Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Ingvar Drikkit

Lisaseadmete võimekuse arendamine haridusrobotile Robotont

Bakalaureusetöö (12 EAP)
Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

PhD Veiko Vunder

Tartu 2023

Resümee/Abstract

Lisaseadmete võimekuse arendamine haridusrobotile Robotont

Haridusrobootika on tähtis pedagoogika haru, mille eesmärgiks on õppurite arendamine ja robootikas vajalike inseneriteaduste õpetamine. Haridusrobootikas kasutatakse tihti modulaarseid platvorme, mille konfiguratsiooni on kerge muuta. Robotont on Tartu Ülikoolis arendatud haridusrobot, millel puudub universaalne lisaseadmete kasutamise võimalus. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli olemasolevate haridusrobotite ja lisaseadmete uurimine, et kaardistada kasutusel olevaid tehnoloogiaid ja implementatsioone, mille hulgast valiti välja Robotondile sobiv tehnoloogia erinevate lisaseadmete mugavaks integreerimiseks. Samuti disainiti töö käigus kolmanda põlvkonna Robotondi trükkplaadile lisaseadmetega suhtluseks ning nende toitmiseks vajalikud komponendid ja nendevahelised ühendused.

CERCS: T125 Automatiseerimine, robootika, control engineering

Märksõnad: haridusrobootika, lisaseadmed

Developing add-on device support for the educational robot Robotont

Educational robotics is an important branch of pedagogy, aiming to develop students and teach the engineering skills needed in robotics. Educational robotics often uses modular platforms that can be easily reconfigured using different add-on devices. Robotont is an educational robot developed at the University of Tartu that currently does not have the possibility to use universal add-on devices. The aim of this thesis is to investigate existing educational robots and solutions in order to map the technologies and implementations in use, from which a technology for universal integration of add-on devices is selected for Robotont. As an end result, Robotont's third-generation printed circuit board was fitted with the necessary components and connections for interfacing with add-on devices.

CERCS: T125 Automation, robotics, control engineering

Keywords: educational robotics, add-on devices

Sisukord

Resümee/Abstract **2**

Jooniste loetelu **5**

Tabelite loetelu **7**

Lühendid, konstandid, mõisted **8**

Sissejuhatus **9**

1 Kirjanduse ülevaade **10**

1.1 Haridusrobootika 10

1.1.1 Näiteid hariduslikest robotplatvormidest 10

1.2 Lisaseadmete tüübid 12

1.2.1 Andurid 13

1.2.2 Täiturid 13

1.2.3 Lisakontrollerid 14

1.2.4 Muu lisavõimekus 15

1.3 Lisaseadmete integreerimine 16

1.3.1 Integreerimiseks võimalikud suhtlusstandardid 16

1.3.2 Integreerimiseks võimalikud füüsilised standardid 18

2 Robotont **20**

2.1 Teine põlvkond 21

2.1.1 Üldkirjeldus 21

2.1.2 Lisaseadmete võimekus 21

2.2 Kolmas põlvkond 22

3 Töö eesmärk ja nõuded **24**

4 Lisaseadmetega suhtlemiseks siini valik ja testimine **25**

4.1 Piirangud siini valikul 25

4.2 Sobiva siini valik 26

4.3 Siini testimine 26

4.3.1 Metoodika 27
4.3.2 Tulemused 29

5 Elektroonikalahenduse ja arhitektuuri kirjeldus 31
5.1 Üldine arhitektuur 31
5.2 Valitud komponendid 31
5.3 Valiku põhimõtted 32
5.3.1 Lisaseadmete füüsilised ühendused 32
5.3.2 Lisaseadmete loogikatasemed 33
5.3.3 Platvormi toitelahendus 34
5.3.4 Alamosade integratsioon trükkplaadile 36

Kokkuvõte 38

Viited 40

Lisad 47

Lihtlitsents 48

Jooniste loetelu

1.1 Duckiebot DB21 [10] 11
1.2 mBot mudelid, (a) mBot (b) mBot Neo [15, 16] 11
1.3 (a) LEGO Mindstorms EV3 ja (b) LEGO Education Spike [20, 21] 12
1.4 OpenMANIPULATOR robotkäe kasutamine Turtlebot lisaseadmena 14
1.5 Arduino Nano arendusplaat [33] 15
1.6 (a) EV3 omatoodetud pesa ja (b) standardne RJ12 pesa 19
1.7 Näide mikroBUS (a) 6DOF IMU laiendusplaadist ja (b) pesast [43] 19

2.1 Robotondi teine põlvkond [62] 20
2.2 Robotondi teise põlvkonna juhtkontroller ja kasutajale paljastatud viigud koos mootori enkooderite ja kontrollerite laiendusplaadiga 22
2.3 Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaadi geomeetria ja lisaseadmete integreerimise jaoks tähtsate alamosade eskiis 23

4.1 Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaadil asuv 15 mm pudelikael roboti eesotsa ja külje vahel 25
4.2 Piirtingimuste testi ülesehitus: (a) sülearvuti, millega olid ühendatud I^2C (b) ülemana ja (c) alamana kasutatud NUCLEO-L476RG plaadid, mis olid omakorda ühendatud (d) Robotondi mootorite ümber keritud juhtmega 27
4.3 Puhkeolekus SCL liinil tekkinud häiritus, kui Robotondi mootor suunda vahetas 30

5.1 Lisaseadmete integratsiooni arhitektuuri skeem 31
5.2 mikroBUS seadme ja Arduino Nano paigutus Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaadi 3D-mudeli alumisel poolel 33
5.3 Skeem juhtkontrolleri ja lisaseadmete vahel paikneva I^2C siini loogikataseme muunduritest 34
5.4 Skeem Arduino Nano ja mikroBUS seadme vahel paiknevatest SPI ja UART siinide loogikataseme muunduritest 35
5.5 Skeem 3,3 V toite lahendusest lisaseadmetele ja juhtkontrollerile 35
5.6 Toitelahendus Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaadi 3D-mudelil 36
5.7 Skeem Arduino Nano toiteahelast ja (a) Robotondi trükkplaadile lisatud Schottky dioodist 37

5.8 Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaat, koos lisaseadmete kasutamise võimaldamiseks disainitud (a) toitelahenduse ja (b) pesade ning loogikataseme muunduritega 37

Tabelite loetelu

4.1 STM32F407VGT poolt toetatud siinide võrdlus 26
4.2 Muudetud parameetrid ja nende väärtused I^2C siini testide sooritamisel 28
4.3 I^2C siini sõnumitestide tulemused, viie mõõtmise aritmeetiline keskmine 30

Lühendid, konstandid, mõisted

ROS - *Robot Operating System*, tarkvararaamistik robotite arendamiseks

I^2C - *Inter-Integrated Circuit*, mitme ülema ja mitme alluvaga sünkroonne jadasiini standard

USART - *universal synchronous asynchronous receiver-transmitter*, seadistatavate parameetritega sünkroonset ja asünkroonset jadasuhtlust võimaldav seade

SPI - *Serial Peripheral Interface*, ühe ülema ja mitme alluvaga sünkroonne jadasiini standard

CAN - *Controller Area Network*, sõnumipõhise protokolliga jadasiini standard

IMU - *inertial measurement unit*, inertsiaalandur

ToF andur - *time-of-flight* andur, laserkaugusandur

RGB - *red-green-blue*, punane-roheline-sinine

LED - *light-emitting diode*, valgusdiood

MOOC - *Massive Open Online Course*, kõigile avatud veebipõhine kursus

PWM - *pulse-width modulation*, pulsilaiusmodulatsioon

LDO - *low-dropout regulator*, lineaarne pingestabilisaator

PTC termistor - *positive temperature coefficient* ehk positiivse temperatuuriteguriga termistor

Sissejuhatus

Robootika on tähtis osa tänapäeva ühiskonnast, moodustades olulise osa tööstus- ja teenindussektorist. Tööstusrobotite müük kasvas 2021. aastal rekordiliselt, uusi roboteid paigaldati hinnanguliselt 500 tuhat ühikut ning võrreldes 2020. aastaga toimus 31% kasv [1]. Ka teenindusrobotite müük kasvas 2021. hüppeliselt. Uute müükide arv oli IFRi (*International Federation of Robotics*) andmetel ligikaudu 121 tuhat ühikut, mis eelneva aastaga võrreldes tähendas 37% kasvu [2].

Selleks, et pidevalt arenevale robootikatööstusele tulevikus spetsialiste leiduks, on tähtsale kohale tõusnud haridusrobootika. Haridusrobootika on kiiresti arenev pedagoogika haru, mis tegeleb vajalike inseneriteaduste õpetamisega. Haridusrobootikas kasutatakse tavaliselt õppevahendina juba olemasolevaid robotplatvorme, eriti kui on tarvis alustada baasteadmiste õpetamisega. Olemasoleva platvormi rakendamine võimaldab spetsialiseeruda erinevate robootika kontseptsioonide edasi andmisele, ilma et õppijal oleks vaja eelnevalt omandada keerulisemaid riistvara arendamise oskusi. [3]

Tartu Ülikoolil on enda hariduslik robotplatvorm: Robotont. Robotont on disainitud eelkõige avatud lähtekoodiga ROS (*Robot Operating System*) tarkvaraarendusplatvormi õpetamiseks, et õpilased saaksid teada, kuidas käib robotite kõrgemal tasemel programmeerimine ja juhtimine. Renno Raudmäe magistritöö raames valmisid esimesed kaks Robotondi põlvkonda. [4]

Koostöös teiste tudengite lõputöödega valmib kolmas Robotondi põlvkond, mis lisab Robotondile funktsionaalsust ja parandab teise põlvkonna kitsaskohad. Selleks, et tulevikus hõlbustada erinevate andurite katsetamist ja pakkuda uusi võimalusi Robotondi rakendamiseks ja selle jaoks hariduslike materjalide koostamiseks, tuleks pakkuda standardset lisaseadmete lahendust. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on olemasolevate haridusrobotite ja lisaseadmete uurimine, et kaardistada kasutusel olevaid tehnoloogiaid ja implementatsioone. Seejärel tuleb välja valida Robotondile sobiv tehnoloogia lisaseadmete paindlikuks integreerimiseks. Samuti disainitakse töö käigus kolmanda põlvkonna Robotondi trükkplaadile lisaseadmetega suhtluseks ning toitmiseks vajalikud komponendid ja nendevahelised ühendused.

1 Kirjanduse ülevaade

1.1 Haridusrobootika

Üleilmastumine on endaga kaasa toonud tehnoloogia ja ühiskonna kiire arengu. Selleks, et uuendused tehnoloogia alastel valdkondadel tulevikus jätkuksid, tuleb juba varajases eas õppuritele robootika kontseptsioone tutvustada. Robotite kasutamine õppevahenditena on vajalik, et ajakohastada ja arendada olemasolevaid õppekavasid, mis on liigselt keskendunud teooria omandamisele [3]. Haridusrobotite kasutamisel saavad õppurid lisaks teoreetilistele teadmistele ka praktilisi kogemusi erinevatest inseneriteadustest, näiteks mehaanika, elektroonika ja programmeerimine. Robootikapõhine õpe on näidanud potentsiaali nii madalamates kooliastmetes [5] kui ka ülikoolides [6], edendades interdistsiplinaarset õpet ja arendades õppurite tehnilist mõtlemist.

Haridusrobootika teeb eriliseks õppija ja õpetaja ülesanded klassiruumis. Selleks, et haridusrobootikast kasu oleks, tuleb õppuril astuda aktiivsesse rolli. Õpetaja jääb tahaplaanile ning tema töö on vajadusel õppureid suunata. Tähtis on see, et õppija jõuaks katsetamise käigus ise lahenduseni. Sel põhjusel on klassiruumides kasutamiseks mõeldud robotid tihti disainitud modulaarselt. Modulaarne disain võimaldab õppuril tutvuda erinevate andurite ja täituritega ning otsustada ise, mis on lahenduseks vajalik. Lisaks sellele muudab modulaarne disain roboti kasutamise paindlikumaks, nii piisab ühest robotplatvormist, et pakkuda erinevaid õpiväljundeid. [3, 7]

1.1.1 Näiteid hariduslikest robotplatvormidest

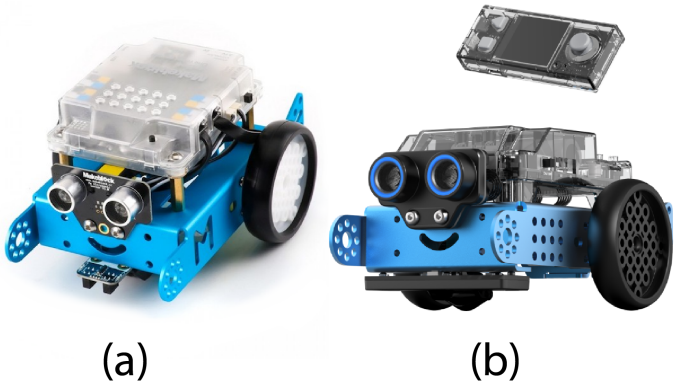
Järgmiseks tutvustan paari hariduslikku robotplatvormi, mida on võimalik kasutada robootika õpetamiseks nii koolilastele kui ka värsketele tudengitele. Kuigi haridusroboteid on erinevaid: droonid, manipulaatorid jne, siis keskendun tutvustusel just platvormidele, mis esindavad ratasrobootikat.

Duckiebot on Duckietowni projekti alla kuuluv haridusrobot, mille esimene versioon valmis 2016. aastal Massachusettsi Tehnoloogiainstituudis toimuva kursuse jaoks [8]. Duckietowni projekti eesmärgiks on võimalikult vähese riistvaraga pakkuda platvormi robotite autonoomse käitumise uurimiseks ja õpetamiseks. Duckiebot on suunatud üliõpilastele või keskkooli lõpetajatele ning õpetamise juures pööratakse tähelepanu just roboti programmeerimisele ning

käitumismustrite loomisele. Seetõttu on Duckieboti riistvara võimalikult minimaalne ning ei toeta modulaarset lähenemist [9].

