei kahjusta komponente, kui ühtki sillust joodetud pole.

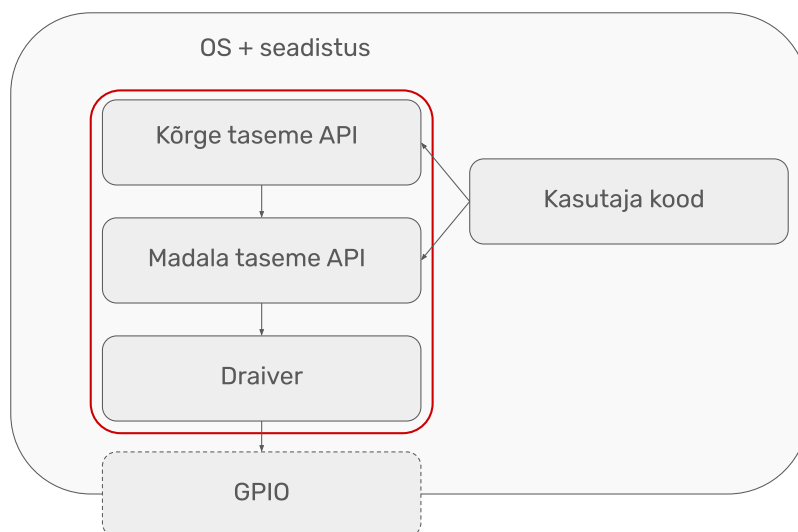


(a) Esikülg (pesadeta).

(b) Tagakülg silluste maatriksitega.

Joonis 19. Ühendusplaat.

## 5. Tarkvaraline lahendus



Joonis 20. Tarkvara skeem ning eeldatav kasutusmuster. Esile on toodud implementeeritud tarkvaraliidesed.

Tarkvaralahendus koosneb rakendusliidestest mootorite ja terve roboti liikumise juhtimiseks ning operatsioonisüsteemi lisakonfiguratsioonist (joonis 20). Peamiseks eesmärgiks on anda kõrge taseme liides roboti juhtimiseks tervikuna (diferentsiaaljuhtimise mudeli läbi). Samas on loodud ka vahepealsed rakendusliidesed, mille abil saab juhtida mootoreid ka otse (madalamal tasemel). Liideste eraldamine annab nii arenduse käigus kui ka edasiste arenduste puhul eelise, et ühe liidese koodi saab suurel määral muuta, muutes liidesest sõltuvat koodi ja liideseid, millest muudetav liides sõltub, minimaalselt.

Liideste kood, kommentaarid, funktsiooninimed ja dokumentatsioon on ingliskeelsed, kuna kasutatavad alusfunktsioonid ning programmeerimiskeel (Python 3) ise on ingliskeelsed. Samuti on inglise keele valik sobiv, kuna õppeainete sihtgrupis on ingliskeelse õppekavaga tudengeid.

### 5.1 Draiver

Draiveri eesmärgiks on otsene suhtlus mootoritega üle RPi GPIO viikude. Draiveri rakendusliides võimaldab seada mootori võimsust osana maksimaalsest funktsiooniga `set_motor_speed` ning pärida mootori enkoodrilt saadud kogu impulsside arvu (mis muutub vastavalt mootori liikumise suunale) funktsiooniga `get_motor_ticks`.

Draiver on implementeeritud toetudes `gpiozero` teegile ning Raspberry Pi operatsioonisüsteemi võimekustele. Implementeeritud on kaks draiverit, mille puhul mootoritele antav

pulsilaiusmodulatsiooni (PWM) signaal toodetakse kas tarkvaraliselt (sihtsagedusega 10 kHz, mis on antud teegi maksimaalseks lubatud väärtuseks) või RPi sisseehitatud riistvaralise lahendusega (sihtsagedusega 20 kHz), et saavutada mootoritele sobilik signaal. Ehkki mootori spetsifikatsioonis [23] on väidetud, et sobiv sageduste vahemik on 20 kHz kuni 30 kHz ning tarkvaraliselt genereeritud PWM signaali pulsilaius varieerub mõõtmisel riistvaraliselt genereeritud PWM signaali pulsilaiusest märksa enam, ei esinenud roboti sõiduomaduste võrdluses praktilisi erinevusi. Samas ilmnes riistvaralist draiverit kasutades mootorite kiirust seades erinevus, et juhul, kui mootor ei suutnud madala sisendvõimsuse tõttu pöörlema hakata, siis ei hakanud mootor pöörlema ka võimsust aeglaselt maksimumini suurendades. Lisas 3 on toodud tarkvaralise draiveri kood failis `driver_software.py` ja riistvaralise draiveri kood failis `driver_hardware.py`. Mõlemad draiverid annavad kasutamiseks sama rakendusliidese. Enkoodrite impulsside lugemiseks kasutatakse RPi GPIO viikude katkestuste võimekust. See võimekus käivitab koodilõigu, kui viigu pinge muutub, mis läbi ei ole vaja koodi, mis pidevalt viigu olekut jälgiks, et uut impulssi tuvastada.

## 5.2 Madala taseme rakendusliides

Madala taseme rakendusliidese eesmärgiks on keskselt abstraherida mootorite ja roboti ehituse põhjustatud iseärasused, võimaldades liikumist juhtida ning mootorite asukoha tagasisidet saada füüsikalistes ühikutes. Liides on disainitud nii, et ei eelda midagi roboti liikumismudeli kohta (diferentsiaaljuhtimine), vaid keskendub korraga ühe ratta liikumisele. Liidese kood on toodud lisas 3 failis `low_level.py`.

Liides kasutab mootorite parameetrite füüsikaliste ühikutega seostamiseks konfiguratsiooni, millel sisseehitatud algväärtused, võimekus failist uut konfiguratsiooni olemasolevale lisada ning hetkene konfiguratsioon faili salvestada. See võimaldab kalibreerida konkreetse roboti liikumist liidese koodi muutmata.

Liidese võimaldab seada ratta kiiruse millimeetrites sekundis funktsiooniga `set_motor_speed_mmmps` ning lugeda ratta sõidetud vahemaa (kui edaspidi sõidetud ja tagurpidi sõidetud vahemaade vahe) funktsiooniga `get_motor_mms`. Samuti on liideses võimekus sõidetud vahemaad mootori kaupa nullida ning seada otse mootori sisendvõimsust (mitte sihtkiirust) osana maksimumist.

Et võimaldada mootori valitud kiirusel hoidmist, on liideses kontroller, mis hindab pidevalt (aluskonfiguratsiooniga sagedusega ligikaudu 20 Hz, isegi siis, kui nii sagedasti liidese

funktsioone välja ei kutsuta) mootori tegelikku kiirust ning parandab võimsust, et saavutada tahetud kiirus. Et kontroller saaks joosta muud rakenduskoodi segamata, käitatakse seda eraldi lõimes. Kontroller määrab mootori esmase võimsuse tahetud kiirusest lineaarse sobituse põhjal, viies paigaloleku võimsuse 0%-ks ja maksimaalse eeldatava kiiruse 100%-ks maksimaalsest võimsusest. Püsiva (näiteks hammasrataste takistus) ja muutuva (näiteks tasandilt kallakule sõitmisest tingitud) mootori kiiruse erinevusega arvestamiseks on kontrolleril integraalne komponent, mis integreerib tahetud ja mõõdetud kiiruse erinevust ehk viga üle aja ning muudab saadud suuruse põhjal mootori võimsust. Saadud parandus kantakse kontrolleri pideval kasutamisel edasi ka sihtkiiruse muutmise käsu puhul, eeldades, et võimsuse erinevus teisel kiirusel on sama. Integraalne komponent tagab ka selle, et kui mootorid suudavad tahetud kiirusest kiirema ja aeglasema kiiruse saavutada, siis keskmine kiirus püsib üle pika aja arvestades tahetud kiiruse juures, olenemata sellest, kui täpselt mootor konkreetset hetkkiirust hoida saab.

