

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Karl Rahn

**Millimeeterlaine radari integreerimine avatud lähtekoodiga
muruniiduki platvormil Open Mower**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

PhD Veiko Vunder

Tartu 2025

Lühikokkuvõte

Millimeeterlaine radari integreerimine avatud lähtekoodiga muruniiduki platvormil Open Mower

Käesolev bakalaureusetöö keskendub millimeeterlaine radari lisamisele Open Moweri platvormile – tegemist on avatud lähtekoodiga autonoomse robotmuruniiduki projektiga, mille eesmärk on edendada teadmisi robotika, Linuxi, ROS-i (Robot Operating System) ja navigatsioonisüsteemide vallas.

Töö koosneb viiest põhiosast: olemasoleva projekti uurimine, vajalike komponentide valimine ja tellimine, roboti lahtivõtmine, uute komponentide integreerimine ning süsteemi seadistamine ja testimine.

Töö praktiline väljund on toimiv radaripõhine takistuste tuvastamise süsteem, mis täiendab Open Moweri navigatsioonivõimekust ning aitab suurendada roboti autonoomsust ja töökindlust. Peamine eesmärk on panustada kogukonnapõhisesse arendusprojekti viisil, mis võimaldab teistel huvilistel tulemustest õppida ja neid edasi arendada.

CERCS: T125 – Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika
Märksõnad: robotika, ROS, Linux, RTK, mmWave radar, robotmuruniiduk, takistustuvastus, autonoomne niitmine

Abstract

Integration of a Millimeter-Wave Radar into the Open-Source Robotic Lawnmower Platform Open Mower

This bachelor's thesis focuses on the integration of a millimeter-wave radar sensor into the Open Mower platform – an open-source autonomous robotic lawnmower project designed to promote learning in robotics, Linux, ROS (Robot Operating System), and navigation systems.

The work consists of five main stages: investigating the existing project, selecting and ordering the necessary components, disassembling the robot, integrating new components, and configuring and testing the system.

The practical outcome is a functional radar-based obstacle detection system that enhances the Open Mower's navigation capabilities, increasing both autonomy and reliability. The main goal is to contribute to the Open Mower community in a way that allows other users to learn from and build upon this solution.

CERCS: T125 – Automation, robotics, control technology

Keywords: robotics, ROS, Linux, RTK, mmWave radar, robotic lawnmower, obstacle detection, autonomous mowing

Sisukord

Lühikokkuvõte	2
Abstract	3
Sisukord	4
Jooniste loetelu.....	6
Tabelite loetelu.....	7
Lühendid, konstandid, mõisted	8
1 Sissejuhatus.....	9
2 Kirjanduse ülevaade.....	10
2.1 Muruniidukite üldine taust ja klassifikatsioon	10
2.2 Roboti opearatsioonisüsteem (ROS)	11
2.3 GPS RTK ning selle toimimise põhimõtted.....	12
2.4 mmWave Radar Sensor	13
2.5 Olemasolevad avatud lahendused robotmuruniidukitele	14
2.6 Olemasolevad mmWave Radar sensori lahendused.....	17
3 Open Mower ja YardForce 500B.....	19
3.1 Open Moweri algus, eesmärgid ja arengukäik	19
3.2 Projekti algusetapid, väljakutsed ja õppetunnid.....	19
3.3 Toetatud mudelid ja arenduse hetkeseis	20
3.4 YardForce Classic 500B – originaalkonfiguratsioon ja ümberseadistamine	22
4 Eesmärk ja nõuded	24
5 Lahendus	25
5.1 Riist- ja tarkvaralised valikud	25
5.2 YardForce 500B robotniiduki konverteerimine Open Mower riistvaraga niidukiks	27
5.2.1 Vana riistvara eemaldamisprotsess.....	27
5.2.2 Uue riistvara ette valmistamine	28
5.2.3 RTK GPSi ettevalmistamine	29
5.2.4 Millimeeter radarsensori ettevalmistamine	30
5.2.5 Uue riistvara paigutamine robotisse	31
5.2.6 Roboti operatsioonisüsteemi valik.....	32
5.3 Baasjaama disaini valik.....	33

5.4 Millimeeterlaine radari integreerimismeetodi valik	34
6 Testimine.....	36
6.1 Baasjaama testimine	36
6.2 Roboti testimine ja arendus	36
6.3 Millimeeterlaine radarsensori testimine ja tulemused.....	37
6.4 Töö käigus esinenud probleemid ning väljakutsed	37
7 Ideid tulevikuks.....	39
8 Kokkuvõte.....	40
Tänuavaldused	41
Viited.....	42
Lisad.....	47
Lisa 1. Lõputöö raames valminud ning täiendatud koodibaas	47
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	48

Jooniste loetelu

Joonis 2.1 ArduMower robotmuruniiduk koos komplekteeritud riistvaraga.....	16
Joonis 2.2 Pääkseenergial töötav robotmuruniiduki lahendus.....	17
Joonis 3.1 (a): YardForce Classic 500B Open Mower (pilt kommuniliikmelt Budda).....	21
Joonis 3.1 (c): Worx Landroid Open Mower (pilt kommuniliikmelt Damme)	21
Joonis 3.1 (b): Viking iMow MI 632 Open Mower (Pilt kommuniliikmelt Pete_MI632)	21
Joonis 3.1 (d): Parkside Open Mower (pilt kommuniliikmelt Dávid).....	21
Joonis 5.1: Open Mower riistvara skeem joonistatud draw.io veebirakenduses [34].....	25
Joonis 5.2 Standard emaplaat koos UI trükkplaadiga vs Open Moweri emaplaat koos selle lahendusega.....	27
Joonis 5.3 Open Moweri komplekteeritud riistvara koos YardForce Classic 500B mudeli kaasatuleva akuga.	28
Joonis 5.4: Open Mower dokkimisjaama DC/DC pingemuundur.	29
Joonis 5.5: Paremal baasjaama RTK GPS trükkplaadi olek, vasakul roboti oma fikseeritud olekus (FIXED) u-center tarkvaras.....	30
Joonis 5.6: Open Mower riistvara YardForce Classic 500B küljes.	31
Joonis 5.7: Open Mower ROS kimpude ning suhtluse skeem joonistatud draw.io veebirakenduses [34].	32
Joonis 5.8 (a): Baasjaam tagant vaates. Vaates on juhtmeteklamber, liugurkorpus ning küljekatted.....	33
Joonis 5.8 (b): Baasjaam liugurkorpuseta. Vaates on platvormi raam koos trükkplaadi platvormidega.	33
Joonis 5.8 (c): 3D-prinditud baasjaama korpuse küljekate PETG materjalist.....	33
Joonis 5.8 (d): Baasjaama trükkplaadid liugurplatvormidel platvormi raamil	33
Joonis 5.9: Millimeeter radari kinnituskoht robotis.....	35
Joonis 5.10: Millimeeterlaine radarile 3D-prinditud kinnitus.....	35

Tabelite loetelu

Tabel 1: Open Mower kogukonna poolt arenduses olevad niidukid	20
Tabel 2: Tehasekonfiguratsiooniga YardForce 500B võrdlus Open Mower YardForce 500B lahendusega.....	23

Lühendid, konstandid, mõisted

RTK – *Real-Time Kinematic*, reaalaajas kinemaatika

GPS – *Global Positioning System*, üleilmne asukoha määramise süsteem

FMCW – *Frequency Modulated Continuous Wave*, sagedusmoduleeritud pidevlaine

NTRIP – *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*, RTCM-i võrgustatud transport internetiprotokolli kaudu

RTCM - *Radio Technical Commission for Maritime*, raadiotehnilise komisjoni merenduse erikomitee

LED – *Light-Emitting Diode*, valgusdiod

RGB – *Red Green Blue*, punane roheline sinine

ROS – *Robot Operating System*, roboti operatsioonisüsteem

CAD – *Computer-Aided Design*, Raalprojekteerimine

DC – *Direct Current*, alalisvool

IF – *Intermediate Frequency*, vahesagedus

FFT – *Fast Fourier Transform*, kiire Fourier' pööre

GNSS - *Global Navigation Satellite System*, Ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem

USB – *Universal Serial Bus*, universaalne jadasiin

PPP – *Precise Point Positioning*, täpne punkti positsioneerimine

DSP – *Digital Signal Processing*, digitaalne signaalitöötlus

BMS – *Battery Managment System*, aku haldus süsteem

Li-ion – *Lithium ion*, liitiumioon

LIDAR - *Light Detection and Ranging*, Valguse tuvastamine ja kauguse mõõtmine

UI – *User Interface*, kasutajaliides

1 Sissejuhatus

Paljudel inimestel üle maailma on kodud, mille juurde kuulub hoov ja muruplats, mis vajab regulaarset hooldust ja niitmist. Selleks on saadaval mitmesuguseid motoriseeritud tööriistu, sealhulgas lükatavad mootorniidukid, murutrimmerid ja üha populaarsemaks muutuvad robotniidukid. Robotniidukid on autonoomsed seadmed, mis suudavad iseseisvalt etteantud ala niita, säästes omaniku aega ja vaeva. Need seadmed kasutavad andureid ja tarkvara, et liikuda mööda määratletud piire ja vältida takistusi, tagades ühtlase ja hooldatud murupinna.

Siiski peitub selliste nutikate toodete juures oluline probleem: mida keerulisemaks muutuvad seadmed, seda raskem on nende üksikuid osi parandada või välja vahetada. Kui varasemalt sai katki läinud tööriista parandada mootori või tera vahetamisega, siis tänapäeval sõltuvad paljud seadmed, sealhulgas robotniidukid, eelkõige tarkvara ja elektroonika toimimisest. Kui need komponendid vananevad või lakkavad töötamast, muutub terve niiduk sageli kasutuskõlbmatuks, kuigi mehaanilised osad võivad olla täiesti töökorras. See tähendab, et kasutaja peab kas investeerima seadme parandamisse või ostma uue niiduki – mis on kallis ja keskkonnale koormav.

Selliste probleemide lahendamiseks on loodud Open Moweri kogukond – aktiivne arendajate ja huviliste võrgustik, kelle eesmärk on pakkuda avatud lähtekoodiga riist- ja tarkvaralahendusi olemasolevatele robotniidukitele. See võimaldab pikendada seadmete eluiga, pakkuda tarkvarauuendusi ja parandamisvõimalusi ka pärast tootja toe lõppemist ning vältida olukorda, kus niiduk muutub lihtsalt „ühekordseks tarbekaubaks“.

Hetkel on Open Moweri platvormil siiski üks oluline puudus: puudub süsteem, mis suudaks niitmise käigus usaldusväärselt tuvastada ja vältida ajutisi takistusi, nagu murule jäetud esemed, veeloigud või muud ootamatud objektid. Üheks võimalikuks lahenduseks on kasutada millimeeterlaine radarsensorit, mis võimaldab mõõta objektide kaugust, suurust ja sügavust sensori vaateväljas.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on integreerida millimeeterlaine radarsensori funktsionaalsus Open Moweri roboti operatsioonisüsteemiga, et kaardistada niitmise käigus ilmnevad ajutised takistused ning neid jooksvalt vältida.

2 Kirjanduse ülevaade

2.1 Muruniidukite üldine taust ja klassifikatsioon

Muruniidukid on arenenud lihtsatest käsiseadmetest nutikateks, osaliselt või täielikult autonoomseteks masinateks. Nende arengut on vedanud nii mehaaniline innovatsioon kui ka elektroonika ja tarkvara areng.