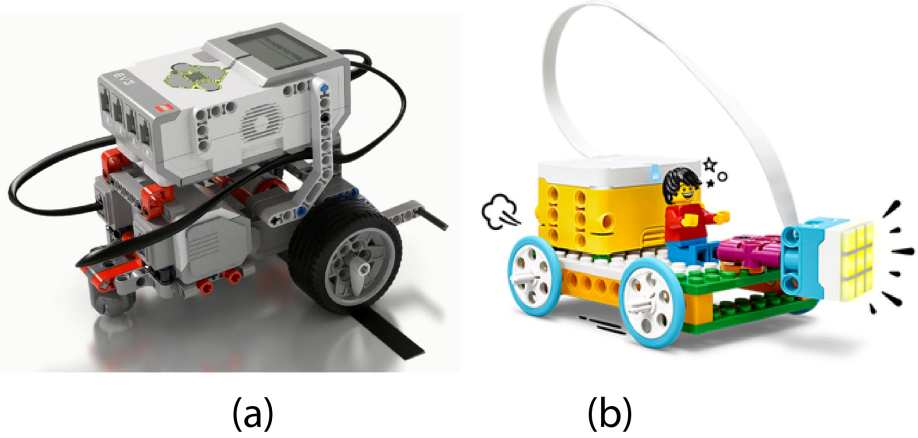
Joonis 1.1: Duckiebot DB21 [10]

mBot Neo, teise nimega mBot2 on Makeblock Educationi robotikomplekt, mis ilmus turule 2021. aastal. Tegu on mBoti edasiarendusega, eelkäijaga võrreldes on mBot Neo baaskomplektil rohkem andureid ning kasutatakse kaasaegsemat protsessorit koos uue emaplaadiga [11]. mBot ja mBot2 on suunatud eelkõige põhikooli õpilastele või lihtsalt inimestele, kes soovivad robootika õppimisega alustada, sest suurem fookus on visuaalprogrammeerimisel ja roboti füüsilisel kokkupanekul. mBoti disain on modulaarne, võimaldades lisaseadmete kinnitamist. mBoti esimest mudelit kasutati 2018. aastal Tartu ülikooli MOOC kursusel "Robootika puust ja punaseks" ning esimene põlvkond on Ameerika Ühendriikide Amazonis 2198 arvustuse põhjal hinnanguga 4,6/5 [12, 13]. Vaadates mBot Neo Amazoni arvustusi, tuleb välja, et teisel põlvkonnal on probleeme lapsesõbralike õppematerjalide saadavusega ja Makeblocki enda tarkvaraga, kuid tegu on siiski riistvaraliselt kvaliteetse robotplatvormiga [14].



Joonis 1.2: mBot mudelid, (a) mBot (b) mBot Neo [15, 16]

LEGO Mindstorms EV3 on LEGO hariduslik robotplatvorm, mis tuli turule 2013. aastal ning oli enne tootmise lõpetamist müügil 8 aastat [17]. LEGO on loonud EV3le ka ise õppematerjale, mis on suunatud just 10 kuni 16 aastastele [18], kuid LEGO komplektid on kasutust leidnud ka kõrghariduses [19]. EV3 komplektid on üles ehitatud modulaarselt, LEGO klotside ja detailide kasutamine laseb õppuritel eksperimenteerida roboti kuju ja andurite/täiturite konfiguratsiooniga. Roboti südames on pardaarvuti, mille külge ühenduvad juhtmete abil tööks vajalikud moodulid.



Joonis 1.3: (a) LEGO Mindstorms EV3 ja (b) LEGO Education Spike [20, 21]

LEGO Education Spike on LEGO uus hariduslik robotplatvorm, mis on mantlipärijaks eelnevalt mainitud EV3 platvormile. Spike kasutab uut pardaarvutit, millel on juba sisseehitatud mõni eelnevalt EV3 jaoks moodulina saadaval olev andur [23]. Funktsionaalselt on Spike väga sarnane EV3ga, robotite ehitamiseks kasutatakse LEGO klotse ning moodulid kinnituvad juhtmetega pardaarvuti külge. See-eest ei ole EV3 ja Spike moodulid ühilduvad, uue pardaarvutiga võeti kasutusele ka uued füüsilised ühendused ja protokollid [24].

1.2 Lisaseadmete tüübid

Lisaseadmete all on käesolevas bakalaureusetöös mõeldud roboti külge kinnitatavaid seadmeid, mille ühendamine ja eemaldamine on roboti konfiguratsiooni muutmise eesmärgil tehtud võimalikult lihtsaks. Lisaseadmeid võib liigitada nende funktsiooni järgi: andurid, täiturid, lisakontrollerid jne. Tihti on piir lisaseadmete ja roboti vahel hägune ning teatud tingimustel võib lisaseadmeks olla teine robot (näiteks robotmanipulaator), mis sisaldab omakorda andureid, täitureid ja kontrollerit.

Vaadates eelnevalt mainitud haridusroboteid, on lisaseadmete mõiste tihedalt seotud roboti

modulaarsusega. Näiteks LEGO robotite puhul on kõiki kaasas olevad andureid ja täitureid pardaarvuti küljest kerge eemaldada ja üksteise vastu välja vahetada. Seega antud käsitluses on kõik LEGO moodulid lisaseadmed. LEGO robotitele vastandub Duckiebot, mille disain on staatiline ning ei eeldata baaskonfiguratsioonist kõrvale kaldumist, mistõttu pole ka Duckieboti andurid ja täiturid lisaseadmed. Haridusroboti modulaarsus ja lisaseadmete kasutamine lisab väärtust selle kasutamisele klassiruumis [7].

Järgmisena tutvustan erinevaid lisaseadmete tüüpe, tuues välja nende funktsionaalsuse, kasulikkuse ja olemasolevad seadmed.

1.2.1 Andurid

Andur on seade, mille abil on võimalik mõõta füüsikalisi suurusi ning muuta kogutud info süsteemi jaoks loetavaks elektriliseks signaaliks [25].

Roboti lisaseadmena pakub andur roboti töö parandamiseks varem puudulikku infot. Näiteks saab robotile lisaseadmena kinnitada IMU (inertsiaalanduri), mille abil saab robot täpsemat infot oma joon- ja pöörlemiskiiruse kohta. Selle info abil saab robot korrigeerida vastavalt vajadusele mootorite kiirust.

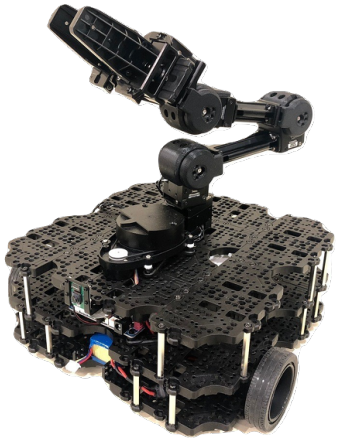
Erineva otstarbega andureid on palju, kuid robootikas asjakohased on näiteks: erinevad kaugusandurid (laser, ultraheli), värvitundlikud valgusandurid, jõuandurid, mikrofonid, infrapunaandurid, temperatuuriandurid, inertsiaalandurid, kompassid jne. Seda kinnitavad ka LEGO EV3 ja Spike andurikomplektid. EV3 baaskomplektis on anduritena kaasas puuteandurina kasutatav nupp, infrapunaandur ja värvitundlik valgusandur [22] ning eraldi toodetena on saadaval güroskoopandur ja ultraheliandur [26]. LEGO Spike baaskomplektis on jõuandur, värvitundlik valgusandur ja ultraheli kaugusandur [51]. Kasutatavad andurid töötavad tihti kas 3,3 või 5 voldi juures, vahepeal toetades ka mõlemat. Levinud on just 5 voldi tugi, sest sellel pingel töötavad andurid on kasutusel Arduino platvormil põhinevates koduautomaatika ja hobirobootika projektides.

1.2.2 Täiturid

Täitur ehk aktuaator on seade, mis muundab sisendi vastavaks väljundliikumiseks. Robootikas kasutatakse eelkõige elektrilisi täitureid, mis liiguvad elektrilise signaali alusel [27].

Lisaseadmena mõeldud täitur annab robotile uusi võimalusi ümbritseva keskkonna manipuleerimiseks või keskkonnas liikumiseks. Ümbritseva manipuleerimiseks saab lisaseadmena kinnitada täiendatava platvormi peale robotkäe. Robotkäed, mida saab

olemasolevate platvormide peale integreerida on näiteks JACO [28], uArm Swift [29] ja vabavaraline OpenMANIPULATOR [30]. Näide OpenMANIPULATOR robotkäest Turtlebot hariduslikul platformil on näha joonisel 1.4 [31].



Joonis 1.4: OpenMANIPULATOR robotkäe kasutamine Turtlebot lisaseadmena

Täiturina funktsioneeriva lisaseadme sisse on tavaliselt ehitatud juba vajalik elektroonika, näiteks mootoriga käib kaasas mootori kontroller ning kesksel kontrolleril on mooduliga vaja kasutada eelnevalt kokkulepitud suhtlusviisi. Tihtipeale on mootoriga integreeritud ka andurid, et saada tagasisidet selle asendi või kiiruse kohta.

1.2.3 Lisakontrollerid

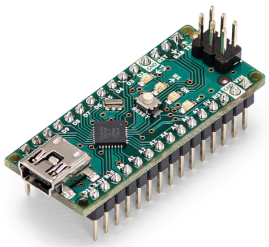
Lisaseadmena on võimalik robotile kinnitada ka lisakontrollereid, mis saavad parandada roboti arvutusvõimsust, tegeledes anduritelt kogutud andmete töötlemisega või täiturite juhtimisega. Vaadatud haridusrobotitel ei ole lisaseadmena kontrolleri ühendamine võimalik, täiturite puhul on juhtkontroller integreeritud juba seadme sisse ning andurite puhul jooksevad ühendused andurist otse kesksesse kontrollerisse.

Lisakontrolleri ühendamise võimekus annab roboti väärtusele siiski juurde, sest see võimaldab platvormi kasutamisel leida uusi rakendusi ning pakub paindlikku lähenemist probleemidele. See-eest tõstab see süsteemi keerukust, sest kasutaja ülesandeks on lisakontrolleri programmeerimine ning tekib juurde üks potentsiaalne tõrkepunkt.

Kui tahta lisada robotile programmeeritava kontrolleri lisaseadmena ühendamise võimekust, siis robootika ja automaatikaprojektides levinud Arduino elektroonikaplatvormid on selle jaoks hea valik. Arduino toodab arendusplaate, mille südames on enamasti Atmel AVR

mikrokontroller. Mikrokontrolleri mugavamaks kasutamiseks on kontrolleri sisend- ja väljundviigud tehtud kergesti ligipääsetavaks. Arduino riistvaraga käib kaasas ka Arduino IDE, mis muudab mikrokontrollerite programmeerimise lihtsamaks. Arduino riistvara kasutamiseks on võimalik internetist leida palju abistavat materjali, ainuüksi Arduino enda foorumisse postitatakse iga nädal üle 500 uue küsimuse ja teema [32]. Materjalide suur hulk lihtsustab arendusprotsessi ja võimaldab kasutajal saada foorumit kasutades ka teiste käest kohest tagasisidet.

Arduino Nano on Arduino kõige odavam ja kõige väiksem arendusplaat. Nano on kõigest 45 mm pikk ja 18 mm lai. Nano mikrokontrolleriks on küll võrdlemisi vana ATmega328P, kuid lisaks originaalsele Arduino Nanole on müügil ka tagasiühilduv Arduino Nano Every, mis kasutab uuemat ATMega4809 mikrokontrollerit. Mõlemad mainitud Nano versioonid on mõeldud töötama 5 V, kuid nii ATmega328P kui ka ATMega4809 taktkiiruse langetamisel saab kasutada ka 3,3 V. [33, 34]



Joonis 1.5: Arduino Nano arendusplaat [33]

Arduinole lisaks leidub veel programmeeritavaid kontrollereid. Näiteks Espressif ESP32 arendusplaadid [35], erinevad STMicroelectronics arendusplaadid [36] ja Raspberry Pi Pico arendusplaat [37].

1.2.4 Muu lisavõimekus

Lisaks anduritele, täituritele ja kontrolleritele saab robotitele lisaseadmete abil anda veel kasulikke funktsioone.

Näiteks saab ühendatava mooduli abil lisada robotile erinevate juhtmevabade tehnoloogiate tuge, võimaldades roboti väliseks suhtluseks kasutada erinevaid standardeid: Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee, LoRaWAN. Tihti on mingi juhtmevaba standard roboti baaskonfiguratsioonis olemas ning ei vaja lisaseadmeid juhtmevaba suhtluse tagamiseks. Näiteks LEGO EV3 pardaarvuti, mille sisse on ehitatud Bluetooth võimekus. Siiski leidub tahe ka teiste juhtmevabade

tehnoloogiate kasutamiseks, sest samale robotile on kasutajad teinud enda ehitatud mooduleid, mis lisavad võimekuse Zigbee jaoks või teevad roboti raadio teel kaugjuhitavaks [38].

Lisavõimekuse näiteks on veel erinevad ekraanid ja valguslahendused, mille abil saab otse robotil informatsiooni näidata. Näiteks on Makeblocki mBot platvormile müügil lisaseadmed, mis võimaldavad LCD ekraani, 7-segmendilise näidiku ja erinevate värviliste valguslahenduste kasutamist [39].

1.3 Lisaseadmete integreerimine

Robotplatvormil lisaseadmete kasutamise võimaldamisel on tähtis osa seadmete ühilduvus robotiga. Tutvustuseks räägin lähemalt erinevatest roboti piires lisaseadmetega kommunikeerimiseks kasutusel olevatest suhtlusstandarditest ning füüsilistest pesadest lisaseadmete ühendamiseks. Mõnikord on ühe standardi piires defineeritud nii suhtlusprotokoll kui füüsiline ühendus, näiteks USB Type-C puhul [40].

1.3.1 Integreerimiseks võimalikud suhtlusstandardid

Järgmisena räägin lähemalt erinevatest võimalustest lisaseadmetega suhtlemiseks, keskendudes juhtmestatud standarditele, mida kasutatakse tavaliselt ühe süsteemi piires suhtluse implementeerimiseks.

CAN (*Controller Area Network*) on sõnumipõhise protokolliga pooldupleks jadasiini standard, mis tavakonfiguratsioonis kasutab suhtluseks diferentsiaalsignaali. CAN standardis defineeritakse nii füüsiline kui ka andmelülikiht. CAN siinil ei ole ülemat, vaid sõnumitele on määratud prioriteedid ning kogu info jõuab kohale kõikidele siinil asetsevatele seadmetele. Seadmete ühendamiseks on vaja kasutada kahte komplementaarset rada: CANH (kõrge) ja CANL (madal). Diferentsiaalsignaali kasutamine muudab CAN siini mürakindlamaks, sest komplementaarsete signaalide võrdlemisel on võimalik eemaldada ühine müra. Samas suurendab diferentsiaalsignaali kasutamine ka implementatsiooni keerukust ja hinda. [45]

CANi ei ole rakendatud laialt saadaval olevates haridusrobotites, kuid on leidnud kasutust näiteks jalgpallirobotites, kus kogu roboti pardakommunikatsioon käib üle CAN siini [46, 47]. CANi kasutatakse peamiselt autotööstuses ning tööstusautomaatikas, kus ülema puudumine siinil võimaldab kriitilistel anduritel kiiremini teavitada vajalikke alamsüsteeme [48].