### 5.3 Kõrge taseme rakendusliides

Kõrge taseme rakendusliidese eesmärgiks on lihtsustada roboti juhtimist, sisaldades funktsioone konkreetsete roboti liikumismustrite läbi viimiseks. See rakendusliides suhtleb mootoriga ainult läbi madala taseme rakendusliidese ning põhineb diferentsiaaljuhtimise liikumismudelil. See liides on struktureeritud sarnaselt GoPiGo3 ametlikule EasyGoPiGo3 rakendusliidesele [25]. Liidese kood on toodud lisas 3 failis `high_level.py`.

Liides annab kasutamiseks klassi mis jälgib tahetud maksimaalset ratta liikumiskiirust (`speed_mmps`). Liideses on defineeritud funktsioonid nii kindla kiirusega pidevaks (mitteblokeeruvalt) sõitmiseks kui ka kindla vahemaa sõitmiseks või pööramiseks (blokeeruvalt).

Pideva sõitmise keskseks meetodiks on `steer`, mis lubab seada korraga mõlema ratta liikumise suuna ja kiiruse osana maksimaalsest seatud kiirusest. Eraldi on defineeritud abimeetodid mõne kasuliku liikumissuuna jaoks seatud kiirusega liikumiseks, näiteks edasisõiduks (`drive_forward`) ja roboti rataste keskpunkti ümber pöörlemiseks (`spin_left` ja `spin_right`); nende meetodite implementatsioon koosneb ühest meetodi `steer` väljakutsest.

Kindla vahemaa otse sõitmiseks ja kindla nurga võrra pööramiseks on vastavalt meetodid `drive_mm` ja `turn_degrees`. Need meetodid on disainitud roboti liigutamiseks paigaltseisust, arvestades seejuures lisaks seatud maksimaalsele ratta kiirusele täpsuse saavutamiseks ka seatud maksimaalse kiirendusega. Lisaks on defineeritud meetod `drive_arc`, mis võimaldab sõita robotiga, järgides keskpunktiga kaart etteantud raadiusega ringjoonest.

Kõrge taseme liides sisaldab madala taseme rakendusliidese põhjal meetodeid kummagi ratta läbitud vahemaa pärimiseks (`get_driven_mm` ja `get_driven_mm_average`) (kus sõidetud teepikkust mõõdetakse otse ja tagurpidi sõidetud teepikkuste vahena) ning vastavate näitude nullimiseks (`reset_driven`).

## 5.4 Operatsioonisüsteemi lisaseadistus

Raspberry Pi muudab käivitamisel GPIO viikude käitumist, muutes seejuures juhtimiseks kasutatavad viigud sisenditeks, mille pinge hoitakse läbi takisti madal. Kuna kasutatavad mootorid tõlgendavad antud madalat pinget kiiruse viigul käsuna liikuda maksimaalse kiirusega, hakkavad roboti rattad RPi käivitamisel ja tarkvaralisel väljalülitamisel täiskiirusel liikuma. Selle mõjude pehmendamiseks lisati operatsioonisüsteemi konfiguratsioonifaili seadistus (joonis 21), mis RPi käivitamisel paari sekundi jooksul eemaldab vastavatelt viikudelt madala pinge allika, peatades mootorid.

```
52 # Plokis [all]
53 # Peata RPi käivitamisel mootorid.
54 gpio=13,18=ip,pn
```

Joonis 21. `/boot/firmware/config.txt` faili lisaseadistus.

Kuna vooluallikas pole RPi'ga ühendatud üle USB-C ning elektroonikas pole vastavat kontrolleri, ei saa RPi vooluallika käest pärida, mis selle maksimaalne voolutugevus. Selleks, et anda teada, et vooluallikas suudab anda maksimaalse nõutud voolutugevuse 5 A, lisati vastav konfiguratsioonirida EEPROM konfiguratsiooni (joonis 22). Vastava konfiguratsiooni muutmisele pääseb ligi käsuga `sudo -E rpi-eeprom-config --edit [20]`.

```
4 # Plokis [all]
5 PSU_MAX_CURRENT=5000
```

Joonis 22. RPi EEPROMi konfiguratsiooni lisaseadistus.

## 6. Testimine

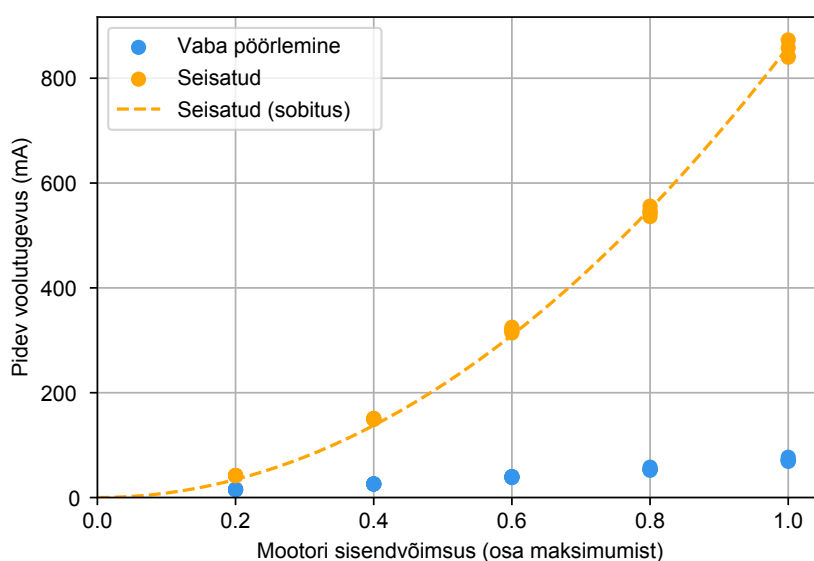
Kõik roboti (diferentsiaaljuhtimisega) liikumist sisaldavad testid viidi läbi tarkvaralise draiveriga ning juhtmoodulil minimaalset käskude hulka kasutades, kui konkreetsel juhul pole kirjutatud teisiti. Roboti juhtimisel katsetati valdavalt kiirusi 80 kuni 800 mm, kuna alampiirist madalamal kiirusel liikusid rattad katkendlikult ning ülempiirist kõrgemal kiirusel halvenes roboti juhitavus märgatavalt.

Lühendamiseks kirjeldatakse mootori kiiruse valimiseks kasutatavat PWM signaali täiteteguri muutmist mootori sisendvõimsuse valimisena.

### 6.1 Voolutarbimine

Järgnevad testid viidi läbi toiteploki antud 12,0 V pingega.

Ühe mootori tarbitava voolutugevuse määramiseks kasutati esimese versiooni roboti küljele monteeritud mootorit, millele anti juhtsignaale Raspberry Pi Pico mikrokontrollerist. Voolutugevus mõõdeti toiteploki programmeerimisliidese kaudu poolteist sekundit peale mootori kiiruse seadmist. Takistatud liikumiseks fikseeriti roboti ratas, takistades nii mootorit pöörlema hakkamast. Joonisel 23 on toodud mootori voolutugevus sõltuvalt nõutud võimsusest. Takistamata pöörlemisel on mootori voolutarbimine madal, püsides ka täisvõimsusel töötades alla 100 mA. Mootori täielikul seiskamisel kasvab voolutarbimine aga märgatavalt, ligikaudu ruutseoses nõutud võimsusega, tipnedes ligikaudu 850 mA voolutugevusega maksimaalse nõutud võimsuse juures.

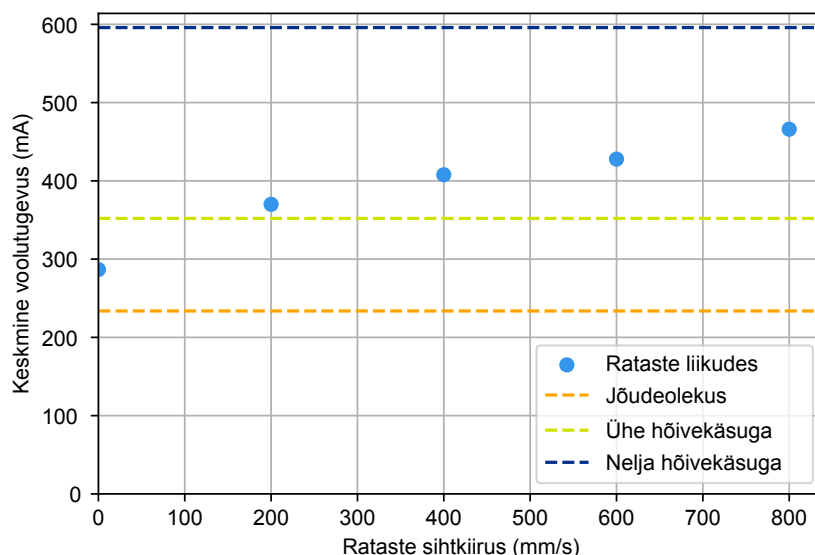


Joonis 23. Mootori voolutugevuse sõltuvus nõutud võimsusest.