Muruniidukeid saab üldjoontes jagada kolme klassi :

- Manuaalsed niidukid – traditsioonilised vikatid ja mehhaanilised lükatavad seadmed. [1,2]
- Poolautomaatsed niidukid – bensiini- või akutoitel mootorniidukid, mida kasutaja ise juhib. [1,2]
- Autonoomsed robotniidukid – iseseisvalt liikuvad seadmed, mis kasutavad navigatsioonisüsteeme, sensoreid ja tarkvara, et katta niiduala ning vältida takistusi. [1,2]

Autonoomsed niidukid jaotuvad omakorda:

- Perimeetrijuhitavad – määravad niiduala füüsilise juhttraadi alusel. [3]
- Kaardipõhised – kasutavad täppispositsioneerimist , et navigeerida määratud kaardil. [3]

Lisaks navigeerimistehnoloogiale varieeruvad seadmed ka takistuste tuvastamise meetodites. Visuaalsed lahendused (nt kaamerad), laserskannerid (LIDAR) ja millimeeterlaine radarid võimaldavad täpsemat ja töökindlamat reaajas otsustamist. [1-3]

2.2 Roboti operatsioonisüsteem (ROS)

Autonoomsete robotniidukite – ja üldisemalt isesõitvate robotite – arendamisel on kriitilise tähtsusega tarkvaraplatvorm, mis võimaldab erinevate andurite, juhtimisloogika ja liikumissüsteemide integreerimist. Üks enim kasutatud raamistikke selles vallas on roboti operatsioonisüsteem (Robot Operating System, ROS), mida kasutatakse laialdaselt teadus-, arendus- ja prototüüpimiskeskondades. Kuigi enamik kaubanduslikke robotniidukeid kasutab omaette suletud tarkvaraplatvorme, tuginevad avatud lähtekoodiga lahendused nagu ROS-ile. [4]

Roboti operatsioonisüsteem (ROS) on avatud lähtekoodiga tarkvaraplatvorm, mis on mõeldud robotikasüsteemide arendamise, testimise ja haldamise hõlbustamiseks. Vaatamata oma nimele ei ole ROS iseseisev operatsioonisüsteem, vaid pigem vahekiht (*middleware*), mis töötab tüüpiliselt Linuxi operatsioonisüsteemil ning pakub standardiseeritud mehhanisme sõlmedevaheliseks suhtluseks, protsesside haldamiseks ja riistvaraga liidestumiseks. [5,6]

Käesolevas töös kasutatav ROS 1 tugineb modulaarsele arhitektuurile, kus süsteem on jaotatud eraldiseivateks sõlmedeks (*nodes*), mis täidavad konkreetseid ülesandeid – näiteks andurite andmete töötlemine, juhtimisalgoritmid või kasutajaliideste haldamine. Sõlmed suhtlevad omavahel asünkroonselt teemade (*topics*) kaudu või sünkroonselt teenuste (*services*) kaudu, kasutades *roscore*'i kui kesksel registrit ja kommunikatsioonihaldurit [6]. Selline arhitektuur toetab süsteemi laiendatavust ning võimaldab paralleelset töötlemist, mis on autonoomsete robotite puhul kriitilise tähtsusega.

ROS-i ökosüsteemi oluliseks tugevuseks on lai valik olemasolevaid tarkvarapakette, mis katavad robotika võtmevaldkonnad nagu lokaalne ja globaalne navigeerimine, kaardistamine (SLAM), simulatsioon (nt Gazebo), liikumise planeerimine ja sensorite integreerimine. Selline taaskasutatavuse ja avatud lähtekoodi kombinatsioon võimaldab arendajatel keskenduda süsteemispetsiifilistele probleemidele, kasutades samas usaldusväärseid ja kogukonnatestitud lahendusi. [5-7]

Kuigi ROS 1-l puuduvad sisseehitatud reaaliajavõimekus ja standardiseeritud mitme roboti koostöö tugi, on see platvorm endiselt laialdaselt kasutusel teaduslikes ja rakenduslikes projektides, eriti väikese ja keskmise keerukusastmega süsteemides. Lisaks on ROS 1 hästi dokumenteeritud ning omab tugevat kasutajaskonda, mis muudab selle sobivaks valikuks ka haridus- ja prototüüpimiskeskondades. [5,6]

2.3 GPS RTK ning selle toimimise põhimõtted

Kaasaegsetes autonoomsetes robotniidukites, on täpne positsioneerimine ülioluline, et tagada ohutu ja tõhus liikumine nii keerukates kui ka avatud keskkondades. Selle saavutamiseks kasutatakse tihti GPS RTK (Real-Time Kinematic) lahendust, mis võimaldab GNSS-i signaalide abil määrata asukohta kuni 1 cm täpsusega. GNSS-i alla kuuluvad süsteemid nagu GPS, GLONASS, BeiDou ja Galileo. [8,9]

RTK-süsteem kasutab kahte komponenti: statsionaarset baasjaama ja liikuvat kulgurit (*rover*). Baasjaam, mille asukoht peab olema teada sentimeetritäpsusega, saadab reaajas korrektsioonisignaale kulgurile. Need parandused edastatakse tavaliselt RTCM-protokollis, mis sisaldab erinevaid sõnumitüüpe (nt 1005, 1077, 1087, 1230), millest igal on kindel funktsioon. RTCM-andmeid edastatakse enamasti interneti või raadiosignaali kaudu, kasutades näiteks NTRIP-protokolli. [8,9]

Selleks et baasjaam saaks edastada täpseid parandusi, peab ta ise teadma oma asukohta sentimeetritäpsusega. Baasjaama koordinaadid saab määrata kolmel peamisel viisil:

- käsitsi sisestades, kui need on eelnevalt geodeetiliselt määratud;
- kasutades "*survey-in*" protseduuri, mille käigus baasjaam arvutab enda asukoha pikaajalise GNSS-andmete kogumise abil (see võib kesta mõnest minutist mitme tunnini);
- või kasutades PPP-meetodit koos täpsustatud satelliidikorrektuuridega.[9-11]

Esmakasutuse korral kasutatakse tavaliselt "*survey-in*" meetodit. Selle protsessi käigus töötab baasjaam esialgu tavalise GNSS-vastuvõtjana, kuni suudab määrata oma koordinaadid piisava täpsusega. Kui asukoht on kindlaks määratud, salvestatakse see ning baasjaam alustab korrektsioonisignaali saatmist. Kui baasjaam jääb statsionaarsesse asukohta, pole järgmistel käivitustel vaja uut kohamääramist teha – piisab salvestatud koordinaatide kasutamisest. [10]

RTK-süsteemi rakendamiseks on kolm peamist võimalust [9]:

- kasutada olemasolevaid avalikke NTRIP-teenuseid;
- luua iseseisev referentsbaasjaam (soovitav töökindluse ja sõltumatuse huvides);
- kasutada mobiilirakendusi (nt Lefebure NTRIP Client [12]), mis loovad ühenduse jadaside kaudu.

Ajalooliselt olid RTK-lahendused kallid ja piiratud kasutusega, kuid olukord muutus 2006. aastal, kui avaldati esimene avatud lähtekoodiga tarkvarateek RTKLIB. Hiljem, 2009. aastal, ilmus ka RTKLIBi versioon Microsoft Windowsi platvormile. See areng tegi RTK-lahendused kättesaadavaks ka tavakasutajatele ja avas ukse vabavarapõhiste lahenduste loomisele. [9,11]

Kõige töökindlamaks ja täpsemaks peetakse tavaliselt teist lahendust, s.t referentsbaasjaama iseseisvat seadistamist, kuna see ei sõltu välistest teenusepakkujatest ega vaja keerulist eelseadistust. [9]

2.4 mmWave Radar Sensor

Millimeeterlainne radar (mmWave) on üks mitmest sensoritehnoloogiast, mida kasutatakse autonoomsete süsteemide takistuste tuvastamiseks, liikumise jälgimiseks ja keskkonna tajumiseks. Selle tehnoloogia võimekus tuvastada objekte sõltumata nähtavusest või valgusoludest teeb sellest väärtusliku komponendi erinevates rakendustes – alates autonoomsetest sõidukitest ja droonidest kuni tööstusautomaatika ja nutikate kodusüsteemideni. [13,14]

Erinevalt visuaalpõhistest anduritest, nagu kaamerad või lidarid, suudavad mmWave radarid usaldusväärset töötada keerulistes keskkonnatingimustes, sealhulgas udu, vihma, suitsu ja täieliku pimeduse korral. See muudab need eriti sobivaks rakendusteks, kus töökindlus peab olema tagatud sõltumata ilmast ja valgustingimustest. [13]

Millimeeterlainne radarid kasutavad objektide tuvastamiseks FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) meetodit. Selle põhimõtte kohaselt saadab radar pidevalt muutuva sagedusega signaali ning mõõdab peegeldunud lainete ajaviivitust ja sagedusnihkeid, et määrata:

- objekti kaugus (signaali ajaviivituse põhjal),
- liikumiskiirus (kasutades Doppleri efekti [13]),
- ja nurk (kasutades mitme antenni signaali erinevusi) [13,15].

Millimeeter radari arhitektuuris mängib olulist rolli signaalitöötlus, mis sisaldab andmete filtreerimist, kiiret Fourier' teisendust (FFT), objekti klassifitseerimist ning vajadusel ka

reaalajas jälgimist [14,15]. Texas Instrumentsi radariplatvormid suudavad töödelda mitut objekti samaaegselt, pakkudes detailselt infot nende kauguse, kiiruse ja nurga kohta [13].

Millimeeterlaine radarite võimekus on leidnud rakendust paljudes valdkondades, sealhulgas autonoomsed sõidukid, tööstusautomaatika, droonid, meditsiinilised jälgimissüsteemid ning nutikad keskkonnad. Robotikas kasutatakse millimeeterlaine tehnoloogiat peamiselt takistuste tuvastamiseks, liikumistrajektoride jälgimiseks ja turvafunktsioonide realiseerimiseks. [14]

Autonoomsete mobiilsete robotite, nagu robotmuruniidukid, puhul võimaldab millimeeterlaine radar reaalajas reageerimist ootamatutele objektidele, mis võivad olla liiga väikesed, läbipaistvad või halvasti nähtavad teiste sensorite jaoks. See muudab millimeeterlaine radarid sobivaks komponendiks süsteemides, kus töökindlus ja keskkonnast sõltumatus on kriitilise tähtsusega. [13]

2.5 Olemasolevad avatud lahendused robotmuruniidukitele

Siinses alampeatükis annab töö autor ülevaate olemasolevatest robotmuruniiduki lahendustest ning arendustest. Eesmärk on teha miniatuurne sissejuhatus projektile ning tuua välja sarnasusi ning erinevusi võrreldes Open Mower projektiga.

Kuna tänapäevased robotniidukid tuginevad keerukale tarkvarale ja riistvarale, siis nende hooldus ja kohandamine on sageli piiratud suletud ökosüsteemide tõttu. See on tekitanud vajaduse avatud lahenduste järele, mis oleksid:

- Modulaarsed – võimaldavad komponente vahetada või täiendada;
- Läbipaistvad ja arendajasõbralikud – tarkvara ja riistvara on dokumenteeritud ja modifitseeritav;
- Taaskasutatavad – pikendavad seadmete eluiga ja vähendavad elektroonikajäätmeid;
- Kogukonnapõhised – võimaldavad kasutajatel ja arendajatel jagada teadmisi, tuge ja uusi lahendusi.

Open Mower

Open Mower on Saksamaalt alguse saanud avatud lähtekoodiga projekt, mille eesmärgiks on võimaldada kasutajal ehitada täisautonoomne robotmuruniiduk, mis põhineb kaasaegsetel robotikastandarditel. Projekti keskmes on ROS 1 (Robot Operating System) tarkvaraplatvorm, mis koordineerib erinevate sõlmede (nt sensoriandmete töötlemine, juhtimisalgoritmid, navigeerimine) omavahelist suhtlust ning võimaldab väga täpset ja paindlikku süsteemiarhitektuuri. [16,17]

Riistvaraliselt koosneb Open Mower süsteem Raspberry Pi 4 juhtarvutist, millele lisandub RTK-GNSS moodul (nt ArduSimple), mootori draiverid, aku, veomootorid, niidumoodul. Süsteem kasutab ka Raspberry Pi Pico mikrokontrollerit madala taseme juhtimiseks, näiteks ohutusfunktsioonide või signaalide vahendamiseks. [16,17]

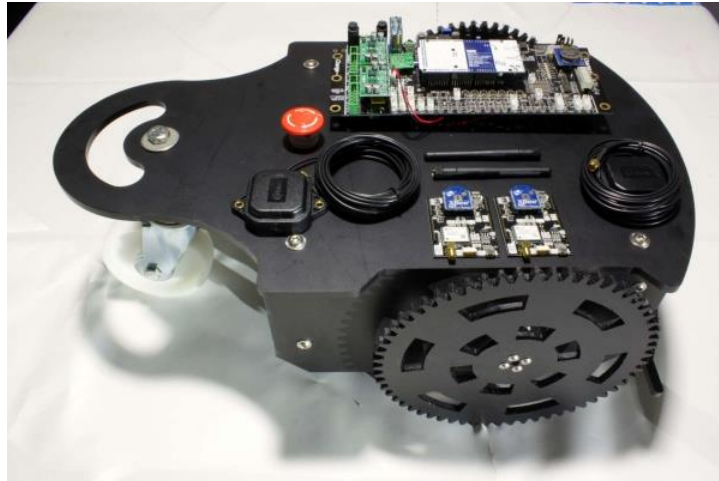
Peamine erinevus võrreldes teiste lahendustega seisneb tarkvaraarhitektuuris ning sentimeetritäpse RTK GPS navigatsioonis, mis võimaldab töötada ilma perimeeterjuhtmeteta. Kasutaja saab kaardistada tööala, salvestada niidutrajektoore ning lisada takistustuvastuse mooduleid. [16,17]