USART (*universal synchronous asynchronous receiver-transmitter*) on jadaliidese standard, mis võimaldab kahe seadme vahel sünkroonset ja asünkroonset suhtlust. USARTi eeliseks

on selle paindlikus. Nimelt on standardis defineeritud ainult saatja/vastuvõtja riistvaraline ülesehitus, kasutajal on lisakontroll andmete saatmise kuju ja kiiruse üle. Puudujäägiks on siinil paiknevate seadmete arv, USARTi abil saab omavahel suhelda ainult kaks seadet. Seega on USARTi kasutavates modulaarsetes süsteemides kasutusel mitu USART liidest. Kuigi USARTi implementatsioon ei ole keeruline ning on paljude seadmete poolt toetatud, siis võib USARTi poolt antud vabadus suhtluse implementeerimisel tekitada hiljem segadust siini töös. Näiteks peavad asünkroonse suhtluse korral mõlemad osapooled kokku leppima andmeedastuskiiruses ning tuleb paika seada ühe sõnumi andmebittide arv ja paarsuskontroll. Need parameetrid tuleb seadistada saatja ja vastuvõtja programmeerimisel, enne USART liidese kasutamist. [49]

USARTi asünkroonne versioon (UART) on näiteks kasutusel lisaseadmete ühendamiseks LEGO EV3 [50] ja LEGO Spike [51] robotites ning Turtlebot4 [52] platvormil laserskaneerimisseadmega suhtluseks.

SPI (*Serial Peripheral Interface*) on ühe ülema ja mitme alluvaga täisdupleks sünkroonne jadasiini standard. SPI seadmetel on suhtluseks neli signaali: SCLK (kellasignaal), MOSI (andmed ülemalt alluvale), MISO (andmed alluvalt ülemale) ja CS (alama valik). Kõik siinil paiknevad alamad on ühendatud SCLK, MOSI ja MISO liinidega, kuid CS liin peab olema igal alluval erinev, mistõttu seadmete arvu kasvuga siinil suureneb kiiresti ka vajalike viikude hulk. Seetõttu pole SPI ka kergesti skaleeritav. [53]

SPI ei leia kasutust lisaseadmete ühendamiseks modulaarsetes haridusrobotite süsteemides, kuna tegu on liiga jäiga siiniga, mis ei ole tegelikult mõeldud seadmete pidevaks vahetamiseks. See-eest on SPI kasutusel kontrolleri vahetus läheduses asuvate kiipidega suhtlemiseks, sest see pakub lihtsat ja kiiret täisdupleks suhtlust. SPId kasutatakse, et näiteks suhelda lisamäluga või analoog-digitaal muunduritega [53].

I^2C (*Inter-Integrated Circuit*) on sünkroonne pooldupleks jadasiin, mis kasutab seadmete adresseerimist, võimaldades ühel siinil suhtlust mitme ülema ja alama vahel [54]. I^2C siinil suhtlemiseks on vaja seadmete vahele tekitada kaks ühist liini: üks kellasignaali (SCL) jaoks ja teine andmete edastamiseks (SDA). Info saatmine I^2C siinil toimub pakettide abil, kus saadetav info kapseldatakse I^2C paketi sisse. Iga saadetud baidi järel peab sõnumi saaja saatma siinile jaatuse, mis annab saatjale märku, et suhtlusega on kõik korras. Kuna I^2C kasutab avatud kollektoriga disaini, siis selle kasutamiseks on mõlemale liinile vaja lisada ainult tõmbetakisti, aktiivseid kiipe I^2C siinile juurde lisama ei pea. [55]

I^2C on haridusrobootikas levinud standard, mida kasutavad just lisaseadmete ühendamiseks näiteks LEGO EV3 [50], mBot [56] ja EZ-Robot [57]. Ka Duckiebotis kasutatakse alamosade

vaheliseks suhtluseks I^2C siini [58], kuid eelnevalt käsitletud definitsiooni põhjal pole tegu otseselt lisaseadmete suhtlusega.

Lisaks mainitud suhtlusprotokollidele on veel mitmeid võimalusi lisaseadmetega suhtluseks. Näiteks USB (*Universal Serial Bus*) protokoll, mida kasutab Turtlebot4 [52], et suhelda platvormile kinnitatud sügavuskaameraga või INTERBUS siin, mis on mõeldud tööstuskeskkondades sensorite/täituritega suhtluse jaoks [59]. Võimalik on ka juhtmevabade võimaluste kasutamine, kuid need on kasutusel pigem tervete robotite või süsteemide vahelisel suhtlusel, näiteks hariduslik platvorm Thymio, mida on kasutatud parverobootika õpetamisel [60].

1.3.2 Integreerimiseks võimalikud füüsilised standardid

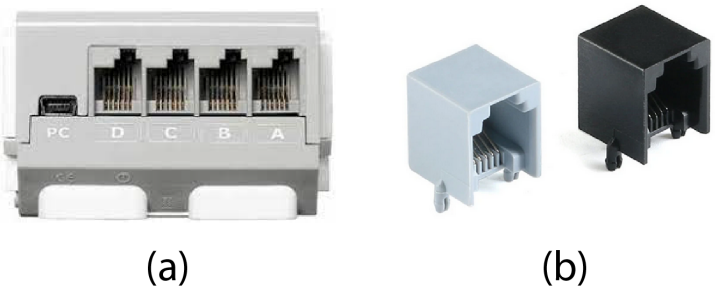
Lisaseadmete toitmiseks ja nendega suhtlemiseks on seega vaja luua füüsiline ühendus robotplatvormi ja lisaseadme vahele. Pesa ja pistiku valik on tähtis, sest selle kasutamine peab olema mugav ja veakindel.

Vaadates eelnevalt toodud LEGO ja Makeblock haridusroboteid, on näha ettevõtluse ärihuvidest tingituna poliitikat, kus konkurentide ja ka teiste standardsete vabavaraliste lisaseadmete ühildamine oma robotplatvormiga ei ole ametlikult toetatud või on raskendatud. Pesad on disainitud ja toodetud spetsiaalselt enda toodete jaoks ning puudub dokumentatsioon pesas paiknevate ühenduste funktsioonidest.

Näiteks LEGO EV3, mille füüsilise liidese funktsioon oli turule tulekul varjatud. Pesana kasutab EV3 modifitseeritud RJ12 standardit, kus mehaanilise ühenduse kindlustamiseks mõeldud sakk on liigutatud pesa äärde, pesade erinevus on näha joonisel 1.6. Sellise otsuse tõttu tuli moodulite ühendamiseks vajalike lisakaablite ostmisel need kas otse LEGOlt soetada või käepäraste vahenditega ühendusi sobivaks kohandada. Tänu aktiivsele kasutajaskonnale on ettevõtte väliselt loodud põhjalik dokumentatsioon EV3 pesade funktsioonidest, mis hõlbustab EV3le füüsiliste ühenduste tegemist. [41]

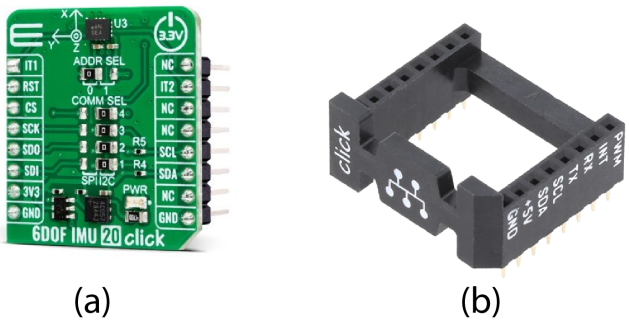
Omaloodud füüsilise standardi arendamine ei ole mõttekas, eriti kui pole vahendeid platvormile enda disainitud seadmete tootmiseks või soovitakse luua täielikult vabavaralist platvormi. Sel juhul oleks vaja kasutada avatud standardiga pesa, mille jaoks on toodetud juba lisaseadmeid.

mikroBUS on üks selline avatud standardiga pesa. Tegu on MikroElektronika poolt arendatud avatud standardiga, mis defineerib lisaseadmete (laiendusplaatide) ja nende ühendamiseks vajaliku pesa kuju ning paneb paika viikude funktsioonid. Pesa jaoks saab kasutada kahte



Joonis 1.6: (a) EV3 omatoodetud pesa ja (b) standardne RJ12 pesa

standardset 2,54 mm sammuga viigupäist, mis asetsevad kahes reas, üksteisest 20 mm kaugusel. Mõlemas päises on kaheksa viiku. Müügil on ka spetsiaalne mikroBUS pesa, mis on näha joonisel 1.7 koos ühe mikroBUS lisaseadmega. Standardis on defineeritud lisaks pesale ka viikude funktsioonid. Ühel küljel on funktsionaalsus I^2C ja UART liideste jaoks, lisaks on viigud PWM (pulsilaiusmodulatsioon) signaali ja riistvaralise katkestuse jaoks. Teisel küljel on viigud SPI, analoogsignaali ja taaskäivitussignaali jaoks. Toiteks kasutavad mikroBUS lisaseadmed 5 või 3,3 volti. Standardis on toodud kolm mikroBUS laiendusplaadi suurust: S, M ja L. Kõik suurused kasutavad sama pesa, erinevuseks on lihtsalt lisaseadme pikkus. [42]



Joonis 1.7: Näide mikroBUS (a) 6DOF IMU laiendusplaadist ja (b) pesast [43]

mikroBUSi ökosüsteem on suur, kokku on MikroElektronika kodulehel müügil 1469 erinevat lisaseadet. Tegu ei ole ainult anduritega, saadaval on ka erinevad siiniliidesed, kasutajaliidesed, juhtmevabad transiiverid, mäluseadmed, heliseadmed jne [44]. mikroBUS on kasutusel ka Tartu Ülikooli kursusel ”Manussüsteemid”, kus STM32F429I-DISCO arendusplaadile on disainitud laiendusplaat vajalike pesadega.

2 Robotont

Robotont on Tartu Ülikooli oma haridusrobot, mis on edasiarendus tudengite poolt tehtud jalgpalliroboti standardlahendusest. Mainitud standardlahendust kasutati, et osaleda Eestis toimuval iga-aastasel Robotex robotivõistlusel. Renno Raudmäe 2019. aasta magistritöö raames arendati, dokumenteeriti ja toodeti Robotondi kaks esimest põlvkonda. Nendega loodi riistvaraline alus, mille abil on võimalik õpetada gümnasistidele ja üliõpilastele algteadmisi robotite ja nende juhtimise kohta. Robotondi juhtimiseks kasutatakse avatud lähtekoodiga ROS tarkvara, mis võimaldab erinevate teekide, tööriistade ja kõrgtaseme programmeerimiskeelte kasutamist. Teine põlvkond on näha joonisel 2.1. [4]

Samal aastal valmis Madis Kaspar Nigoli magistritöö, mille eesmärgiks oli Robotondi tarkvaraline arendamine, Robotondile õppematerjalide valmistamine ning nende testimine. Kuna valminud õppematerjalid on suunatud just gümnaasiumitasemele ning värsketele tudengitele, siis alustatakse täitsa algusest. Materjalides tutvustatakse Linuxi, programmeerimise, robotite ja ROSi aluseid. Nagu eelnevalt mainitud, siis juba olemasoleva robotplatvormi eeliseks on see, et õppurid saavad keskenduda eelmainitud teemade põhiteadmiste omandamisele, ilma et peaksid läbima keerulist ja aegavõtvat riistvaraarenduse protsessi. Praktikumides kasutatakse andurina Robotondile juba kinnitatud kaamerat, modulaarsete andurite lisamine ja kasutamine ei ole osa kursusest. [61]

Robotondi kursustes kasutamine ei ole selle ainus hariduslik rakendus. Nende paari aasta

Joonis 2.1: Robotondi teine põlvkond [62]

jooksul, mis on möödunud Raudmäe ja Nigoli magistritöödest, on Robotonti mainitud

mitmetes bakalaureusetöödes. Osad tööd on mõeldud Robotondi edasiarendamiseks, üheks näiteks on Ranno Mäesepa töö, mille raames töötati Robotondile välja takistuste vältimise lisamoodul [63]. Lisaks töödele, mille eesmärgiks on konkreetselt Robotondi edasiarendamine, on ka bakalaureusetöid, mille väljundit on tänu Robotondile võimalik testida. Näiteks Davis Kruminse töö, mille eesmärgiks oli ROS robotitele virtuaalse klassiruumi arendamine [64]. Robotont leiab kasutust ka teadustöödes, näiteks Tartu Ülikoolis välja töötatud robotite tarkvararaamistiku TeMoto testimisel [65].

2.1 Teine põlvkond

2.1.1 Üldkirjeldus

Robotondi teise põlvkonna kere on disainitud nii, et robotit oleks kerge lahti võtta ja hooldada. Lisaks sellele on kõik detailid freesitud polükarbonaadist ning ühendatud peamiselt kalatappidega. [4]

Robotondil on kolm rattamoodulit: üks moodul koosneb Pololu 37Dx68L mootorist, MC33887l põhinevast mootori kontrollerist ja omnirattast. Mootorite juhtimisega ja kooderitest saadud odomeetria töötlemisega tegeleb NUCLEO-L476RG arendusplaat, mis on teisisõnu Robotondi juhtkontroller. Juhtkontrollerilt saab infot Robotondi pardaarvuti, milleks on Intel NUC7i5BNK. Navigeerimiseks on kasutusel Intel Realsense D435 kaamera, mis on ühendatud otse pardaarvuti külge. [4]

Toiteks kasutab Robotont liitiumpolümeerakut, mille jaoks on roboti sees eraldi koht olemas. Tavaliselt on aku Robotondil siiski kinnitatud takjas-kinnitusega NUCi peale, sest see hõlbustab aku vahetamist ning võimaldab kasutada ka ajaga paisunud akusid, mis muidu ei mahu roboti sisse. Robotondi mootorid ja nende kontrollerid on toite külge ühendatud läbi E-STOP nupu, mis võimaldab mootoreid pardaarvutist sõltumatult lülitada või ohuolukorras kiiresti roboti liikumise lõpetada. Mootorite kontrollerid ja toitelahendus asetsevad eraldi trükkplaatide peal, mis on üksteisega juhtmete abil ühendatud. [4]

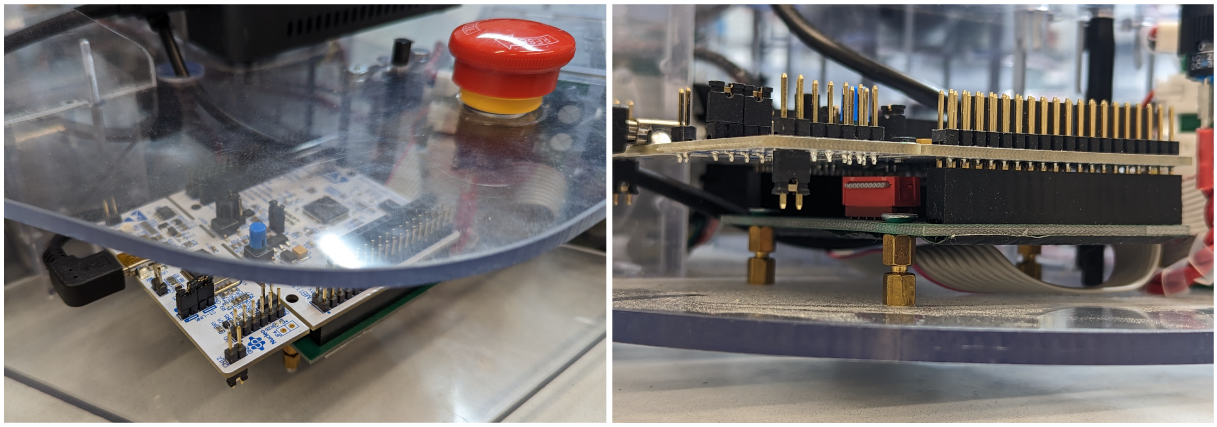
2.1.2 Lisaseadmete võimekus

Üheks võimaluseks teise põlvkonna Robotondile lisaseadmete ühendamiseks on kasutada pardaarvutil vabaks jäänud USB pesasid, läbi mille on ühilduvaid seadmeid otse Robotondi pardaarvutist võimalik kontrollida. See kitsendab lisaseadmete kasutamist ainult USB pesaga ühilduvatele seadmete või nõuab kasutaja poolt elektroonika arendust, et valmistada ise vastav seade. Tähtis detail on see, et USB pesa kaudu on võimalik suhelda kasutades UART jadasiini

standardit, mis tähendab et sellise implementatsiooni koostamine ei ole liiga keeruline. Siiski nõuab see arendusprotsessi ja tootmist ning lõpptulemusena on robotondi pardaarvuti küljes juhtmeid, mis võivad jääda nii visuaalselt kui ka funktsionaalselt segama.