Järgnevat testides leiti keskmine voolutugevus ligikaudu ühe minuti jooksul toiteploki voolutugevuse näidu hetkväärtust perioodiliselt märkides ning saadud näite keskmistades.

Robot tarbib sisselülitatud juhtmooduliga voolu keskmiselt 234 mA. Hõivates juhtmooduli üht protsessorituuma, jooksutades käsku `dd if=/dev/urandom of=/dev/null` (edaspidi hõivekäsk), suurenes keskmine voolutugevus väärtusele 352 mA. Jooksutades korraga nelja hõivekäsku, mis kasutab RPi 5 kõiki nelja protsessorituuma, suurenes keskmine voolutugevus väärtusele 596 mA. Need väärtused on toodud võrdluseks ka joonisel 24.

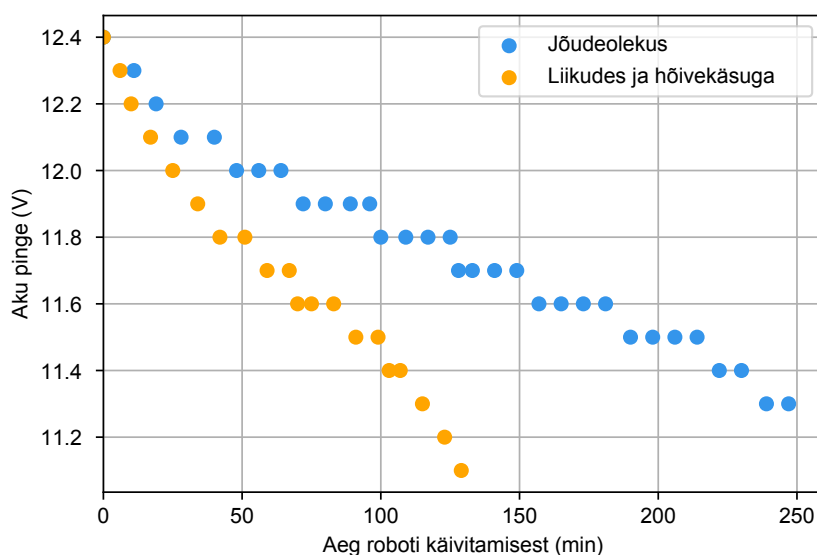
Roboti voolutarbimise määramiseks rattaid eri kiirusel liigutades asetati robot lauale nii, et rattad ei puudutanud laua pinda, valiti soovitud kiirus kõrge taseme liidesest muutuja `speed_mmpps` abil ning käivitati liikumine meetodiga `forward`. Joonisel 24 on toodud roboti tarbitav keskmine voolutugevus sõltuvalt valitud mootorite sihtkiirusest. Selgub, et rataste juhtkoodi käivitamine suurendab ka rattaid liigutamata pisut roboti voolutarbimist. Vabal pöörlemisel on mootorite liigutamise koguvoolutarbimine võrreldav juhtmooduli voolutarbimisega jõudeolekus, kusjuures kiirusel 800 mm/s on voolutugevus ligikaudu kaks korda suurem kui jõudeolekus, saavutades väärtuse 466 mA. Samas tarbib robot paigal seistes nelja hõivekäsku jooksutades märkimisväärselt rohkem voolu kui ainult maksimaalse kiirusega rattaid liigutades.



Joonis 24. Roboti tarbitava voolutugevuse sõltuvus ratasest sihtkiirusest vabal pöörlemisel. Võrdluseks on toodud roboti voolutarbimine juhtmooduli eri hõivatusel, kui rataste juhtkood ei töötanud.

## 6.2 Aku kestvus

Aku kestvuse mõõtmiseks jälgiti aku pinget algselt pingelt 12,4 V kuni aku tühjenemiseni piirpingeni 11,1 V või ligikaudu nelja tunni möödumiseni. Katsetati juhtu, kui robot on jõudeolekus (juhtmoodul sisse lülitatud), ja juhtu, kui robot sõidab pidevalt edasi-tagasi ning juhtmoodul käitab ühte hõivekäsku. Pideva sõitmise tarbeks kasutati käsku `drive_mm`, sihtkiiruseks seati 600 mm/s ja ühes suunas sõidetavaks vahemaaks 3000 mm. Pingemõõtmised saadi aku alarmilt, mis kinnitati robotile. Tulemused on toodud joonisel 25. Jõudeolekus kestis aku algselt täis laetud pingelt 12,4 V üle nelja tunni, kuid lõpuole lähenes aku pinget seadud piirpingeni. Pidevalt liikuva ja hõivekäsku jooksutava roboti puhul pidas sama aku vastu pisut üle kahe tunni (130 min). Mõlemal juhul langes aku pinget algul kiiresti, pikka aega pisut aeglasemalt ning piirpingele lähenedes taas pisut kiiremini.

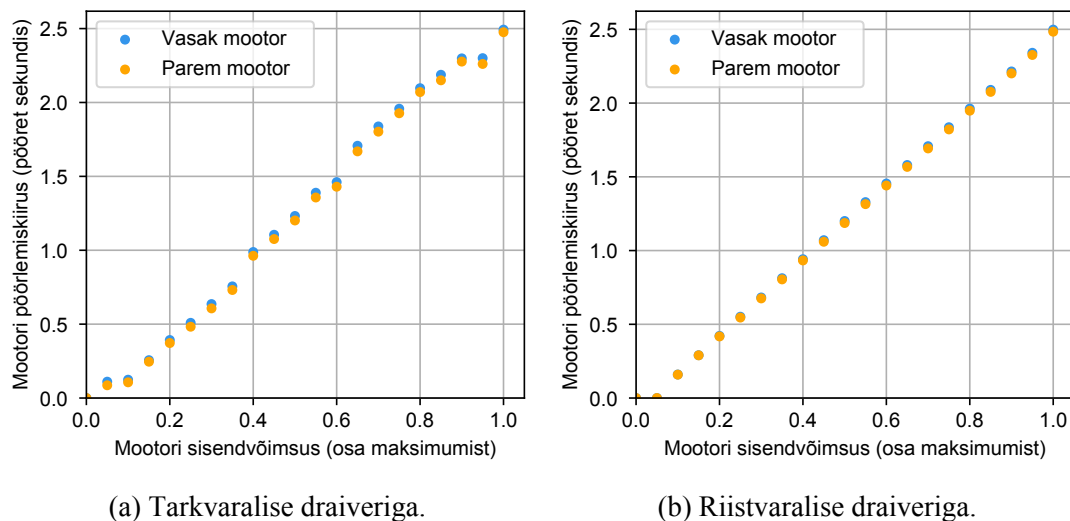


Joonis 25. Aku pinget langus roboti töötamisel jõudeolekus ning pidevalt liikudes koos ühe hõivekäskuga.

## 6.3 Mootori kiirus

Mootorite pöörlemiskiiruse sõltuvuse määramiseks antud sisendvõimsusest (PWM signaali täitetegurist) määrati kummalgi mootori võimsust eraldi (seades teise mootori võimsuseks 0), vähendades ühe mootori võimsust maksimumist samm-sammult ja keskmistades igal võimsusel peale 2 s möödumist vastava enkoodri impulsside arvu üle 10 s. Mõõtmise ajal polnud rattad maaga kontaktis. Joonisel 26 on toodud mõõtmiste tulemused testides eraldi ühel juhul tarkvaralist ja teisel riistvaralist draiverit. Riistvaraline draiver annab tarkvaralisest draiverist pisut lineaarsema ning mootorist (valitud kanalist) väga vähe sõltuva tulemuse.