ArduMower

ArduMower on avatud lähtekoodiga tee-ise tüüpi robotmuruniiduki projekt (Joonis 2.1), mille eesmärgiks on võimaldada kasutajatel ehitada autonoomne niiduk nullist, kasutades vabalt kättesaadavat tark- ja riistvara. Süsteemi keskne komponent on Arduino arendusplaat, mille külge ühendatakse mootorikontrollerid, toiteplokid ja vajadusel ka RTK GPS moodulid täpsemaks positsioneerimiseks. [18]

Projekti peamised eesmärgid kattuvad suurel määral Open Moweriga: kättesaadavus, avatud lähtekood ning kasutajasõbralikkus. Märkimisväärne erinevus seisneb tarkvaraarhitektuuris – ArduMower tugineb Arduino-põhisele juhtimisele, samas kui Open Mower kasutab ROS-i platvormi. [18]

Takistuste vältimiseks on ArduMoweril rakendatud Alfred-tarkvara, mis võimaldab nutitelefoniga kaamerapildi kaudu tuvastada eesolevaid objekte. Kasutaja saab roboti vaadet jälgida ja juhtida reaalsajas nii arvutist kui ka mobiiliseadmest. See lahendus pakub visuaalset tagasisidet ning lisab mugavust interaktiivses kasutuses. [18]



Joonis 2.1 ArduMower robotmuruniiduk koos komplekteeritud riistvaraga

Päikesepaneelidega robotmuruniiduk

OpenElectronics veebilehel avaldatud projekt tutvustab päikeseenergiat töötavat robotmuruniidukit (Joonis 2.2), mille eesmärk on ühendada autonoomsus ja keskkonnasõbralikkus. Tegemist on Arduino-põhise lahendusega, mille energiaallikaks on peamiselt päikesepaneelid ning vajadusel lisaks akutoide, mis laetakse samuti päikeseenergia abil. Sellist lähenemist kasutatakse ka näiteks Solaride päikeseauto projektis, kus energiaallikana tohib kasutada vaid päikeseenergiat. [19]

Süsteemi keskmes on Arduino Uno arendusplaat, millele on lisatud erinevad laiendusplaadid mootorite ja andurite juhtimiseks. Liikumist jälgitakse esiratastele paigaldatud HAL-andurite abil ning mootoreid juhitakse läbi kahe draiverplaadi. Niiduki löiketerasid juhib harjadeta mootor, mille tööd reguleeritakse PWM-signaalide kaudu, kasutades selleks eraldi mootoridraiverit. Lisaks on süsteemis olemas pingemuundurid, mis võimaldavad akude laadimist vajadusel ka võrgutoite abil. [19]

Selle lahenduse peamine erinevus võrreldes Open Moweriga seisneb navigatsioonimeetodis ja energiavarustuses. Päikesepaneelidega robotmuruniiduk kasutab perimeeterjuhtmeid, mitte GPS-põhist navigatsiooni. Seetõttu on see süsteem sobilik pigem statsionaarseks kasutuseks ühel kindlal niidualal, kuna tööpiirkonna muutmine eeldab perimeetrisüsteemi ümberpaigaldamist. Iga uue ala lisamine tähendab ka lisakulusid, mis piirab süsteemi paindlikkust võrreldes RTK GPS-il põhinevate lahendustega nagu Open Mower. [19]



Joonis 2.2 Päikseenergiat töötav robotmuruniiduki lahendus

2.6 Olemasolevad mmWave Radar sensori lahendused

Käesolevas alapeatükis käsitletakse olemasolevaid avatud millimeeterlaineline radar lahendusi, millel on potentsiaal toetada takistuste tuvastamist ja vältimist autonoomsetes süsteemides nagu robotmuruniidukid. Eesmärk on tutvustada projekte ning koodibaase, mis pakuvad ROS-ühilduvaid tööriistu.

radar-lab/ti_mmwave_ropkg

Tegemist on laialdaselt kasutatava ROS 1-põhise draiveriga Texas Instrumentsi mmWave radarite, mis toetab mitmeid mudeleid (nt xWR1443, xWR1642, AWR1843). Projekt võimaldab lugeda radari andmeid, sh Doppleri kiirusinfot ja punktipilv-andmestikku [20], ning visualiseerida neid ROSi tööriistade (nt RViz [21]) abil. Draiver toetab kahe kanali vahelist suhtlust – üks konfigureerimiseks ja teine andmete edastamiseks. Käesolevas bakalaureusetöös kasutataksegi just seda draiverit millimeeterlaineline sensori integreerimiseks Open Moweri robotile. [22]

DesignCore® RS-1843AOPU millimeeterlaineline radarimoodul

DesignCore® RS-1843AOPU on 77 GHz millimeeterlaineline radarimoodul, mille on välja töötanud D3 Engineering koostöös Texas Instrumentsiga. Moodul põhineb AWR1843AOP kiibil, mis sisaldab digitaalset signaalitöötlust, mikrokontrollerit, radarikiirendit ja antenne ühes pakendis (*Antenna-on-Package*). Seade on kompaktne, mõõtmetega ligikaudu $2,6 \times 2,1 \times 1,5$ cm, metallkorpusega ja USB-Serial liidesega, mis võimaldab mugavat ühendamist ROS-põhiste süsteemidega. [23,24]

ethz-asl/ti_mmwave_ropkg

Originaalselt võetud radar-lab/ti_mmwave_ropkg alt, on see projekt uuendatud 1843AOP radarsensori võimalustega. See toetab ROS 1 ning ka SDK 3.5 , mille põhjal on ka püsivara kirjutatud selles töös kasutatud radarsensoril. [25]

Continental ARS548 ROS/ROS2 draiver – ARS548_ros

Tegemist on teadusliku projekti raames loodud ROS- ja ROS2-draiveriga, mis toetab Continental ARS 548 RDI radari integreerimist autonoomsetesse sõidukitesse. Draiver võimaldab koguda infot objektide kiiruse, orientatsiooni ja liikumise kohta. Kuigi sensor ise ei ole odav ega vabavaraline, pakub projekt kasulikke võrdlusvõimalusi millimeeterlaine radarite kõrgema täpsusega rakenduste osas. [26]

3 Open Mower ja YardForce 500B

Selles peatükis antakse ülevaade Open Moweri projektist, selle arengust ja eesmärkidest, ning tutvustatakse lähemalt YardForce Classic 500B robotmuruniiduki platvormi, millele käesolev töö tugineb. Valik langes just sellele mudelile, kuna Open Moweri kogukond on selle põhjal välja töötanud dokumenteeritud ja stabiilselt toimiva lahenduse.

3.1 Open Moweri algus, eesmärgid ja arengukäik

Open Moweri projekt sai alguse 2022. aasta alguses vastusena turul valitsevale olukorrale, kus enamik olemasolevaid robotniidukeid olid kas liiga kallid, piiratud funktsionaalsusega või vähese täpsusega. Projekti algatajaks oli hobirobootika entusiast, kelle eesmärgiks oli luua RTK-GPS-il põhinev täisautonoomne robotmuruniiduk, mis oleks avatud lähtekoodiga ja taskukohane isetegijatele ning arendajatele. [27]

RTK on positsioneerimistehnoloogia, mis suurendab GNSS-süsteemide täpsust sentimeetri tasemele. Süsteem kasutab kahte komponenti: statsionaarset baasjaama ja liikuvat kulgurit (niidukit), kus baasjaam saadab korrektsioonisignaale, võimaldades kulguril oma asukohta väga täpselt määrata. [27]

Avatud lähtekoodiga arendamine oli teadlik valik, mille eesmärk oli võimaldada kasutajatel süsteemi täiendada ja jagada teadmisi kogukonna sees. Pikas perspektiivis nähakse Open Mowerit osana suuremast avatud robotikaplatvormide perest, mille baasil võiks välja töötada ka teisi autonoomseid seadmeid, nagu tolmuimejad või transpordirobotid. [27]

3.2 Projekti algusetapid, väljakutsed ja õppetunnid

Arenduse varases staadiumis osutus suurimaks takistuseks mootorikontrollerite töökindlus. Esialgsed katsed erinevate valmis lahendustega andsid ebaühtlaseid tulemusi – madalatel kiirustel esinesid ülepinged, katkestused ja isegi kontrollerite purunemised. Lõpuks võeti aluseks VESC open source mootorikontroller, mille põhjal loodi väiksem ja Open Moweri vajadustele vastav kohandatud lahendus. [27]

Lisaks sellele disainiti nullist uued trükkplaadid ja kasutajaliidesed. Teatud määral kasutati ka pöördprojekteerimist (*reverse engineering*), et tagada sobivus olemasolevate komponentide ja pistikutega. [27]

3.3 Toetatud mudelid ja arenduse hetkeseis

Open Moweri kogukonna poolt arendatakse mitmeid erinevaid niidukimudeleid, kuid enamik neist on veel eksperimentaalses faasis, samuti puudub neil põhjalik dokumentatsioon. YardForce Classic 500 on ainus mudel, mille puhul on lahendus täielikult välja töötatud ja dokumenteeritud. [16,17,28]

Küll aga on Open Mower kogukond loonud nimekirja, kuhu on märgitud ära robotniidukid, mis on ühiludvad nende poolt loodud lahendusega [28]. Allpool (Tabel 1) on ära toodud mõned neist

Niiduki bränd / mudel	Toetuse seis	Märkused
YardForce Classic 500/500B [29]	Täielikult toetatud	Dokumenteeritud, plug-and-play lahendus
Husqvarna Automower robotmuruniidukid [30]	Eksperimentaalne	Kasvav tugi, kogukond töötab lahenduste kallal
Bosch Indego robotmuruniidukid [31]	Eksperimentaalne	Disainitakse uusi trükkplaate, katsetusi pole veel tehtud
Parkside robotniidukid [32]	Eksperimentaalne	Uuritakse standardriistvara, tehakse esimesi lihtsamaid katsetusi
John Deere robotmuruniidukid [33]	Eksperimentaalne	Esimesed katsetused tehtud, mõningane modifitseerimine on vajalik

Tabel 1: Open Mower kogukonna poolt arenduses olevad niidukid

Lähtuvalt eeltoodust keskendub käesolev töö YardForce Classic 500B platvormile, mis on tänu stabiilsusele ja kogukonna toele sobiv arendusbaas Open Moweri sensorite integreerimiseks.

Allpool (Joonis 3.1 (a-d)) on toodud mõned pildid robotniidukitest, kus Open Mower tarkvara ja riistvara lahendus juba rakendatud on.



Joonis 3.1 (a): YardForce Classic 500B Open Mower (pilt kommuuniliikmelt Budda)



Joonis 3.1 (b): Viking iMow MI 632 Open Mower (Pilt kommuuniliikmelt Pete_MI632)



Joonis 3.1 (c): Worx Landroid Open Mower (pilt kommuuniliikmelt Damme)



Joonis 3.1 (d): Parkside Open Mower (pilt kommuuniliikmelt Dávid)

3.4 YardForce Classic 500B – originaalkonfiguratsioon ja ümberseadistamine

YardForce Classic 500B on kodukasutuseks mõeldud automaatne robotmuruniiduk, mille tootja lubab katta kuni 500 m² suuruse muruplatsi. Seade on mõeldud töötama perimeeterkaabli abil defineeritud alas ning naaseb ise baasjaama laadima. Tegemist on suletud süsteemiga kaubandusliku tootega, mille juurdepääs sisemisele tarkvarale on piiratud. [29]

Niiduki peamised originaalomadused on järgmised [29]:

- Lõikesüsteem: kolme pöörleva lõiketeraga efektiivne multšimissüsteem;
- Lõikelaius: 16 cm;
- Lõikekõrgus: reguleeritav 5 astmega vahemikus 20–60 mm;
- Mootor: harjadeta (*brushless*), vaikne ja töökindel;
- Sensorid: kokkupõrke-, kalle-, tõste- ja vihasensorid;
- Juhtimine: Bluetoothi kaudu, toetab mobiilirakendust;
- Toide: laetav aku, automaatne laadimisfunktsioon;
- Lisafunktsioonid: äärte lõikamise režiim, vihma tuvastamine, turvakaalutlustel iselülituv süsteem;
- Korpus ja mõõdud: plastikust konstruktsioon; mõõtmed 96 × 38 × 101 cm; kaal 8,76 kg; värv must/oranž.

