

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Pille Pärnalaas

Pöördpõik ajami arendus robotplatvormile Robotont

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

Renno Raudmäe, MSc

Tartu 2023

Resümee/ Abstract

Pöördpõik ajami arendus robotplatvormile Robotont

Robotplatvorm Robotont kasutab omniliikumiseks rullikutega omnirattaid. Omnirattad võimaldavad liikuda holonoomiliselt, kuid nad saavad liikuda ainult siledal pinnal. Vahetades Robotondi omnirataste lahendus pöördpõik ajami vastu säilivad positiivsed liikumisomadused. Lisaks on robot võimeline ületama takistusi ja liikuma välitingimustes. Lõputöös sai disainitud, toodetud ja testitud Robotondile sobiv modulaarne pöördpõik ajami lahendus. Tänu sellise ajami võimele sõita ka keerulisemal pinnasel, saab Robotonti rakendada rohkemates õppeülesannetes. Mehaanilise lahenduse ehitamisel on vaja kõrget täpsust, et ülekanded töötaksid sujuvalt. Tulevikus vajab disain parandamist, et saavutada täielik omniliikuvusvõime.

CERCS: T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika.

Märksõnad: robotika, mehaanika, omniliikuvus, haridusrobotika

Development of swerve drive for robotic platform Robotont

Robotic platform Robotont uses omniwheels with rollers for implementing omnimotion. Omniwheels enable holonomic movement, but they can only move on a flat surface. When changing Robotont omniwheels to swerve drive, positive movement characteristics remain the same. In addition, the robot gains the ability to drive over obstacles and in outside conditions. A suitable swerve drive module for Robotont was designed, manufactured, and tested in the course of this thesis. With swerve drive capability to drive over obstacles the educational choices of Robotont are more diverse. For the transmissions to run smoothly, the mechanical solution had to be built with high precision. In the future, the design will need additional work to achieve full omnimotion capabilities.

CERCS: T125 Automation, robotics, control engineering

Keywords: robotics, mechanics, omnidirectional moving, educational robotics

Sisukord

Resümee/ Abstract	2
Sisukord	3
Mõisted ja lühendid.....	5
Jooniste ja tabelite loetelu.....	6
1. Sissejuhatus	7
2. Ülevaade probleemist	8
2.1. Omniliikumine	8
2.2. Omniliikumine kasutades omnirattaid	10
2.3. Omniliikumine kasutades mekaanumrattaid	11
2.4. Pöördpõik ajam	13
2.5. Pöördpõik ajami rataste süsteemi ja omniratastega liikumise võrdlus.....	15
2.6. Olemasolevad lahendused	16
3. Nõuded ja disain	17
3.1. Nõuded	17
3.2. Disain	17
4. Loodud lahendus.....	19
4.1. Tootmine	19
4.2. Mehaanika	20
4.3. Mooduli hind	26
5. Testimine ja järeldused.....	27
5.1. Testimine.....	27
5.2. Järeldused	30

Kokkuvõte.....	32
Summary	33
Tänuavaldused	34
Viidatud kirjandus.....	35
Lisad.....	39
Lisa 1 – Materjalide nimekiri ühe mooduli kohta.....	39
Lisa 2 – Disainitud detailide pildid.....	44
Lisa 3 – Koostamisjuhend.....	49
Lisa 4 – Välised materjalid	51
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	52

Mõisted ja lühendid

ROS ehk roboti operatsioonisüsteem – tarkvara ja tööriistade kogum, mis muudab robotite ehitamise lihtsaks ja nauditavaks. [1]

Holonomiline – robot on holonomiline, kui ta liikumist on võimalik kontrollida kõikides suundades. [2]

Omniliikumine – holonomilise liikumise üks lahendusi, mis kasutab omnirattaid, mekaanumrattaid või pöördpõik ajamiga rattamooduleid. [3]

Omnirattad – omnisuunaline ratas, mille rullikute telg on täisnurgas ratta enda telje suhtes.

Mekaanum rattad – omnisuunaline ratas, mille ratta telg moodustab 45 kraadise rattal olevate väiksemate rullikute teljega. [4]

Pöördpõik ajam – roboti liikumismehhanism, mille ratta pöördnurk ja kiirus on eraldiseisvalt kontrollitavad. [4]

PLA – ettevõtte Prusa poolt toodetud materjal, mida kasutatakse 3D printimiseks. [5]

PC blend – ettevõtte Prusa poolt toodetud polükarbonaadi segu, mida kasutatakse 3D printimiseks. [6]

Jooniste ja tabelite loetelu

Joonis 2.1. Pildid erinevatest omniliikumisel kasutatavatest ratastest.....	8
Joonis 2.2. Kolmerattalise omniroboti liikumisloogika.....	9
Joonis 2.3. Neljarattalise omniroboti liikumisloogika.....	9
Joonis 2.4. Kolmerattalise omniroboti rataste paiknemine.....	10
Joonis 2.5. Omniratastega sorteerimislint.....	11
Joonis 2.6. Kolmerattaline õppeotstarbeline omnirobot Robotont.....	11
Joonis 2.7. Mekaanumratastega tööstus- ja logistikarobot.....	12
Joonis 2.8. Mekaanumratastega raskete vedude platvorm.....	12
Joonis 2.9. Mekaanumratastega Kuka Youbot robotkäega.....	13
Joonis 2.10. Pöördpõik ajami vektorite mudel, mille abil arvutada mootorite liikumiskiiruseid...	14
Joonis 2.11. Pöördpõik ajamiga logistika robot õues kasutamiseks.....	14
Tabel 2.1. Omniratastega liikumise ja pöördpõik ajami ratastega lahenduste võrdlus.....	15
Joonis 2.12. SDS MK4i pöördpõik ajami moodul.....	16
Tabel 4.1. PLA ja PC segu võrdlus.....	19
Tabel 4.2. Loodud mudelid.....	21
Joonis 4.1. Rattamooduli disainimudel.....	23
Joonis 4.2. Kolme pöördpõik ajamiga rattamooduliga Robotondi kere disainimudel.....	24
Joonis 4.3. Rattamooduli disaini plahvatusvaade.....	25
Tabel 4.3. Materjalide hinnad ilma kinnitusedetailideta.....	26
Joonis 5.1. Pilt valminud testlahendusest.....	27
Joonis 5.2. Testlahenduse elektroonika ühendusskeem.....	28
Tabel 5.1. Voolutugevuse (I) mõõtmistulemused mootoritel.....	29

1. Sissejuhatus

Robotont on Tartu Ülikoolis loodud avatud robotplatvorm. Robotondi arenduse eesmärk on luua ROSi toetav hariduslik robot, mis on kasutatav õppevahendina töötubades ning Tartu Ülikooli seostuvatel kursustel. Raudmäe [7] magistritöö teoreetilises osas anti ülevaade robotite olulisusest tänapäeva maailmas ning haridusrobotikast. Töö tulemusena arendati ning toodeti esimene lahenduse versioon kuues eksemplaris. Õppides esimese lahenduse puudustest, arendati teine versioon, mida valmis 17 tükki. Disainimisel seati prioriteediks roboti lihtne hooldus ja modulaarsus. Sellise roboti süsteemi osad on vabalt eraldatavad ja uuesti kokku kombineeritavad. Mõlemad eesmärgid saavutati ja loodi ühtne dokumentatsioon. Tootmisprotsessi käigus leiti siiski kujustuses puudusi. [7]

Kirjeldatud magistritöö põhjal on võimalik leida parendamist vajavaid elemente. Hetkel kasutuses olevad omnirattad koguvad liikumisel mustust. Lisaks, kuna Robotondil on hetkel suhteliselt väike kliirens, ei suuda robot takistusi ületada. Samuti esineb omniliikumisel kasutatavas odomeetria [8] draiveris ebatäpsust. Siinse töö eesmärk on leida lahendus, mis võimaldab robotil ületada väiksemaid takistusi, näiteks lävepakke, ja liikuda maastikul. Õpperoboti liikumismehaanika robustsemaks muutes on see veelgi laialdasemalt kasutatav ja seeläbi saab Robotondi keskset robotikaõpet muuta mitmekesisemaks. On oluline, et loodav lahendus on modulaarne. Nii on võimalik, ainult liikumismoduleid vahetades, kasutada seda erinevates õpiülesannetes. Sobiva lahenduse leidmise järel uus mehhanism modelleeriti, toodeti, testiti mehaanilise lahenduse toimimist ning rakendati Robotondile.

2. Ülevaade probleemist

Paljud robotid, mis liiguvad holonoomiliselt või omnisuunaliselt, kasutavad erinevaid omnirataste versioone [4]. Omnirataste disain põhineb ideel, mis võimaldab haarduvust ühes ning vaba veeremist teises suunas [9]. Omnisuunalise liikumise rakendamiseks on Robotondil hetkel kasutusel omnirattad. Nende asemel on võimalik kasutada mekaanumrattaid või pöördpõik ajameid [10]. Järgnevalt annan ülevaate võimalikest omniliikuvusega rataste valikust.

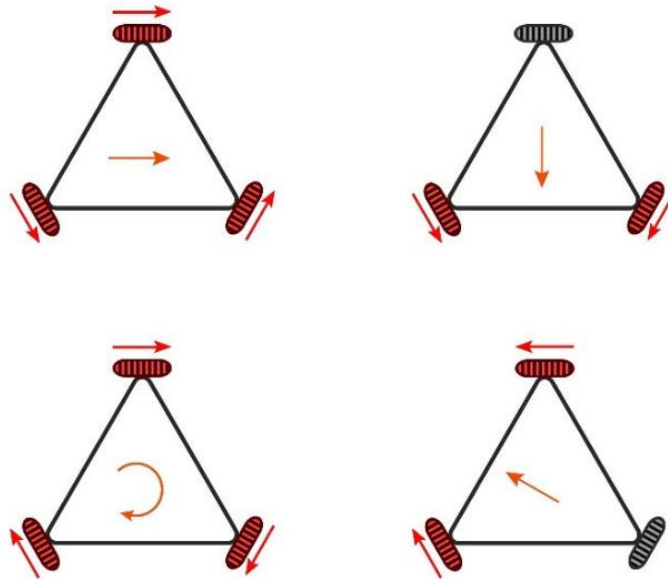
2.1. Omniliikumine

Omnisuunaline liikumine erineb tavapärasest edasi-tagasi liikumisest, sest saab vabalt liikuda kolmes suunas: edasi, tagasi ja küljele. Selleks, et ehitada omnisuunaline sõiduk on võimalik kasutada kahte eri tüüpi rattaid: tavalised rattad, mis muudavad suunda pöörava mootori abil, ja mehaanilised omnirattad, mille suurele rattale on lisaks paigaldatud ka väiksemad rullikud. Rullikutega rattad jagunevad kaheks: omni- ja mekaanumrattad. Omnirattaid toodetakse erinevatest materjalidest: metallist, kummist või vormitud plastikust rullikutega [11]. Rullikute ridade arv on varieeruv. Levinud on nii kahe kui ka kolme rullikute reaga rattad [12].

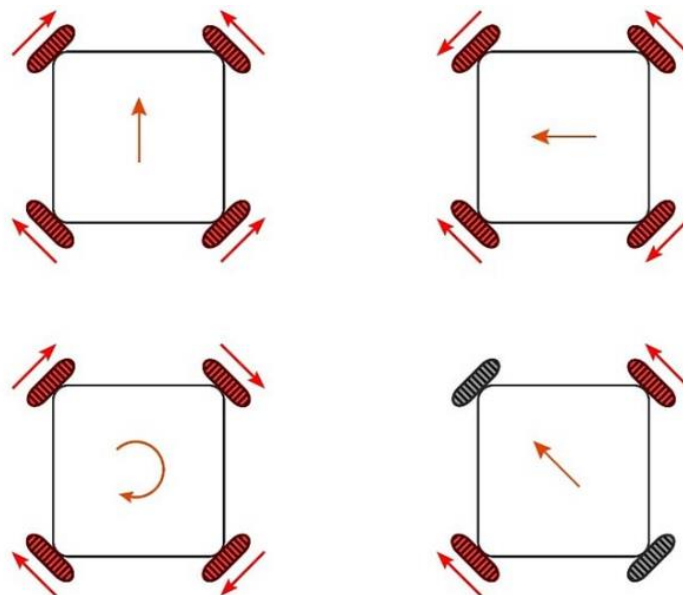


Joonis 2.1. Pildid erinevatest omniliikumisel kasutatavatest ratastest. [13] [11]

On olemas erinevaid omniliikuvusega roboteid, laialdasemalt kasutatakse kolme või nelja ratast. Kolmerattalise puhul on rattad paigutatud ringis üksteise suhtes 120-kraadise nurgaga ning tihti peale on robot ümmargune. Neljarattalise puhul on robot nelinurkse kujuga ning rattad on paigutatud nurkadesse. Rakendades iga ratta mootorile erinevaid võimsusi on võimalik kõikides suundades liikudes ka samaaegselt pöörata. Eeldades, et keskkonna tingimused on ideaalsed, on võimalik trigonomeetriat kasutades arvutada iga ratta kiirus. [15]



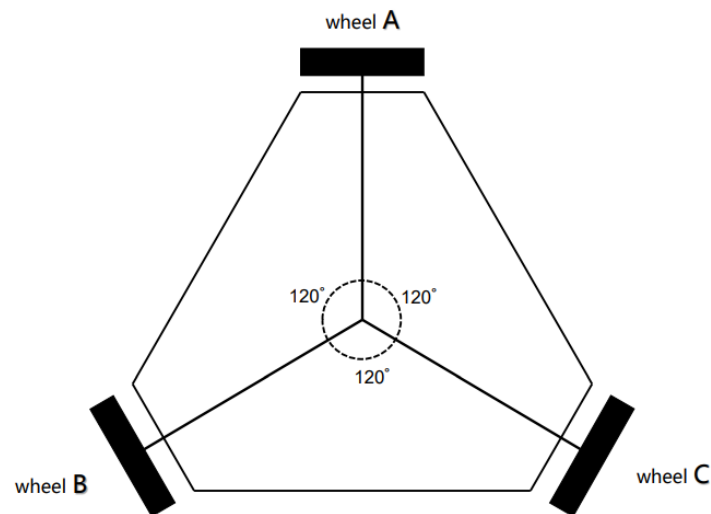
Joonis 2.2. Kolmerattalise omniroboti liikumisloogika. [16]



Joonis 2.3. Neljarattalise omniroboti liikumisloogika. [16]

2.2. Omniliikumine kasutades omnirattaid

Robotont liigub holonoomiliselt ehk omnisuunaliselt kolme rattaga [3], mille rullikud paiknevad 90-kraadise nurga all põhiratta teljega. Neid rattaid nimetatakse omniratasteks. Seda võib nimetada ka Kiwi liikumiseks [17].



