



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EE40LT

Roboti UR5 haaratsi ja kaamera moodul

Development of the Gripper and Camera Module for Robot UR5

BAKALAUREUSETÖÖ

MEHATROONIKA ÕPPEKAVA

Üliõpilane: Artur Loorpuu

Üliõpilaskood: 134544MAHB

Juhendaja: Mart Tamre

Tallinn 2017

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.
Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.
Lõputöös kasutatud kõik teiste autorite tööd ja seisukohad ning materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Mart Tamre juhendamisel

“.....” 201.....

Töö autor:
/ allkiri /

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele

“.....” 201.... a.

Juhendaja:
/ allkiri /

Lubatud kaitsmisele

“.....”201... a.

..... õppekava lõputööde kaitsmiskomisjoni esimees:
/ allkiri /

TTÜ inseneriteaduskond

BSc LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

2017. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Artur Loorpuu, 134544MAHB
Õppekava: Mehhatroonika, MAHB02/13
Eriala: Mehhatroonika
Juhendaja: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi professor, Mart Tamre

LÕPUTÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Roboti UR5 haaratsi ja kaamera moodul

(inglise keeles) Development of the Gripper and Camera Module for Robot UR5

Töös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Ülesande püstitus, nõuded ja kirjeldus, olemasolevate lahenduste analüüs.	01.04.17
2.	Haaratsi projekteerimine ja juhtimine.	20.04.17
3.	Kaameramooduli projekteerimine.	01.05.17
4.	Haaratsi ja kaamera informatsioonivahetuse tarkvara väljapakkumine.	10.05.17

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

1. Projekteerida haarats
2. Projekteerida kaameramoodul
3. Välja pakkuda tarkvaralahendus haaratsi ja kaamera informatsioonivahetuseks

Töö keel: Eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt: 15.05.2017 Töö esitamise tähtaeg: 25.05.2017

Üliõpilane: Artur Loorpuu /allkiri/..... kuupäev:.....

Juhendaja: Mart Tamre /allkiri/..... kuupäev:.....

SISUKORD

EESSÕNA	6
SISSEJUHATUS	7
1. HAARATSITE OLEMASOLEVAD LAHENDUSED	9
1.1 Levinumad haaratsite tüübid	9
1.1.1 Vaakumi põhimõttel töötav pneumaatiline haarats	9
1.1.2 Ala- ning ülerõhul töötav pneumaatiline haarats.....	10
1.1.3 Hüdrauliline haarats.....	12
1.1.4 Elektrimootoriga haarats.....	13
1.2 Adaptiivsed haaratsid	15
1.3 Moodullahenduse eesmärk	18
2. HAARATSI KONSTRUKTSIOONILINE LAHENDUS	21
2.1 Haaratsi disain	21
2.1.1 Mõõtmed.....	21
2.1.2 Haaratsi tüüp ja käpad	23
2.1.3 Lõpptulemus	30
2.2 Haaratsi ühendamise robotiga ning sobiva mootori valik.....	33
2.2.1 Sobiva mootori valik	33
2.2.2 Mootori ühendamine ning juhtimine	38
2.3 Haaratsi ühenduslüli	45
3. KAAMERAMOODULI ÜLESEHITUS	48
3.1 Kaameramooduli disain.....	48
3.2 Kaablite lahendus	54
4. HAARATSI JA STEREOKAAMERA VAHELINE SUHTLUS	58
KOKKUVÕTE	62
SUMMARY	63
KASUTATUD KIRJANDUS	64
LISAD	68
Lisa 1 Mootori spetsifikatsioon	68
Lisa 2 Kaamera LI-USB30-M021 spetsifikatsioonid.....	69
Lisa 3 Jõutundliku takisti FSR 408 spetsifikatsioonid	70
Lisa 4 EOS PA12 karakteristikud.....	71
Lisa 5 C++ kood haaratsi juhtimiseks	72
Lisa 6 UR5 tehnilised spetsifikatsioonid	74

Lisa 7 UR5 kontrolleri sisendite ja väljundite spetsifikatsioonid.....	75
Lisa 8 UR5 tööriista sisendite ning väljundite spetsifikatsioonid	77
Lisa 9 Kaamera käivitamine ja õpetamine	79

EESSÕNA

Antud bakalaureusetöö teema „Universal Robots roboti UR5 haaratsi ja kaamera moodul“ on välja pakutud Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi poolt. Valmivaid mooduleid on instituudi töötajate arvates sõnul võimalik kasutada instituudi turundusliku atraktiivsuse suurendamiseks. Selleks, et hinnata töö vajalikkust on töö autor pidanud arutelusid instituudi töötajatega Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi turundusliku atraktiivsuse teemadel.