Samas on tarkvaralise draiveri puhul mootori pöörlemiskiiruse ja sisendvõimsuse suhe üsna lineaarne. Mõlemal juhul on lineaarse sobituse põhjal paigalseisu sisendvõimsus ligikaudu 5% maksimumist, mille võib tingida hammasrataste tekitatud takistus. Mootori tippkiiruseks osutus mõlemal juhul ligikaudu 2,5 pööret sekundis ehk 150 pööret minutis, mis on pisut madalam tootja [23] pakutud maksimaalsest kiirusest 169 pööret minutis; ka selle põhjuseks on tõenäoliselt mehhanismi takistus.



Joonis 26. Mootorite pöörlemiskiiruse sõltuvus antud sisendvõimsusest.

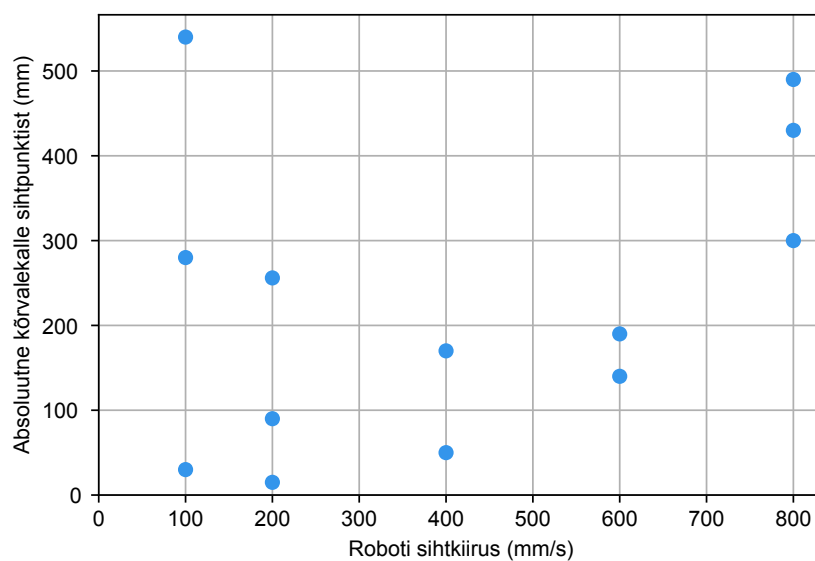
## 6.4 Roboti liikumise kõrvalekalle

Roboti otsesõidu täpsust määrati eraldi otsesõidu sihis (roboti algse vaatenurga sihis) sõidetud kauguse ning ristisihis (kaugusena täielikult sirgjoonelise otsesõidu kiirest) sõidetud kaugusena sõidu lõppedes iga kiiruse ja distantsi puhul korrati katset 2 kuni 3 korda.

Roboti otsesõidu teepikkuse kõrvalekalde määramiseks sõitis robot distantse 1230 mm ja 6143 mm käsu `drive_mm` põhjal, kusjuures lühemal distantstil mõõdeti roboti otsa kaugust alguspunktist ja pikemal kaugust sirgest, mis ristus täiusliku otsesõidu trajektooriga selle lõpp-punktis. Roboti otsesõidul 1230 mm sihtteepikkusega ei leitud üle 10 mm kõrvalekallet roboti otsesõidu teepikkuse osas. Peaaegu sama tulemus ilmnis ka 6143 mm sihtteepikkuse puhul, välja arvatud kahel mõõtmisel, kui kiirusel 100 mm/s läbis robot 35 mm ning 800 mm/s kiirusel 20 mm tahetust lühema distantsi projitseerituna mõõdetud liikumise suunas, kuid antud mõõtmiste puhul kaldus robot tahetud trajektooriga ristisihis ligikaudu 500 mm kõrvale.

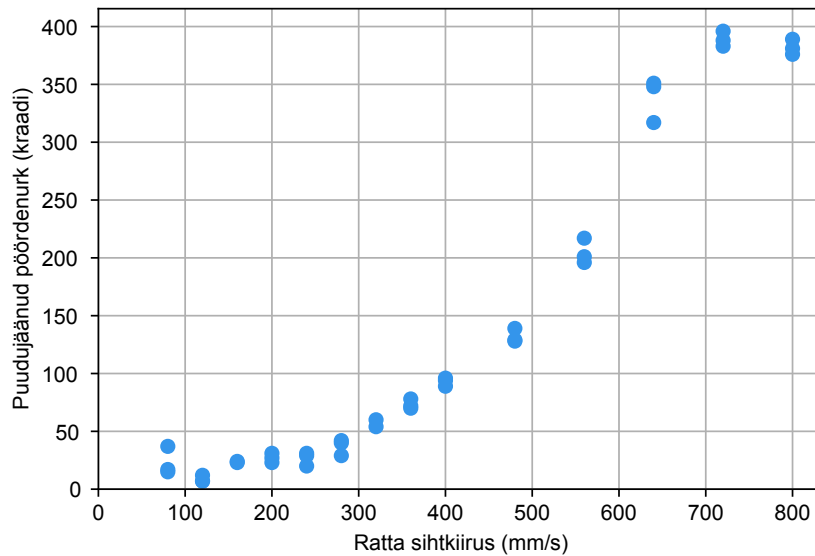
Roboti otsesõidul ristisihilise kõrvalekalde määramiseks sõitis robot distantse 6143 mm käsu `drive_mm` põhjal (koos otsesõidu teepikkuse mõõtmisega), misjärel mõõdeti roboti esiotsa keskpunkti kaugust ristisuunas ideaalse otsesõidu lõpp-punktist. Joonisel 27 on toodud tehtud

mõõtmiste tulemused. Robot fikseeriti enne iga sõitu juhikute abil võimalikult sarnasesse algasendisse, misjärel robot liikus käsu `drive_mm` abil edasi ning mõõdeti eraldi roboti keskkoha kõrvalekallet roboti ideaalse liikumissuunaga risti. Roboti otsesõidu stabiilsus varieerub madalatel kiirustel palju, mille võib tingida mootorite seiskumine madalate nõutud võimsuste juures, mis muudab roboti nurga liikumise alguses. Kiirustega 400 kuni 600 mm/s sõites lõpetas robot mõõtmise alati suunaga peaaegu tahetud trajektoori sihis, maksimaalsel ristsihilise kõrvalekaldega 190 mm; kiirusel 100 mm/s mõõdetud juhtudel aga lõpetas robot kahel korral silmnähtavalt erineva nurga all algsest. Üldiselt näib stabiilseim sõidukiirus edasisõiduks olevat 200 kuni 600 mm/s.



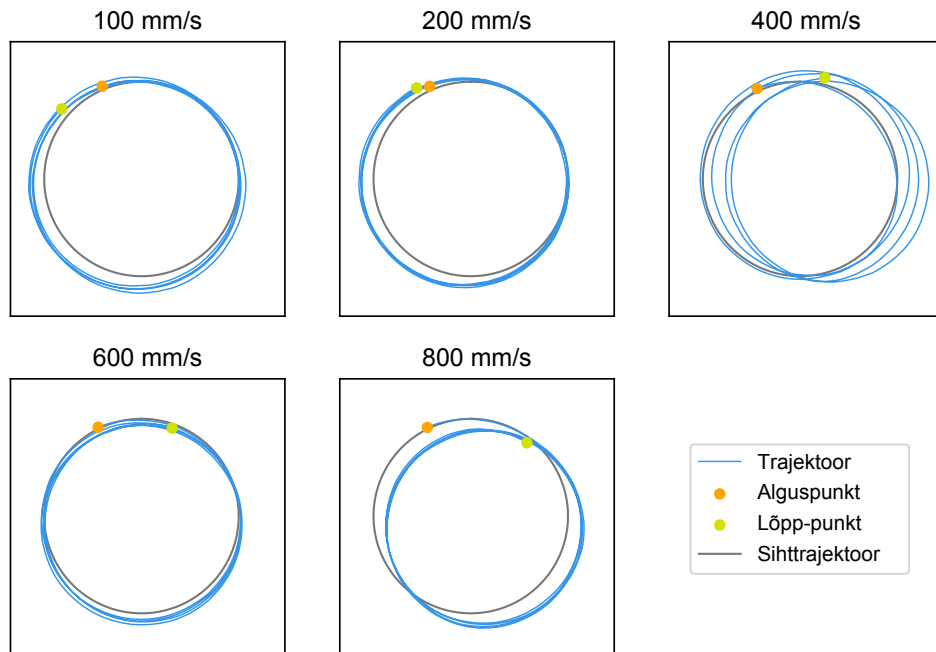
Joonis 27. Absoluutne horisontaalne kõrvalekalle ligikaudu 6 m sõidul sõltuvalt sihtkiirusest.