Joonis 2.4. Kolmerattalise omniroboti rataste paiknemine. [15]

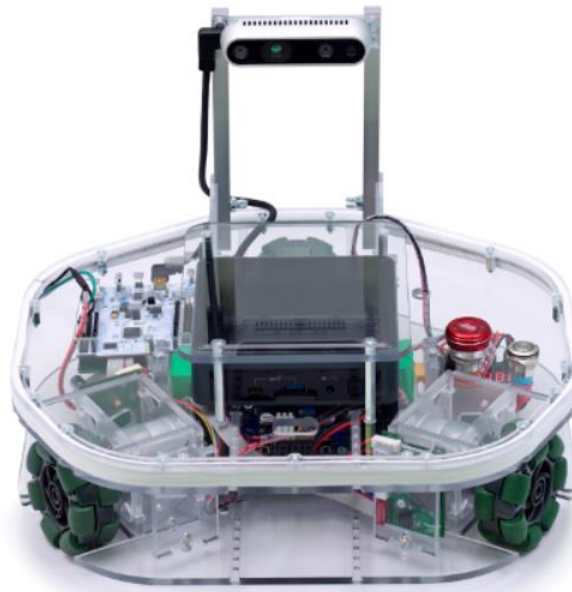
Selline omniliikumise rataste süsteem on mitmekülgne lahendus, mis võimaldab sujuvat liikumist mitmes suunas. Omniliikumise lahendus, mis kasutab omnirattaid, on ebatäpne, kuna rattad libisevad ebatäiuslikul sõidetaval pinnal ning haardumine ei ole pidev. Seega erineb tegelik positsioon ja suund ideaalsest planeeritud trajektoorist. Katsetuste käigus on leitud, et omniliikumise ideaalse arvutusliku trajektoori ja reaalse liikumissuuna erinevus on kuni 1%. Sellest võib järeldada, et valdkondade jaoks, kus ei vajata 100% täpsust, näiteks teenindus, haridus või logistika, on omnirattad hea lahendus. [18]

Logistikas on võimalik kasutada omniroboteid kauba transpordiks või omnirattaid sorteerimisliintidel.



Joonis 2.5. Omniratastega sorteerimislint. [19]

Omnirataste kasutamine on eriti levinud hariduses. Omniratastega roboteid kasutatakse koolides õppetegevustes ning robotika võistlustel jalgpallis ja korvpallis.



Joonis 2.6. Kolmerattaline õppeotstarbeline omnirobot Robotont.[20]

2.3. Omniliikumine kasutades mekaanumrattaid

Mekaanumrattad on omnirataste erilahendus. Erinevalt omniratastest, kus rullikute telg on põhiratta pöörlemisteljega täisnurga all, on mekaanumrataste rullikud paigutatud 45-kraadise nurgaga [4]. Mekaanumrattaid kasutatakse tavaliselt nelja- või kuuerattaliste robotite puhul [21].

Kuigi kolmerattalise omnirataste disaini ja neljarattalise mekaanumrataste disaini konfiguratsioon erineb, siis liikumisloogika on sama. Rakendades erinevatele mootoritele vastavaid kiirusi on võimalik liikuda kõikides suundades [9].

Tavalise mekaanumratta puuduseks on ebaefektiivsus. Neljarattalise disaini puhul diagonaalses suunas liikudes veavad masinat kaks ratast ning teised kaks lohisevad vastassuunas [9]. Samuti on liikumissuuna muutmine ajakulukas, sest suured rattad liiguvad ühes suunas ja väikeste abil liigutaks ristsuunaliselt [22]. Nende puuduste tõttu on vaja leida disain, mis kasutaks normaalrataid mekaanum- või omnirataste asemel.

Mekaanumratastega robotite ja masinate disain on levinud tööstuses, kus raskused on suured, sest kontakt sõidetava pinnaga on suurem. Nii jaotub raskus ühtlasemalt.



Joonis 2.7. Mekaanumratastega tööstus- ja logistikarobot [23].



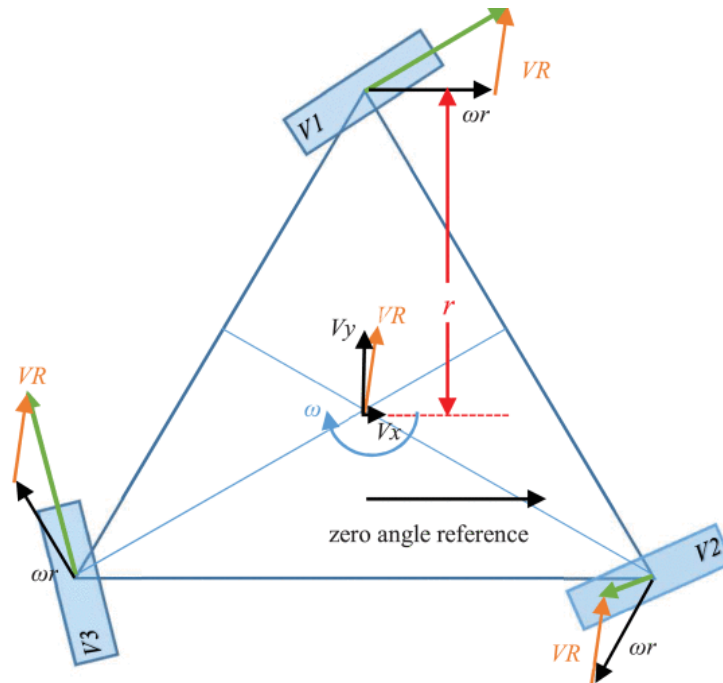
Joonis 2.8. Mekaanumratastega raskete vedude platvorm [24].



Joonis 2.9. Mekaanumratastega Kuka Youbot robotkäega [25].

2.4. Pöördpõik ajam

Pöördpõik ajamil põhineval lahendusel saab iga ratas olla suunatud kõikidesse võimalikesse suundadesse. Disain põhineb vedaval ja keeraval mootoril. Vedav mootor määrab liikumiskiiruse ja pöörav mootor annab pöördenurga. Selline disain on kõrgem ning robustsem, kui omniratastega lahendus, ja seetõttu võimaldab sõitmist ebatasasel pinnal ning takistuste ületamist. Lisades lahendusse PID kontrolleri, on võimalik liikumissuunda korrigeerida vastavalt mootori enkooderite tagasisidele. Nii saab kõrvaldada sõitmise ebatäpsuse. Miinusena on pöördpõik ajami lahendus mehaaniliselt keerulisem kui omnisuunaliste ratastega, sest koosneb mitmetest ülekannetest. Iga ratast eraldi pöörates enne suunatud liikumise alustamist tekib viivitus. Jõuülekande mehhanismid teevad disaini välismõõtmed suureks. Liikumise kontrollimine on keeruline, sest iga ratta kohta on vaja kontrollida kahte mootorit. Täpse liikumise saavutamine sõltub kolmerattalise disaini puhul kokku kuue mootori kontrollimisest. [4]



Joonis 2.10. Pöördpõik ajami vektorite mudel, mille abil arvutada mootorite liikumiskiiruseid.

[4]

Pöördpõik ajamiga rattamooduleid saab kasutada ka keerulisemates oludes, sest sellised robotid on võimelised ületama erinevaid takistusi. Näiteks on uuritud haiglavooditel robotiseeritud pöördratste kasutamist [2]. Pöödratste eelis on võimalus kasutada nendega roboteid ka väliskeskkonnas.



Joonis 2.11. Pöördpõik ajamiga logistika robot õues kasutamiseks [26].

2.5. Pöördpõik ajami rataste süsteemi ja omniratastega liikumise võrdlus

Tabel 2.1. Omniratastega liikumise ja pöördpõik ajami ratastega lahenduste võrdlus.

Omniratastega lahendus	Pöördpõik ajamiga rataste lahendus
<u>Plussid</u>	<u>Miinus</u>
Lihtsam mehaaniline lahendus;	Keerulisem mehaaniline lahendus;
Lihtne programmeerida;	Keerulisem programmeerida;
Kohene keeramine;	Keeramisel tekib viivitus;
<u>Miinus</u>	<u>Plussid</u>
Ebatäpne;	Täpsem, eriti kasutades PID kontrolleri;
Vajab tasast pinda;	Võimeline liikuma ka maastikul;
Puudub lükkamisvõime;	Võimeline lükkama;

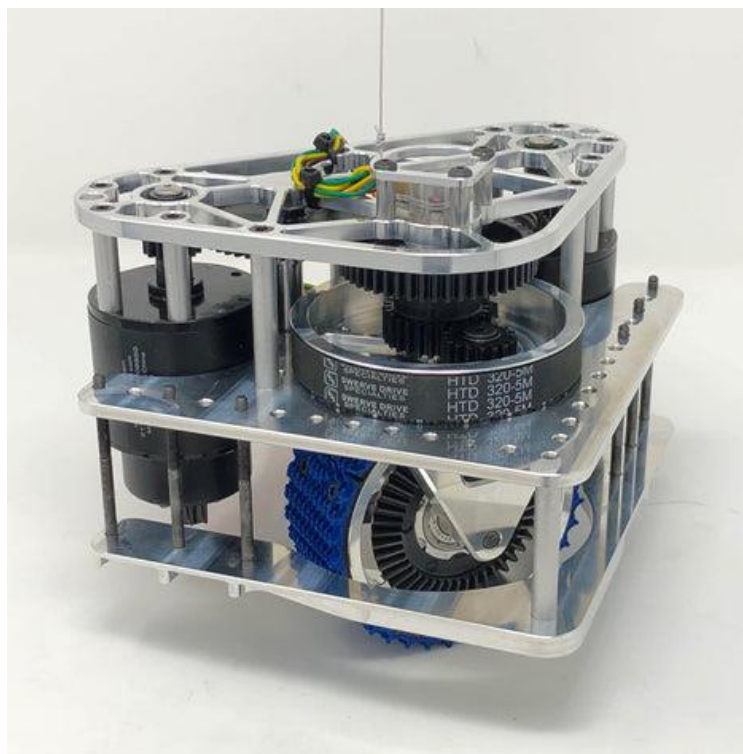
Nagu kirjeldatud tabelis 1 on omniratastega omniliikumislahendus võrreldes pöördpõik ajamiga mehaaniliselt lihtsam. Tänu sellele on ratas kergem ja disain kompaktsem. Seda liikumist on lihtne programmeerida ja kontrollida, kuid see on ebatäpne, sest libiseb sõidetaval pinnal [27]. Kui roboti liikumissuuna ja ühe ratta põhitelje vaheline nurk on ligikaudu 45-kraadi, siis tekib selle ratta rullikutest lisatakistus. Keeramine on kohene, kuid puudub lükkamisvõime. Kuna rullikute vahele jäävad väikesed vahed, siis ei sobi neid kasutada välitingimustes [28]. [10]

Pöördpõik ajami disain on võrreldes omniratastega keerukam, sest koosneb mitmest ülekande mehhanismist. Ratas on laialt kasutatav harilik, ilma rullikuteta kummikattega ratas, mis on seetõttu hõlpsasti kättesaadav ja odav. Omniratastel on rullikute vahel tühimikud, mis tavalisel rattal puuduvad. Tänu sellele on haarduvus parem [4]. Iga ratas veab kõigis suundades liikumisel, erinevalt omniratastest, mille puhul osades suundades mõni ratas ainult libiseb kaasa. Vähem mootori jõudu kulub lihtsalt libisemisele [29] ja igal liikumisel on täpne tulemus [30]. Pöördpõik ajamil põhinev robot on võimeline lükkama objekte ja hoidma positsiooni ka kaldel. Maksimaalne

kalle, millel robot suudab sõita sõltub massi keskmest ja rataste diameetrist [31]. See muudab lahenduse maastikuvõimeliseks. [10] [4]

2.6. Olemasolevad lahendused

Pöördpõik ajamit on võimalik osta valmislahendusena. Selliste moodulite hinnad algavad kolmesajast USA dollarist. Näiteks algab Swerve Drive Specialties pöördpõik ajami mudeli MK4i hind 365-st dollarist [32]. Selline hind on ebaproportsionaalselt suur võrreldes robotplatvormi Robotont tootmishinnaga. Lisaks soovime kasutada juba Robotondi põhidisainis olemasolevaid mootoreid. Need asetsevad risti ratta põhiteljega ja ei ole võimalik seetõttu ühendada valmis mooduliga. Robotondi juhtmoodul on valitud Pololu mootorite järgi. Selleks, et hoida süsteemi ühtsena ei ole otstarbekas juhtmoodulit ümber kujundada. Nendel põhjustel valmislahendus Robotondile ei sobi. Enda disainitud ja toodetud lahendusega saame säilitada platvormi modulaarsuse ja hoida Robotont avatud platvormina.