Komplektis on robotmuruniiduk, laadimisjaam, 120 m perimeeterkaablit, kinnitusnaelad, varuterad ja ühendustarvikud. [29]

Süsteemi juhtimine põhineb tootjapoolsel tarkvaral ja spetsialiseeritud riistvaral, millele kasutajal puudub ligipääs. Seetõttu ei ole võimalik niiduki funktsionaalsust oluliselt laiendada (nt lisada GPS, takistustuvastus, kaardipõhine navigeerimine või kaugjuhtimine väljaspool Bluetooth-ala). [29]

Open Moweri projekti raames on YardForce Classic 500B varustatud täiesti uue elektroonikaga, mis võimaldab avatud lähtekoodiga autonoomset juhtimist, täpset RTK GPSi positsioneerimist ning erinevate andurite (nt lidar, millimeeterlaine). Selline lähenemine muudab algselt piiratud võimalustega niiduki paindlikuks robotikaplatvormiks, mida saab edasi arendada vastavalt projekti või kasutaja vajadustele.

Tabel 2 juures on ära märgitud tehasekonfiguratsiooniga YardForce 500B NING YardForce 500B Open Mower funktsionaalsused ning erinevused.

Komponent/Funktsioon	Originaal (YardForce 500B) [29]	Open Mower versioon [16][17]
Navigeerimine	Perimeeterkaabel + kokkupõrkepõhine takistustuvastus	RTK-GPS (sentimeetritäpsus) + projekti käigus lisatav millimeeterlaine radar
Juhtimine	Nuppudega juhtpaneel + Bluetooth mobiilirakendus	ROS-tarkvara (Raspberry Pi 4) + kaugühendus
Lõikemootor ja süsteem	3 teraga multšisüsteem, harjadeta mootor	Sama füüsiline mehhanism, juhitud uue mootor draiveri kaudu
Sensorid	Põrke-, kalde-, tõste- ja vihasensorid	Samad, kuid lisatud juurde millimeeterlaine radar
Positsioneerimine	Puudub täpne positsioneerimine	RTK-GPS (ArduSimple F9P)
Tarkvara	Suletud, tootjapoolne	ROS 1, avatud lähtekoodiga sõlmed
Toite- ja juhtplokk	Originaal juhtmoodul + akuvalvur	Kohandatud PCB + Raspberry Pi 4+ mikrokontroller (nt RP2040)
Kohandatavus ja laiendatavus	Väga piiratud, suletud ökosüsteem	Väga hea, modulaarsus ja avatud liidesed
Ühenduvus	Bluetooth	Wi-Fi
Sobivus arenduseks / prototüübiks	Väike	Sobiv robotika arenduseks

Tabel 2: Tehasekonfiguratsiooniga YardForce 500B võrdlus Open Mower YardForce 500B lahendusega

4 Eesmärk ja nõuded

Selle töö üldeesmärk on integreerida millimeeterlaine radarsensor olemasolevasse Open Moweri platvormi, mis tugineb YardForce Classic 500B niidukile. Projekti eesmärk on suurendada roboti autonoomiat, võimaldades sellel tuvastada ja vältida ajutisi takistusi, mis ei ole kaardistatud ega püsivad (nt liikuvad objektid, inimesed või muud esemed murul).

Projekti põhieesmärkideks on:

- 1) Valida ning hankida sobiv millimeeterlaine radarsensor;
- 2) Leida või koostada selle sensori jaoks sobiv ROS-põhine draiver, mis võimaldaks integreerimist Open Moweri süsteemiga;
- 3) Teha vajalikud riistvaralised muudatused roboti konstruktsioonis, et sensorit kinnitada ja elektriliselt Open Mower platvormiga liidestada;
- 4) Testida sensori toimimist nii andmeedastuse kui ka takistuste tuvastamise seisukohalt;

Funktsionaalsed nõuded:

- Sensor peab suutma reaalsajas tuvastada vähemalt 1–2 m kaugusel asuvaid takistusi;
- Andmed peavad olema loetavad ROS-i kaudu ja visualiseeritavad tööriistas RViz;
- Roboti liikumiskäitumine peab muutuma tuvastatud takistuste korral.

Mittefunktsionaalsed nõuded:

- Süsteem peab olema töökindel erinevates ilmastikutingimustes;
- Sensor peab sobituma niiduki konstruktsiooniga nii, et see ei sega niitmist ega laetavust;
- Lahendus peab olema taaskasutatav ja dokumenteeritud viisil, mis võimaldab teiste kogukonnaliikmete poolt taaskandamist.

Lisaks püstitati eesmärk tagada, et arendus ja dokumentatsioon oleksid kooskõlas Open Moweri kogukonna standardite ja arendussuundadega. Töö tulemus peaks olema mitte ainult funktsionaalne prototüüp, vaid ka väärtuslik panus avatud lähtekoodiga projekti arengusse.

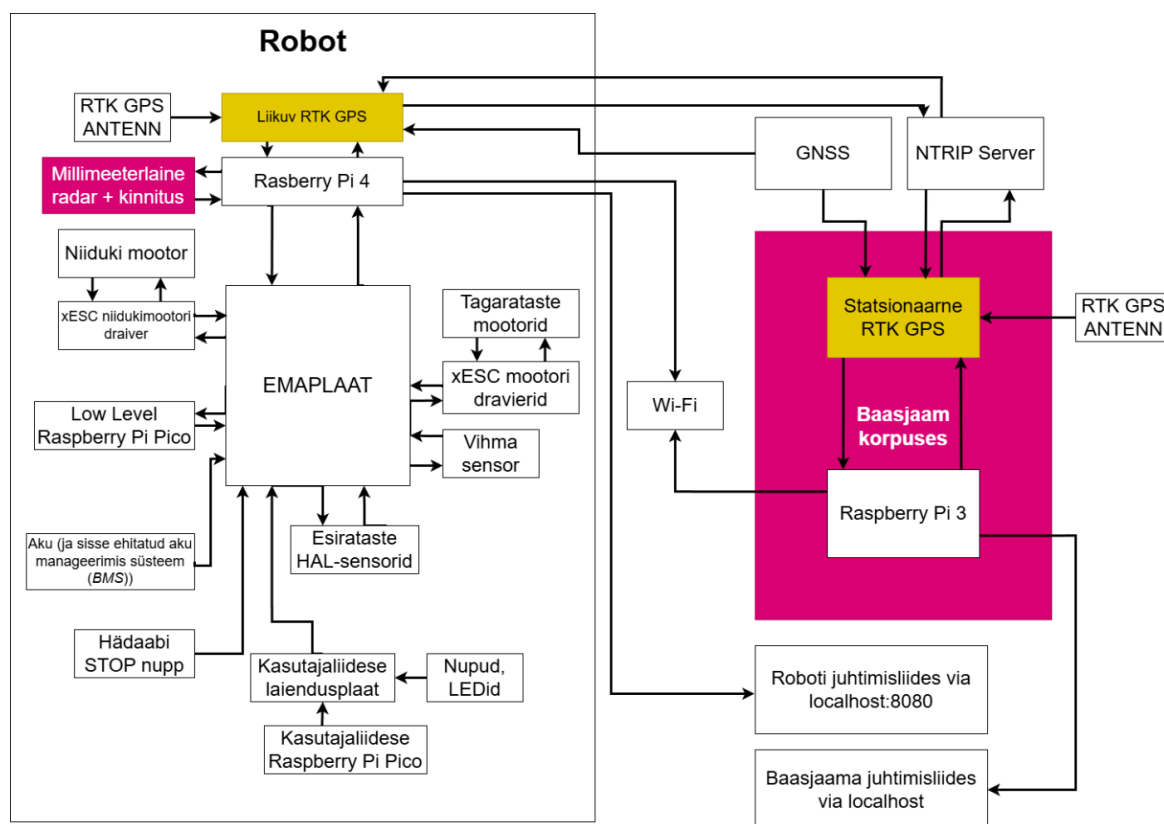
5 Lahendus

Käesolevas peatükis kirjeldatakse samm-sammult, kuidas toimus millimeeterlaineline radarsensori integreerimine Open Moweri platvormile. Protsess jaguneb mitmeks etapiks: riistvaraline ettevalmistus, tarkvaraline seadistamine, draiveri testimine ning süsteemi terviklik integreerimine.

Integreerimise aluseks oli YardForce Classic 500B, mis sobib hästi Open Moweri avatud lähtekoodiga lahenduse kasutuselevõtuks. Sellele mudelile on Open Moweri kogukond loonud põhjaliku dokumentatsiooni ning komponentide ostunimekirja, mis võimaldab originaalelektronika täielikult asendada avatud ja kohandatava juhtimissüsteemiga.

5.1 Riist- ja tarkvaralised valikud

Millimeeterlaineline radari integreerimine Open Moweri platvormile eeldas mitmete riist- ja tarkvarakomponentide koordineeritud tööd. Selle alapeatüki eesmärk on anda ülevaade kasutatud komponentidest ning põhjendada tehtud valikuid. Joonis 5.1 annab visuaalse ülevaate süsteemi ülesehitusest ja komponentide omavahelistest seostest.



Joonis 5.1: Open Mower riistvara skeem joonistatud draw.io veebirakenduses [34]

Open Mower komplekteeritud riistvara:

Robotniiduk YardForce Classic 500B – Niiduk koos dokkimisjaamaga [29].

Open Mower riistvara komplekt. [35]

2x ArduSimple RTK2B GPS trükkplaadi komplekt. [36]

Riistvara, mis tuli hankida:

DesignCore RS-1843AOPU millimeeterlaine radar (kasutusel robotis) – valitud tänu kompaktsusele, kõrgele töökindlusele ja TI-põhisele arendustööriistade toele, mis on ühildatavad ROSiga. [37]

Raspberry Pi 4B (kasutusel robotis) – Sobib Open Moweri tarkvaraplatvormi (ROS, Ubuntu) käitamiseks ja võimaldab USB kaudu radariandmete töötlemist.

Raspberry Pi 3B (kasutusel baasjaamas) – kasutusel baasjaamas koos RTKBase tarkvaraga GNSS parandussignaali edastamiseks.

3D-prinditud hoidikud ja kinnitused – vajalikud mehhaaniliste komponentide (nt sensorid, trükkplaadid ja arvuti) paigutamiseks ning kaitsmiseks välistingimuste eest. Kõik hoidikud modelleeriti töö autori poolt ning valmistati töö käigus kasutades isiklikku Bambu Lab P1P 3D-printerit. Mõned detailid trükiti kaastudengi bakalaureusetöö käigus kasutusel olnud Mass Portal Pharaoh XD printeril.