Roboti kohapeal pööramise täpsuse määramiseks paigutati robot iga mõõtmise alguses samasse algpositsiooni, misjärel robot pöörles ümber enda telje käsu `turn_degrees` abil sihtnurga  $3600^\circ$  (10 täisringi) ning kogu protsess jäädvustati pealtvaates videole, tehes 2–3 korduskatset. Nurgad määrati videolt pöörete arvu lugedes ja lõppasendi pildilt roboti pööratud nurka mõõtes. Joonisel 28 on toodud roboti pööramisel sihist puudujäänud pöördenurk. Roboti pööramise stabiilsus püsib hea (alla 1% vea,  $36^\circ$ ) ratta sihtkiirustel 120 kuni 240 mm/s, millest viimane vastab pöörlemiskiirusele ligikaudu 57 pööret minutis ehk pisut alla ühe pöörde sekundis. Suuremate kiiruste korral kasvab pidev viga lineaarselt kuni kiiruseni 480 mm/s, misjärel tõuseb palju järsemini. Pideva puudujäägi suurematel kiirustel võib tingida rataste libisemine, mille omakorda võis põhjustada liiga suur nurkkiirendus.



Joonis 28.  $3600^\circ$  pööramise käsu järel sihist puudu jäänud nurk sõltuvalt rataste sihtkiirusest.

Roboti ringjoone kaare sõitmise täpsuse määramiseks asetati robot iga kord ligikaudu samasse algpositsiooni, misjärel robot liikus käsu `drive_arc` põhjal, kus parameetriteks oli seatud pöördenurk  $4 \cdot 360^\circ$  (neljakordne täisring) ja raadiuseks 615 mm. Kogu protsess jäädvustati pealtvaates videole keskpunktiga eeldatava trajektoori (ringjoonte) keskpunktis. Iga sihtkiiruse kohta sooritati üks sõitmiskatse. Roboti trajektoor määrati videosalvestiselt roboti juhtmooduli ventilaatori asukohta jälgides, kasutades tarkvara Blender. Joonisel 29 on toodud roboti trajektoor eri sihtkiirustel ja ligikaudne sihttrajektoor. Valdavalt järgib robot ringjoont üsna täpselt, kuid tahetust pisut suurema raadiusega; samas varieerub täispööretest sõidetav osa nii alla kui ka üle soovitud teepikkuse. Kiirusel 400 mm/s tekkis trajektooris pidev ühesuunaline triiv, kiirusel 800 mm/s nihkus robot esimese veerandpöörde jooksul, misjärel järgis mitmekordse ringjoone kujulist trajektoori.



Joonis 29. Nelja päripäeva raadiusega 615 mm täisringi sõitmise trajektoor sõltuvalt sihtkiirusest.

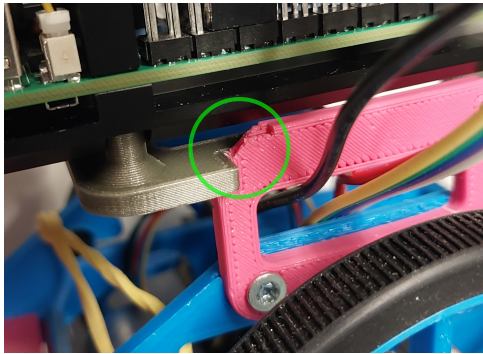
## 6.5 Vastupidavus

Vastupidavuse testimiseks sõideti robotiga sihtkiirusel 840 mm/s eri nurkade all vastu metallist lauajalga, mis on levinud takistuseks klassiruumides. Otsesuunas sõites sõideti vastu jalga 41 korral ning tagurpidi sõites 13 korral. Otsesuunas sõites kukkus robot kahel korral kokkupõrke tulemusel külili. Roboti kere ei saanud katsete käigus nähtavalt kannatada, kuid aku liikus mitmel korral üle eesmise distantspuksi, aku alarm eraldus mitmel korral enda asendist ning mõned mootorite juhtimise juhtmed liikusid osaliselt RPi poolel pesast välja. Väljaulatuvate juhtmete tõttu liikus robot mitmel korral lauajalga kerega tabamata edasi erinevas suunas, sealhulgas kohati tiireldes ümber jala. Tagurpidi sõites tabas jalga peamiselt aku kaabel, mis deformeerus elastselt.

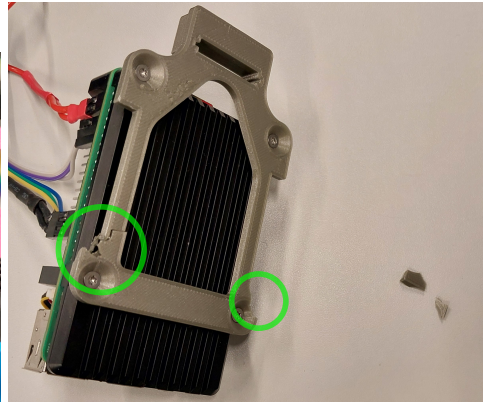
Arenduse käigus ilmnas, et üks RPi'd ja ühendusplaati ühendav toitejuhe (kahe ühendusega) ei püsinud ühendusplaadi pool hästi ning tuli kohati roboti põrutuste peale hetkeks lahti, lülitades RPi välja. See puudujääk parandati konkreetsel juhul pistikut soojuslikult töödeldes. Samas ilmnas testide vahel, et mõned mootori juhtimise ühendused olid RPi pool lahti tulemas.

Robot kukkus arenduse ja testimise käigus tahtmatult kahel korral laualt põrandale, tingides mõnede detailide purunemised. Mõlemal juhul kukkus robot ligikaudu 88 cm kõrguselt linoleumpõrandale. Esimesel juhul eraldus parempoolse külgmise kinnitusplaadi tagumine

juhtmooduli raami hoidev nurk (joonis 30a). Teisel juhul purunesid juhtmooduli raami kaks kinnitavat nurka ning ühe poole ühendustala (joonis 30b). Mõlema kukkumise tulemusena eraldus juhtmoodul koos raamiga ülejäänud robotist ning parandamiseks tuli kahjustada saanud detail asendada uuega.



(a) Esimene purunemine.



(b) Teine purunemine.

Joonis 30. Kukkumiste tagajärjel purunenud detailid.

## 7. Arutelu

### 7.1 Järeldused

Robot on otsesõidus ka üle pikkade distantside täpne, säilitades distantstil 6143 mm täpsuse vähemalt 0,6% otsesõidu suunas ning samal distantstil. Roboti ristisuunaline liikumine otsesõidul on ebatäpsem, saavutades distantstil 6143 mm kiirustel 200 kuni 600 mm/s sõidusuunaga ristisihilise vea kuni 265 mm. Seejuures näib peamine viga tekkivat just sõidu alguses või lõpus ehk madalal kiirusel kiirendamisel. Pööramise puhul on täpsusel suur sõltuvus sihtkiirusest; viga jäi 3600° pööramisel ratta sihtkiirustel 120 kuni 240 mm/s alla 1%, kuid oli kiirusel 720 mm/s kuni 11%. Hetkene kõrge taseme liides ei tee kiiruse määramisel ega kiirendamisel vahet otsesõidul ja pöördliikumisel, mis antud tulemuste põhjal pole soovitatav: pööramine peaks täpsete tulemuste jaoks toimuma palju kitsamas kiiruste vahemikus kui otsesõit.