Joonis 2.12. SDS MK4i pöördpõik ajami moodul. [23]

3. Nõuded ja disain

Uueks liikumislahenduseks otsustati luua ise pöördpõik ajam. Selle süsteemiga saame anda Robotondile juurde kõrgust ja parandada liikumisvõimet. Pöördpõik ajamiga saab robot jätkuvalt liikuda holonoomiliselt, kuid suudab lisaks sellele ületada ka lävepakke või sõita välistingimustes.

3.1. Nõuded

Komponentide valikul lahendusse lähtuti järgmistest nõuetest:

- Ühildub Robotont versioon 3 disainiga;
- Komponentid on vabalt tellitavad ja seejärel kohandatavad juhul kui 3D printimine ei ole võimalik;
- Valminud lahendus on modulaarne ja roboti omnirattaid on võimalikult lihtne vahetada pöördpõik ajamiga mooduli vastu;
- Ratta vedava mootori kontrollimine ja pöörleva mootori kontrollimine on ühetaoline;
- Mooduli lõppmõõtmed on võimalikult väikesed;
- Kasutatakse materjale, mis on kergelt kättesaadavad;
- Disain on ühtne ehk materjalide ja komponentide tüüpide ning mõõtude valikul lähtutakse Robotondi disainist.
- Hammasrataste disain vastab ISO standarditele [33], mida rakendab Solidworks tarkvara hammasrataste genereerimise tööriist ja tootja kataloog [34].

3.2. Disain

Komponentide disainimisel on kasutatud Solidworks raalprojekteerimise tarkvara ning selle laiendustööriistu. 3D printimeks loodud g-koodis juhised on genereeritud PrusaSlicer versiooniga 2.4.2. CNC freespingi kasutamiseks loodud g-kood on genereeritud tarkvaras Fusion360.

Lahenduse disainis võeti eeskujuks juba turul olemasolevad pöördpõik ajami moodulid [12]. Loodud moodul koosneb levinud rulluisuratta tüüpi rattast, hammasratastest, laagritest, puksidest, võllidest ning kere detailidest (Lisa 1: Komponentide nimekiri). Selleks, et mootorite kontroll oleks ühetaoline, valiti vedav mootor sama, mis juba Robotondi omniratastega versioonis olemasolev mootor Pololu BDSG-37-40-R150. Lahendus disainiti võimalikult. Ratta kinnitus võllile on üks-ühele Pololu rattakinnitusega. Alumine ja ülemine kere tugiplaat freesiti 5mm paksusest polükarbonaadist vastavalt sellele, mida kasutatakse ka Robotondi kere disainis. Kõik ülekannete võllid valiti nõudel, et disain on ühtne ja on läbimõõduga 6mm, sest valitud mootorivõll on sama diameetriga. Hammasrattad on võllil ping-istuga. Laagrid valiti kättesaadavuse, võllide diameetrite ning disaini kompaktsusest lähtudes. Tugipuksid on levinud M3 keermega kuuskantpuksid. Kinnitusteks kasutati M3 polte ja mutreid. Prinditud hammasrataste paremaks fikseerimiseks võllile kasutati M3 seadekruvisid.

Hammasrataste valikul arvestati ka jõuülekandearvu. Jõuülekandearv iseloomustab, kui mitu pööret teeb süsteem ühe vedava hammasratta pöördetsükli vältel. Kui jõuülekandearv on suurem, on ühe pöördetsükli tarvis teha rohkem tööd.

Loodud disaini vedava mootori jõuülekandearv on

$$\frac{24}{72} * \frac{26}{26} * \frac{16}{16} \approx 0.33$$

ja pöörava mootori jõuülekandearv on

$$\frac{16}{16} * \frac{26}{72} \approx 0.36$$

Seega vajab pöördmootor rohkem jõudu vedamiseks, kui vedav mootor [35].

4. Loodud lahendus

4.1. Tootmine

Prototüüpimisel freesiti mooduli konstruktsiooni plaadid 5mm paksusest polükarbonaat plaadist kasutades Stepcraft D840 CNC freesmasinat. Hammasrattad ja kinnitusdetailid on prinditud 3D-printeriga Prusa i3 MK3S. Tööks kasutati küll sellist riistvara, aga tootmiseks sobivad ka muud tüüpi sama otstarbega masinad.

Tabel 4.1. PLA ja PC segu võrdlus.

		PLA [36]	PC [37]
Printimisotsiku temperatuur		210±10 °C	275±10 °C
Printplaadi temperatuur		40-60 °C	110±10 °C
Hind		~31 €/kg	~51.5 €/kg
Tihedus		1.24 g/cm ³	1.22 g/cm ³
Prinditud detaili paindetugevus	horisontaalselt	83±6 MPa	88±1 MPa
	vertikaalselt	99±1 MPa	94±2 MPa
Tõmbetugevus voolavuspiiril	horisontaalselt	51±3 MPa	63±1 MPa
	vertikaalselt	59±2 MPa	63±1 MPa

Esialgu prinditi hammasrattad ning rattahoidmise detailid ettevõtte Prusa poolt toodetud materjalist „prusament PLA“ [5]. See on laiaotstarbeline ja kergesti käsitletav, kuid oma omadustelt rabe. Alternatiivina sai prinditud üks komplekt detaile sama ettevõtte toodetud materjalist „PC blend“ [6]. Tegemist on polükarbonaadi seguga, mis sobib tugevamate ja vastupidavamate detailide 3D printimiseks. Võrreldes PLA-ga on selle sulamistemperatuur kõrgem. See teeb ta ka vastupidavamaks kõrgematele temperatuuridele. Võrreldes tabeli 2 põhjal PLA ja PC omadusi, võib järeldada, et PC on tugevam, kuid kallim. Prusa testid näitasid, et PCst prinditud detailid olid vastupidavamad. [37]

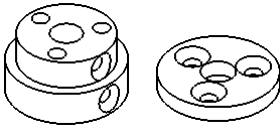
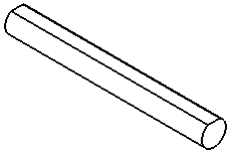
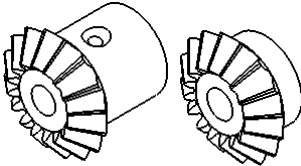
PLA sulamist printimisel on 1M koonushammasrattad prinditud kihi kõrgusega 0.1mm ning ülejäänud detailid kihi kõrgusega 0.2mm. PCst printimisel on kõik detailid prinditud kihi kõrgusega 0.1mm.

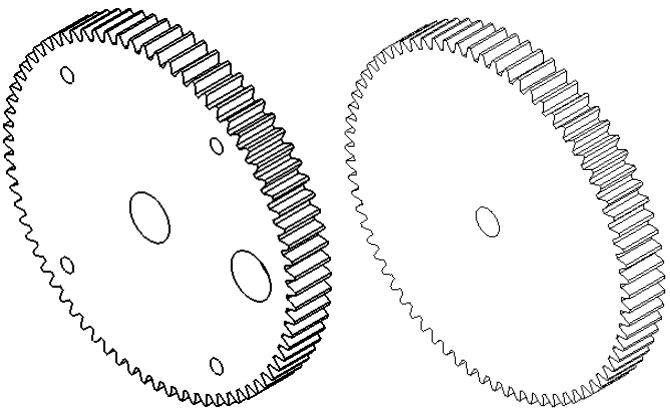
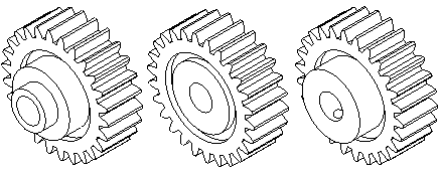
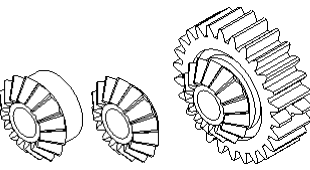
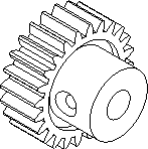
Detailid on omavahel ühendatud istude, poltide ja pressmutritega. Ratta keredetaili tugevdamiseks prinditi see kolmes tükis. Detaili kõrvadesse kuumutati pressmutrid (ingl *inserts*) ning seejärel ühendati need plaadiga kasutades polte.

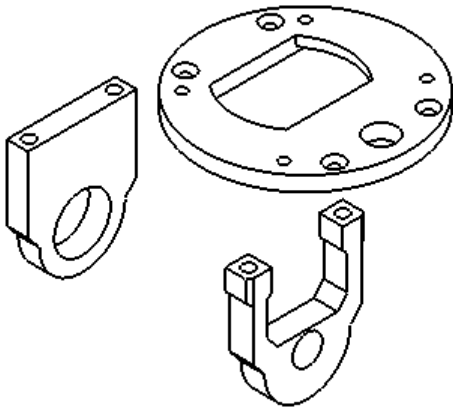
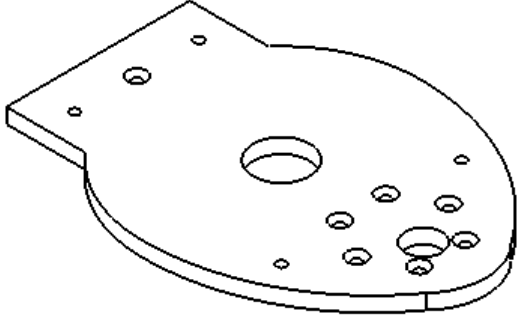
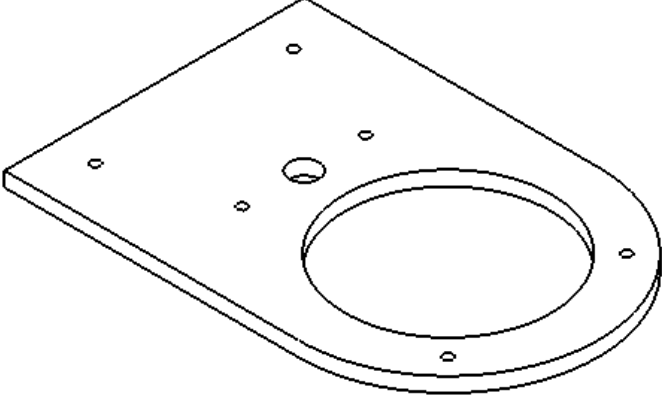
4.2. Mehaanika

Mehaanilise lahenduse jaoks sai loodud järgmised mudelid:

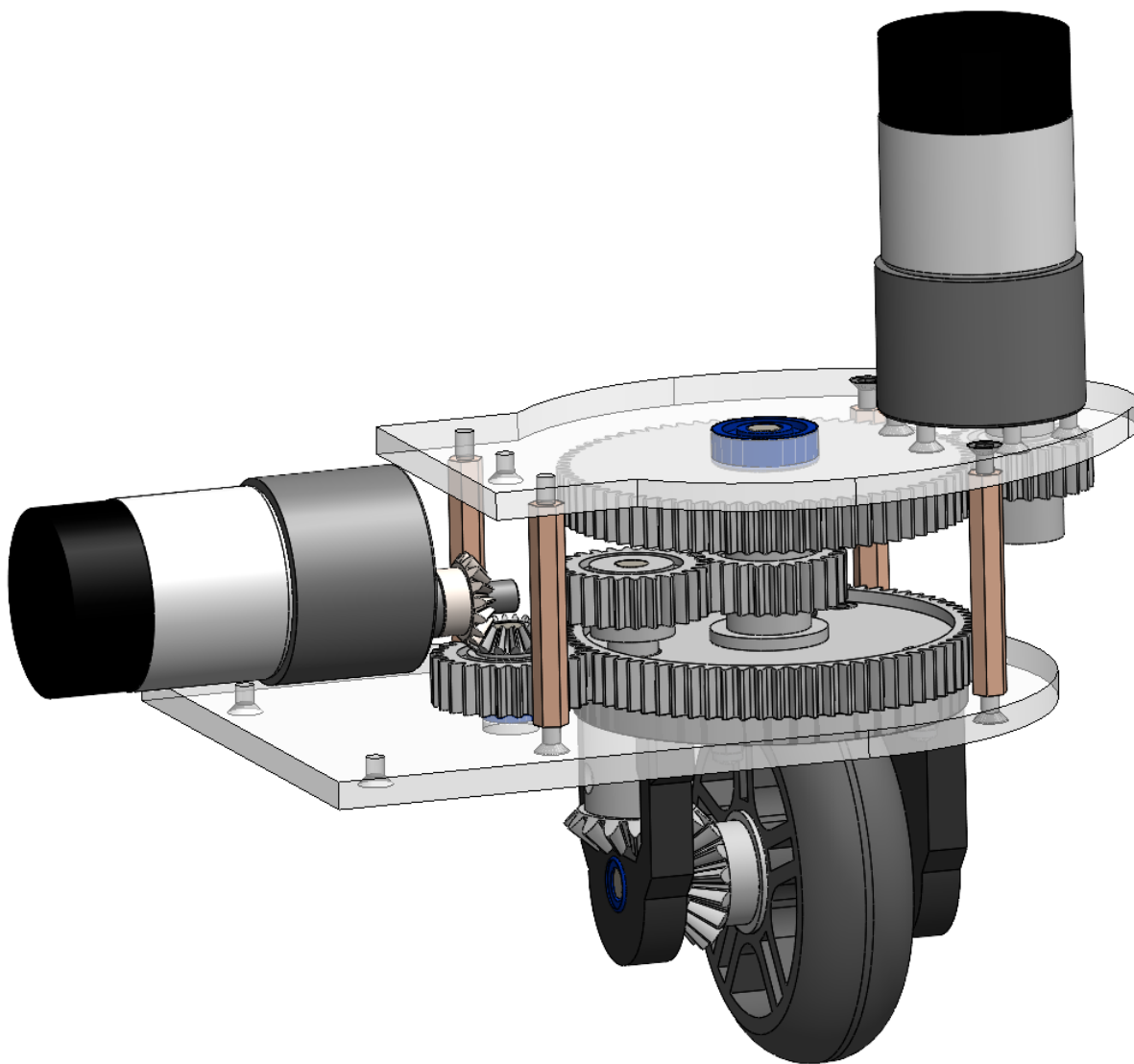
Tabel 4.2. Loodud mudelid.

Ratta kinnitused võllile;	
Neli ülekandevõlli diameetriga 6mm, istuga H6. Mudelis neli erineva pikkusega võlli. Võllidele on freesitud sälgud hammasrataste fikseerimiseks seadekruviga;	
Kaks koonushammasrattast mooduliga 1.5, 16 hambaga, sisediameetriga 6mm nurkülekande jaoks rattavõllil. Südamikesse (ingl <i>hub</i>) on lisatud võllile fikseerimiseks avad;	
Kaks silinderhammasrattast mooduliga 1, 72 hambaga, sisediameetriga 6mm keskmistele ülekannetele. Muudetud on südamike kõrgust ja ühele on lisatud kinnitusavad rattahoidjale. Samal hammasrattal on ka ava laagrile, läbi	

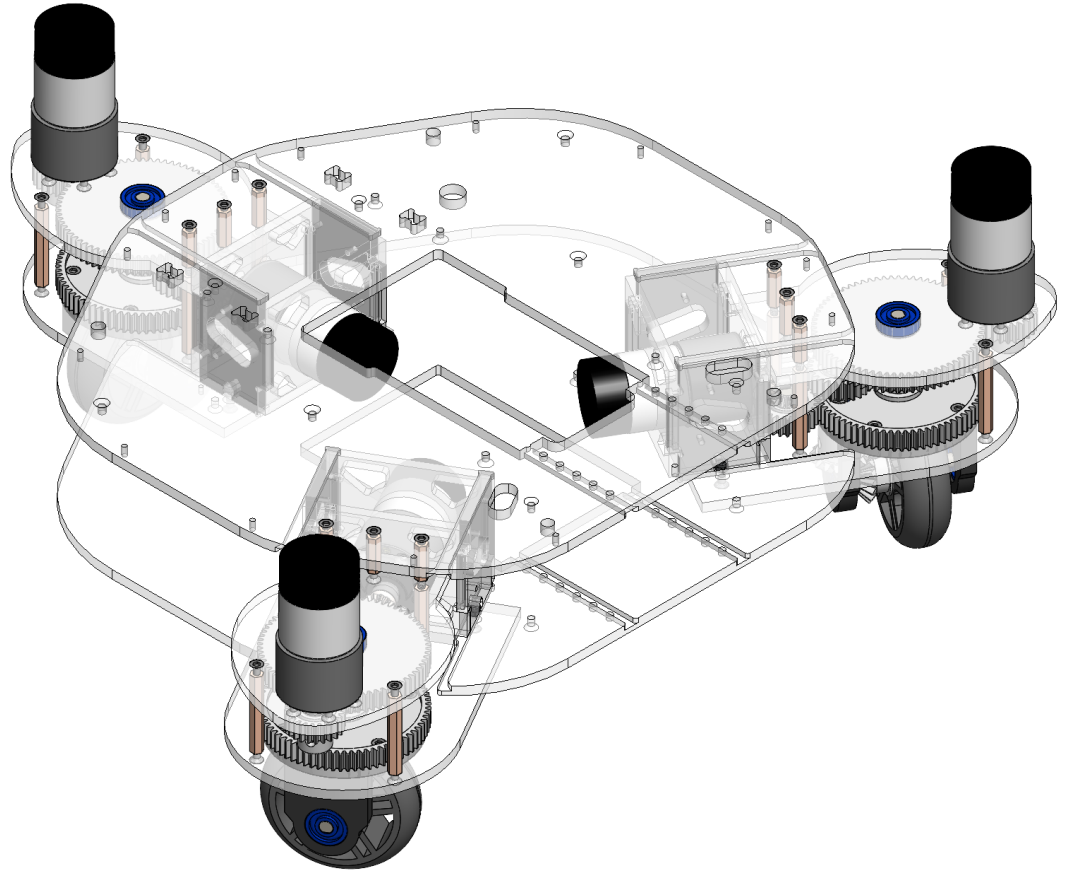
mille käib völli ratta kontrollimiseks. Teise südamikul on völli fikseerimiseks ava;	
Kolm silinderhammasratast mooduliga 1, 26 hambaga, sisediameetriga 6mm erinevate südamike kõrguste ja kujuga. Ühel on lisatud ka ava völli fikseerimiseks;	
Kaks koonushammasratast mooduliga 1, 16 hammast, sisediameetriga 6mm, erinevate südamike kõrgustega. Ühele on lisatud ava mootorivölli kinnitamiseks. Antud tüüpi väiksemast koonushammasrattast on ka alternatiivne disain, kus see on ühendatud eelmise punkti silinderhammasrattaga;	
Silinderhammasratas vedava mootori ülekande jaoks mooduliga 1, 24 hammast, sisediameetriga 6mm. Lisatud on ava mootorivölli kinnitamiseks;	
Kuullaager laiusega 6mm, välisdiameetriga 19mm ja sisediameetriga 6mm (SKF626 mudel);	
Nõellaager laiusega 8mm, välisdiameetriga 10mm ja sisediameetriga 6mm (HK 0608 mudel);	

Üherealine kuullaager laiusga 3mm, välisdiameetriga 10mm ja sisediameetriga 6mm (MR-106 mudel);	
Ratta keredetail, mis sai lahutatud kolmeks osaks ning prinditud eraldi. Ühendati kuumutades kõrvadesse pressmutrid ja seejärel plaat kinnitades poltidega;	
Ülemine freesitav kereplaat;	
Alumine freesitav kereplaat;	

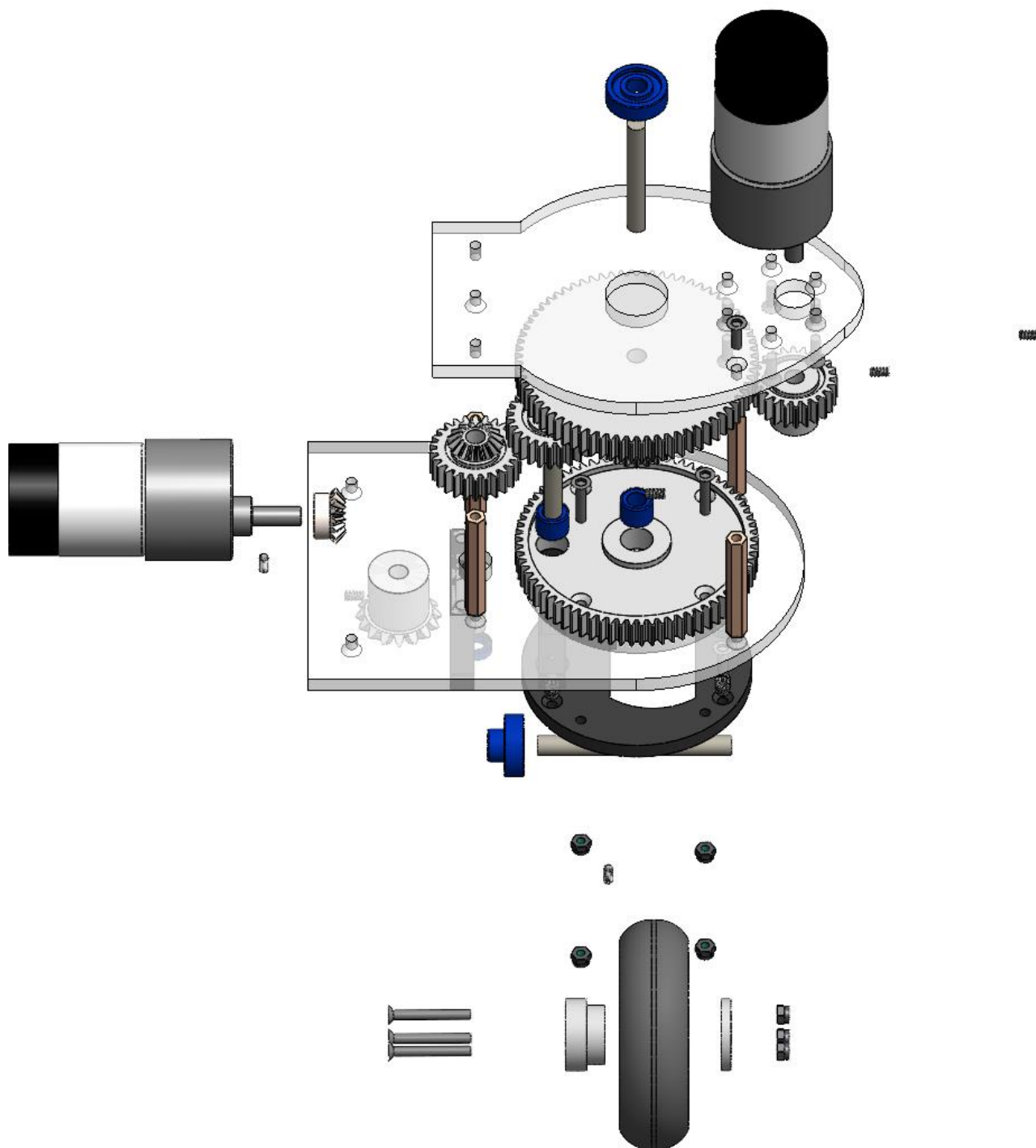
Detailne nimekiri komponentidest, kinnitustest, nende arvust ja tellimisviidetest on toodud Lisas 1. Eridisainiga komponentide pildid on toodud Lisas 2. Valmis ühe rattamooduli disain, mida sai visualiseeritud ka Robotondi versioon 3 kerega.



Joonis 4.1. Rattamooduli disainimudel.



Joonis 4.2. Kolme pöördpõik ajamiga rattamooduliga Robotondi kere disainimudel.



Joonis 4.3. Rattamooduli disaini plahvatusvaade.

Plahvatusvaatel on näha rattamooduli disain lahutatud kujul. Täpsemad koostamise juhised on Lisas 3.

4.3. Mooduli hind

Tabel 4.3. Materjalide hinnad ilma kinnitusdetailideta.