Teiseks võimaluseks on lisaseadmete ühendamine läbi juhtkontrolleri. Sel juhul vastutab lisaseadmega suhtlemise eest NUCLEO-L476RG arendusplaat. NUCLEO-L476RG juhtkontroller jätab võimaluse lisaseadmete jaoks, sest kasutajale on paljastatud kõik arendusplaadi viigud. Osad neist on aga mootori enkooderite ja kontrollerite poolt kasutuses, kuid kasutajale ei ole see ilmne (joonis 2.2). Seega lisaseadmete ühendamine nõuab täpseid teadmisi Robotondi elektroonikast.

Robotondi juhtelektroonika töötab 3,3 voldiga, ühildudes seadmetega, mis jagavad sama loogikataset. Näiteks Mäesepa töös kasutatud VL53L0X ToF andurid [63]. Samas on laialt levinud Arduino platvormiga koos töötamiseks mõeldud 5 voldisel pingel töötavad lisaseadmed, mille ühendamine otse juhtkontrolleri külge pole võimalik. Selliste seadmete ühendamiseks on vaja eraldi elektroonikalahendust loogikatasemete muundamiseks. Lisaks sellele on lisaseadmete viisakaks ühendamiseks tihti vajalik eraldi koostelahendus, mis nõuab eraldi arendusprotsessi. Iga lisaseadme puhul elektroonika- ja koostelahenduse väljatöötamine on ajakulukas ning ebamugav, eriti kui on soovi kiiresti testida erinevate lisaseadmete kasutamist.



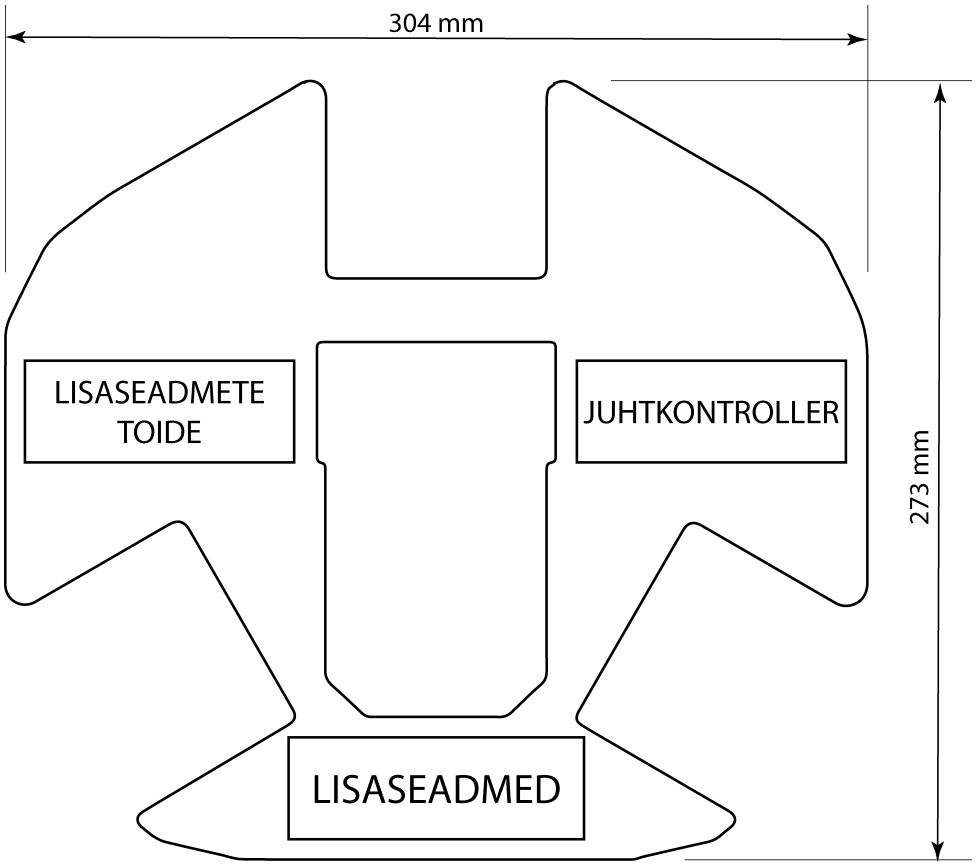
Joonis 2.2: Robotondi teise põlvkonna juhtkontroller ja kasutajale paljastatud viigud koos mootori enkooderite ja kontrollerite laiendusplaadiga

2.2 Kolmas põlvkond

Robotondi edasi arendamiseks valmib koostöös teiste tudengite lõputöödega uus Robotondi põlvkond, mille eesmärgiks on eemaldada olemasolevaid probleeme ja lisada robotile funktsionaalsust. Kolmanda põlvkonna kõige suurem muutus on see, et toitelahendus,

juhtkontroller, mootorite kontrollerid ja muu vajalik on paigutatud kõik ühisele trükkplaadile. See vähendab juhtmete vedamist Robotondi sees, mis muudab valede ühenduste tegemise raskemaks ja Robotondi visuaali puhtamaks. Lisaks sellele valmib Robotondile uus akulahendus, mis hõlbustab aku vahetust ja muudab selle ohutumaks ning laadimislahendus, mis võimaldab Robotondil automaatselt dokkida ja laadida. Kolmandale põlvkonnale tehakse ka roboti 3D printimiseks vajalikud failid ja sellest tulenevalt uus koostelahendus.

Robotondi kolmas põlvkond hakkab toetama ka lisaseadmete standardset ühendamist, mille arhitektuuriline ja elektriline disain on käesoleva töö eesmärk. Kolmanda põlvkonna trükkplaadile lisaseadmete võimekuse arendamise algusjärgus pandi rangelt paika uue Robotondi trükkplaadi geomeetria ning lepiti kokku erinevate süsteemi alamosade ligikaudne paigutus. Trükkplaadi geomeetria sõltus mootorite ja uue akulahenduse paigutusest, lisaks sooviti säilitada Robotondi üldist identiteeti. Lisaseadmete integreerimiseks oluliste tükkide asetus on näha joonisel 2.3.



Joonis 2.3: Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaadi geomeetria ja lisaseadmete integreerimise jaoks tähtsate alamosade eskiis

3 Töö eesmärk ja nõuded

Robotondi kolmandale põlvkonnale tuleb välja töötada kasutajasõbralik ja mugav ent siiski ka paindlik viis lisaseadmete integreerimiseks. Selleks tuleks Robotondi trükkplaadile välja valida standardne pesa lisaseadmete otseühendamiseks, millega ühilduvad juba turul figureerivad lisaseadmed. Lisaseadmete valikul tuleb silmas pidada toetatud suhtlusstandardeid, samuti tuleb läbi mõelda trükkplaadil paikneva juhtkontrolleri ja lisaseadmete vahelise suhtluse arhitektuur. Lahendus võiks lasta kasutada erinevaid suhtlusstandardeid ning võiks muuta võimalikuks mitmekesisemate lisaseadmete kasutamist, et Robotondile oleks võimalik leida uusi funktsioone ja rakendusi. Lisaks sellele tuleb Robotondi lisaseadmetele välja töötada eraldi toitelahendus ning kogu disaini käigus peab arvestama trükkplaadi geomeetriaga.

Järgmisena loetlen täpsemalt defineeritud nõuded Robotondi kolmandale põlvkonnale lisaseadmete integreerimiseks.

Nõuded lisaseadmete toele

- Kasutajal on võimalik kasutada erinevaid suhtlusstandardeid.
- Lahendus võimaldab kasutada uusi andureid, täitureid, lisakontrollereid pakkudes Robotondile lisafunktsionaalsust.
- Lisaseadmete ühendamine peab olema kasutaja jaoks mugav .
- Lisaseadmed peavad kasutama avatud standardiga füüsilisi ühendusi.
- Lahendus põhineb STM32F407VGT mikrokontrolleri poolt toetatud suhtlusstandarditel.

Nõuded toitelahendusele

- Toitelahendus võimaldab ühendada 3,3 V lisaseadmeid, mis tarbivad kuni 3 A.
- Toitelahendus võimaldab ühendada 5 V lisaseadmeid, mis tarbivad kuni 3 A.

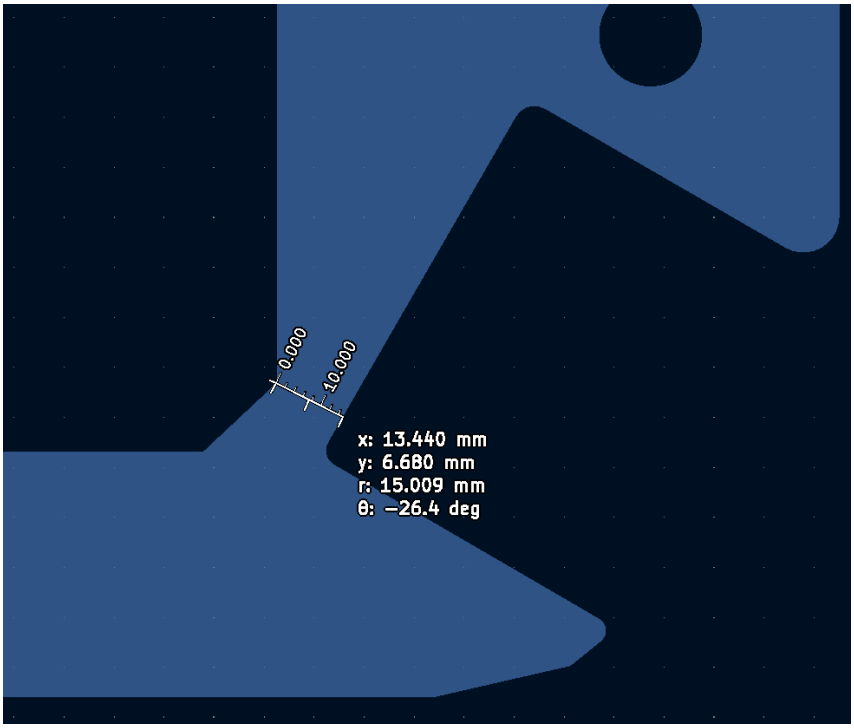
Nõuded trükkplaadi disainile

- Lahendus arvestab Robotondi trükkplaadi geomeetriaga ja alamosadega.
- Lahenduse jalajälg on võimalikult kompaktne.

4 Lisaseadmetega suhtlemiseks siini valik ja testimine

4.1 Piirangud siini valikul

Uuel Robotondi trükkplaadil on juhtkontrolleriks STM32F407VGT, mis võimaldab suhtluseks kasutada CAN, USART, SPI ja I^2C siine [66]. Robotondi trükkplaadi geomeetria ja paika pandud alamosade paigutuse tõttu tuleb lisaseadmete ja juhtkontrolleri ühendamisel läbi minna 15 mm suurusest pudelikaelast trükkplaadi peal (joonis 4.1). Lisaks lisaseadmetega suhtlemiseks vajalikele radadele peavad sealt läbi mahtuma ka trükkplaadile lisatud valguslahenduse ja mootori enkooderite jaoks mõeldud signaalid ja toiterajad. Seetõttu tuleb lisaseadmete ühendamisel mikrokontrolleriga valida võimalikult väikse jalajäljega suhtlusstandard ning peab piirduma juhtkontrolleri poolt ainult ühe standardi kasutamisega.



Joonis 4.1: Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaadil asuv 15 mm pudelikael roboti eesotsa ja külje vahel

4.2 Sobiva siini valik

Tabelis 4.1 on toodud võrdlus valiku puhul tähtsamatest siini omadustest, punasega on toodud valiku puhul negatiivsed tegurid. CANi implementatsioon nõuab lisakomponentide kasutamist suhtluse toimimisel, mis kasutab rohkem ruumi trükkplaadil ja suurendab süsteemi keerukust. USART või sama liidese peal töötav UART võimaldavad ainult kahe seadme omavahel ühendamist, seega mitme seadme kinnitamisel oleks vaja juhtkontrolleri pealt tuua rohkem radu. SPI ei toeta hästi lisaseadmete skaleerimist tulevikus ning täisdupleks suhtluse jaoks vajalike radade arv on samuti liiga suur. Seega kõige sobivamaks siiniks jäi I^2C, mis kasutab suhtluseks ainult kahte liini. Lisaks sellele on selle implementatsioon lihtne ning paljud lisaseadmed toetavad selle kasutamist. Kuna I^2C kasutab seadmetega suhtlemiseks 7- ja 10-bitist adresseerimist, siis saab ühele siinile teoreetiliselt lisada $2^7 + 2^{10} = 1152$ alluvat, mis muudab lahenduse tulevikus ka skaleeritavaks [67]. Tuleb silmas pidada, et reaalsuses on see number väiksem, sest tuleb arvestada siini kogumahtuvusega ning sellega, et tihti ei toeta kõik I^2C seadmed kõiki võimalikke aadresse. Osadel seadmetel on aadress tootmisel fikseeritud.