Mootori määratud tippkiiruse põhjal (takistuseta) on roboti ratta tippkiirus ligikaudu 920 mm/s. Samas selgus katsetades, et robot hakkas sihtkiirust 880 mm/s ületades juhtimise üle kontrolli kaotama; samuti on ristisihis kõrvalekalde ja kohapeal pöörlemise testides märgata, et kiirusel 800 mm/s on sõitmine pikkadel distantssidel ebatäpne. Eeltoodu põhjal ei katsetatud roboti liikumist suuremate kiirustega ning loetakse roboti efektiivseks maksimumkiiruseks 800 mm/s.

Roboti aku tühjeneb roboti aktiivsel kasutamisel ligikaudu kaks korda kiiremini kui jõudeolekus. Eeldades, et nende töörežiimide vahel saab vabalt vahetada, piisaks aku laetusest roboti käitamiseks 3,5 h (üks praktikumiaeg) ligikaudu 25% ajast robotit aktiivselt liigutades. See osa tundub kasutuskõlblik, arvestades, et valdava osa ülesannete puhul kulub juhtkoodi kirjutamisele palju kauem aega kui lahenduse testimisele. Samas muudab jõudeoleku voolutarbimist tõenäoliselt kasutajapoolne arenduse seadistus, näiteks see, kas koodi muutmiseks kasutatakse terminalipõhist protokollit või videoedastust.

Kukkumiste tagajärjel purunenud detailid näitavad, et tõenäoline purunemise koht on juhtmooduli raami ja külgmise kinnitusplaadi liitekoht. Asukoht näitab, et tõenäoliselt sai löögi kõrgel asuv juhtmoodul; samas ei leitud juhtmoodulil kahjustusi, mille tingis ilmselt mooduli alumiiniumkorpus ning teise detaili purunemine, mis neelas osa energiast. Mõlemad purunenud detailid on hõlpsasti 3D-prinditavad: kasutatud printeril kulub külgmise kinnitusplaadi printimiseks 11 min ning juhtmooduli raami printimiseks 40 min. Juhtmooduli raami välja vahetamine nõuab vaid selle komponendi taas kinnitamist, kuid külgmise kinnitusplaadi välja

vahetamine nõuab ratta küljelt eemaldamist. Seega on purunemiste korral asendusdetaili hankimine üsna lihtne, kuid asenduse teostamiseks vajaminev aeg varieerub.

## 7.2 Edasised plaanid

Roboti arenduse käigus ja juhendajatega arutades ilmnisid jooksvalt puudujäägid, mis segavad roboti mugavat kasutamist.

Roboti jõuülekandemehhanism on osaliselt varjestatud rattaga, samuti ei ulatu hammasrattad külje sihis külgmistest plaatidest väljapoole. Samas pole mootori hammasrattad ega hammasrataste kokkupuutepunkt eest ja pealt lähenedes kaetud, mistõttu on lihtne jätta näiteks sõrmi ja juukseid mehhanismi vahele. Seega on plaanis lisada kerele kate, mis kataks vähemalt nendest suundadest hammasrattad.

Kere disain nõuab koostamist üsna spetsiifilises järjekorras, kuna mitmed detailid varjavad teiste detailide kinnitusvahendeid. Näiteks on nii varjatud üks parema külje distantspuksi ühendus, hammasrataste paigaldamisel mootorite hammasrataste ühendusdetailide seadekruid ja akut kinni hoidev kummipael. Lisaks algse koostamise keerukusele muudab see keeruliseks ka detailide välja vahetamise, nõudes näiteks külgmise kinnitusplaadi vahetamiseks peaaegu terve külje demonteerimist. Plaanis on disaini muuta, viies kinnitusvahendid hõlpsamini ligipääsetavatesse asenditesse.

Aku ülejäänud elektroonikaga ühendamiseks keres olev XT60M pesa asukoht ja kõrvalolev külgmise plaadi kuju muudab aku pistikust tõmbamise keeruliseks, mistõttu on märksa lihtsam akut lahti ühendada pistikust tõmbamise asemel juhtmest tõmmates, mis võib aku pistiku ühendust kahjustada. Selle probleemi vältimiseks on plaanis liigutada pesa kerest väljapoole ning muuta külgplaadi kuju, et pistikut oleks lihtsam haarata.

Raspberry Pi toitelahendus üle maketeerimislaajuhtmete (DuPont) ühenduste tuleb võrdlemisi lihtsasti lahti ning testimise jooksul tuli mitu korda RPi poolseid ühendusi kohendada. Et vältida juhtmooduli volukatkestust, on plaanis kasutada voluedastuseks USB-C ühendust, mida on märkimisväärselt raskem kogemata lahti ühendada kui hetkeseid ühendusi.

Selgus, et RPi käivitamisel ja välja lülitamisel viiakse mootorite kiiruse juhtviigud olekusse, mida mootorid tõlgendavad käsuna täiskiirusel sõita. Selle vältimiseks on plaanis lisada ühendusplaadile võimekus vastavate viikude pingele läbi takisti kõrge hoida, et mootorid vastavates olukordades seisata. Samuti on plaanis muuta pesade asukohti ühendusplaadil, et parandada koostatavust ja lihtsustada aku paigaldamist.

Tarkvaraliselt ei korrigeeri kõrge rakendusliidese meetod `drive_arc` ega meetodi `steer` põhised meetodid rataste kiirust otseselt nende omavahelise läbitud vahemaa erinevuse põhjal nagu seda teeb meetod `drive_mm`. Vastav võimekus on plaanis lisada, et korrigeerida trajektoori varakult, vähendades tahtmatu triivimise ulatust.

Töö käigus loodi üks vaid mehaanilise lahendusega esimese versiooni robot ja üks täiesti töökorras teise versiooni robot, kuid projektide tarbeks ja massiliseks kasutamiseks on neid vaja rohkem. Eesmärk on luua kokku vähemalt 12 töökorras robotit, millest piisaks ühe (12 tudengiga) riistvarapraktikumi läbiviimisel kõigile tudengitele.

## 8. Kokkuvõte

Selle töö eesmärgiks oli koostada robotplatvorm, mis Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi robotikakursustes kasutuseloleva modifitseeritud GoPiGo3 platvormiga võrreldes sisaldaks uuendatud riistvara, oleks mõõtmelalt väike ning samuti õppetöös kasutamiseks piisavalt vastupidav.

Töö tulemusena valmis kaks versiooni robotist, millest viimane implementeeriti täielikult funktsionaalsena. Etappidena töötati välja platvormi mehaaniline lahendus, elektrooniline lahendus ja tarkvaralahendus. Mehaaniline lahendus koosneb roboti kere, kinnituste ja mehhanismide disainist. Elektrooniline lahendus koosneb komponentide valikust ja viikude korrektsest ühendusest. Tarkvaralahendus koosneb kolmest kihist rakendusliidestest eri abstraktsioonitasemetel roboti juhtimiseks.

Loodud ja töös kirjeldatud platvorm rahuldab valdavalt sellele seatud tingimusi, kuid roboti mõõtmed on loodetust pisut suuremad, eriti kõrguse osas. Robot on üldiselt üsna täpselt juhitud ning tarkvara võimaldab hõlpsasti väikeseid erinevusi robotite vahel parandada. Samuti annab loodud tarkvara ligipääsu roboti ja rataste liikumisele eri abstraktsioonitasemetel, võimaldades seda kasutada õppetöös eri eesmärkidel.

Platvormi on plaanis juba 2025. a sügisel rakendada Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis robotikaga seotud ainetes platvormina, millel realiseerida kursuste osaks olevaid projekte. See on ka võimalus saada tudengitelt tagasisidet roboti kasutatavuse kohta. Samuti on plaanis peale seda robotit rakendada vastavates ainetes praktikumirobotina.

Nii mehaanika, elektroonika kui ka tarkvara valdkonnas on platvormil puudujääke, mida parandada. Töös kirjeldatud puudused parandatakse järgmises iteratsioonis. Disainifailid jäetakse sellisesse seisusse, mis võimaldab ka kellelgi teisel arendust jätkata.