Tarkvara:

Ubuntu 20.04 + ROS Noetic (kasutusel robotis) – Open Moweri ametlikult toetatud platvorm. Ubuntu 20.04 operatsioonisüsteemi oli võimalik saada Raspberry Imager tarkvara kaudu. ROS Noetic tuli laadida hiljem juurde. [38-40]

RTKBase (kasutusel baasjaamas) – Pakub veebipõhist kasutajaliidest, mis võimaldab hallata baasjaama seadeid, jälgida satelliitsignaale ja edastada RTK parandussignaale robotile. RTKBase võimaldab seadistada NTRIP casterit, RTCM voogusid ning logida andmeid. Pakett oli kättesaadav repositooriumist. [41]

ti_mmwave_ropkg (kasutusel robotis) – Texas Instrumentsi millimeeterlaine radarite ROS-draiver. Valitud, kuna toetab AWR1843 kiipi ja võimaldab punktipilve visualiseerimist ja andmevoogude haldamist. ROS pakett oli kättesaadav repositooriumist. [22,25]

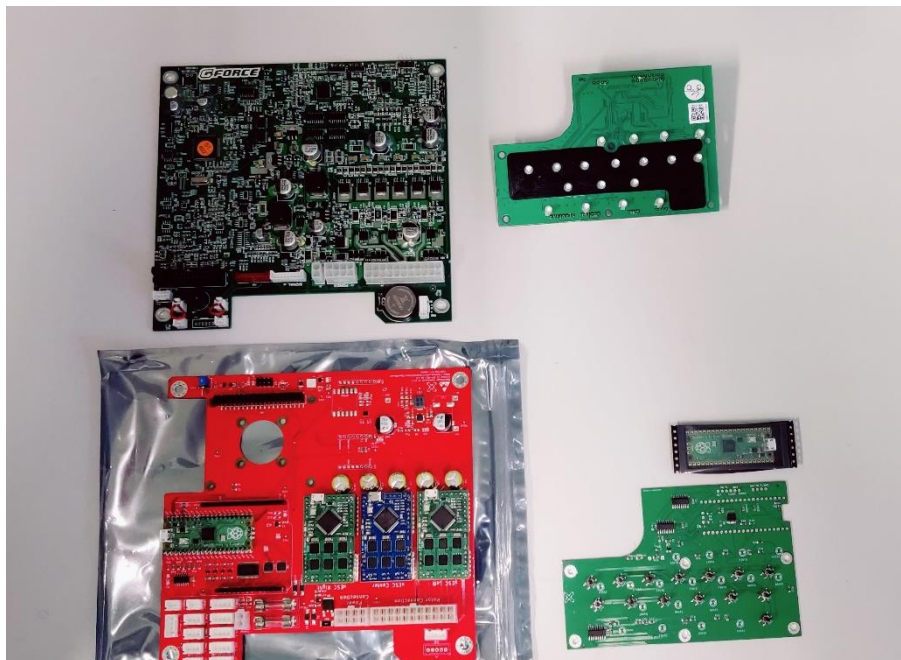
RViz ja tf (kasutusel robotis) – andmete visualiseerimiseks ja koordinaatsüsteemide sidumiseks. Need teegid tulevad ROS Noetic desktop versioonis kaasa. [42]

5.2 YardForce 500B robotniiduki konverteerimine Open Mower riistvaraga niidukiks

Robotniiduki standardmudeli ümber konverteerimiseks Open Mower robotniidukiks oli tarvis täita kolm etappi: standard riistvara eemaldamine, uue riistvara ette valmistamine ning selle paigutamine niidukisse. Dokumentatsioonis komplekteeritud ostunimekirja [43] alusel oli võimalik jälgida koostamisprotsessijuhist [16], mis on samuti Open Moweri dokumentatsioonist leitav.

5.2.1 Vana riistvara eemaldamisprotsess

YardForce 500B roboti avamiseks ja standardse elektroonika (vt. Joonis 5.2) eemaldamiseks kasutati ristpeaga kruvikeerajat ja kuuskantvõtmeid. Kõik juhtmed eemaldati ettevaatlikult, sildistati ning dokumenteeriti. Eemaldatud said nii originaalemaplaad kui ka kasutajaliides. Komponentide eemaldamisel lähtuti alajuhendist [44], mille järgi oli võimalik leida kõik kinnituskohad.



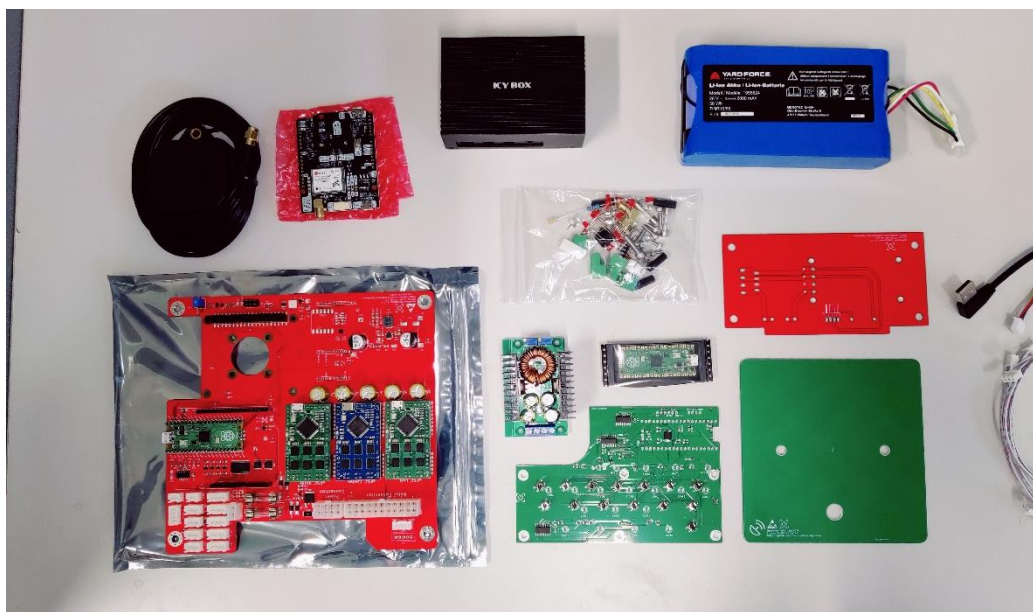
Joonis 5.2 Standard emaplaad koos UI trükkplaadiga vs Open Moweri emaplaad koos selle lahendusega.

5.2.2 Uue riistvara ette valmistamine

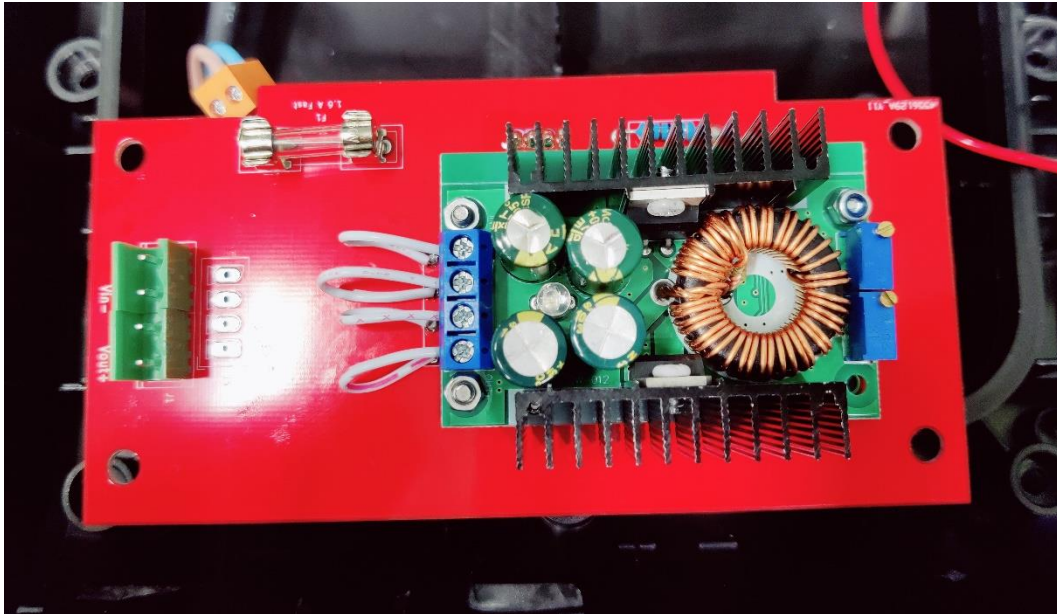
Tellitud Open Moweri riistvarakomplekt (vt. Joonis 5.3) oli suures osas valmis, kuid vajab veel mõningast ettevalmistust. Emaplaat oli täielikult komplekteeritud, ühele ArduSimple RTK plaadile tuli käsitsi joota viigud, et tagada ühendatavus emaplaadiga. [45]

Samuti tuli kasutajaliidese trükkplaadile joota LED-ide, mis toimivad nuppude taustvalgustusena. Lisaks joodeti dokkimisjaama DC/DC pingemuundurile üks induktor ja neli ühendusjuhet, et võimaldada roboti akule laadimise toiteühendus (vt Joonis 5.3). [45]

Emaplaadile ühendati mootorite juhtmed, sensorid, kasutajaliides ja toide, mis olid standard. Kasutajaliidesele joodeti Raspberry Pi Pico, mis loeb nupuvajutusi ja edastab need Raspberry Pi 4-le. Emaplaat oli tehase poolt täielikult komplekteeritud ja sellel ei olnud vaja midagi joota, millest tulenevalt oli võimalik sellele ühendada mootorite juhtmed, sensorid, kasutajaliides ja toide. [45]



Joonis 5.3 Open Moweri komplekteeritud riistvara koos YardForce Classic 500B mudeli kaasatuleva akuga.



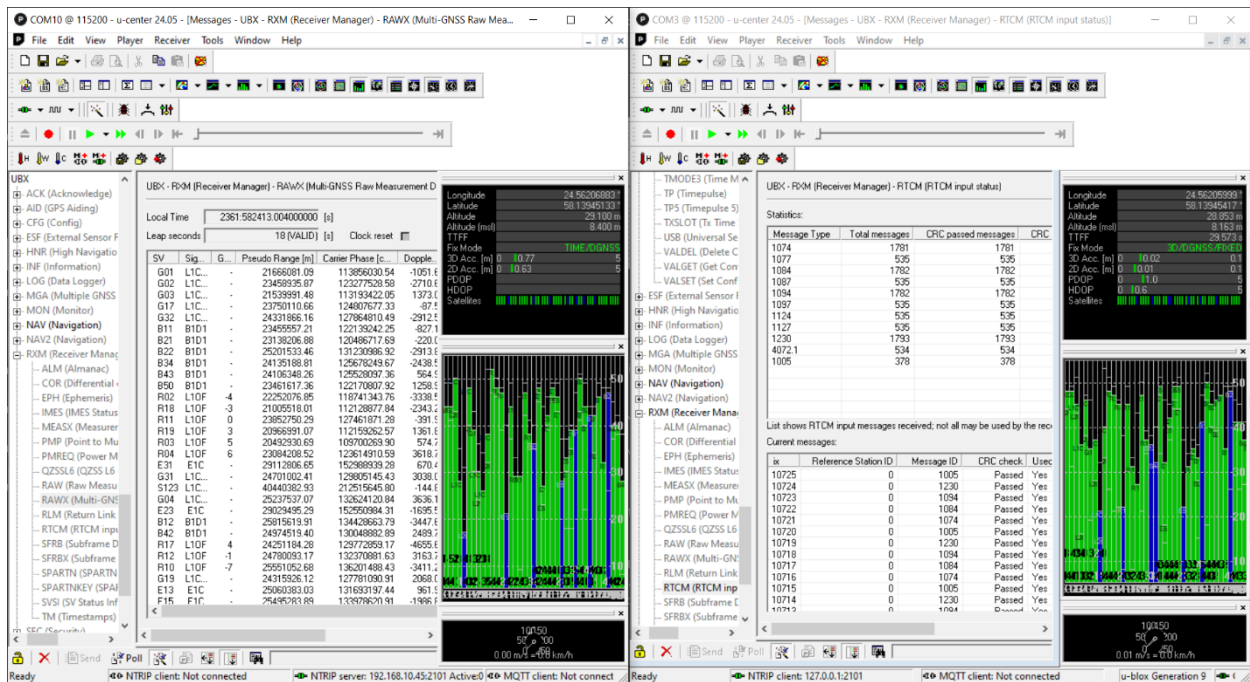
Joonis 5.4: Open Mower dokkimisjaama DC/DC pingemuundur.