Tabel 4.1: STM32F407VGT poolt toetatud siinide võrdlus

	Seadmete arv	Ühenduste arv ülemal	Suhteline keerukus	Skaleeritavus
CAN	>20	2	keerulisem	✓
USART	2	4	lihtne	✗
UART	2	2	lihtne	✗
SPI	>20	3 + 1 seadme kohta	lihtne	✗
I^2C	>20	2	lihtne	✓

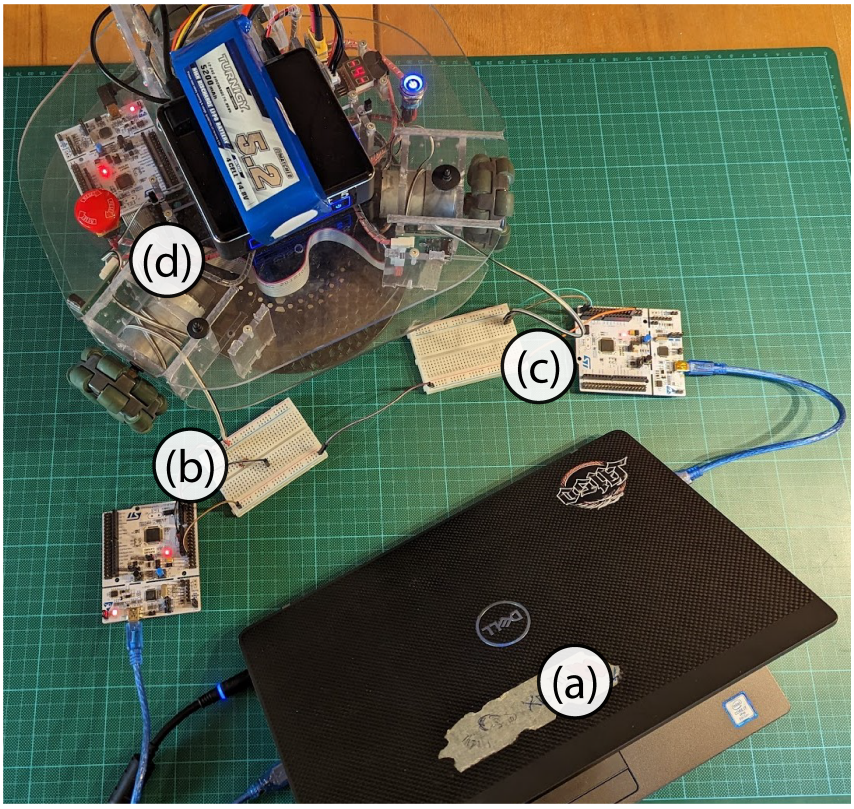
4.3 Siini testimine

Nagu eelnevalt mainitud, siis Robotont kasutab liikumiseks kolme Pololu 37Dx68L mootorit, mille maksimaalne vool rootori seiskumisel on 5,5 amprit 12 voldi juures [68]. Kuna valitud suhtlussiini rajad peavad trükkplaadil ka mootorite lähedalt mööduma, siis kerkis küsimuseks võimalik elektromagnetilistest häiringutest tekkiv müra suhtlussiinidel, kui robot peab äkiliselt kiirendama ja pidurdama. Selleks, et veenduda I^2C sobivuses lisaseadmetega suhtluseks, viidi läbi vaatlus, kus võrreldi I^2C signaalikuju roboti puhkeolekus ja mootorite kurnamisel. Lisaks sellele testiti, kas ka sõnumite tasandil tekib mootorite kasutamise ajal probleeme. Testide jaoks kasutati Robotondi teist põlvkonda, sest mootorid jäävad kolmandal põlvkonnal samaks.

4.3.1 Metoodika

Piirtingimuste test

Sõnumitestide jaoks ühendati omavahel kahe NUCLEO-L476RG arendusplaadi I^2C liinid ja maa. I^2C liinide ühendamiseks kasutati 2 m pikkust 0,3 mm diameetriga lintkaablit, millel olid alles jäetud vajalikud sooned. Lõigatud juhe oli seejärel keritud ümber Robotondi mootorite, valitud pikkus võimaldas teha 3 kuni 4 keerdu ümber iga mootori. Juhtme otstes olid maketeerimisplaadid, et teha vajalikud ühendused arendusplaatidega ning ka selleks, et lisata I^2C siini jaoks vajalikud tõmbetakistid. Maa jooksis mööda äärmist soont, et SCL ja SDA liinidel oleks suurem parasiitmahtuvus. Testi jaoks kasutati 1700 oomiseid takisteid. Robotondi juhtkontrollerilt võeti maha mootorite juhtimiseks mõeldud PWM signaali töötsükli piirangud ja tõsteti mootorite lubatud kiirust ühe meetrini sekundis. Robotont ise oli tõstetud laua pinnast kõrgemale, et rattad maad ei puudutaks.



Joonis 4.2: Piirtingimuste testi ülesehitus: (a) sülearvuti, millega olid ühendatud I^2C (b) ülemana ja (c) alamana kasutatud NUCLEO-L476RG plaadid, mis olid omakorda ühendatud (d) Robotondi mootorite ümber keritud juhtmega

Müravabade testide jaoks käivitas ülemaks programmeeritud arendusplaat suhtluse ning saatis 500000 ühe baidi pikkust sõnumit alluvale. Sisseprogrammeeritud lõpusõnumi kättesaamisel

näitas alluv testi jooksul kohale jõudnud sõnumite arvu. Nii alluvale kui ka ülemale oli siini aegumisajaks pandud 100 millisekundit ning suhtluse hangumise korral lähtestati I^2C siin. Teste tehti FM+ (Fast Mode Plus – 1000 kbit/s), FM (Fast Mode – 400 kbit/s) ja SM (Standard Mode – 100 kbit/s) kiirustega.

Kõikide testide jaoks kasutatud koodid on lisas toodud Githubi koodihoidlas. Koodi jaoks võeti aluseks NUCLEO-L476RG ametlik näidiskood [69] ning STM32CubeMX [70] abil genereeritud konfiguratsioonifailid.

Tabel 4.2: Muudetud parameetrid ja nende väärtused I^2C siini testide sooritamisel

Parameetrid		Piirtingimuste test	Tavatingimuste test
Füüsilised parameetrid	Kaabli pikkus (cm)	200	40
	Keritud ümber mootori	✓	✗
Juhtkontrolleri sätted	PWM töötsükkel (%)	100	25
	Maksimaalne kiirus (cm/s)	100	30
Käskluse sätted	Suuna muutmise intervall (ms)	100	500

Seejärel korrati teste, kuid seekord programmeeriti Robotont ennast maksimaalse kiirusega ühe koha peal keerama, muutes suunda iga 100 millisekundi tagant. Kuigi Robotont oli õhus ning mootoritel otsest koormust ei olnud, pidid käsu tulemusena Robotondi mootorid pidevalt kiirendama ja pidurdama, tekitades suuremat koormust mootori rootorile ning suurendades elektromagnetilist häiringut.

Antud testi tingimustega sooviti tekitada võimalikult halb olukord I^2C siini jaoks, lõplikus disainis oleksid tingimused paremad, sest rakenduksid eelnevad piirangud juhtkontrollerile ja I^2C jooksud oleksid lühemad, mis vähendaks parasiitmahtuvust.

Tavatingimuste test

Selle testiga sooviti tekitada soodsam olukord I^2C siini kasutamisel, mis matkib paremini Robotondi reaalseid opereerimistingimusi. Selleks lisati tagasi eelnevalt eemaldatud juhtkontrolleri limiidid mootorite kiirusele ja töötsüklile ning juhtme pikkuseks võeti nüüd 40 cm, mis on hinnanguliselt I^2C liini pikkus uue põlvkonna trükkplaadil. Juhe pandi nii, et see liiguks läbi Robotondi sisemuse, möödudes mootoritest ja nende toitejuhtmetest. Muud

tingimused jäid samaks.

Kõigepealt tehti müravaba suhtlustest, I^2C alama ja ülema konfiguratsioon jäeti samaks, mis eelnevas testis. Müraga testide jaoks muudeti Robotondile antud mootorite liigutamisel suuna muutmise sagedust, kuna 10 korda sekundis mootorite suuna vahetamine ei ole kindlasti roboti tavapärane kasutusjuht. Selle asemel anti käesolevas testis mootoritele käsklus suunda muuta iga 500 millisekundi tagant.

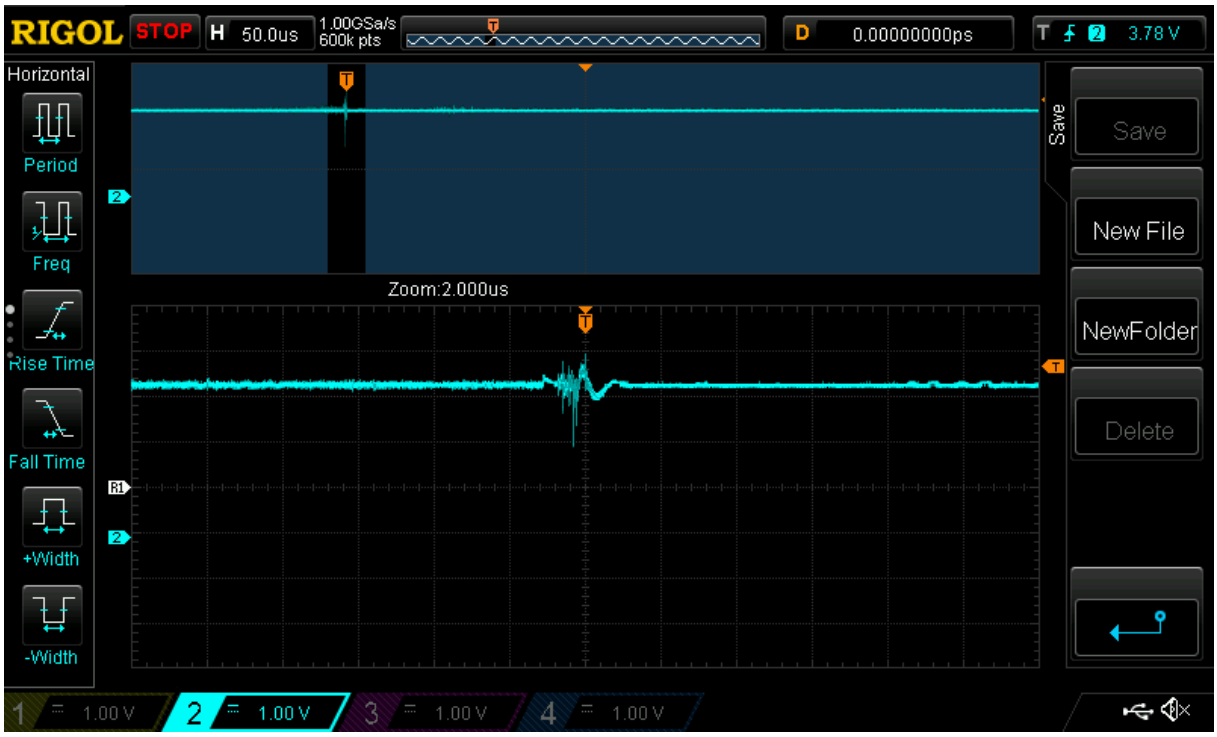
4.3.2 Tulemused

I^2C siini piir- ja tavatingimuste testide tulemused on toodud tabelis 4.3, tabelisse on märgitud viie mõõtmise aritmeetiline keskmine.

Tekkinud vigu siinil sai liigitada kahte kategoorias: jaatusvead (ACK) ja aegumisvead (TIMEOUT). ACK vigade korral ei saanud ülem alamalt jaatust ning liikus järgmise sõnumi juurde. TIMEOUT vigade korral hangus üks osapooltest ja katkes suhtlus, tabelis on toodud sõnumite arv, mis katkestuste tõttu kohale ei jõudnud.

I^2C suhtluse ajal ei olnud signaalikujude vaatlusel erinevusi näha, kuna mootori tekitatud interferents oli liiga madala amplituudiga. Selleks, et mootori mõju liinidele näha, lasti mootoritel joosta parajasti siis, kui siinil suhtlust ei toimunud. Puhkeolekus SCL liinil tekkinud häiritus on näha joonisel 4.3. Tabelites toodud tulemustes on näha, et mootorite kurnamise ajal suurenes ka siinil tekkinud vigade arv. Siiski olid vead harvad, sest mootorite tekitatud häiring pidi kattuma täpselt signaali tipuga, et alluv või ülem siinilt vale info sisse loeks. Mootorite väljas oleku ajal tekkinud jaatusvead tulenevad SDA ja SCL liinide suurest parasiitmahtuvusest, mistõttu alam ei jõudnud alati SDA liini madalaks tõmmata. Faktoriteks võivad olla ka maketeerimislaua ühenduste ebakindlus ning välised mõjutajad, millega testide ajal parajasti ei arvestatud. Sellest hoolimata, mootorite käitamisel suurenes vigade arv.

Siiski esinesid vead ainult siis, kui tingimused siinil olid ebarealistlikud, eeldatavate töötingimuste testide ajal ei tekkinud siini töös ühtegi probleemi. Realistlikumad tingimused I^2C siinil muudavad ka suhtluse palju töökindlamaks ning Robotondi trükkplaadil mootorid suhtlust lisaseadmetega häirima ei hakka.