Platvormi loomisel kulus mõningasele eelnevale kogemusele vaatamata suur osa ajast roboti kere disainile, nõudes mitmeid detailide ümberdisainimisi ja füüsiliste detailide katsetamist, ehkki valdava osa detailide üldine kuju ja olemus said juba varakult paika. Tõenäoliselt oli oodatust suurema keerukuse põhjuseks võimalikult väikeste mõõtmete taotlemine, mis nõudis pidevalt eri detailide suhtelise asetsemise parandamist. Samuti olid ajakulukad roboti sõitmise analüüsimise osad, mida ei automatiseeritud — palju kiirem ja lihtsam oli lasta arvutil andmeid töödelda, mis õnnestus näiteks ringjoone sõitmise analüüsis.

## Viited

- [1] Xu W. ja Ouyang F. Robotic roles in education: A systematic review based on a proposed framework of the learner-robot relationships. *Educational Research Review* 47 (2025), lk 100–685. DOI: [10.1016/j.edurev.2025.100685](https://doi.org/10.1016/j.edurev.2025.100685). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1747938X25000223>.
- [2] Page B. R., Ziaeeafard S., Knop L., Rastgaar M. ja Mahmoudian N. Robotics Education To and Through College. *Robotics in Education*. Toim. Merdan M., Lepuschitz W., Koppensteiner G., Balogh R. ja Obdržálek D. Cham: Springer International Publishing, 2020, lk 101–113. DOI: [10.1007/978-3-030-26945-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26945-6_10).
- [3] Auyelbek M., Ybyraimzhanov K., Andasbayev E., Abdykerimova E. ja Turkmenbayev A. Analysis of studies in the literature on educational robotics. *Journal of Turkish Science Education* 19.4 (detsember 2022), lk 1267–1290. DOI: [10.36681/tused.2022.174](https://doi.org/10.36681/tused.2022.174). <https://mail.tused.org/index.php/tused/article/view/2156>.
- [4] Pedersen B. K. M. K., Larsen J. C. ja Nielsen J. The Effect of Commercially Available Educational Robotics: A Systematic Review. *Robotics in Education*. Toim. Merdan M., Lepuschitz W., Koppensteiner G., Balogh R. ja Obdržálek D. Cham: Springer International Publishing, 2020, lk 14–27. DOI: [10.1007/978-3-030-26945-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26945-6_2).
- [5] Karalekas, G. Vologiannidis, S. K. EUROPA: A Case Study for Teaching Sensors, Data Acquisition and Robotics via a ROS-Based Educational Robot. *Sensors* 20.9 (2020). DOI: [10.3390/s20092469](https://doi.org/10.3390/s20092469). <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/9/2469>.
- [6] Raudmäe R. Avatud robotplatvorm Robotont. Magistritöö. Tartu Ülikool, 2019. <http://hdl.handle.net/10062/64341>.
- [7] Trilobot base kit. <https://shop.pimoroni.com/products/trilobot?variant=39594077093971> (26.11.2024).
- [8] Trilobot Library. <https://github.com/pimoroni/trilobot-python/blob/main/library/trilobot/README.md> (26.11.2024).
- [9] Tricycle Bot. [https://wiki.seeedstudio.com/Tricycle\\_Bot/](https://wiki.seeedstudio.com/Tricycle_Bot/) (03.12.2024).
- [10] MicroROS-Pi5 ROS2 Robot Car for Raspberry Pi 5. <https://category.yahboom.net/collections/ros-robotics/products/microros-pi5> (03.12.2024).
- [11] Create 3 Robot. <https://edu.irobot.com/what-we-offer/create3> (15.05.2025).
- [12] 3pi+ 2040 Robot - Standard Edition (30:1 MP Motors), Assembled. <https://www.pololu.com/product/5001/> (08.12.2024).
- [13] GCTronic Wiki. <https://www.gctronic.com/doc> (15.05.2025).

- [14] Mõtshärg E., Vunder V., Raudmäe R., Muro M., Drikkit I., Tšigrinski L., Köidam R., Aabloo A. ja Kruusamäe K. Robotont 3—an accessible 3D-printable ROS-supported open-source mobile robot for education and research. *Frontiers in Robotics and AI* Volume 11 - 2024 (2024). DOI: [10.3389/frobt.2024.1406645](https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1406645). <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2024.1406645>.
- [15] Introduction to microROS control board. <https://github.com/YahboomTechnology/MicroROS-Car-Pi5/blob/main/01.Introduction/3.%20Introduction%20to%20microROS%20control%20board.pdf> (03.12.2024).
- [16] Create<sup>®</sup> 3 Docs. [https://iroboteducation.github.io/create3\\_docs/](https://iroboteducation.github.io/create3_docs/) (03.12.2024).
- [17] TurtleBot 4 user manual. <https://turtlebot.github.io/turtlebot4-user-manual/overview/features.html> (03.12.2024).
- [18] e-puck2. <https://www.gctronic.com/doc/index.php/e-puck2> (10.05.2025).
- [19] DC-DC Buck Converter 7-24V to 5V 4A. <https://www.dfrobot.com/product-2240.html> (15.05.2025).
- [20] Raspberry Pi hardware. <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html> (11.05.2025).
- [21] Raspberry Pi Datasheets. <https://datasheets.raspberrypi.com/> (15.05.2025).
- [22] Raspberry Pi 4 Model B (REDUCED). <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-reduced-schematics.pdf> (09.05.2025).
- [23] FIT0441 Brushless DC Motor with Encoder 12V 159RPM. [https://wiki.dfrobot.com/FIT0441\\_Brushless\\_DC\\_Motor\\_with\\_Encoder\\_12V\\_159RPM](https://wiki.dfrobot.com/FIT0441_Brushless_DC_Motor_with_Encoder_12V_159RPM) (06.05.2025).
- [24] FIT0441 Brush-less DC Motor Connections?! <https://www.dfrobot.com/forum/topic/2253> (06.05.2025).
- [25] EasyGoPiGo3. <https://gopigo3.readthedocs.io/en/master/api-basic/easygopigo3.html> (11.05.2025).
- [26] mBot v1.1 - Blue (2.4G Version). [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Seeed%20Technology/110090104\\_Web.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Seeed%20Technology/110090104_Web.pdf) (15.05.2025).
- [27] GoPiGo3 Robot. <https://github.com/DexterInd/GoPiGo3/blob/master/Hardware/GoPiGo3%20Robot.stl> (15.05.2025).
- [28] Duckiebot (DB-J). <https://get.duckietown.com/products/duckiebot-db21> (15.05.2025).
- [29] Specifications - Thymio & Aseba. <https://get.duckietown.com/products/duckiebot-db21> (15.05.2025).

- [30] Base specifications. <https://theroboboproject.com/wp-content/uploads/specifications.pdf> (15.05.2025).
- [31] ActivityBot 360°Robot Kit. [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Parallax%20PDFs/32600\\_Web.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Parallax%20PDFs/32600_Web.pdf) (15.05.2025).
- [32] AlphaBot2 robot building kit for Arduino. <https://www.waveshare.com/alphabot2-ar.htm> (15.05.2025).
- [33] AlphaBot2 robot building kit for Raspberry Pi 3 Model B. <https://www.waveshare.com/alphabot2-pi.htm> (15.05.2025).
- [34] Viam Rover. <https://www.viam.com/resources/rover> (15.05.2025).
- [35] Root. <https://robotsguide.com/robots/root> (15.05.2025).
- [36] mBot Mega. <https://wiki.openlab.io/kits/mbot-mega> (15.05.2025).
- [37] IQ (2nd gen) Builds Made With IQ (1st gen) Parts. <https://plc.pd.vex.com/t/iq-2nd-gen-builds-made-with-iq-1st-gen-parts/561> (15.05.2025).
- [38] FMS 1:24 FCX24 Chevrolet K5 Blazer RTR. <https://www.fmshobby.com/products/fms-1-24-fcx24-chevrolet-k5-blazer-rtr> (15.05.2025).