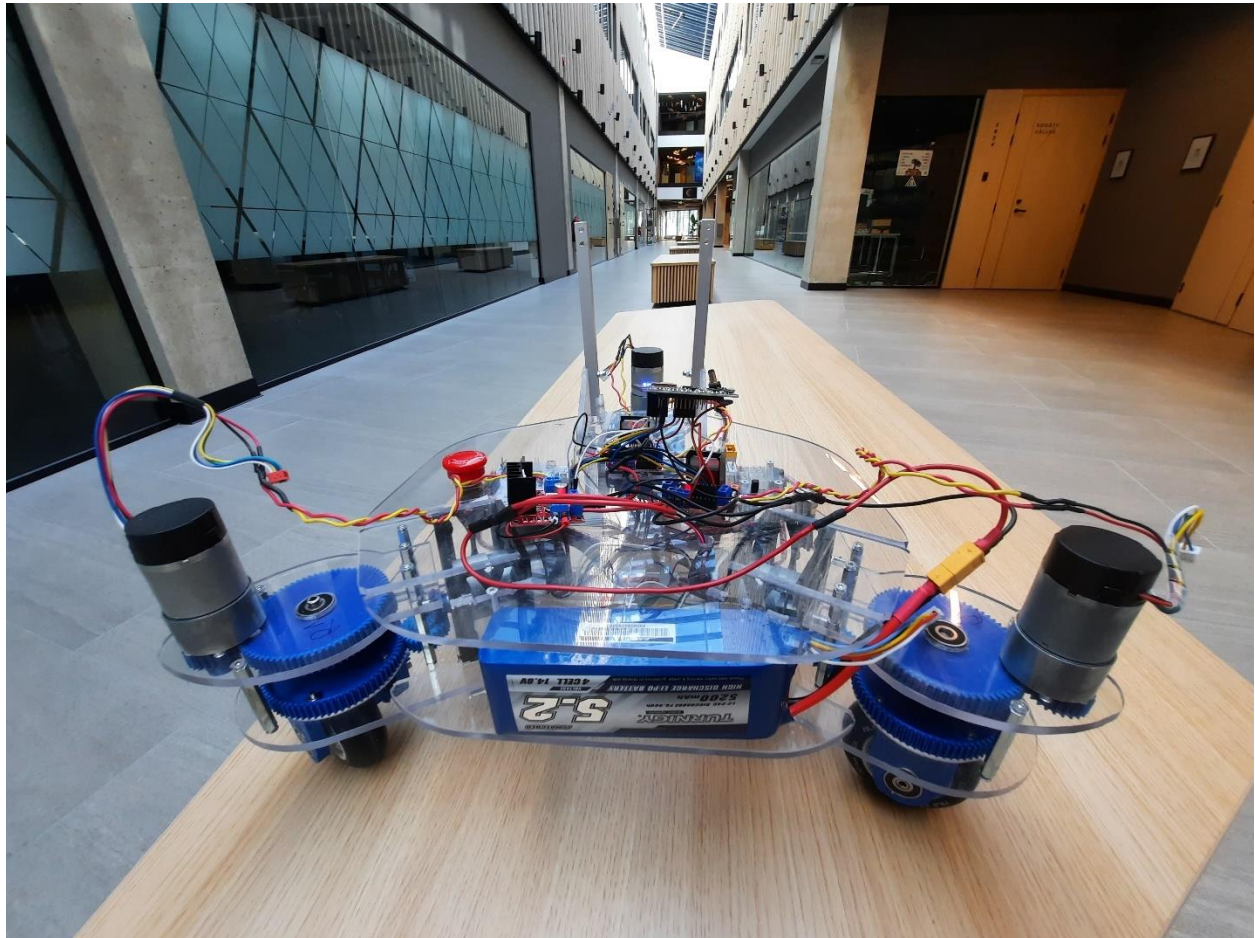
Materjal	Hind	Materjali kulu	Maksumus (EUR)
PLA	31€ / kg	93.9 g	2.91
PC	51.5€ / kg	92.87 g	4.78
Polükarbonaat plaat	52€ / m ²	0.0238 m ²	1.23
Pololu mootor koos enkoodriga	51.95\$ / tk	1 tk	47.74
Rullisuratas 70mm	6.85€ / 4tk	1 tk	1.71
Võll	15.60€ / 1m	0.17m	2.65
Kuullaager SKF626	0.66€ / 1tk	2	1.32
Nõellaager	1.44€ / tk	3	4.32
Kuullaager välisdiameetriga 10mm ja laiussega 3mm	6.76€ / tk	1	6.76

Arvestades hindasid Tabelis 2 saame ühe mooduli hinnaks ilma kinnitusdetailideta nagu poldid, mutrid, pressmutrid 68.64€ kasutades printimiseks PLA-d ja 70.51€ kasutades printimiseks PC segu. Arvestame mootori hinnaks ühes moodulis ainult ühte mootorit, sest teine on olemas Robotondi põhidisainis. Pololu mootori hind on arvutatud Eesti Panga kodulehel olevate valuutakursside alusel seisuga 16. mai 2023. Tooteviited on toodud Lisa 1 tabelis.

5. Testimine ja järeldused

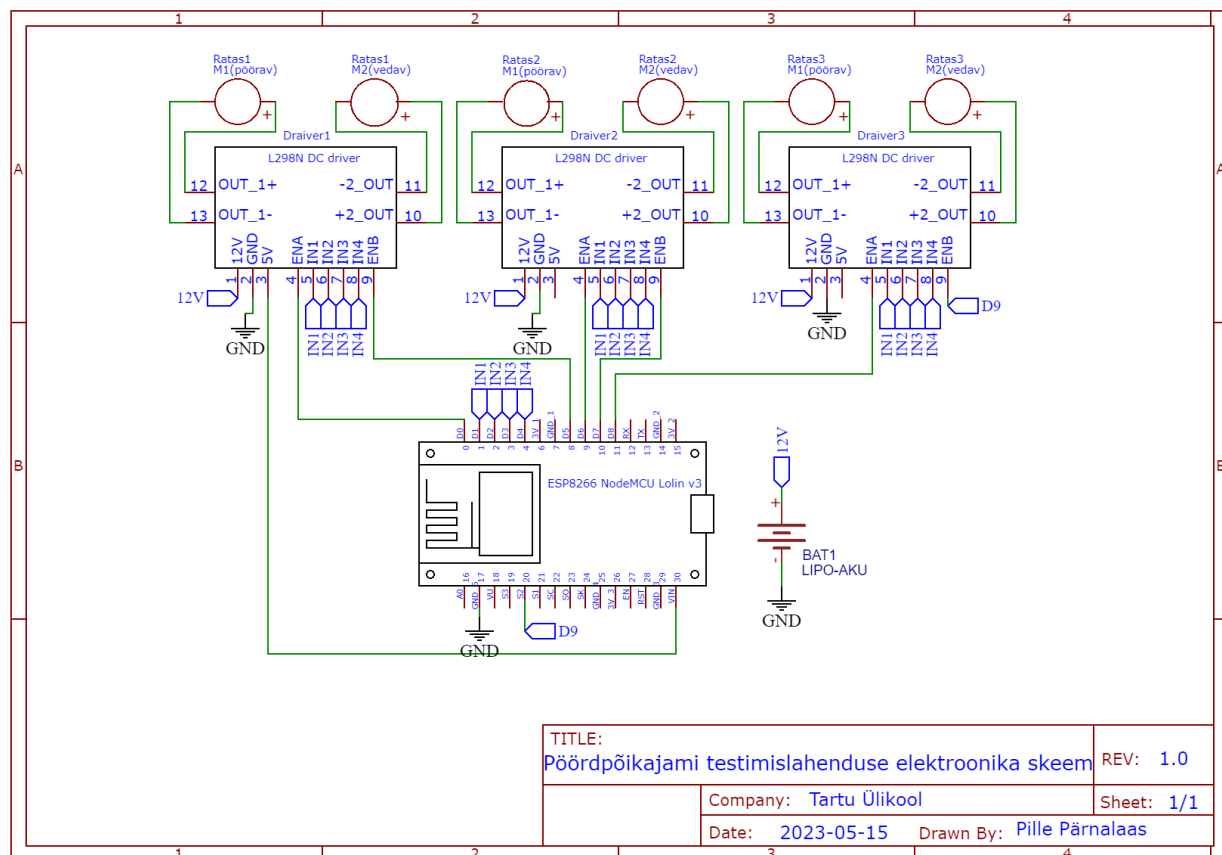
5.1. Testimine

Testimise hetkeks ei olnud veel Robotont versioon 3 tervikuna valminud. Pöördpõik ajami rattamoodulid ühendati versioon 2 kerele 3D printitud versioon 3 mootorikinnitustega.



Joonis 5.1. Pilt valminud testlahendusest.

Rohkem pilte, videoid testlahendusest ning kood on üles laetud Lisas 4 toodud allikasse. Testimiseks kasutati ESP8266 moodulit NodeMCU Lolin v3 ja kolme L298N DC mootori draiveri moodulit. Testlahenduse toiteallikaks oli 5000mAh 4S Lipo aku[38].



Joonis 17. Testlahenduse elektroonika ühendusskeem

Testlahenduse ühendused on näidatud joonisel 17. Iga draiver kontrollib kahte mootorit, ühe ratta pöördmootorit ja liikumismootorit. Seadet katsetati Arduino IDE-s kirjutatud programmiga, mis ühendus WiFi abil nutiseadme rakendusega WiFi Controller versiooniga 1.4, loodud mightyIT poolt. Rakendus võimaldas saata kontrolleri infot mootorite kiiruse ja suuna kohta.

Tabel 5.1. Voolutugevuse (I) mõõtmistulemused mootoritel.

	Pöörav mootor	Vedav mootor
Voolutugevus liikumise alustamiseks I_a (A)	1.2	0.8-0.85
Pinge liikumise alustamiseks U_a (V)	8.2	6.8
Liikumise alustamiseks vaja minev võimsus $P_a = I_a * U_a$ (W)	9.84	5.61
Voolutugevus juba liikuva ratta korral I_l (A)	1	0.65-0.8
Pinge juba liikuva ratta korral U_l (V)	8.71	7.4
Liikumisel vajatav võimsus $P_l = I_l * U_l$ (W)	8.71	5.37

Pöördpõik ajami võimsuskulu hindamiseks sai mõõdetud mootorite käitamise voolutugevusi pöördpõik ajamiga. Tulemused on toodud tabelis 5.1. Mõõtmistulemused saadi testides ühte PC materjalist prinditud moodulit sisetingimustes ja siledal põrandal. Mõõdeti multimeetriga Uni-T M830B ühendades mõõteseade mootori vooluringi jadamisi. Tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada, et teised rattad testimise ajal ei vedanud. Reaalses situatsioonis vajatav võimsus on tänu mootorite koostööle väiksem.

5.2. Järeldused

Ülekande mehhanismid on keerukad ning vajavad liikumiseks mootorilt palju jõudu arvestades kasutatud mootorite maksimaalset võimekust. Tulevikus on vaja parandada mehhanismide sujuvust ja sellega vähendada vajatavat mootorivõimsust. Üks võimalik lahendus vajamineva jõu vähendamiseks on ülekandearvu vähendamine. Seda on võimalik saavutada vahetades vedav hammasratas praegusega võrreldes väiksema vastu ning veetav suurema vastu. Vähendades lisaks mooduli suurust ja kasvatades hammaste arvu ühel hammasrattal, saame vähendada pöördemomenti [39]. Sel juhul on vaja rakendada vähem voolu liikumise alustamiseks.

Kõige suurem probleem praeguse disaini juures on ülekanne pööravast mootorist koonushammasrattale. Mooduli alumise kereplaadi ja pöördemootori võlli vahel on ruumi väga vähe. Seetõttu on pöördpõik ajami mooduli loomisel võimalused piiratud. Ruumi pöördpõik ajami mooduli alumise kereplaadi ja mootori võlli vahel on ainult 19mm, kui mõõdame võlli keskpunktist. Pöördpõik ajamit on võimalik implementeerida ka selliselt, et ülekanne mootorilt ratta pööramiseks jääb võlli kohale. Sel juhul kinnituks see ülekanne ülemisele kereplaadile. See tähendaks küll kogu disaini ümber tegemist, ent pakub laiemaid võimalusi ülekande realiseerimiseks.

Testimise käigus selgus, et PLA segust 3D prinditud hammasrattad on pehmed ning võivad kergelt hakata võllil libisema. Seda ka, siis kui võll on ping-istuga. Parema tulemuse saamiseks sai testimiseks ühe mooduli jagu detaile prinditud tugevamast PC segust. Tugevamast materjalist prinditud ja poltidega sälguga võllile fikseeritud hammasrattastega moodulit testides ülekanded enam ei libisenud nii nagu PLA-st hammasrattad. Saab järeldada, et PLA ei sobi selliste ülekannete prototüüpimiseks, mida käitatakse suurel võimsusel.

Katsetes selgus, et siinses töös loodud lahendus ei liigu sujuvalt ning vajab mootorilt palju võimsust liikumiseks. Tabelis 5.1. toodud mõõtmistulemused näitavad, et pöördemootor vajab liikumise alustamiseks ligikaudu 10 W võimsust. Arvestades, et Pololu mootori maksimaalne väljundvõimsus on 12 W, on selline võimsusvajadus suur [40].

Selgus, et kogu moodul vajab väga täpset koostamist. Isegi väikesed (vähem kui 0.5mm) ebatäpsused koostamisel võivad hiljem takistada ülekannete sujuvat liikumist. Vajalikku täpsust on mittetööstuslikul tootmisel keeruline saavutada. Selleks, et pöördpõik ajam töötaks sujuvalt on tulevikus vaja disaini kohandada selliselt, et see arvestaks koostel tekkiva täpsusveaga. Mudeli edasiarendamiseks võimalusel tellida eritellimusena metallist hammasrattad. Nii on võimalik saavutada suurem tootmistäpsus, kui seda võimaldab 3D-printimine.