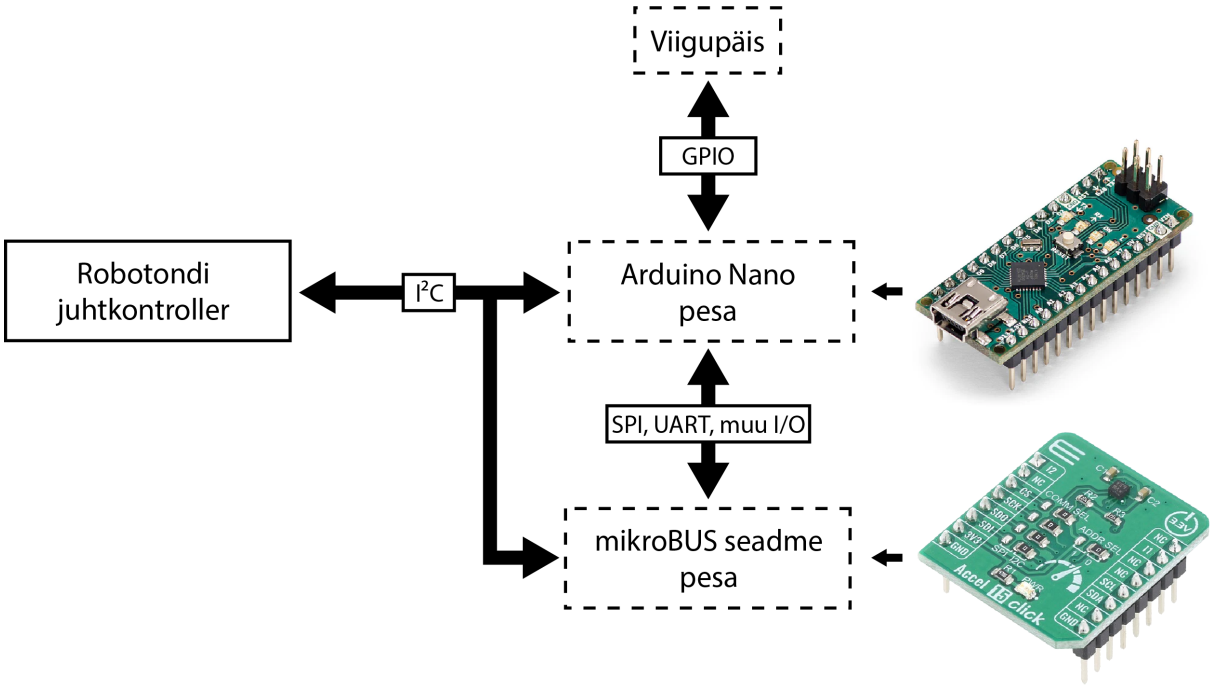
Joonis 4.3: Puhkeolekus SCL liinil tekkinud häiritus, kui Robotondi mootor suunda vahetas

Tabel 4.3: I^2C siini sõnumitestide tulemused, viie mõõtmise aritmeetiline keskmine

Test	Mootorid töös	I^2C kiirus	Kätte saadud sõnumid	ACK vead	TIMEOUT vead	Vigu kokku (ppm)
Tavatingimuste test	✗	SM	500000	0	0	0
	✗	FM	500000	0	0	0
	✗	FM+	500000	0	0	0
	✓	SM	500000	0	0	0
	✓	FM	500000	0	0	0
	✓	FM+	500000	0	0	0
Piirtingimuste test	✗	SM	499997	3	0	6
	✗	FM	499996	4	0	8
	✗	FM+	499985	15	0	30
	✓	SM	499982	12	6	36
	✓	FM	499834	128	38	332
	✓	FM+	499460	268	272	1080

5 Elektroonikalahenduse ja arhitektuuri kirjeldus

5.1 Üldine arhitektuur



Joonis 5.1: Lisaseadmete integratsiooni arhitektuuri skeem

Joonisel 5.1 on toodud lisaseadmete integreerimiseks kavandatud arhitektuur. Robotondile tuleb kaks pesa: üks mikroBUS seadme jaoks ja teine Arduino Nano jaoks. Seadmed on läbi pesade I^2C siini kaudu ühendatud juhtkontrolleriga. Ülejäänud mikroBUS standardis defineeritud viigud on ühendatud Arduino Nano pessa ning Arduino Nanost üle jäänud viigud on omakorda viidud viigupäisesse.

5.2 Valitud komponendid

Lisaseadmete kasutamiseks ja platvormile toitelahenduse pakkumiseks valiti Robotondile välja järgmised komponendid:

- mikroBUS pesa;

- Arduino Nano pesa ehk kaks 2,54 mm sammuga viigupäist;
- kaks TXS0102DCU 2-bitist ja kahesuunalist loogikataseme muundurit [71];
- kuus SN74LV1T34DBV 1-bitist ja ühesuunalist loogikataseme muundurit [72];
- kolm TPS56339DDC DC-DC muundurit [73];
- kolm BSMD1206-300-6V PTC termistor taastuvkaitset [74];
- PMEG6030EVPX Schottky diood [75];
- muud vajalikud passiivid ja viigupäised.

5.3 Valiku põhimõtted

Kuna Robotondi trükkplaadid tellitakse koos komponentide ladumisega JLCPCBst, siis tuli iga komponendi puhul jälgida selle saadavust JLCPCB laos (v.a viigupäised). Lisaks sellele hoiduti komponentide valikus liiga väikeste kiibikorpuste kasutamisest, et oleks võimalik komponente vajadusel käsitsi maha ja peale joota. Samuti mängis rolli komponentide valikul tootja usaldusväärsus ja komponendi hind.

Järgnevalt kirjeldan teisi motiive komponentide valikus ning toon välja lisaseadmete integreerimise arhitektuuri.

5.3.1 Lisaseadmete füüsilised ühendused

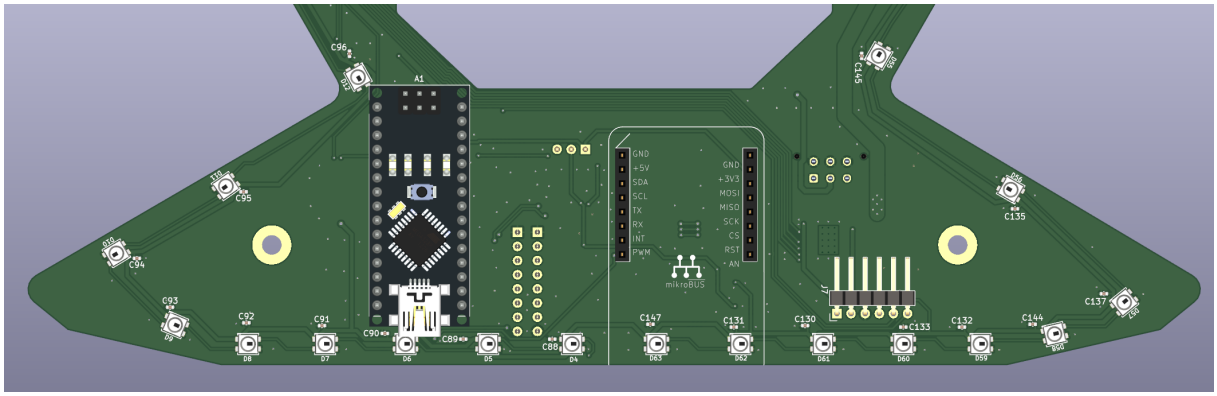
Erinevaid lisaseadmete pesa standardeid vaadates jäi silma just mikroBUS, sest see on avatud standardiga ning üpris universaalne. Avatud standard on hea valik Robotondi jaoks, kuna Robotont on ise ka vabavara. Lisaks sellele ei ole tudengid või õppejõud piiratud ainult saadaval olevate seadmetega, avatud standardi tõttu on võimalik disainida ka enda mooduleid. Robotondi eesotsas oli ruumi M suurusega mikroBUS seadme pesaks. [42]

Nagu eelnevalt uuritud, siis moodulite vahelise suhtluse jaoks plaaniti kasutada I^2C siini. I^2C on mikroBUS lisaseadmetes samuti enim kasutatud suhtlussiin, M ja S suuruses seadmeid, mis kasutavad I^2Cd on MikroElektronika enda kodulehel müügil 496 tükki [44].

Selleks et toetada ka neid mikroBUS seadmeid, mis ei võimalda I^2C kasutamist on Robotondil pesa ka Arduino Nano jaoks ning kõik mikroBUS suhtlussiinid ühenduvad Arduinoga Robotondi plaadil. Selline ülesehitus võimaldab kasutada Arduinot vahendajana olukordades, kus mikroBUS seade saab kasutada ainult SPI või UART liidest. Sel juhul saadab mikroBUS

seade info Arduinole, kus saab vajadusel teha eeltöötlust ning seejärel saab Arduino I^{2}C siinil suhelda emaplaadi mikrokontrolleriga. Samuti on kõik ühendused, mis Arduino Nanol üle jäid tehtud Robotondi ülemisel küljel ligipääsetavaks kahe viigupäisega, millele pääseb ligi läbi koostelahenduse. Samadest ühendustest saab kätte ka 5 ja 3,3 voldise toite. Nii saab kasutada muidu ilma funktsioonita Arduino viike. Sellise konfiguratsiooniga töötab Arduino Nano Robotondile paigaldatava lisakontrollerina.

Probleemiks osutus see-eest lisaseadmete jaoks ruum. Kuna uue koostelahenduse tõttu ei ole Robotondi trükkplaadi kohal ruumi, siis tuli mikroBUS ja Arduino Nano pesad liigutada trükkplaadi alla, kus nad asetsevad tagurpidi. See piirab kindlasti kasutatavate seadmete hulka, samuti tuleb Robotondi kasutamise ajal jälgida, kas seadmed püsivad korralikult pesas.



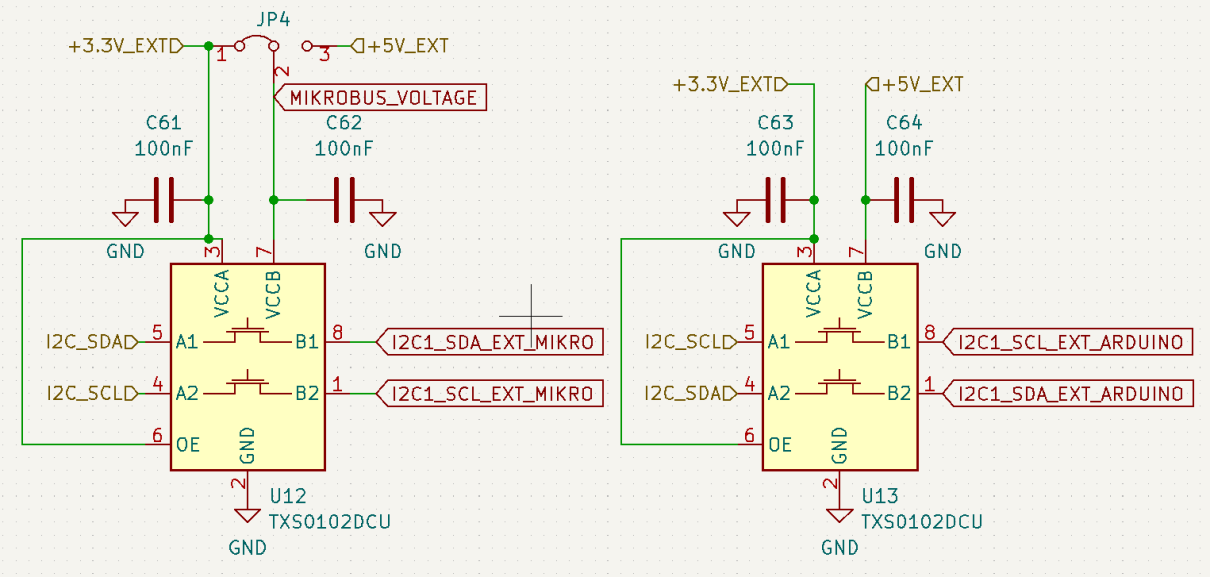
Joonis 5.2: mikroBUS seadme ja Arduino Nano paigutus Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaadi 3D-mudeli alumisel poolel

5.3.2 Lisaseadmete loogikatasemed

Kuna Arduino Nano on mõeldud töötama 5 voldi, emaplaadi mikrokontroller 3,3 voldi ning mikroBUS seade 3,3 või 5 voldi juures, siis tähtis osa välja valitud lisaseadmete integreerimisel on kõikide loogikatasemete toetamine.

TXS0102DCU on Texas Instrumentsi kahesuunaline loogikataseme muundur, mis võimaldab selle kasutamist I^{2}C siini implementeerimisel. Üks muundur tõlgib Arduinolt tuleva suhtluse ning teine muundur mikroBUS seadme suhtluse. Kuna mikroBUS võib olla nii 3,3 kui 5 volti, siis kasutaja saab *jumper*iga valida mikroBUS seadme loogikataseme.

SN74LV1T34DBV on Texas Instrumentsi ühesuunaline muundur, mis tähendab, et seda saab kasutada UART ja SPI implementeerimisel. Sama *jumper*, mis muudab I^{2}C muundurite konfiguratsiooni, muudab ka nende muundurite väljundi taset.



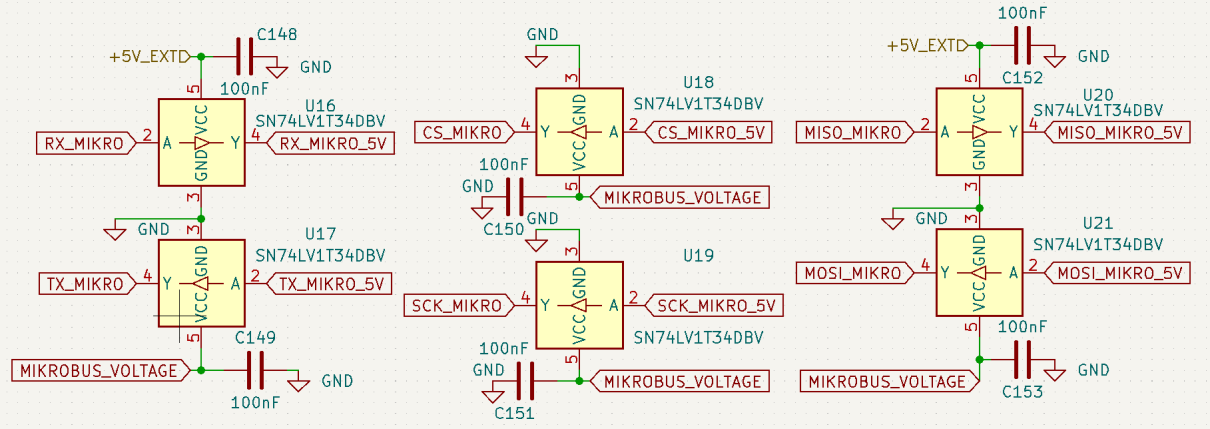
Joonis 5.3: Skeem juhtkontrolleri ja lisaseadmete vahel paikneva I^2C siini loogikataseme muunduritest

5.3.3 Platvormi toitelahendus

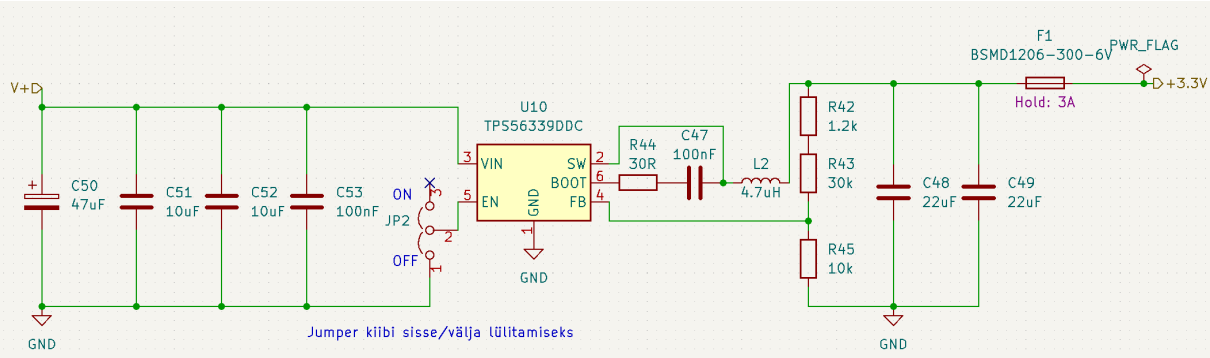
Aku pinge muundamine

Kuigi nõuetes on toodud, et tuleb pakkuda eraldi toidet lisaseadmetele, siis uue trükkplaadi prototüübil vastutab disainitud toitelahendus lisaks lisaseadmetele ka juhtkontrolleri, toitekontrolleri ja LEDide toitmise eest. Lahenduses kasutasin Texas Instrumentsi DC-DC (alalisvool-alalisvool) madaldavat pingemuundurit, TPS56339DDC. Hetkel on kasutusel kolm eraldiseisvat muundurit: üks annab 5 V toite lisaseadmetele ja LEDidele, teine 3,3 V toite juhtkontrollerile ja lisaseadmetele ning kolmas annab eraldi 3,3 volti toitejuhtimise mikrokontrollerile. Vajalike passiivide valikul ning toitelahenduse füüsilisel disainil lähtuti andmelehes toodud soovitustest.