Autor soovib tänada abi eest Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituuti, selle abivalmeid töötajaid ning juhendaja professor Mart Tamret.

SISSEJUHATUS

Viimaste aastakümnete jooksul on tehnoloogia arenenud äärmiselt kiiresti ja üha enam protsesse ning tegevusi võtavad üle robotid. Tootmise automatiseerimine annab potentsiaalselt väga suuri kasumivõimalusi ettevõtete jaoks ning just sel eesmärgil on tähtis kaasas käia tehnikatrendidega, et püsida konkurentsisis. Robotite üheks peamiseks ülesandeks on objektide haaramine, olgu nendeks objektideks kas tööstuses olevad koostude osad, mis tuleb omavahel kokku panna; koostud, mis tuleb just osadeks lahti võtta või siis hoopis mõni muu väljund, miks robot peaks teatud objektist kinni haarama. Mida parem on objektiga manipuleerimist teostav haarats, seda parem on ka üldine tulemus ning esineb vähem praaki.

Robotitega on töö autor kokku puutunud Elektroenergeetika ning mehhatroonika instituudis tööd tehes. Autori peamiseks tööülesanneteks instituudis on robotite programmeerimine peamiselt ürituste jaoks, kus on tarvis näidata instituudi kaasaskäimist tehnoloogia arenguga ning tekitada huvi instituudi tegevusvaldkondade vastu. Demonstratsioonidel on tavaliselt robotid manipuleerinud erinevate objektidega. Kui hästi ja täpselt suudab robot objektidega manipuleerida, see sõltub haaratsi kvaliteedist ning ülesehitusest.

Haaratsite tööpõhimõtteid on erinevaid, need võivad töötavad kas vaakumi, pneumaatika, hüdraulika või elektrimootorite põhimõttel. Igal haaratsi tüübil on oma plussid ja miinused. Haaratsi valikul tuleks arvesse võtta ettevõtte või mõne muu asutuse vajadust, et mida robot tegema peab. Arvestada tuleb roboti tööülesande endaga, tsükli ajaga, nõutava täpsusega, keskkonna piirangute ning objektidega, millega manipuleeritakse. Haaratsid võivad oma ülesehituse poolest jaguneda veel kas jäikadeks või objekti kujule adaptiivseteks, mis võimaldab haarata hõlpsalt erineva kujuga objektide.

Käesolev mehhatroonika eriala bakalaureusetöö keskendub Universal Robots robotile UR5 adaptiivse haaratsi ning stereokaamera mooduli teoreetilise lahenduse loomisele, mida saaks vajadusel hõlpsalt valmistada TTÜ Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis olevaid võimalusi arvesse võttes. Töö eesmärk on projekteerida sobiv moodul haaratsi ning stereokaamera jaoks, välja pakkuda haaratsi juhtimispõhimõtte, arvestades stereokaameralt kaugusinformatsiooni saamise tarkvaralahendust.

Lõputöös püstitati järgmised ülesanded:

- projekteerida moodulid haaratsi ning stereokaamera jaoks, mida saab kasutada nii koos kui eraldi;
- töötada välja moodulite toite ja signaalide kaabelduste lihtne ning töökindel ühendamise viis erinevate komponentide vahel;
- välja mõelda haaratsi juhtimise elektroonika;
- pakkuda välja tarkvaralahendus haaratsi ning stereokaamera vahel informatsiooni saatmiseks;
- veenduda, et väljatöötatud lahendust oleks instituudil vajadusel võimalik hõlpsalt realiseerida.

Lahenduse väljatöötamiseks kasutatakse Solidworksi, ROSi ja MoveIT paketti.

Töö koosneb neljast peatükist, millest esimene kirjeldab hetkel maailmas olemasolevaid haaratsite lahendusi ning arutlust, miks TTÜle oleks tarvis väljatöötavat moodulilahendust. Teises peatükis kirjeldatakse haaratsi disaini ning ülesehitusega seotud tegevusi. Kolmandas peatükis kirjutatakse stereokaamera mooduli disainiga seotud üksikasjadest ning viimane neljas peatükk hõlmab endas pakutavat tarkvaralahendust stereokaamera ja haaratsi omavaheliseks suhtlemiseks.