Loodud pöördpõik ajami lahenduses kasutatavad nõellaagrid ei fikseeru võllil. Võllid on vajalikes kohtades fikseeritud kahelt poolt, ühelt poolt suurema kuullaagriga ja teisest otsast nõellaagriga. Juhul kui kuullaager ebaõnnestub võlli fikseerimisega võib võll paigast liikuda. Katse tulemused näitavad, et mõlemad võlli otsad on vaja tihkelt fikseerida. Edaspidi on vaja antud laager asendada sellisega, milles saaks sobiva diameetriga võll olla ping-istuga.

Bakalaureuse töö raames loodud lahendus on potentsiaalselt omniliikuv ja maastikuvõimekas. Selleks, et tehtud tööd praktikas rakendada vajab loodud disain täiendamist. Uus lahendus peab arvestama käesolevas lõputöös leitud puudustega ning leidma neile lahendused. Tulemused näitavad, et hetkel kasutuses olevad rullisurattad tuleb vahetada suurema mustriga rataste vastu, et sõiduomadused erineval pinnasel paraneksid. Selleks, et saavutada täielik omniliikuvus on vaja kirjutada lahendusele draiver. Draiverile saab anda tagasisidet, võttes kasutusele mootoritel olevad enkooderid, mis jälgivad ratta positsiooni. Siis saab draiver rakendada PID-loogikat ja saavutab maksimaalse täpsuse.

Kokkuvõte

Robotplatvorm Robotont kasutab omniliikumiseks omnirattaid. Nende ratastega saab robot liikuda ainult siledal pinnal. Oli vaja leida omniliikumise lahendus, mis on kõrgem ja võimekam erinevatel pinnastel. Selline liikumislahendus võimaldab robotil ületada takistusi. Õpperoboti sõiduomadusi parandades saab laiendada sellel baseeruvaid õpiülesandeid.

Bakalaureusetöö käigus loodi pöördpõik ajamil põhinev holonoomilise liikumisega rattamoodul. Töös kirjeldati põhilisi omniliikuvuse variante ning valiti sobivaim. Püstitati disainile nõuded ning loodi neile vastav mudel. Lahendus toodeti ja testiti sobivust Robotondi kerele. Loodud süsteem on modulaarne ning võimaldab kerget liikumislahenduse vahetamist. Pöördpõik ajamil põhinev rattasüsteem on varasemast rattast kõrgem, robustne ja võimaldab liikuda välistes tingimustes.

Testimise käigus selgus ka erinevaid probleeme. PLA sulamist hammasrattad libisevad metallist võllil mootorite käitamisel. Selle parandamiseks saab printida tugevamast PC sulamist detailid, mis selliselt võllil ei libise. Toodetud lahenduse koostamisel on tekkinud täpsusvigu ning disain vajab täiustamist. Bakalaureusetöö käigus tehtud katse põhjal ei saa siiski teha lõplikke järeldusi maastikuvõimekuse ja omniliikuvuse. Neid saab teha siis, kui järeldustes väljatoodud parandused on ellu viidud ning pöördpõik ajami süsteemi on testitud sellele kirjutatud draiveriga.

Summary

The robotic platform Robotont uses omniwheels to implement omnimotion. With omniwheels the robot can only move on smooth surfaces. It was necessary to find an omnimotion solution that can move on different surfaces and is higher. That gives the robot the capability to overcome obstacles. When the movement abilities of the educational robot improve, the curriculum that implements the robot, can become more diverse.

A swerve drive wheel module with holonomic movement was created in the process of this thesis. Various omnimotion implementation options were described and the most suitable was chosen. Design requirements were established, and a model was created accordingly. The solution was manufactured and tested with Robotont chassis. The created system is modular and enables easy changing of movement modules between omniwheels and swerve drive. The swerve drive wheel module is higher than the previous omniwheel, more robust and enables moving in external conditions.

In the process of testing, various problems were detected. Gears which were produced from PLA tended to slip on a metal shaft. To fix that, it is possible to print details from the stronger PC blend material, which does not slip on the shaft like that. While assembling the solution, small precision mistakes were made which hinder the proper working of the solution. The design needs improvement. Final conclusions about the systems' omnimotion capabilities and the ability to move outdoors cannot be made. Only when the corrections that were mentioned in the deductions are implemented and the system has been tested with a driver specifically written for it, final deduction can be done.

Tänuavaldused

Autor soovib tänada juhendajat Renno Raudmäed abi ja heade soovitude eest kogu töö vältel. Tema asjatundlikud mõtted disaini parendamise osas andsid aluse toodetud disainile. Samuti tänan alati kiirelt komponentide leidmise eest ja kiire ning asjakohase tagasiside eest.



Viidatud kirjandus

- [1] „Robot Operating System [Robotic & Microcontroller Educational Knowledgepage - Network of Excellence]“. <https://robo-labor.ee/homelab/et/ros> (vaadatud 18. mai 2023).
- [2] R. Dhelika, A. F. Hadi, ja P. A. Yusuf, „Development of a Motorized Hospital Bed with Swerve Drive Modules for Holonomic Mobility“, *Applied Sciences*, kd 11, nr 23, Art. nr 23, jaan 2021, doi: 10.3390/app112311356.
- [3] „Robot Platform | Knowledge | Holonomic vs. Non-Holonomic“. http://www.robotplatform.com/knowledge/Classification_of_Robots/Holonomic_and_Non-Holonomic_drive.html (vaadatud 26. veebruar 2023).
- [4] E. H. Binugroho, A. Setiawan, Y. Sadewa, P. H. Amrulloh, K. Paramasastra, ja R. W. Sudibyo, „Position and Orientation Control of Three Wheels Swerve Drive Mobile Robot Platform“, *2021 International Electronics Symposium (IES)*, sept 2021, lk 669–674. doi: 10.1109/IES53407.2021.9593947.
- [5] „Prusament PLA Blend Royal Blue 970g | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa“, *Prusa3D by Josef Prusa*. <https://www.prusa3d.com/product/prusament-pla-royal-blue-blend-970g/> (vaadatud 16. mai 2023).
- [6] „Prusament PC Blend Natural 970g | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa“, *Prusa3D by Josef Prusa*. <https://www.prusa3d.com/product/prusament-pc-blend-natural-970g/> (vaadatud 16. mai 2023).
- [4] R. Raudmäe, „Avatud robotplatvorm Robotont“, Magistritöö, Tartu Ülikool, 2019. <https://dspace.ut.ee/handle/10062/64341>
- [5] M. Maidla, „Avatud robotiarendusplatvormi Robotont omniliikumise ja odomeetria arendamine“, Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, 2018, <https://dspace.ut.ee/handle/10062/60288>
- [6] O. Diegel, A. Badve, G. Bright, J. Potgieter, ja S. Tlale, „Improved Mecanum Wheel Design for Omni-directional Robots“, *Australasian Conference on Robotics and Automation*, lk 5., 2021,

- https://www.researchgate.net/publication/228559343_Tlale_Improved_Mecanum_Wheel_Design_for_Omni-directional_Robots
- [7] A. Baker ja I. Mackenzie, „Omnidirectional Drive Systems Kinematics and Control“, 2008 *FIRST Robotics Conference*, 2008. <https://files.andymark.com/2008CON-Omni-Baker-McKenzie.pdf>
- [11] „Rotacaster Omni-Directional Wheels“, *Materials Handling*. <https://www.materialshandling.com.au/products/rotacaster-omnidirectional-wheels/> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [12] „Omni and Multidirectional Wheels | Alternative to Casters | OMNIA“, *Rotatruck*. <https://www.omniawheel.com/omnia-wheels> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [10] „Wheels“, *Vex Robotics*. <https://www.vexrobotics.com/wheels.html> (vaadatud 22. oktoober 2022).
- [14] „MK4 Swerve Module“, *Swerve Drive Specialties*. <https://www.swervedrivespecialties.com/products/mk4-swerve-module> (vaadatud 18. märts 2023).
- [15] S. Hu, H. Chen, ja Y. Shao, „Triangular Omnidirectional Wheel Motion Control System“, *Open Access Library Journal*, kd 7, nr 8, Art. nr 8, aug 2020, doi: 10.4236/oalib.1106677.
- [13] „Get Rolling with Omni-Directional Wheels“, *Servo Magazine*. <https://www.servomagazine.com/magazine/article/get-rolling-with-omni-directional-wheels> (vaadatud 26. veebruar 2023).
- [17] „Drivebases“. <https://docs.ftclib.org/ftclib/features/drivebases> (vaadatud 18. mai 2023).
- [14] S. Soni, T. Mistry, ja J. Hanath, „Experimental Analysis of Mecanum wheel and Omni wheel“, *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, kd 1, nr 3, mai 2014. https://www.ijiset.com/v1s3/IJISSET_V1_I3_50.pdf
- [19] „Conveyor Transfer Systems and Omniwheel Conveyors | Omnia“, *Rotatruck*. <https://www.omniawheel.com/conveyor-systems> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [16] „robotont“, Tartu Ülikool. <http://robotont.ut.ee/avaleht> (vaadatud 6. mai 2023).
- [21] P. I. Chang, S. C. Fan-Chiang, C. Chen, ja C. Y. Lan, „Real Time Fault Detection for Mecanum Wheel Omnidirectional Robot Platform“, 2021 *21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, okt 2021, lk 1969–1973. doi: 10.23919/ICCAS52745.2021.9649780.

- [22] S. Sharma, K. V. Vasireddy, R. G. Melita, S. Suresh, ja M. Rakesh, „Omni-Directional Robot Based on Swerve Drive“, *2022 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI)*, jaan 2022, lk 1–7. doi: 10.1109/ACCAI53970.2022.9752654.
- [23] „Omni-directional Wheeled Mobile Robot“, *IOV ASIA*, 28. juuli 2020. <http://iovasia.com/product/omni-directional-wheeled-mobile-robot/> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [24] „KUKA omniMove (AGVs)“, *KUKA AG*. <https://www.kuka.com/en-us/products/mobility/mobile-platforms/kuka-omnimove> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [21] „KUKA YouBot Kinematics, Dynamics And 3D Model“, . <http://www.youbot-store.com/developers/kuka-youbot-kinematics-dynamics-and-3d-model> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [26] „RB-VOGUI Mobile Robot - Outdoor Mobile Robot | Robotnik®“, *Robotnik*. <https://robotnik.eu/products/mobile-robots/rb-vogui-en/> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [27] R. Zhang, H. Hu, ja Y. Fu, „Trajectory tracking for omnidirectional mecanum robot with longitudinal slipping“, *MATEC Web of Conferences*, kd 256, lk 02003, jaan 2019, doi: 10.1051/mateconf/201925602003.
- [28] H. Ghariblu, „Design and Modeling of a Ball Wheel Omni-directional Mobile Robot“, *2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications*, märts 2010, lk 571–575. doi: 10.1109/ICCEA.2010.260.
- [29] I. Doroftei, V. Grosu, ja V. Spinu, „Omnidirectional Mobile Robot - Design and Implementation“, 2007. doi: 10.5772/5518.
- [30] M. H. Korayem ja T. B. Rostam, „Design, Modelling and Experimental Analysis of Wheeled Mobile Robots“, *IFAC Proceedings Volumes*, kd 37, nr 14, lk 629–634, sept 2004, doi: 10.1016/S1474-6670(17)31173-4.
- [31] „3-Wheel Swerve - DEW Robotics“. http://team1640.com/wiki/index.php/3-Wheel_Swerve (vaadatud 17. mai 2023).
- [32] „MK4i Swerve Module“, *Swerve Drive Specialties*. <https://www.swervedrivespecialties.com/products/mk4i-swerve-module> (vaadatud 15. mai 2023).

- [23] „ISO 6336-1:2019“, ISO. <https://www.iso.org/standard/63819.html> (vaadatud 20. märts 2023).
- [24] „MÄDLER - your expert for power transmission elements“, *Maedler*. <https://www.maedler.de/> (vaadatud 20. märts 2023).
- [35] „Steps to calculate a gear ratio“, 9. mai 2019. <https://clr.es/blog/en/steps-to-calculate-a-gear-ratio/> (vaadatud 17. mai 2023).
- [36] „Prusa3d PLA datasheet“, *Prusa3D* by *Josef Prusa*. <https://www.prusa3d.com/file/938568/prusament-pla-blend-technical-data-sheet.pdf> (vaadatud 16. mai 2023).
- [37] „Prusa3d PC blend datasheet“, *Prusa3D* by *Josef Prusa*. https://www.prusa3d.com/file/690443/technical-data-sheet-prusament_pcbblend.pdf (vaadatud 16. mai 2023).
- [38] „Turnigy Heavy Duty 5000mAh 4S 60C Lipo Pack w/XT-90“, *Hobbyking*. https://hobbyking.com/en_us/turnigy-heavy-duty-5000mah-4s-60c-lipo-pack-w-xt-90.html (vaadatud 6. mai 2023).
- [39] S. C. Kiong, J. H. Wu, ja N. H. M. Nor, „Maximum Torque of Combinations Threat for Spur Gear Based on AGMA Standard“, *Applied Mechanics and Materials*, kd 465–466, lk 1347–1351, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.1347.
- [40] „Pololu - 19:1 Metal Gearmotor 37Dx68L mm 12V with 64 CPR Encoder (Helical Pinion)“. <https://www.pololu.com/product/4751> (vaadatud 22. oktoober 2022).
- [27] „Tehniline dokumentatsioon“, *Tartu Ülikool*. <https://sisu.ut.ee/robotont/tehniline-dokumentatsioon> (vaadatud 22. oktoober 2022).
- [28] „M3 Hex Socket Set Screw | 3D CAD Model Library | GrabCAD“, *GrabCAD*. <https://grabcad.com/library/m3-hex-socket-set-screw-2> (vaadatud 9. aprill 2023).
- [43] „Tips & Tricks for Heat-Set Inserts used in 3D printing“, *CNC Kitchen*, 1. oktoober 2021. <https://www.cnckitchen.com/blog/tipps-amp-tricks-fr-gewindeeinstze-im-3d-druck-3awey> (vaadatud 9. aprill 2023).