5.2.3 RTK GPSi ettevalmistamine

Kuna RTK on eraldiseisev üksus Open Moweri tarkvaralises arhitektuuris, tuli trükkplaadid eelnevalt seadistada. RTK GPSi antennid paigutati kohta, kus on otsenähtavus taevasse, et tagada maksimaalne signaalitugevus ja täpsus satelliitidega suhtlemisel. [46]

Konfiguratsiooniks kasutati u-center v25_03 tarkvara (Joonis 5.5) [8], mille abil saab määrata näiteks kasutatavad satelliitkanalid, seadme tüübi (statsionaarne või liikuv), suhtlusmeetodi ja satelliitide paigutuse parameetrid. Kuigi tarkvara võimaldab manuaalseid seadistusi, eelistati kasutada ametlikke ArduSimple'i eelkonfiguratsioone, mis laeti vastavalt kulguri- ja baasjaamaseadmetele otse seadmesse. [46,47]

Fikseeritud oleku saavutamist kontrolliti pärast ühenduse loomist NTRIP serveri kaudu, mille kaudu kulguri RTK seade sai baasjaamalt parandussignaali. Tavaliselt saavutati fikseeritud (FIXED) olek umbes viie minuti jooksul. Kui fikseeritud staatus oli saavutatud, paigaldati RTK moodulid vastavalt baasjaama ja roboti emaplaadile. Kasutati ametlikke ArduSimple konfiguratsioonifaile nii kulgurile kui ka baasjaamale. Pärast seadistamist ühendati RTK plaadid vastavalt roboti ja baasjaama külge. Fikseeritud oleku saavutamine võttis tavaliselt ~5 minutit pärast NTRIP-ühenduse loomist. [46]



Joonis 5.5: Paremalt baasjaama RTK GPS trükkplaadi olek, vasakul roboti oma fikseeritud olekus (FIXED) u-center tarkvaras

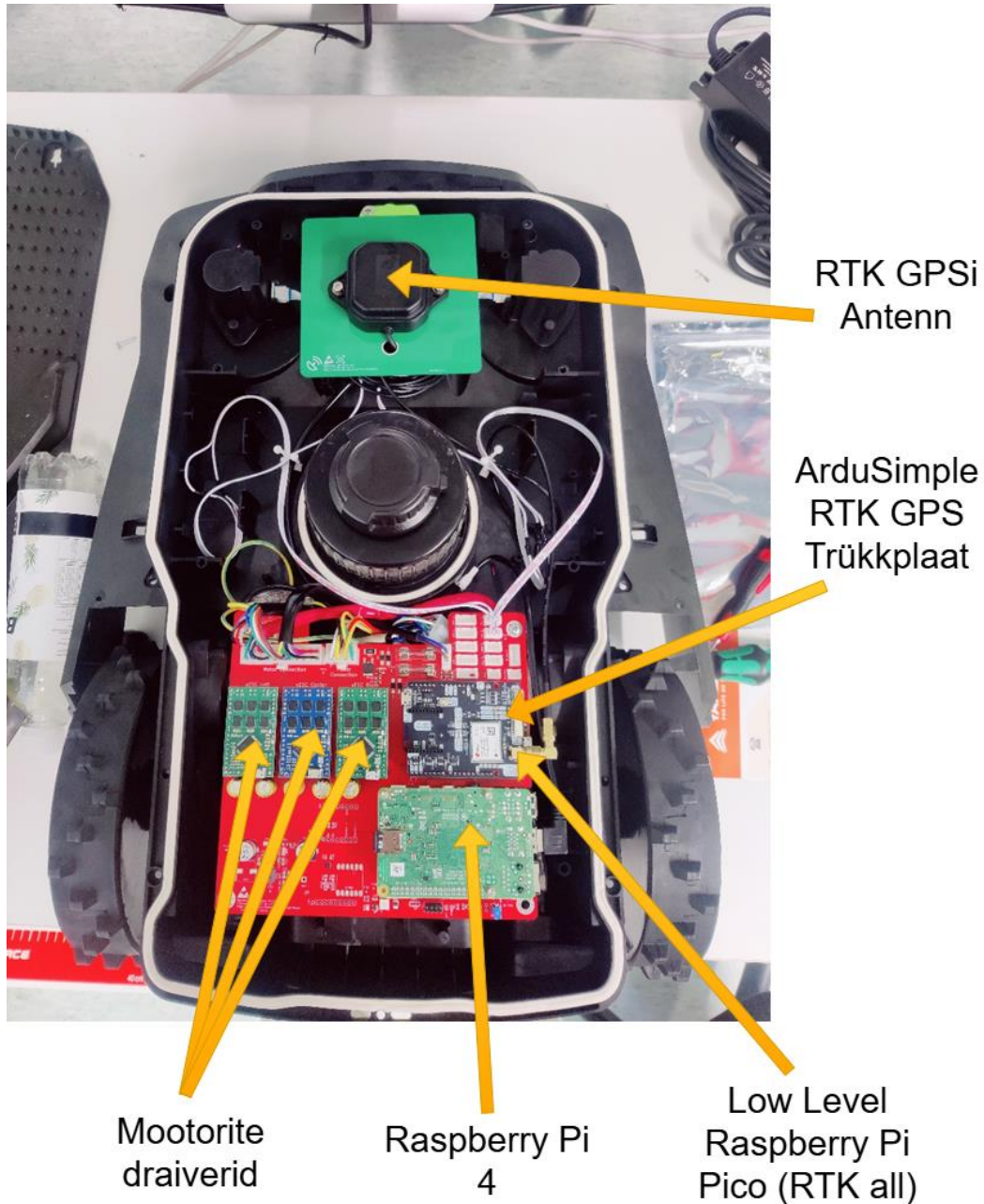
5.2.4 Millimeeter radarsensori ettevalmistamine

Millimeeterlaine radarsensor saabus karbis koos USB Type-C kaabliga. Projekti raames kasutati ainult USB-ühendust, millega sensor ühendati Raspberry Pi 4 külge, mis paikneb roboti emaplaadil.

Sensori tööks oli vajalik MaxLinear EXRA tarkvarateegi [48] allalaadimine, kuna andmeside toimub kahe eraldi USB-kanali kaudu: üks kanal konfiguratsioonikäskude saatmiseks ja teine mõõteandmete vastuvõtuks. Sensorile laaditi sobivad konfiguratsioonifailid ning kasutati ROS-paketti `ti_mmwave_ropkg`, mis võimaldab mõlema kanali kaudu andmeid lugeda ning punktilve reaajas visualiseerida RViz tarkvaras.

5.2.5 Uue riistvara paigutamine robotisse

Open Moweri dokumentatsiooni [49] alusel kinnitati kõik komponendid šassii sisse (Joonis 5.6). Kasutati 3D-prinditud hoidikuid ja konsoole. DC/DC pingemuundur modifitseeriti sobivaks originaalse laadimisdokiga. Mõned pistikud (nt HAL-sensorite omad) tuli ümber ühendada, et sobitada Open Moweri emaplaadiga.



Joonis 5.6: Open Mower riistvara YardForce Classic 500B küljes.

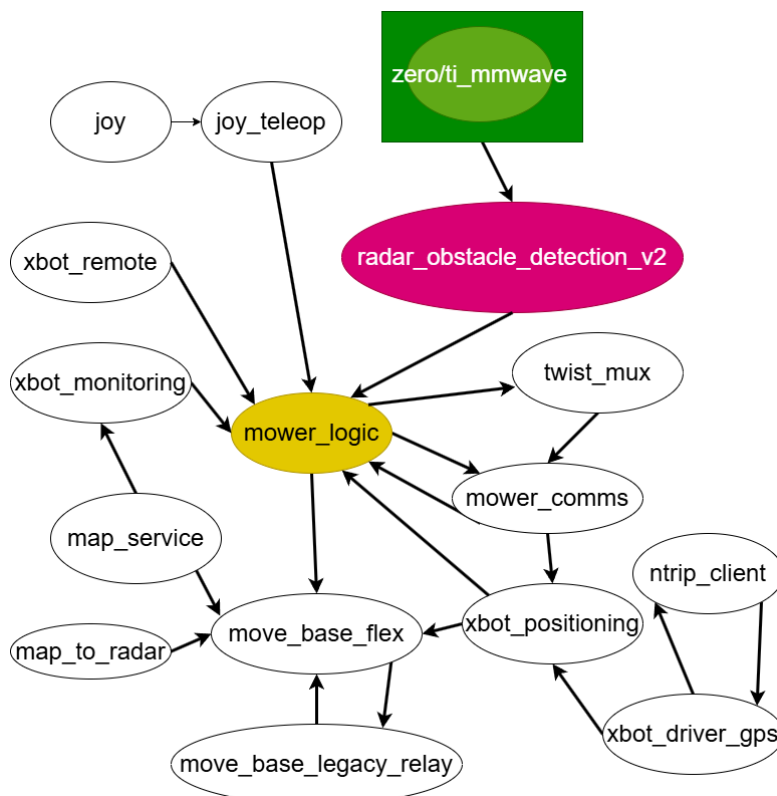
5.2.6 Roboti operatsioonisüsteemi valik

Hetkeseisuga on Open Moweri kommuun välja arendanud ROS Noetic peal baseeruva operatsioonisüsteemi, mis on testitud YardForce Classic 500 ja 500B mudelitel. Arendusperioodis olev ROS2 pole veel töötav lahendus, mistõttu tuli valida hetkel töötav lahendus, et robotit kasutada.[17]

Roboti tarkvara käivitamiseks on kaks võimalust:

1. Eelkonfigureeritud konteinerlahendus, mis võimaldab roboti kiiresti tööle panna, kuid ei sobi tarkvaraarenduseks. [50]
2. Käsitsi paigaldamine nullist, mis nõuab rohkem seadistamist, kuid võimaldab süsteemi vabalt muuta ja täiendada. [51]

Kuna lõputöö eesmärk oli arendada ja integreerida täiendavaid funktsioone (Joonis 5.7), valiti teine võimalus, täielik käsitsi paigaldus nullist. Selleks tuli hoolikalt jälgida juhendit [51] ning vajadusel uurima lisa Open Mower Discordi serverist [52].



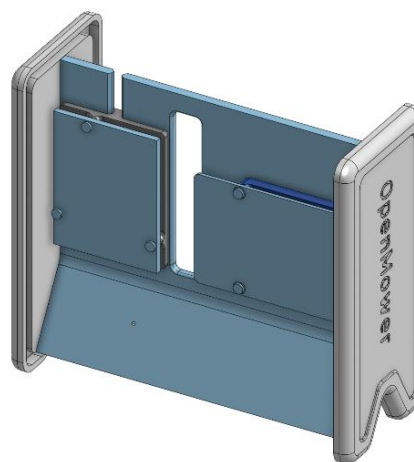
Joonis 5.7: Open Mower ROS kimpude ning suhtluse skeem joonistatud draw.io veebirakenduses [34].

5.3 Baasjaama disaini valik

Selleks, et baasjaam lihtsalt ei oleks lahtised trükkplaadid kuskil toanurgas või kuuris, oli mõistlik arendada välja lahendus, kuhu mahub kõik vajalik baasjaamale. Baasjaam disainiti kruvivaba, 3D-prinditava ja ilmastikukindlana. Korpus koosneb platvormist, liugurkorpusest, küljekatetest ja juhtmeklambrist. Materjaliks kasutati PETG-d ja kogu disain loodi OnShape CAD-tarkvaras [53]. Allpool (Joonis 5.8 (a-d)) on välja toodud disainilahendused ning 3D-prinditud nendest lahendustest.



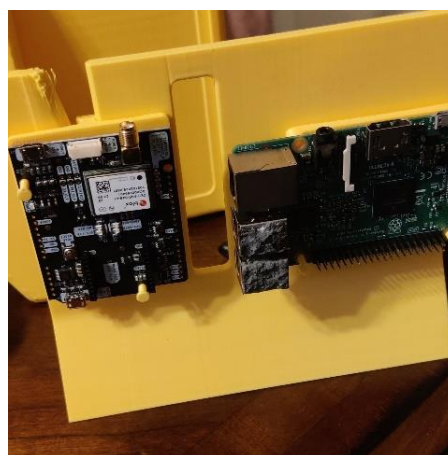
Joonis 5.8 (a): Baasjaam tagant vaates. Vaates on juhtmeteklamber, liugurkorpus ning küljekatted



Joonis 5.8 (b): Baasjaam liugurkorpuseta. Vaates on platvormi raam koos trükkplaadi platvormidega.



Joonis 5.8 (c): 3D-prinditud baasjaama korpuse küljekate PETG materjalist



Joonis 5.8 (d): Baasjaama trükkplaadid liugurplatvormidel platvormi raamil

Detailide printimise peale kulus aega umbes 7 tundi, mis sisaldas kahte eraldi printimist ühel 3D-printeril. Trükkplaatide kaitseks ja ülekuumenemise vältimiseks disainiti avad Sunon 30 mm × 30 mm 5 V ventilaatori jaoks, mida toidetakse otse karbis paikneva Raspberry Pi 3 5V GPIO-viikude kaudu.

5.4 Millimeeterlaine radari integreerimismeetodi valik

Esialgu testiti millimeeterlaine radarsensorit personaalarvuti peal, kasutades tootega kaasas olnud visualiseerimistarkvara ja demokonfiguratsioonifaile, mis olid seadmemudeli spetsiifilised. Kuna sensor paigutatakse roboti sisemusse, tuli vastav püsivara konfiguratsioon eelnevalt seadme mälusse (*flash*) laadida. Seejärel ühendati sensor robotil oleva Raspberry Pi 4 arvutiga, mille kaudu toimub käsuedastus, andmete vastuvõtt, töötlemine ja tõlgendamine.