Muundurite sisendiks tuleb akult umbes 13 kuni 20 volti. Valitud muunduri maksimaalne konstantne väljundvool on 3 amprit ning iga muunduri väljundisse on lisatud ka PTC (positiivse temperatuuriteguriga) termistor taastuvkaitse, mis suudab toatemperatuuril (25 °C) läbi lasta samuti 3 amprit. Kuna tegu on PTC kaitsmega, siis kaitsme temperatuuri tõusmisel väheneb selle läbilaskevõime. Seega tuleb prototüübi testimisel jälgida Robotondi töötemperatuuri, ning vajadusel korrigeerida valitud kaitsmeid.



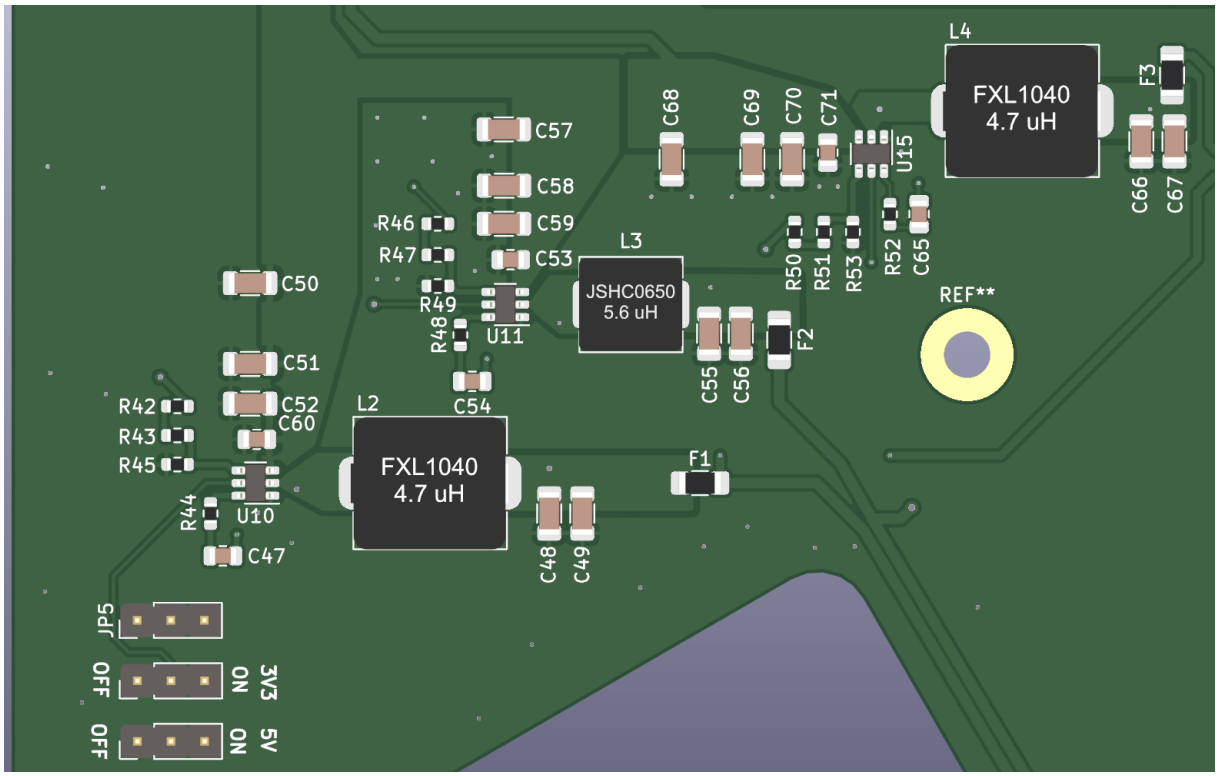
Joonis 5.4: Skeem Arduino Nano ja mikroBUS seadme vahel paiknevatest SPI ja UART siinide loogikataseme muunduritest



Joonis 5.5: Skeem 3,3 V toite lahendusest lisaseadmetele ja juhtkontrollerile

Arduino Nano toitelahendus

mikroBUS seadmete toitmiseks midagi muud peale pingemuundurite väljundite pesasse viimist tegema ei pidanud. Sama ei saa öelda Arduino Nano toitmise kohta. Nimelt on Nano toitmiseks soovitatud kasutada kas USB pesa või VIN viiku. VIN on ühendatud plaadil paikneva LM1117 lineaarse pingestabilisaatoriga (LDO), mille sisendis peab olema 7 kuni 12 V. Kuna soovisin, et Nano saaks toidet ka siis, kui USB kaabel ei ole ühendatud ning eraldi muunduri plaadile lisamine ainult VIN sisendi nõude täitmiseks ei oleks olnud ka otstarbekas, siis tuli leida alternatiiv. Õnneks on Nanol viik 5 V (+5V) jaoks, kuid probleem seisneb Nano toiteahela disainis. +5V on mõeldud väljundina kasutamiseks, toites andureid, mida soovitakse Nano külge ühendada. Selle jaoks on +5V ühendatud LM1117 väljundiga ja USB kaudu tuleva toitega. Andes +5V viigule toidet Robotondi trükkplaadi peal paiknevast muundurist ei saa Arduinot enam ümberprogrammeerimiseks või silumiseks arvutiga ühendada, sest kaabliga USB toite ja Robotondi pakutava toite otseühendamisel võib juhtuda, et USB pinge on suurem



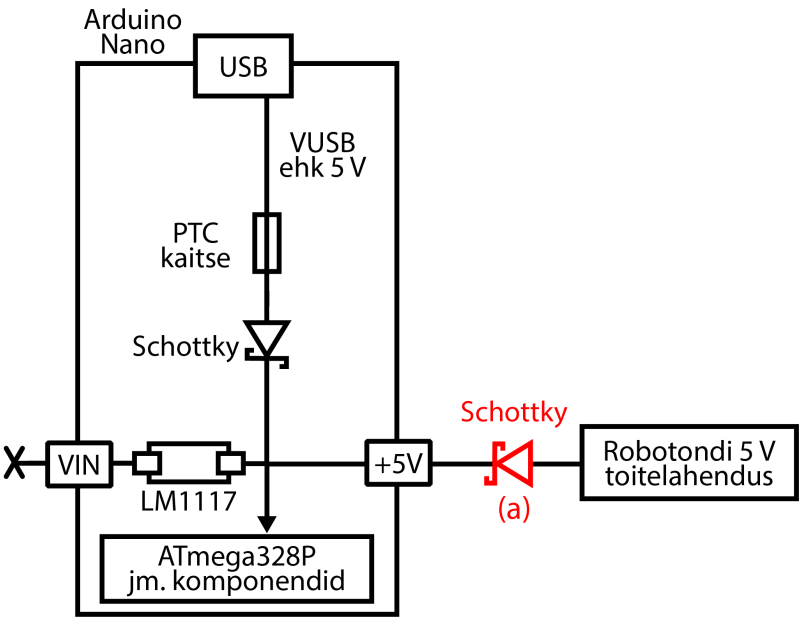
Joonis 5.6: Toitelahendus Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaadi 3D-mudelil

Robotondi muunduri väljundpingest ning pingeerinevuste tõttu hakkab vool jooksma Robotondi muunduri väljundisse, kahjustades seda ning teisi süsteemi osi, mis on sama toiteahelaga ühendatud. Teistpidi vool liikuda ei saa, sest Nanol on USB kaitseks lisatud SS1P3L Schottky diood. Sama probleem on ka uuemal Arduino Nano Every plaadil, mille toiteahel on identne. [76, 77]

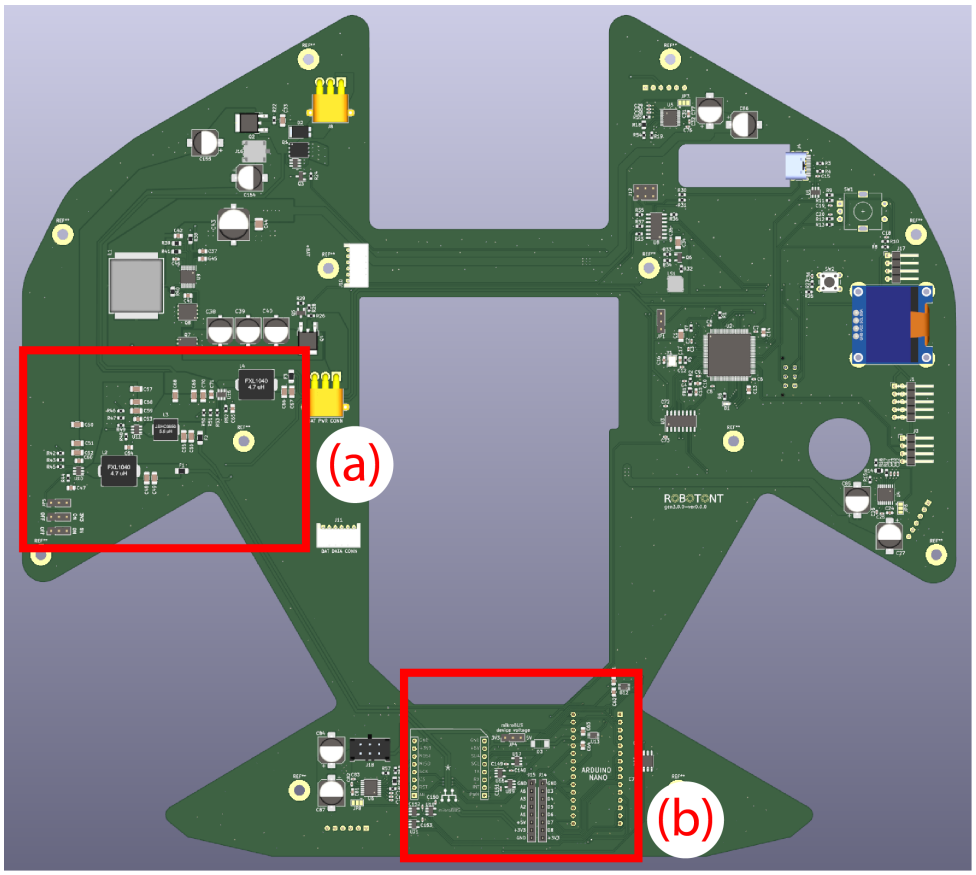
Lahenduseks oli Robotondi trükkplaadile samuti võimalikult madala päripingelanguga Schottky dioodi lisamine, et Nano ei saaks Robotondi toiteahelat vooluga varustada (joonis 5.7). Schottky dioodiks valiti PMEG6030EVPX, mille päripingelang on 0,1 A korral tüüpiliselt 275 mV [75]. Nano mikrokontrolleri, ATmega328P voolutarve on hinnanguliselt 20 mA ning töötab täiskiiruse juures ka madalama pingega (4,5 V kuni 5,5 V) [78]. Siiski tuleb Nano kasutamisel olla ettevaatlik, sest vabavara olemuse tõttu saab soetada Nano kloone, kus on kokkuhoiu jaoks see diood asendatud potentsiaalselt ebakvaliteetse alternatiiviga.

5.3.4 Alamosade integratsioon trükkplaadile

Töö lõpptulemusena integreeriti kirjeldatud alamosad Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaadile, mis on tervikuna näha joonisel 5.8. Alamosade paigutus on vastavuses arendusprotsessi alguses paika pandud piirangutega.



Joonis 5.7: Skeem Arduino Nano toiteahelast ja (a) Robotondi trükkplaadile lisatud Schottky dioodist



Joonis 5.8: Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaat, koos lisaseadmete kasutamise võimaldamiseks disainitud (a) toitelahenduse ja (b) pesade ning loogikataseme muunduritega

Kokkuvõte

Üks osa haridusrobotite tähtsusest on nende modulaarne disain, mis võimaldab erinevate lisaseadmete kasutamist, et pakkuda ühele robotile mitmeid rakendusi ja õpiväljundeid. Tartu Ülikoolis disainitud Robotondil puudus siiamaani võimalus lisaseadmete universaalseks ja mugavaks vahetamiseks.

Olemasolevaid haridusroboteid, nende lisaseadmeid ning turul leiduvaid tehnoloogiaid uurides pandi kokku Robotondi kolmanda põlvkonna lisaseadmete integreerimise lahendus. Antud lahendus kasutab turul figureerivaid avatud standardeid ning võimaldab tulevikus Robotondil uusi lisaseadmete konfiguratsioone kasutada.

Uus lahendus laseb lisada Robotondile Arduino Nano lisakontrolleri, mille külge saab kasutaja ühendada vabadest viigupäistest või mikroBUS pesa kaudu teisi mooduleid. Näiteks saab anda mikroBUS mooduliga Robotondile GPS või ZigBee võimekust, täiendada baaskonfiguratsiooni inertsiaal- või valgusanduritega ning lisada servosid ja mootoreid. Uus lahendus toetab nii 3,3 V kui ka 5 V seadmeid.

Koostöös teistega disainiti Robotondi kolmanda põlvkonna trükkplaat. Üheks töö osaks oli sellele trükkplaadile lisaseadmete lahenduse jaoks vajalike komponentide valimine ja trükkplaadil ühenduste disainimine.

Tänuavaldused

Tänan Veiko Vunderit juhendamise, arendusprotsessis nõustamise ja Robotondi kolmanda põlvkonna arenduse juhtimise eest. Lisaks sellele täna kõiki, kes olid seotud kolmanda põlvkonna arendusega: Teet Tilk trükkplaadi disaini konsulteerimise eest, Marko Muro ja Priit Rooden, kelle lõputööd olid samuti seotud kolmanda põlvkonna trükkplaadi arendusega ning Eva Mõtshärg, kes disainis kolmandale põlvkonnale uue 3D-prinditava koostelahenduse.