Lisad

Lisa 1 – Materjalide nimekiri ühe mooduli kohta

Nr	Komponendi kirjeldus	Failinimi	Kogus	Tellimisviit	Kas prinditav/ tellitav/ freesitav
1	Pololu 19:1 mootor 37Dx68L mm 12V koos 64 CPR kodeerijaga	BDSG-37-40-R150_motor [41]	2	https://www.pololu.com/product/4751/spe cs	tellitav
2	Rullisuratas 70x25mm	scooter_wheel_70mm	1	https://www.pololu.com/product/3272 kasutatud prototüübis: https://kaup24.ee/et/sport-puhkus-turism/jalgrattad-rullisurad/rullisurad/rullisurattad-nils-extreme-70x24-mm-82a-mustad?id=5890108&mid=7538983&utm_campaign=17169_EE&utm_content=cart_block&utm_medium=email&utm_source=transactional&utm_subscriber=119580977	tellitav
3	Ratta kinnitus võllile (võlli diameeter 6mm)	wheel_mount_hub2	1	https://www.pololu.com/product/2674 (komplekt)	tellitav/ prinditav
4	Ratta kinnituse vastus	wheel_mount_hub1	1		tellitav/ prinditav

5	ratta völli l=59.1mm ping-istuga	shaft_round_wc ut_6mm_for_wheel	1	https://www.alas-kuul.ee/lineaarjuhtimise-ja-koostamise-teenused	tellitav
6	vedava mootori ülekanne völli l=16.7mm ping-istuga	shaft_round_wc ut_6mm_for_motor_transmission	1	https://www.alas-kuul.ee/lineaarjuhtimise-ja-koostamise-teenused	tellitav
7	keskmiste hammasrataste ülekanne völli l=45.1mm	shaft_round_wc ut_6mm_for_midgears	1	https://www.alas-kuul.ee/lineaarjuhtimise-ja-koostamise-teenused	tellitav
8	völli ratta kõrvale koonushammasrataste ülekanne ping-istuga l=49.5mm	shaft_round_wc ut_6mm_for_bevel_wheel_transmission	1	https://www.alas-kuul.ee/lineaarjuhtimise-ja-koostamise-teenused	tellitav
9	Koonushammasratas ratta ülekanne väline 1.5M 16GT	bevel_gear_1.5 M_16GT_35570700	1	https://www.maedler.de/Article/35570700	tellitav/ prinditav
10	Koonushammasratas ratta ülekanne sisemine 1.5M 16GT	bevel_gear_1.5 M_16GT_35570700_inner	1	https://www.maedler.de/Article/35570700	tellitav/ prinditav
11	Silinderhammasratas 72T 1M alumine	spur_gear_lower _1M_72T_28307201	1	https://www.maedler.de/Article/28307201	tellitav/ prinditav
12	Silinderhammasratas 72 1M ülemine	spur_gear_upper _1M_72T_28307201	1	https://www.maedler.de/Article/28307201	tellitav/ prinditav
13	72T-de vaheline hammasratas 26T 1M	spur_gear_long hub_26T_28302601	1	https://www.maedler.de/Article/28302601	tellitav/ prinditav

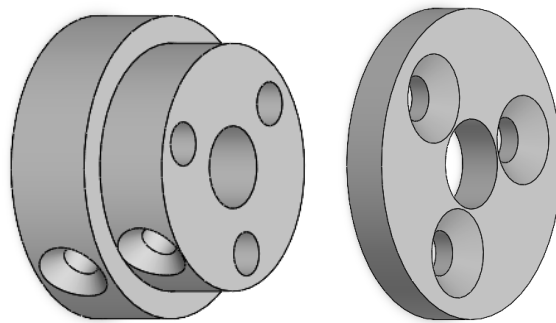
14	72T-de vaheline hammasratas 26 T 1M, topelt keskmikuga, koonushammasratas völli	spur_gear_26T_mid_double_hub_28302601	1	https://www.maedler.de/Article/28302601	tellitav/ prinditav
15	Koonushammasratas 1M 16GT pöörava mootori (1.) nurkülekanne	small_bevel_gear_1M_16GT_35550701	1	https://www.maedler.de/Article/35550701	tellitav/ prinditav
16	Koonushammasratas 1M 16GT pöörava mootori nurkülekanne, lühem	small_bevel_gear_CUT_1M_16GT_35550701	1	https://www.maedler.de/Article/35550701	tellitav/ prinditav
17	26T 1M hammasratta väline ülekanne 1. mootori (pöörav) jaoks	spur_gear_CUT_26T_28302601	1	https://www.maedler.de/Article/28302601	tellitav/ prinditav
18	Komponendi 16 ja 17 ühendatud versioon (alternatiivne printimiseks)	small_bevel_gear_1M_merged_with_spur_gear_26T_28302601_35550701	1	-	prinditav
19	Silinderhammasratas 24T 1M vedava mootori ülekanne	spur_gear_second_motor_transmission_1M_24T_28302401	1	https://www.maedler.de/Article/28302401	tellitav/ prinditav
20	Rullisurattale 70mm kuullaager sisemine D=6mm, väline D=19mm, W=6mm	ball_bearing_SK_F626	2	https://tellimiskeskus.moduator.ee/index.php?pg=1&tg=155&kg=30&aid=52789	tellitav
21	Nõellaager sisemine D=6mm, väline 10mm, W=8mm	needle_roller_bearing_6-10-8	3	https://tellimiskeskus.moduator.ee/index.php?pg=1&tg=155&kg=40&aid=67110	tellitav
22	Üherealine laager sisemine D=6mm, väline D=10mm, W=3mm	ball_bearing_68_iso_6-10-3	1	https://tellimiskeskus.moduator.ee/index.php?pg=1&tg=155&kg=30&aid=79536	tellitav
23	Rattahoidja detaili plaat	body_wheel_holder_plate	1	-	prinditav
24	Rattahoidja detaili kõrv väiksem	body_wheel_holder_ear_smaller	1	-	prinditav

25	Rattahoidja detaili kõrv suurem	body_wheel_holder_ear_bigger	1	-	prinditav
26	Kere alumine plaat	bottom_base_plate	1	-	freeditav
27	Kere ülemine plaat	upper_base_plate	1	-	freeditav
28	Vahepuks ema-ema kuuskant M3 sise kinnitus pikkus 40mm	support1_between_plates [41]	4	https://www.tme.eu/ee/details/tff-m3x40_dr113/metallpuksid/dremec/113x40/	tellitav
29	Vahepuks ema-ema kuuskant M3 sise kinnitus pikkus 18mm	support2_upper_plate [41]	3	https://www.tme.eu/ee/details/tff-m3x18_dr113/metallpuksid/dremec/113x18/	tellitav
30	M3 koonuspeaga kruvi 10mm	Bolt_m3_10mm [41]	20	https://ee.farnell.com/tr-fastenings/m3-10-m4a2mccsk-t10sf/screw-countersunk-hex-socket-m3/dp/2846508	tellitav
31	M3 koonuspeaga kruvi 12mm	Bolt_m3_12mm [25]	2	https://ee.farnell.com/tr-fastenings/m3-12-m4a2mc-s50-csk-t10/screw-countersunk-hex-socket-m3/dp/2846515	tellitav
32	M3 koonuspeaga kruvi 16mm	Bolt_m3_16mm [25]	4	https://uk.farnell.com/multicomp-pro/mp006522/screw-flat-csk-head-pozidriv-m3/dp/3666715?st=m3%20countersink%2016	tellitav
33	M3 mutter kaheksakant	M3_stopper_nut [25]	9	https://ee.farnell.com/tr-fastenings/m3-n5st-z100/nut-locking-steel-bzp-m3-pk100/dp/1420431?st=m3%20stopper%20nut	tellitav

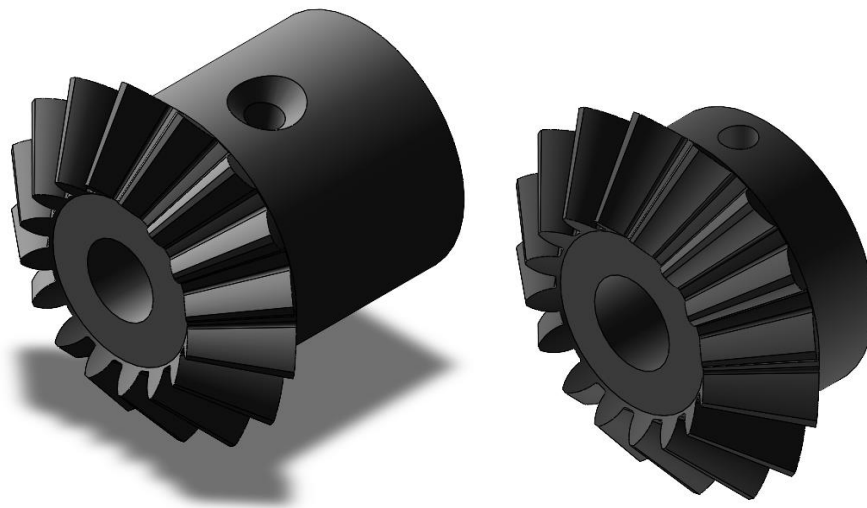
34	M3 koonuspeaga kruvi 25mm	Bolt_m3_25mm 25]	3	https://ee.farnell.com/tr-fastenings/m325krstmcz100/pozi-csk-head-machine-screw-steel/dp/2770707?st=m3%20countersink%2025	tellitav
35	seadekruvid ratta kinnitamiseks M3 6mm	M3x6.0_set_screw[42]	9	https://ee.farnell.com/tr-fastenings/m3-6-hs45pc-s100/set-screw-socket-pcp-m3x6-pk100/dp/1419732?st=m3%20set%20screw%206	tellitav
36	Pressmutrid (ing. k inserts) M3 6mm	M3_insert_Standard [43]	4	https://www.prusa3d.com/product/threaded-inserts-m3-standard-100-pcs/	tellitav
37	seadekruvid kahe puksi vahele 10mm M3	M3x10.0_set_screw[42]	2	https://ee.farnell.com/tr-fastenings/m2-10-hs45pc-s25/set-screw-socket-pcp-m2x10-pk25/dp/1419725	tellitav

Kõik hammasrattad on tellitavad, kuid siseaugu diameeter ning keskmiku mõõdud on disainis modifitseeritud.

Lisa 2 – Disainitud detailide pildid



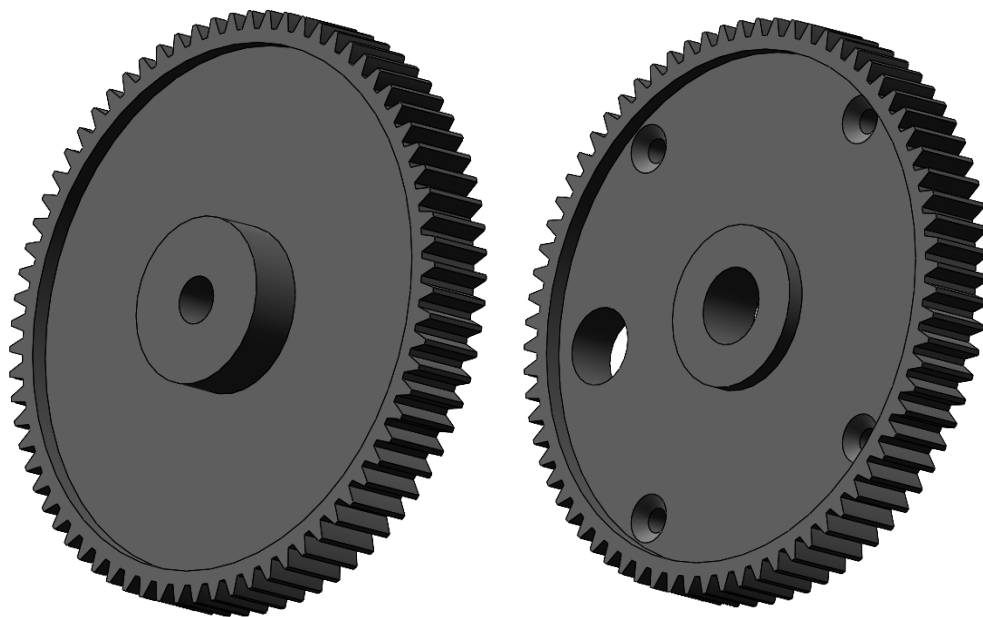
Mudelid ratta kinnitusest võllile.