Algne kaalutlus oli luua lahendus nullist, kuid lõppvalikuks osutus olemasolevate tarkvarapakettide kasutamine. Kuna sensor kasutab Texas Instrumentsi millimeeterlaine kiipi, oli saadaval mitmeid toetatud ROS-põhiseid pakette. Katsetades erinevaid valikuid leiti sobiv ROS-lahendus, mis võimaldas konfiguratsiooni, andmelugemist ning punkt pilve genereerimist.

Radariandmeid kuvati ROSi tööriistaga RViz. Kuna robotil puudub ekraan, loodi eraldi Ubuntu virtuaalmasin personaalarvutisse, millele edastati andmed RViz serveri kaudu. Virtuaalmasinas sai reaajas jälgida sensorilt tulevat punkt pilve ning veenduda süsteemi toimivuses.

Et võimaldada millimeeterlaine radari kinnitamist muruniiduki külge, tuli leida sobiv paigalduskoht kas seadme sisemuses või katte korpuse pinnal. Arvestades, et radar on võimeline tuvastama objekte ka läbi plastikkatte, otsustati see integreerida korpuse kaane seesmisele küljele (Joonis 5.9). Kuna olemasolevad kinnitusavad sensori korpusel ei võimaldanud selle otsest paigaldust plastikkattesse, projekteeriti ja 3D-printiti spetsiaalne kinnitusdetail (Joonis 5.10), mis võimaldab radarmooduli turvalist kinnitamist korpuse sisse.



Joonis 5.9: Millimeeter radari kinnituskoh
robotis



Joonis 5.10: Millimeeterlain
radarile 3D-
prinditud kinnitus

6 Testimine

Selleks, et teada saada, kas elektroonika ja riistvara töötab nii nagu peab, oli vaja teha erinevaid teste, arendustööd ning analüüsimist. Töö vältel tekkis mitmeid probleeme olemasoleva tarkvara ja riistvaraga, mistõttu kulus aega probleemide lahendamisele küllaltki palju.

6.1 Baasjaama testimine

Robotniiduki baasjaam töötab standardse seinavõrgutoitega, ent testimise käigus katsetati ka portatiivset toitelahendust. Kasutati 10 Ah akupanka, mille väljund 5V/3A osutus piisavaks Raspberry Pi 3 ja RTK GPS trükkplaadi tööks. Akupank tagas baasjaama autonoomse töövõime ligikaudu 30 tunniks, tõestades, et süsteemi saab kasutada ajutistes ja mobiilsetes tingimustes.

6.2 Roboti testimine ja arendus

Robotit on võimalik käivitada mitut erinevat moodi, kasutades selleks olemasolevat konteiner lahendust, mis on võimalik robotile saada laadides Raspberry Pi 4 SD-kaardile eelkirjutatud pildi, kus on konteiner peal. Kui konteiner hakkas tööle, tuli ühendada võrgu-kuumkohta, mille tekitas eelnevalt mainitud konteiner Raspberry Pi4 peal. Sinna ühendudes avanes veebiaknas vaade, kus tuli sisestada üldkasutatava Wi-Fi võrgu informatsioon selleks, et saaks juhtida robotit veebiliidese abil. Veebiliides annab ülevaate roboti olekust, sensoritest, aku mahust.

Selleks, et robotit arendada tuli aga leida operatsioonisüsteem, mis toetaks ROS Noetic platvormi tööd. Robot arendati ROS Noetic platvormil (täpsem kirjeldus peatükis 5.1). Seejärel kirjutati püsivara SD-kaardile ning ühendati Raspberry Pi 4 arvutiga.

Kuna tegemist oli server tüüpi operatsioonisüsteemiga, mis on mõeldud Raspberry Pi 4 jaoks, siis oli vajalik oodata ~30 minutit, et süsteem lõpetaks automaatsed uuendused ja jõudlus normaliseeruks ning alles siis sai tegelema hakata ROS keskkonna ülesseadistamisega. Selleks tuli järgida ROS Noetic laadimisjuhust, kus on olemas vastavad käsud allalaadimiseks ja initsialiseerimiseks. [51]

Kui ROS sai paigaldatud roboti Raspberry Pi peale, võis Open Mower ROSi repositooriumi kloonida masinasse, kus hakkab terve roboti arendus aset leidma. Repositooriumis oli ka juhised vajalikke teekide installimiseks ning juhised, mis konfiguratsiooni faile muuta on vaja. [51]

6.3 Millimeeterlaine radarsensori testimine ja tulemused

Testimise algfaasis kasutati D3 Engineering poolt kaasa antud Visualizer tarkvara [54], mis võimaldas tutvuda sensori üldise tööpõhimõtte ja punktipilve visualiseerimisega. See pakkus esmase ülevaate, kuidas radar reageerib erinevatele objektidele ja liikumistele. Hiljem hakati teste tegema Texas Instruments visualiseerimiskeskonnas [55], kus oli võimalik näha põhjalikumaid graafikuid ning tuvastada efektiivsemalt objekte, millelt signaal tagasi peegeldub.

Radari testid viidi läbi nii siseruumides kui ka õues, eesmärgiga näha, kuidas sensor reageerib erinevatele objektidele – siseruumides sai testitud erinevate objektide peal nagu näiteks pudelid, purgid, läbipaistvad detailid ning kõvemad pinnad nagu puit, betoon. Väli tingimustes oli võimalik tuvastada suuremaid objekte nagu näiteks puid ja inimesi.

Millimeeterlaineid peegeldavad hästi metallpinnad, mistõttu võib eeldada, et robot suudab niitmise ajal metallesemeid edukalt tuvastada ja vältida. Samuti võivad teatud tingimustel peegelduda läbipaistvad materjalid nagu klaas, PET ja vesi, kuid peegeldusvõime sõltub kasutatava sensori sagedusest. [56]

Testimise teises etapis kontrolliti millimeeterlaine radari ühenduvust ja andmeedastust ROS-i süsteemiga. Sensor ühendati Raspberry Pi 4B külge ning kasutati `ti_mmwave_rospkg` draiverit, mille abil saadi punktipilve andmed käsureale ja hiljem ka RViz visualiseerimisvahendisse. Andmete kuvamine toimus personaalarvuti virtuaalmasina peal.

Kokkuvõttes kinnitas testimine, et DesignCore RS-1843AOPU sensor sobib takistuste tuvastamiseks Open Moweri süsteemis ning pakub piisavat täpsust ja reageerimiskiirust praktilistes oludes.

6.4 Töö käigus esinenud probleemid ning väljakutsed

Arendustöö jooksul esines mitmeid tehnilisi ja praktilisi takistusi, mis nõudsid iseseisvat probleemilahendust, juhendajalt nõu saamist ning täiendavat uurimistööd. Allpool on välja toodud mõned peamised väljakutsed, millega töö käigus kokku puututi:

- Tarkvaraline seadistamine, eriti radarsensori draiveri ja konfiguratsioonifailide leidmine ning sobitamine konkreetse mudeliga.
- Radarsensori kommunikatsioonikanalite töökindluse tagamine ja kahekanalilise suhtluse häälestamine.

- u-center tarkvara kasutamine ja RTK moodulite fikseeritud oleku saavutamine.
- Mõned pistikute sobimatused (nt HAL-andurite juhtmetes), mis vajasis käsitsi kohandamist.
- Dokumentatsiooni puudulikkus teatud komponentide juures, mis aeglustas süsteemi täielikku kokkupanekut ja testimist.
- Roboti akusüsteem osutus probleemseks – kuna robot oli pikalt sisse jäänud ja aku sattus alapinge olekusse, polnud seda võimalik tavapärasel viisil laadida. Probleemi lahendamiseks kasutati tarka laadijat, mille abil sai liitiumelementide külge ühendatud eraldi juhtmed. See võimaldas elemente individuaalselt laadida ja tasakaalustada, taastades kogu aku töövõimekuse ohutul viisil.

7 Ideid tulevikuks

Selles peatükis jagab töö autor töö käigus tekkinud arendusideid ja uusi lahendusi, mida oleks tulevikus võimalik Open Moweri kogukonnale edasi anda.

Esimese ideena tekkis töö autoril mõte kaardistada murupinna niiskustaset, kasutades mulla niiskusandureid. Eesmärgiks on luua kasutajaliidesesse visuaalne mullaniiskuse kaardikiht, mis võimaldaks kasutajal tuvastada piirkondi, kus on vaja kastmist või kuhu robot võiks niitmise vältimiseks mitte siseneda – näiteks liiga märg pinnas, mis võib kahjustada seadet või keskkonda.

Teise ideena pakutakse välja avatud akulahendus, mis võimaldaks kasutada mitut erinevat akut – näiteks Makita tööriistaakusid. See suurendaks tööaega, aku töökindlust ja ohutust. Võimalik oleks kasutada olemasolevaid BMS-lahendusi või arendada kohandatud akusüsteem nullist.

Kolmandaks ideeks oleks juba arenduses olev ROS 2 ühilduvus, mille kaudu saab kogu riistvara muuta sobivaks ka ROS 2 platvormi jaoks. See tagaks tarkvaralise kaasaegsuse ja ennetaks vananevate tehnoloogiate kasutamisest tingitud piiranguid.

Neljandaks ideena pakutakse välja iselukustuv dokkimisjaam, mis suurendaks turvalisust ja aitaks vältida vargusi. Selline lahendus lukustaks roboti automaatselt laadimisalusele ja avaneks ainult autentimise kaudu (nt võrguühendus, Bluetooth või füüsiline kood).

8 Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli integreerida millimeeterlaine radarsensor Open Moweri avatud lähtekoodiga robotmuruniiduki platvormile ning suurendada seeläbi roboti autonoomiat ja ohutust. Valitud sensor – DesignCore RS-1843AOPU – võimaldab reaalajas takistuste tuvastamist, mis täiendab olemasolevat RTK GNSS-põhist navigeerimissüsteemi.

Töö käigus konverteeriti standardne YardForce 500B robot Open Moweri lahenduseks, kasutades kogukonna poolt arendatud riist- ja tarkvarakomponente. Integreeriti mitmeid komponente, sealhulgas Raspberry Pi 4B, emaplaat, RTK GPS süsteem ning millimeeterlaine radar. Ehitati ka baasjaam koos kliimakindla, 3D-prinditud korpusega ning millimeeterlaine radarile kinnitusliides.

Testimise etapis hinnati radarsensori töökindlust, ühenduvust ja võimekust keskkonnast andmeid koguda. Tulemused kinnitasid, et valitud sensor sobib hästi robotniiduki jaoks ja pakub reaalselt lisaväärtust takistuste tuvastamisel. Sensor suutis edukalt registreerida erinevaid objekte nii statsionaarses kui ka liikuvases olekus.

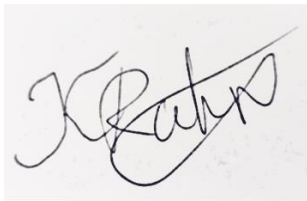
Töö tulemus on funktsionaalne prototüüp ja väärtuslik panus avatud lähtekoodiga kogukonda. Arenduse käigus tekkis ka mitmeid uusi ideid – alates tarkvarauuendustest kuni riistvaraliste laiendusteni, mis loovad tugeva aluse edasiseks arenguks.

Tänuavaldused

Veiko Vunder, juhendamise, õpetamise ning nõu eest terve töö vältel

Open Mower kommuuni, õpetamise, suunamise eest

Käesoleva töö tekstilise toimetamise ning grammatilise korrektsuse kontrolli juures kasutati abivahendina ChatGPT 4o tekstirobotit (OpenAI). Tekstirobotile esitati sisendeid nagu „sõnasta korrektsemalt“ ja „kontrolli õigekeelsust ning lausete struktuuri“, mille abil hinnati stiili, lauseehitust ja õigekirja ning vajadusel tehti parandusi.

A handwritten signature in black ink on a light background. The signature is stylized and appears to read 'Veiko Vunder'.