Viited

[1] "Executive Summary World Robotics 2022 Industrial Robots", International Federation of Robotics, 2022. https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2022.pdf (vaadatud 17. mai 2023).

[2] "Executive Summary World Robotics 2022 - Service Robots", International Federation of Robotics, 2022. https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Service_Robots_2022.pdf (vaadatud 17. mai 2023).

[3] A. Eguchi, "Bringing Robotics in Classrooms", Robotics in STEM Education: Redesigning the Learning Experience, M. S. Khine, Toim, Cham: Springer International Publishing, 2017, lk 3–31. doi: 10.1007/978-3-319-57786-9_1.

[4] R. Raudmäe, "Avatud robotplatvorm Robotont", Lõputöö, Tartu Ülikool, 2019. DSpace: http://hdl.handle.net/10062/64341

[5] J. Sung, J. Y. Lee, ja H. Y. Chun, "Short-term effects of a classroom-based STEAM program using robotic kits on children in South Korea", International Journal of STEM Education, kd 10, nr 1, lk 26, apr 2023, doi: 10.1186/s40594-023-00417-8.

[6] U. Gerecke ja B. Wagner, "The Challenges and Benefits of Using Robots in Higher Education", Intelligent Automation & Soft Computing, kd 13, nr 1, lk 29–43, jaan 2007, doi: 10.1080/10798587.2007.10642948.

[7] P. Chakma ja M. Romero, "Exploration of learning analytics in educational modular robotics", UCA - INSPE Académie de Nice. 2022. https://hal.science/hal-03733571/document (vaadatud 17. mai 2023).

[8] "History – Duckietown". https://www.duckietown.org/about/history (vaadatud 31. märts 2023).

[9] "Technology – Duckietown". https://www.duckietown.org/platform (vaadatud 31. märts 2023).

[10] "Duckiebot (DB-J)", the Duckietown project store. https://get.duckietown.com/products/duckiebot-db21 (vaadatud 31. märts 2023).

[11] “mBot2 — Makeblock Education”. https://education.makeblock.com/mbot2/ (vaadatud 31. märts 2023).

[12] “MOOC: Robootikast puust ja punaseks”. https://sisu.ut.ee/robot/avaleht (vaadatud 31. märts 2023).

[13] “Amazon.com: Customer reviews: Makeblock mBot Robot Kit”. https://www.amazon.com/product-reviews/B00SK5RUQY/ (vaadatud 31. märts 2023).

[14] “Amazon.com: Customer reviews: Makeblock mBot Neo Robot Kit”. https://www.amazon.com/product-reviews/B0919F9CKS/ (vaadatud 31. märts 2023).

[15] “mBot – Robootika- ja programmeerimisring”. https://robootika.digipurk.ee/mbot/ (vaadatud 31. märts 2023).

[16] “mBot2 — Makeblock Education”. https://education.makeblock.com/product/mbot2/ (vaadatud 31. märts 2023).

[17] “MINDSTORMS Education EV3 Retirement FAQs”, LEGO Education. https://community.legoeducation.com/blogs/36/95 (vaadatud 12. aprill 2023).

[18] “MINDSTORM EV3 Curriculum content”, LEGO® Education. https://education.lego.com/en-us/downloads/retiredproducts/mindstorms-ev3/curriculum/ (vaadatud 17. mai 2023).

[19] E. Danahy, E. Wang, J. Brockman, A. Carberry, B. Shapiro, ja C. B., “LEGO-based Robotics in Higher Education: 15 Years of Student Creativity”, International Journal of Advanced Robotic Systems, kd 11, lk 1, veebr 2014, doi: 10.5772/58249.

[20] “Straight Move — MINDSTORMS EV3 Lesson Plan”, LEGO® Education. https://education.lego.com/en-us/lessons/ev3-tutorials/straight-move/ (vaadatud 19. mai 2023).

[21] “SPIKE™ Essential Lessons - Cave Car”, LEGO® Education. https://education.lego.com/en-us/lessons/spikeessential-great-adventures/spikeessential-cave-car/ (vaadatud 19. mai 2023).

[22] “LEGO® MINDSTORMS® EV3 31313 — MINDSTORMS®”. https://www.lego.com/en-us/product/lego-mindstorms-ev3-31313 (vaadatud 12. aprill 2023).

[23] “LEGO® Education SPIKE™ Prime Technical Specifications”, LEGO Education. https://education.lego.com/v3/assets/blt293eea581807678a/bltf512a371e82f6420/5f8801baf4f4cf0fa39d2feb/techspecs_techniclargehub.pdf (vaadatud 12. aprill 2023).

[24] “The Power Functions 2.0 connector”. https://www.philohome.com/wedo2reverse/connect.htm (vaadatud 12. aprill 2023).

[25] “IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 151-13-48: ‘(electric) sensor”’. https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=151-13-48 (vaadatud 17. mai 2023).

[26] “EV3 Sensors – LEGO Engineering”. http://www.legoengineering.com/ev3-sensors/ (vaadatud 17. mai 2023).

[27] “IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 151-13-49: ‘(electric) actuator”’. https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=151-13-49 (vaadatud 17. mai 2023).

[28] “Lightweight Mobile Robotic Arm”, Stanley Innovation, Inc. https://stanleyinnovation.com/products-services/robotics/advanced-manipulation/lightweight-mobile-robotic-arm/ (vaadatud 17. mai 2023).

[29] “uArm Swift Pro - ROB-14342 - SparkFun Electronics”. https://www.sparkfun.com/products/retired/14342 (vaadatud 17. mai 2023).

[30] “OpenMANIPULATOR”, ROBOTIS e-Manual. https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/openmanipulator_x/overview/ (vaadatud 17. mai 2023).

[31] “TurtleBot3 with OpenMANIPULATOR”, ROBOTIS e-Manual. https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/manipulation/ (vaadatud 18. mai 2023).

[32] “Arduino Forum”, Arduino Forum. https://forum.arduino.cc/ (vaadatud 17. mai 2023).

[33] “Arduino Nano”, Arduino Official Store. https://store.arduino.cc/products/arduino-nano (vaadatud 17. mai 2023).

[34] “Arduino Nano Every”, Arduino Official Store. https://store.arduino.cc/products/arduino-nano-every (vaadatud 17. mai 2023).

[35] “Development Boards — Espressif Systems”. https://www.espressif.com/en/products/devkits (vaadatud 18. mai 2023).

[36] “STM32 MCU & MPU Eval Tools - STMicroelectronics”. https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools.html (vaadatud 18. mai 2023).

[37] “Raspberry Pi Documentation”. https://www.raspberrypi.com/documentation/ (vaadatud 18. mai 2023).

[38] “Exploring Wireless Options — Hacking Your LEGO Mindstorms EV3 Kit: Connections — InformIT”. https://www.informit.com/articles/article.aspx?p=2454873 (vaadatud 17. mai 2023).

[39] “Electronic Modules · GitBook”. http://docs.makeblock.com/diy-platform/en/electronic-modules.html (vaadatud 17. mai 2023).

[40] “Universal Serial Bus Type-C Cable and Connector Specification”, USB 3.0 Promoter Group, 2019. https://www.usb.org/sites/default/files/USB%20Type-C%20Spec%20R2.0%20-%20August%202019.pdf (vaadatud 18. mai 2023).

[41] “Hacking Your LEGO Mindstorms EV3 Kit: Connections — Mindstorms Wires Explained — InformIT”. https://www.informit.com/articles/article.aspx?p=2454873 (vaadatud 17. mai 2023).

[42] “Standard specifications - mikroBUS“, MIKROE, 2015. https://download.mikroe.com/documents/standards/mikrobus/mikrobus-standard-specification-v200.pdf (vaadatud 24. aprill 2023).

[43] “6DOF IMU 20 Click”, MIKROE. https://www.mikroe.com/6dof-imu-20-click (vaadatud 7. mai 2023).

[44] “Click Boards”, MIKROE. http://www.mikroe.com/click (vaadatud 24. aprill 2023).

[45] “Introduction to the Controller Area Network (CAN)”. https://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf (vaadatud 17. mai 2023).

[46] H. Rajaie, O. Zweigle, K. Häussermann, U.-P. Käppeler, A. Tamke, ja P. Levi, “Hardware design and distributed embedded control architecture of a mobile soccer robot”, Mechatronics, kd 21, nr 2, lk 455–468, märts 2011, doi: 10.1016/j.mechatronics.2010.08.008.

[47] D. Darmaji, I. K. Wibowo, F. Ardilla, ja D. Ibadurrohman, “Hardware Architecture For Robot Soccer ERSOW Using Control Area Network Bus”, 2019 International Electronics Symposium (IES), sept 2019, lk 464–468. doi: 10.1109/ELECSYM.2019.8901662.

[48] “Controller Area Network (CAN) Overview”. https://www.ni.com/en-us/shop/seamlessly-connect-to-third-party-devices-and-supervisory-system/controller-area-network–can–overview.html (vaadatud 17. mai 2023).

[49] “Getting Started with USART”, Microchip, 2018. https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/TB3216-Getting-Started-with-USART-90003216A.pdf (vaadatud 17. aprill 2023).

[50] “LEGO MINDSTORMS EV3 Hardware Developer Kit”, LEGO. https://education.lego.com/v3/assets/blt293eea581807678a/blt471320cb14ed0291/5f880386631d5a2165df4144/lego-mindstorms-ev3-hardware-developer-kit.zip (vaadatud 12. aprill 2023).

[51] “LEGO® Education SPIKE™ Prime Set 45678”. https://www.lego.com/en-us/product/lego-education-spike-prime-set-45678 (vaadatud 12. aprill 2023).

[52] turtlebot, “Sensors · User Manual”, 8. veebruar 2022. https://github.com/turtlebot4-user-manual/software/sensors.html (vaadatud 17. mai 2023).

[53] “Introduction to SPI Interface — Analog Devices”. https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html (vaadatud 17. mai 2023).

[54] “I^2C Bus”. https://www.i2c-bus.org/ (vaadatud 14. aprill 2023).

[55] J. Valdez ja J. Becker, “Understanding the I^2C Bus”, Texas Instruments, 2015.

[56] G. Adema, “Advanced Makeblock Sensors (DIY)”, Instructables. https://www.instructables.com/Advanced-Makeblock-Sensors-DIY/ (vaadatud 12. aprill 2023).

[57] “Developer Kit”, EZ-Robot. http://www.ez-robot.com/store/p11/developer-kit.html (vaadatud 17. mai 2023).

[58] “Duckiebot DB21J”. https://docs.duckietown.com/daffy/opmanual-duckiebot/assembly/db21j/index.html (vaadatud 12. aprill 2023).

[59] “INTERBUS”. https://www.profibus.com/technology/interbus (vaadatud 17. mai 2023).

[60] A. Vitanza, P. Rossetti, F. Mondada, ja V. Trianni, “Robot swarms as an educational tool: The Thymio’s way”, International Journal of Advanced Robotic Systems, kd 16, nr 1, lk 1729881418825186, jaan 2019, doi: 10.1177/1729881418825186.

[61] M. K. Nigol, “Õppematerjalid robotplatvormile Robotont”, Lõputöö, Tartu Ülikool, 2019. DSpace: http://hdl.handle.net/10062/64339

[62] “robotont”. http://robotont.ut.ee/avaleht (vaadatud 12. aprill 2023).

[63] R. Mäesepp, “Takistuste vältimise lahendus õpperobotile Robotont”, Lõputöö, Tartu Ülikool, 2020. DSpace: http://hdl.handle.net/10062/72100

[64] D. Krumins, “Web-based learning and software development environment for remote access of ROS robots”, Lõputöö, Tartu Ülikool, 2022. DSpace: http://hdl.handle.net/10062/83040

[65] R. Valner, V. Vunder, A. Aabloo, M. Pryor, ja K. Kruusamäe, “TeMoto: A Software Framework for Adaptive and Dependable Robotic Autonomy With Dynamic Resource Management”, IEEE Access, kd 10, lk 51889–51907, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3173647.

[66] “STM32F407VG”, STMicroelectronics. https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407vg.html (vaadatud 18. mai 2023).

[67] “I2C-bus specification and user manual”, NXP, 2021. https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf (vaadatud 18. mai 2023).

[68] “Pololu - 19:1 Metal Gearmotor 37Dx68L mm 12V with 64 CPR Encoder (Spur Pinion)”, Pololu Corporation. https://www.pololu.com/product/2822/specs (vaadatud 17. aprill 2023).

[69] “NUCLEO-L476RG GitHub Examples”. https://github.com/STMicroelectronics/STM32CubeL4/tree/master/Projects/NUCLEO-L476RG (vaadatud 20. mai 2023).

[70] “STM32CubeMX”, STMicroelectronics. https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html (vaadatud 20. mai 2023).

[71] “TXS0102 2-Bit Bidirectional Voltage-Level Translator for Open-Drain and Push-Pull Applications”, Texas Instruments, 2018. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/txs0102.pdf (vaadatud 17. aprill 2023).

[72] “SN74LV1T34 Single Power Supply Single Buffer GATE CMOS Logic Level Shifter”, Texas Instruments, 2022. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lv1t34.pdf (vaadatud 17. aprill 2023).

[73] “TPS56339 4.5-V to 24-V Input, 3-A Output Synchronous Buck Converter”, Texas Instruments, 2019. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps56339.pdf (vaadatud 17. aprill 2023).

[74] “BSMD1206 Series Surface Mount PTC Device”, BHFUSE, 2021. https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2206071500_BHFUSE-BSMD1206-300-6V_C883136.pdf (vaadatud 17. aprill 2023).

[75] “PMEG6030EVP”, Nexperia, 2023. https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet PMEG6030EVP.pdf (vaadatud 17. aprill 2023).

[76] “Arduino Nano Rev3.2 Schematic”. Arduino, 2014. https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/Arduino_Nano-Rev3.2-SCH.pdf (vaadatud 17. aprill 2023).

[77] “Arduino Nano Every Rev3 Schematic”. Arduino, 2019. https://content.arduino.cc/assets/NANOEveryV3.0_sch.pdf (vaadatud 17. aprill 2023).

[78] “ATmega328P DATASHEET”. Atmel Corporation, 2015. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf (vaadatud 17. aprill 2023).

Lisad

Teistega koostöös arendatud Robotondi kolmanda põlvkonna elektroonika lahendus koos siini testimiseks kasutatud programmidega Githubi koodihoidlas

https://github.com/ut-ims-robotics/drikkit-thesis-2023-robotont-addons

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ingvar Drikkit

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

   “Lisaseadmete võimekuse arendamine haridusrobotile Robotont”

   mille juhendaja on Veiko Vunder

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

2. Annan Tartu ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace’i kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Ingvar Drikkit
20.05.2023