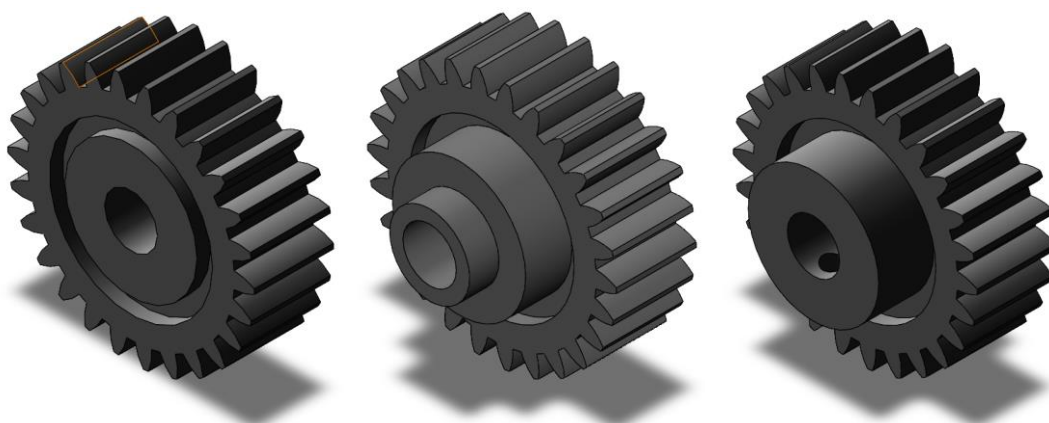
Koonushammasrataste 1.5M 16GT 16PT mudelid.



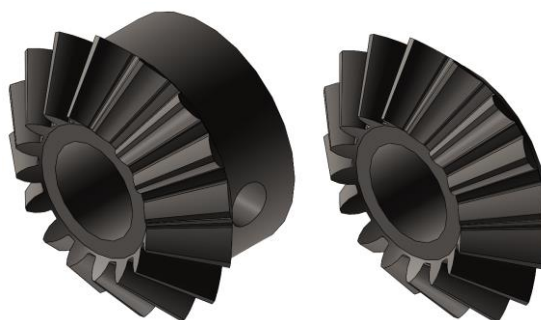
Silinderhammasratta 1M 24T mudel.



Silinderhammasrataste 1M 72T mudelid.



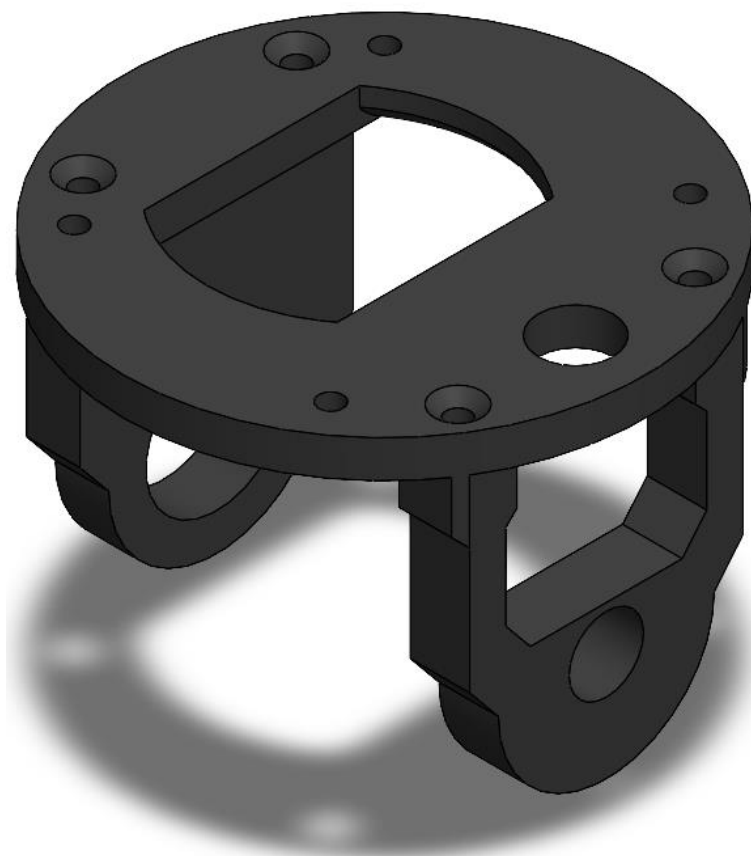
Silinderhammasrataste 1M 26T mudelid.



Koonushammasrataste 1M 16GT 16PT mudelid.



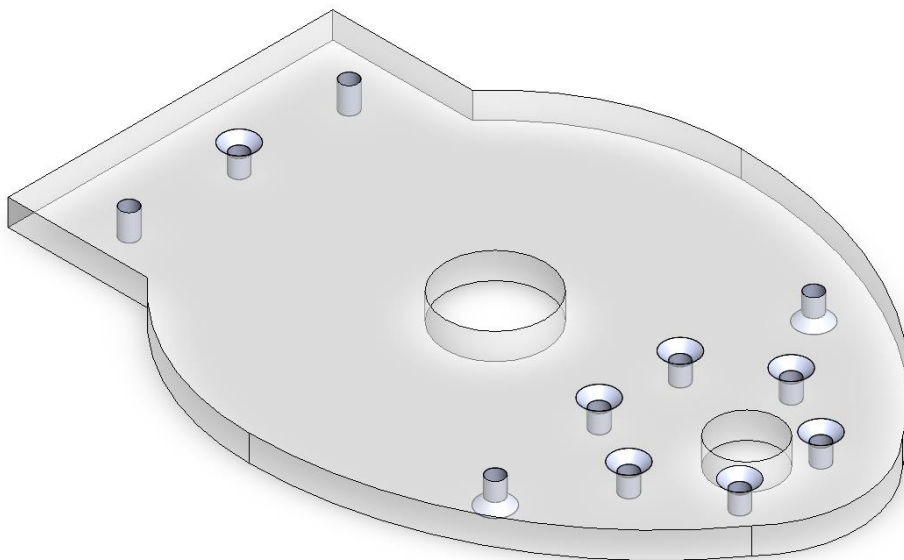
Koonushammasratas 1M 16GT 16PT ühendatuna silinderhammasrattaga 1M 26T mudel.



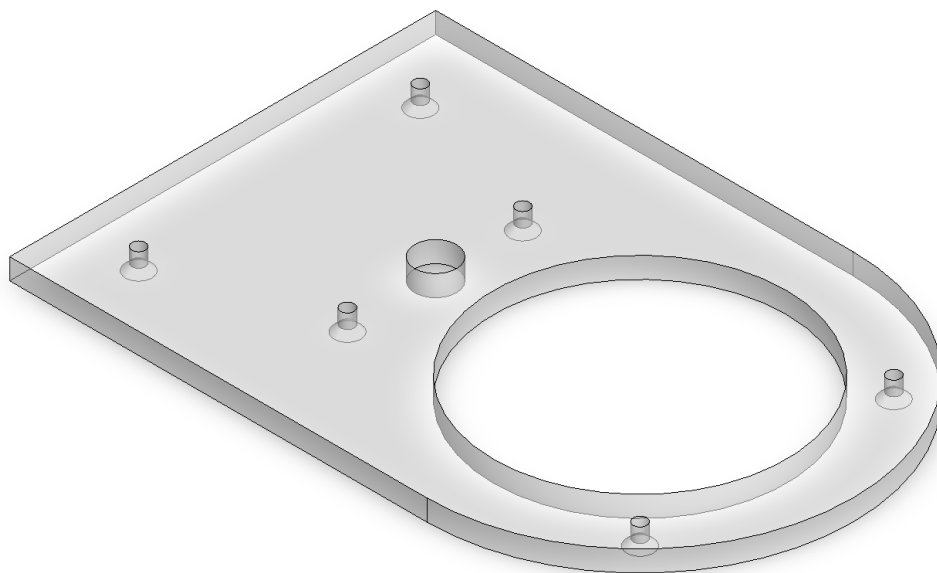
Rattahoidja keredetaili mudel.



Rattahoidja keredetailid osadeks lahutatuna mudelid.



Ülemise kereplaadi mudel.



Alumise kereplaadi mudel.

Lisa 3 – Koostamisjuhend

Koostamisjuhend kirjeldab pöördpõik ajamiga rattamooduli koostamise järjekorda. Komponentid on nummerdatud vastavalt Lisa 1 tabelile.

Alustatakse ratta osast disainis.

1. Komponent 3 kinnitatakse völli 5 kasutades kruve 35.
2. Ratas läheb komponendile 3.
3. Komponent 4 lükatakse oma kohale ning kinnitatakse kolme poldi 34 ja kolme mutriga 33.
4. Koonushammasratas 10 läheb völli 5 komponendi 3 vastu. Kinnitatakse kruviga 35.
5. Pressmutrid 36 kuumutatakse jootekolbiga 220 kraadi juures rattahoidja kõrva detailidesse 24 ja 25.
6. Nõellaager 21 läheb rattahoidja kõrva detaili 24.
7. Kuullaager 20 läheb rattahoidja kõrva detaili 25.
8. Völli 5 läheb nõellaagrisse 21, mis on juba sisestatud rattahoidja kõrva komponenti 24.
9. Rattahoidja kõrva komponent 24 kinnitatakse poltidega 30 rattahoidja plaadiga 23.
10. Völli 5 teine ots läheb kuullaagrisse 20, mis on juba sisestatud rattahoidja kõrva komponenti 25.
11. Rattahoidja kõrv 25 kinnitatakse poltidega 30 rattahoidja plaadiga 23.
12. Laager 22 läheb kere plaati 26.
13. Ühendatud hammasratas 18 (kinnitatakse kruviga 35) või eraldi hammasrattad 17 ja 16 lähevad völli 6.
14. Völli 6 teine ots läheb laagrisse 22, mis on juba sisestatud kere plaati 26.
15. Kaks nõellaagrit 21 läheb hammasratta 11 avadesse.
16. Hammasratas 11 kinnitatakse nelja poldiga 16 ja nelja mutriga 33 rattahoidja detaili plaadiga 23.
17. Ratas ja sellega ühendatud detailid pannakse läbi alumise kere plaadi 26.
18. Hammasratas 13 läheb völli 8.
19. Völli 8 pannakse läbi nõellaagri 21, mis on juba hammasrattas 11 ja koonushammasratta 9.
20. Koonushammasratas 9 kinnitatakse völli 8 kruviga 35.
21. Kuullaager 20 läheb ülemise kere plaadi 27 sisse.
22. Mootor 1 kinnitatakse kuue poldiga 30 ülemisele kereplaadile 27.

23. Mootorile 1 pannakse hammasratas 19 ja kinnitatakse kruviga 35.
24. Hammasratas 12 ja hammasratas 14 lähevad völli 7.
25. Hammasratas 14 kinnitatakse völli 7 kruviga 35.
26. Völli 7 läheb kuullaagrisse 20, mis on juba sisestatud ülemise kereplaadi 27 sisse.
27. Puksid 28 kinnitatakse alumise kereplaadi 26 külge nelja poldiga 30.
28. Kere plaadid 27 ja 26 pannakse koos detailidega kokku nii, et völli 7 läheb nõellaagrisse 21, mis on juba hammasratta 11 sees.
29. Puksid 28 kinnitatakse ülevalt mootori 1 poolt kahe poldiga 30.
30. Läbi ülemise kereplaadi 27 keeratakse puksidesse 28 kaks kruvi 37.
31. Ülemise kereplaadiga 27 ühendatakse puksid 29 kruvides kaks neist kruvidele 37 ja kinnitades keskmine alt poldiga 30.
32. Hammasratas 15 kinnitatakse roboti mootori 1 völli 7 kruviga 35.
33. Pöördpõik ajami moodul kinnitatakse Robotondi kerele alt kahe poldiga 31 ja vastuseks mutrid 33.
34. Moodul kinnitatakse üleval Robotondi kerele kolme poldiga 30 läbi Robotondi kere puksidesse 29.

Illustreeriv animatsioon koostamisest on toodud Lisa 4 välistes materjalides videona.

Lisa 4 – Välised materjalid

Kõik disaini ja tootmise failid on kättesaadavad siin: <https://github.com/robotont/robotont-mechanics-addons-swerve-drive/> (versioon v_1.0).

Kõik videofailid, pildid ja programmi failid on kättesaadavad siin: <https://github.com/ut-ims-robotics/p2rnalaas-thesis-2023-robotont-mechanics-addon-swerve-drive> (versioon v_1.0).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Pille Pärnalaas,

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

„Pöördpõik ajami arendus robotplatvormile Robotont“

mille juhendaja on Renno Raudmäe,

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

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Pille Pärnalaas,

Tartus, **20.05.2023**