1. HAARATSITE OLEMASOLEVAD LAHENDUSED

1.1 Levinumad haaratsite tüübid

Üldise tööpõhimõtte põhjal võib haaratsid jagada neljaks: ainult alarõhu ehk vaakumi põhimõttel, ala- ja ülerõhu põhimõttel, hüdraulilised ning elektrimootoriga. Igaühel neist on oma eripärad, mille põhjal ettevõtte võtab vastu otsuse, milline haarats teatud tööülesandeks parim on. Järgnevalt tutvustatakse lähemalt erinevaid haaratsite tüüpe.

1.1.1 Vaakumi põhimõttel töötav pneumaatiline haarats

Vaakumhaarats on tööstuses laialt kasutuses tänu oma paindlikkusele ning suurele töömahule. Seda tüüpi haarats kasutab peamiselt kummist imiotsikut, et objektidega manipuleerida. Vaakumhaarats töötab hästi ühtlase, sileda ning puhta pinna puhul. Seda tüüpi haarats ei sobi töötamiseks auklike pindadega.

Tüüpiliselt on vaakumhaaratsite imiotsikud ümara kujuga ning on valmistatud kummist, muudest elastsetest materjalidest või pehmest plastist. Võib ka ette tulla, et imiotsik on valmistatud tugevast materjalist, et töötada just pehmete objektidega. Imiotsikus tekitatakse vaakum vastava vaakumpumba abil.

Vaakumhaaratsid võib jagada veel omakorda väiksemateks rühmadeks: ümarliigendiga, tasandi kompensatoriga ning tavalisteks. Ümarliigendiga vaakumhaarats on võimeline end automaatselt kohandama erineva kontaktnurga järgi. Neid kasutatakse peamiselt ebäühtlaste ning raskete objektide tõstmiseks. Tasandi kompensatoriga (sele 1.1) vaakumhaarats tuleb kasuks ebäühtlaste tasanditega objektide manipuleerimisel. Lisaks seda tüüpi haarats võimaldab summutada lööke haaratsile. [1]



Sele 1.1 Tasandi kompensatoriga vaakumhaarats [2]

Vaakumhaaratseid kasutatakse tihedalt näiteks auto- ja mööblitööstuses ning tootmisliinidel, kus on suured tootmismahud. Lisaks on vaakumhaaratsid kasutusel igasuguste protsesside juures, kus tuleb objekte tõsta erinevate punktide vahel ning tegeletakse peamiselt pakendamisega.

Plussid:

- Soodne hind
- Eri tüüpi tooteid saab korjata sama otsaga
- Töötab hästi ka väiksemate positsioneerimisvigade korral

Miinused:

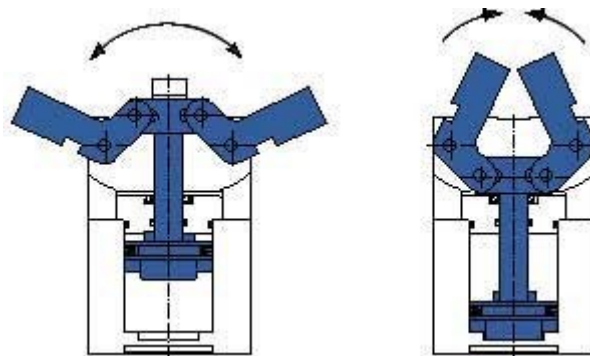
- Tundlik keskkonnale (kui esineb tolm ning muu mustus)
- Suruõhu või vaakumpumba vajadus
- Pinnatekstuur mõjutab töötulemusi

1.1.2 Ala- ning ülerõhul töötav pneumaatiline haarats

Pneumaatilised haaratsid on populaarsed tänu oma kompaktsusele ning väiksele kaalule. Tänu oma kompaktsusele saab neid kasutada kitsastes tingimustes, mistõttu on seda tüüpi haaratsid levinud tootmises, kus iga ruutmeeter on tähtis. Pneumaatilisi haaratseid saab kas

avada või sulgeda, sõltuvalt õhu suunast. Seda tüüpi haaratsid on saanud hüüdnime „*bang bang gripper*“, kuna kui metallist haarats töötab metallist objektiga kõlab vali heli.