## Lisa 1. Platvormide toorandmete tabel

Nimi	Laius	Pikkus	Kõrgus	Põhja kuju	Allikas
Trilobot	125?	150	75?	ristkülik, vr	[7]
MicroROS-Pi5	153	238	124	ristkülik, vr	[10]
Tricycle Bot	160?	220	125?	kolmnurk, kihid	[9]
iRobot Create 3	340	342	93	ketas	[16]
Pololu 3pi+ 2040	97	97	37?	ketas	[12]
mBot v1.1	130	170	90	ristkülik, vr	[26]
GoPiGo3	124	209	96	ristkülik, vr	[27]
Duckiebot	230	340	150	ristkülik, vr	[28]
e-puck2	70	70	45	ketas	[18]
Thymio	110	112	53	ristkülik	[29]
Robobo (telefonita)	172	200	92	ristkülik, vr	[30]
ActivityBot	115	144	100	ristkülik, vr	[31]
AlphaBot2 (kaamerata)	110	110	56	ketas	[32]
AlphaBot2 (kaameraga)	110	110	126?	ketas	[33]
Robotont 3	326	300	225	ristkülik	[14]
Viam Rover 2	295	220	70	ristkülik	[34]
Root	134	149	45	kuusnurk	[35]
mBot Mega	163	192	102	ristkülik, vr	[36]
VEX IQ BaseBot gen1	176	177	104	ristkülik, vr	[37]
1:24 FCX24 K5 RTR	129	253	128	ristkülik, vr	[38]
GoPiGo3 (mod.)	145	243	188	ristkülik, vr	ise mõõdetud

Kõik toodud mõõdud on millimeetrites. Põhja kuju puhul tähistab lühend vr põhja tasandis põhjast väljaulatuvaid rattaid. Küsimärgiga (?) on märgitud mõõdud, mis saadi pildilt mõõtmise tulemusena, võrreldes mõõdetava pikkuse pikslite arvu teadaolevale suurusele vastava pikslite arvuga (eeldades, et perspektiivist ja vaatenurgast tekkiv moonutus on tühine).

GoPiGo3 (mod.) on Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi robotikakursuste jaoks tugevalt modifitseeritud platvorm, mis põhineb levinud GoPiGo3 riistvaral.

## Lisa 2. Roboti komponentide loend

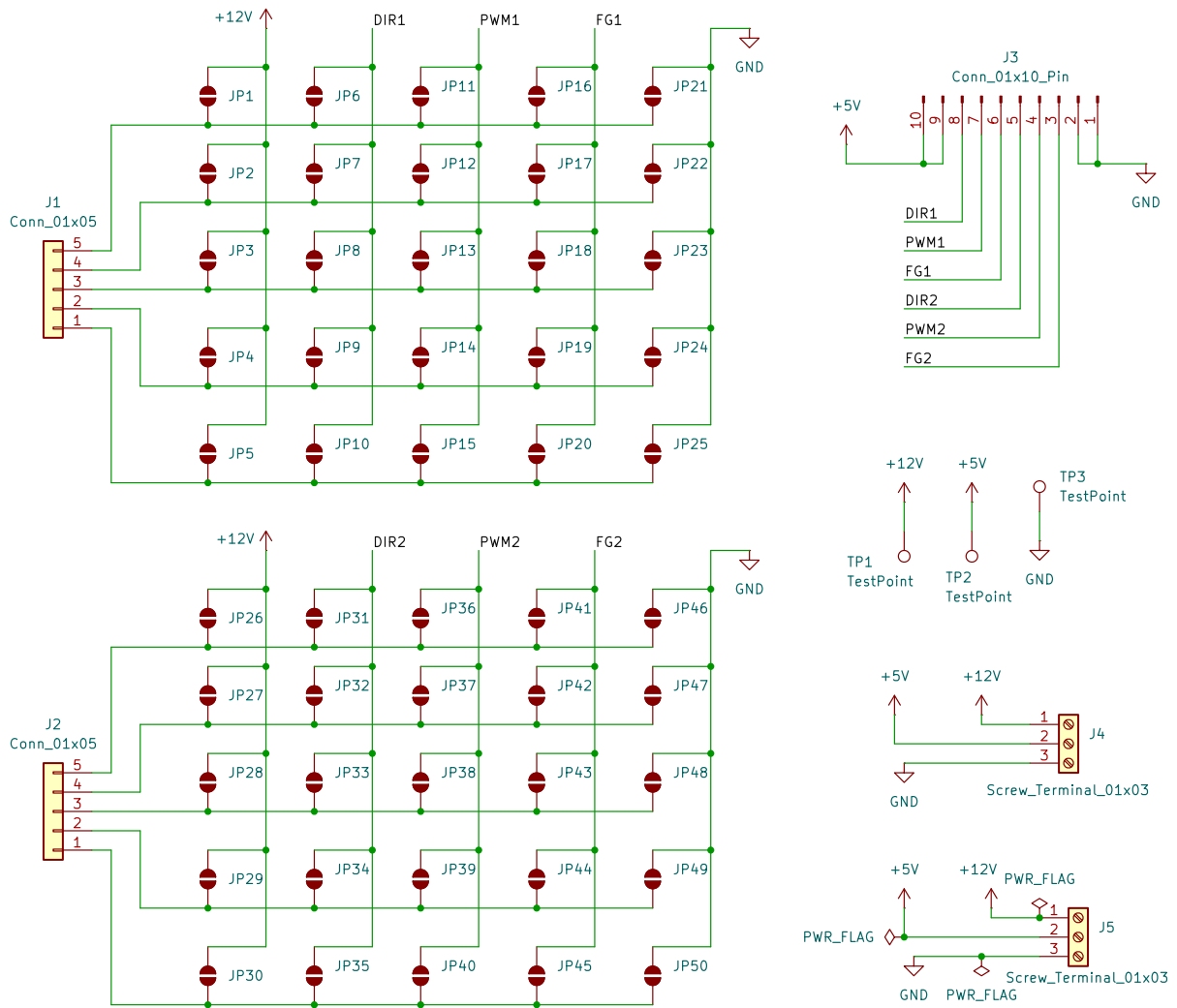
- 4x M3 6 mm peitpeaga polt
- 2x M3 25 mm peitpeaga polt
- 20x M3 10 mm peitpeaga polt
- 4x M2,5 20 mm peitpeaga polt
- 2x M3 seib
- 14x M3 mutter
- 2x FIT0441 mootor (kaabliga)
- 2x 4 mm telje ühendusdetail (Pololu #1997)
- 2x kuullaager  $6 \times 19 \times 6$  mm
- 2x rehvi (Pololu #3410)
- 4x 45 mm distantspuks
- Raspberry Pi 5
- Raspberry Pi 5 jahutuskorpus (ventilaatoriga)
- XT60M pesa (XT60E1-M)
- pingemuundur (DFR0831)
- ühendusplaat (trükkplaat)
- 2x 1 mm 5 siiniga JST SH pesa
- kummipael (60 mm pikkune)
- 6x 20 cm juhe FF DuPont (mootorite siinid)
- eraldi toodetud juhtmed:
  - 2 viiku – 2 viiku (kokku ühendatud) 20 cm juhe F-F DuPont (5 V)
  - 2 viiku – 2 viiku (üheviiguse vahega kolmeviiguses pistikus; kokku ühendatud) 20 cm juhe F-F DuPont (maa)
  - 2x 9 cm juhe (12 V, maa)

- 3x 25 mm juhe (12 V, 5 V, maa)
- 3D-prinditud detailid:
  - vasakpoolne külgplaat
  - parempoolne külgplaat
  - juhtmooduduli kinnitusraam
  - tagumine toes
  - eesmine aku hoidja
  - tagumine aku hoidja
  - toese hoidja
  - 2x mootori hammasratas
  - 2x hammasrattaga telg
  - 2x velg
  - 2x külgmine kinnitusplaat

### **Lisa 3. Tarkvaralise lahenduse kood**

Koodifailid on tööga kaasas failis `lisad.zip`.

# Lisa 4. Ühendusplaadi elektriskeem



## **Lihtlitsents**

### **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, **Marko Tsengov**,

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

#### **Väike õppeotstarbeline kaheveoline robot,**

mille juhendajad on Janno Jõgeva ja Eva Mõtshärg,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;

2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi 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.

Marko Tsengov

**15.05.2025**