Viited

- [1] Wikipedia, „Lawn Mower“. [Võrgumaterjal]. https://en.wikipedia.org/wiki/Lawn_mower, (Vaadatud: 17. mai 2025).
- [2] RIPON ground care, „12 Different Types of Lawn Mowers“. [Võrgumaterjal]. <https://ripongroundcare.com/blogs/lawnmower-help/types-of-lawn-mowers-explained>, (Vaadatud: 17. mai 2025).
- [3] ECOFLOW, „Do All Robot Lawn Mowers Need a Perimeter Wire?“ [Võrgumaterjal]. <https://blog.ecoflow.com/us/do-robot-mowers-need-perimeter-wire/>, (Vaadatud: 17. mai 2025).
- [4] KeiraJones, „What Is the Disadvantage of Robotic Lawn Mowers?“ [Võrgumaterjal]. <https://us.mammotion.com/blogs/news/disadvantage-of-robotic-lawn-mowers>, (Vaadatud: 14. mai 2025).
- [5] M. Quigley, B. Gerkey, ja K. Cooley, „ROS: an open-source Robot Operating System“, 2009. [Võrgumaterjal]. <https://ai.stanford.edu/~ang/papers/icraoss09-ROS.pdf>, (Vaadatud: 22. märts 2025).
- [6] „ROS Introduction“. [Võrgumaterjal]. <https://wiki.ros.org/ROS/Introduction>, (Vaadatud: 22. märts 2025).
- [7] Wikipedia, „Robot Operating System“. [Võrgumaterjal]. https://en.wikipedia.org/wiki/Robot_Operating_System, (Vaadatud: 22. märts 2025).
- [8] u-blox, „u-center, GNSS evaluation software for Windows“. [Võrgumaterjal]. <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>, (Vaadatud: 06. märts 2025).
- [9] NATE. Sparkfun.com, „What is GPS RTK“. [Võrgumaterjal]. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-gps-rtk/all>, (Vaadatud: 01. veeb 2025).
- [10] NATE, Sparkfun.com, „How to Build a DIY GNSS Reference Station“. [Võrgumaterjal]. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-build-a-diy-gnss-reference-station>, (Vaadatud: 17. aprill 2025).
- [11] T. Takasu, *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*. [Võrgumaterjal]. <https://www.rtklib.com/>, (Vaadatud: 17. aprill 2025).
- [12] Lefebure.com, „NTRIP Client“. [Võrgumaterjal]. <http://lefebure.com/software/ntripclient/>, (Vaadatud: 17. aprill 2025).
- [13] C. Iovescu S. Rao, „The fundamentals of millimeter wave radar sensors“. [Võrgumaterjal]. <https://www.ti.com/lit/wp/spyy005a/spyy005a.pdf>, (Vaadatud: 04. aprill 2025).

- [14] D. Barret A. Alvarez, „mmWave radar sensors in robotics applications“. [Võrgumaterjal]. <https://www.ti.com/lit/wp/spry311a/spry311a.pdf>, (Vaadatud: 04. aprill 2025).
- [15] V. Dham, „Programming Chirp Parameters in TI Radar Devices“. [Võrgumaterjal]. <https://www.ti.com/lit/an/swra553a/swra553a.pdf>, (Vaadatud: 04. aprill 2025).
- [16] Open Mower Community, „Welcome to Open Mower: The DIY RTK GPS Smart Mowing Robot for Everyone!“ [Võrgumaterjal]. <https://openmower.de/>, (Vaadatud: 28. september 2024).
- [17] C. Elflein, *OpenMower*. (2025). [Võrgumaterjal]. <https://github.com/ClemensElflein/OpenMower>, (Vaadatud: 28. september 2024).
- [18] ArduMower Community, „MOWING WITHOUT PERIMETER WIRE“. [Võrgumaterjal]. <https://www.ardumower.de/en/home.html>, (Vaadatud: 01. mai 2025).
- [19] B. Landoni, „A Robotic lawn mower powered by Solar Energy with an Arduino heart“. [Võrgumaterjal]. <https://www.open-electronics.org/a-robotic-lawn-mowers-powered-by-solar-energy-with-an-arduino-heart/>, (Vaadatud: 01. mai 2025).
- [20] Geodeesia24 OÜ, „Punktipilv“. [Võrgumaterjal]. <https://geodeesia24.ee/service/punktipilv/>, (Vaadatud: 04. aprill 2025).
- [21] Open Robotics, *RViz*. [Võrgumaterjal]. <http://wiki.ros.org/RViz>, (Vaadatud: 30. aprill 2025)
- [22] University of Arizona, L. Zhang, *TI mmWave ROS Package (Customized)*. [Võrgumaterjal]. https://github.com/radar-lab/ti_mmwave_ropkg, (Vaadatud: 09. mai 2025).
- [23] Texas Instruments, „AWR1843AOP: Single-chip 76-GHz to 81-GHz automotive radar sensor integrating antenna on package, DSP and MCU“. [Võrgumaterjal]. <https://www.ti.com/product/AWR1843AOP>, (Vaadatud: 09. mai 2025).
- [24] D3 Engineering, „DESIGNCORE® RS-x843AOP/RS-x843AOPU mmWAVE RADAR SENSORS“. [Võrgumaterjal]. <https://store.d3engineering.com/wp-content/uploads/2020/02/D3Eng-DesignCore-RS-x843AOPandRS-x843AOPUmmWaveRadarSensors-DataSheet.pdf>, (Vaadatud: 25. november 2024).
- [25] ETH Zürich Autonomous Systems Lab, *ROS Driver for TI's mmWave Radars*. [Võrgumaterjal]. https://github.com/ethz-asl/ti_mmwave_ropkg, (Vaadatud: 09. mai 2025).
- [26] D. Alejo, *ARS_548_RDI Driver*. [Võrgumaterjal]. https://github.com/robotics-upo/ars548_ros, (Vaadatud: 09. mai 2025).
- [27] C. Elflein, [Suuline intervjuu] 5. mai 2025.

- [28] Open Mower Community, „2022-04 dissected mowers“. [Võrgumaterjal]. <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1BX0-KEs5v-VED8-RA4BLE-wRdXHtlmcKy4n9K5vJVAA/edit?gid=0#gid=0>, (Vaadatud: 14. mai 2025).
- [29] YardForce, Amazon.de, „YARD FORCE Classic 500 Lawnmower Robot“. [Võrgumaterjal]. <https://www.amazon.de/-/en/Classic-Lawnmower-500-Automatic-Brushless/dp/B08H1Y3KXZ?th=1>, (Vaadatud: 30. september 2024).
- [30] Husqvarna, „Robot lawn mower“. [Võrgumaterjal]. <https://www.husqvarna.com/uk/robotic-lawn-mowers/>, (Vaadatud: 14. mai 2025).
- [31] Bosch, „Robot-muruniidukid“. [Võrgumaterjal]. <https://www.bosch-diy.com/ee/et/aiatoeoeriistad/robot-muruniidukid>, (Vaadatud: 14. mai 2025).
- [32] Lidl, „Parkside Robot Lawnmower & Lawnmower Garage“. [Võrgumaterjal]. <https://www.lidl.co.uk/c/parkside-robot-lawnmower/s10068177>, (Vaadatud: 14. mai 2025).
- [33] John Deere Powercut, „John Deere Robotic Mowers“. [Võrgumaterjal]. <https://powercut.co.uk/lawn-mowers/robotic-automated-lawnmowers/john-deere-robotic-mowers/>, (Vaadatud: 14. mai 2025).
- [34] JGraph Ltd, *draw.io*. (2025). [Võrgumaterjal]. <https://draw.io/>, , (Vaadatud: 10. mai 2025).
- [35] Gadgets by Vermut, Open Mower Community, „OpenMower Upgrade 0.13.x - Complete Kit“. [Võrgumaterjal]. <https://shop.devops.care/openmower/29-openmower-012x-assembled-board.html>, (Vaadatud: 04. oktoober 2024).
- [36] ArduSimple, „simpleRTK2B – Basic Starter Kit“. [Võrgumaterjal]. <https://www.ardusimple.com/product/simplertk2b-basic-starter-kit-ip65/>, (Vaadatud: 02. oktoober 2024).
- [37] D3 Engineering, „DesignCore® RS-1843AOPU USB 77 GHz mmWave Radar Sensor“. [Võrgumaterjal]. <https://www.d3embedded.com/product/designcore-rs-1843aopu-mmwave-radar-sensor/>, (Vaadatud: 30. oktoober 2024).
- [38] C. Ltd, „Ubuntu 20.04.6 LTS (Focal Fossa)“. [Võrgumaterjal]. <https://releases.ubuntu.com/focal/>, (Vaadatud: 30. aprill 2025).
- [39] Raspberry Pi Foundation, *Raspberry Pi OS*. [Võrgumaterjal]. <https://www.raspberrypi.com/software/>, (Vaadatud: 04.oktoober 2024).
- [40] Open Robotics, „ROS Noetic Ninjemys“. [Võrgumaterjal]. <https://wiki.ros.org/noetic>, (Vaadatud: 30. aprill 2025).

- [41] Stefal, *RTKBase*. [Võrgumaterjal]. <https://github.com/Stefal/rtkbase>, (Vaadatud: 12. märts 2025).
- [42] Open Robotics, *tf - Transform Library*. 2025. [Võrgumaterjal]. <https://wiki.ros.org/tf>, (Vaadatud: 30. aprill 2025).
- [43] Open Mower Community, „Shopping List“. [Võrgumaterjal]. <https://openmower.de/docs/knowledge-base/shopping-list/>(Vaadatud: 30. september 2024).
- [44] Open Mower Community, „Robot Assembly“. [Võrgumaterjal]. <https://openmower.de/docs/robot-assembly/>, (Vaadatud: 29. oktoober 2024).
- [45] Open Mower Community, „Prepare the Parts“. [Võrgumaterjal]. <https://openmower.de/docs/robot-assembly/prepare-the-parts/>, (Vaadatud: 29. oktoober 2024).
- [46] Open Mower Community, „Prepare the GPS“. [Võrgumaterjal]. <https://openmower.de/docs/robot-assembly/prepare-the-parts/prepare-the-gps/>, (Vaadatud: 12. märts 2025).
- [47] ArduSimple, „How to configure u-blox ZED-F9P“. [Võrgumaterjal]. <https://www.ardusimple.com/how-to-configure-ublox-zed-f9p/>, (Vaadatud: 12. märts 2025).
- [48] MaxLinear, *XR21V1410*. [Võrgumaterjal]. <https://www.maxlinear.com/product/interface/uarts/usb-uarts/xr21v1410>, (Vaadatud: 30. aprill 2025).
- [49] Open Mower Community, „Assemble the Robot“. [Võrgumaterjal]. <https://openmower.de/docs/robot-assembly/assemble-the-robot/>, (Vaadatud: 29. oktoober 2024).
- [50] Open Mower Community, „Prepare the SD Card“. [Võrgumaterjal]. <https://openmower.de/docs/robot-assembly/prepare-the-parts/prepare-sd-card/>, (Vaadatud: 29. oktoober 2024).
- [51] Open Mower Community, „OLD Bare Metal System Image“. [Võrgumaterjal]. https://wiki.openmower.de/index.php?title=OLD_Bare_Metal_System_Image, (Vaadatud: 14. veebruar 2025).
- [52] x-tech UG, „x-tech“. [Võrgumaterjal]. <https://discord.gg/jE7QNaSxW7>, (Vaadatud: 30. september 2024).
- [53] Onshape Inc, *Onshape*. (2025). [Võrgumaterjal]. <https://www.onshape.com/en/>, (Vaadatud: 07. november 2024).

- [54] D3 Engineering, „DesignCore® mmWave Radar Visualizer“. [Võrgumaterjal].
<https://www.d3embedded.com/download/designcore-mmwave-radar-visualizer/>,
(Vaadatud: 30. aprill 2025).
- [55] Texas Instruments, *mmWave Demo Visualizer*. [Võrgumaterjal].
https://dev.ti.com/gallery/view/mmwave/mmWave_Demo_Visualizer/ver/3.6.0/,
(Vaadatud: 03. mai 2025).
- [56] QUORA, „What materials reflect millimeter waves well?“ [Võrgumaterjal].
<https://www.quora.com/What-materials-reflect-millimeter-waves-well>, (Vaadatud: 03.
mai 2025).

Lisad

Lisa 1. Lõputöö raames valminud ning täiendatud koodibaas

Töö autori repositoorium: <https://github.com/ut-ims-robotics/rahn-thesis-2025-openmower>

Lihthitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karl Rahn

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

“Millimeeterlaine radari integreerimine avatud lähtekoodiga muruniiduki platvormil Open Mower”

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 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 lihthitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karl Rahn

20.05.2025