Kaks tihedamalt kasutatavat pneumaatilist haaratsit on kahe paralleelse käpa või kahe nurkliikumisega käpaga haaratsid (sele 1.2). Paralleelsete käppadega haarats on tööstuses enimlevinud tänu oma lihtsusele ning töökindlusele. Nurkliikuvate käppadega haarats liigutab oma käppasid radiaalselt objektile lähemale või siis kaugemale, tänu sellele on seda tüüpi haaratsil tarvis rohkem tööruumi. [3]



Sele 1.2 Nurkliikumisega käpad [4]

Pneumaatiliste haaratsite poolt arendatav haaramise jõud sõltub haaratsit toitvast õhurõhust. Kui tõsta õhurõhku 20%, siis tõuseb ka haaratsi jõud 20%. Tänu sellele on võimalik reguleerida haaramistugevust vastavalt vajadusele.

Pneumaatiliste haaratsitega saab tõsta nii väikeseid objekte, näiteks transistor, kui ka suuri objekte nagu auto mootoriplokk. Pneumaatilisi haaratseid kasutatakse peamiselt objekti orientatsiooni muutmiseks või *pick-and-place* tüüpi operatsioonide läbiviimiseks.



Sele 1.3 Pneumaatiline haarats [5]

Plussid:

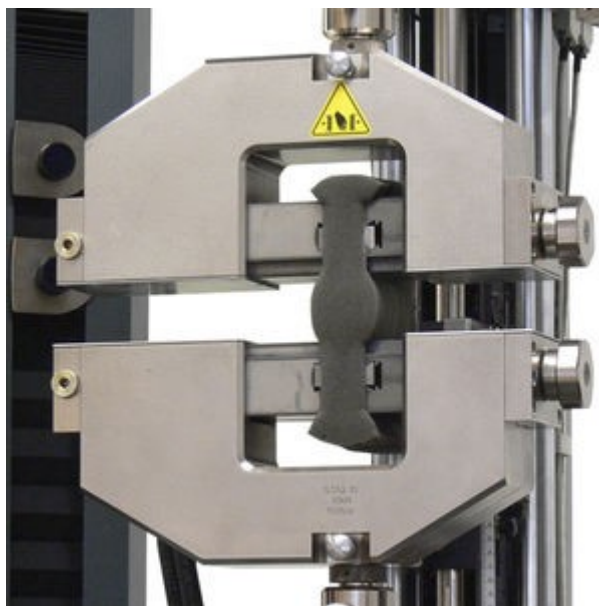
- Soodne hind
- Lihtne üles seada ning kasutada
- Käppasid on võimalik hõlpsalt vastavalt vajadusele vahetada
- Haardejõudu saab reguleerida rõhuregulaatoriga

Miinused:

- Suruõhu vajadus
- Eri objektide jaoks on vaja eri käppasid
- Haaratsi kiirust ning täpsust on raske kontrollida

1.1.3 Hüdrauliline haarats

Hüdrauliline haarats (sele 1.4) leiab kasutust sellistes valdkondades, kus on tarvis rakendada suurel hulgal jõudu. Seda tüüpi haaratsites genereeritakse jõud hüdraulilistes pumpades, mis võimaldavad rõhkusid kuni 2000 psi. Hüdraulilised haaratsid töötavad spetsiaalse õliga, mis võib tekitada märdumist. Lisaks on seda tüüpi haaratsi ülalpidamiskulu kõrgem, kuna haarats võib kergemini laguneda tänu rakendatavatele kõrgetele jõududele. [6]



Sele 1.4 Hüdrauliline haarats [7]

Kolm levinumat tüüpi on paralleelsete käppadega, kolmekäpalised ning nurga all olevad käpad. Enimlevinud on kahe paralleelse käpaga haarats. Kolmekäpalised haaratsid hoiavad objekti käppade keskel ning käpad on omavahel 120-kraadise nihke all. Leidub ka haaratsi tüüpe, kus käpad on näiteks 30-, 40-kraadiste jne nurkade all.

Plussid:

- Suured jõud
- Suured kiirused
- Mehaaniline lihtsus

Miinused:

- Võtavad palju ruumi
- Kõrgem ülalpidamiskulu
- Hüdraulilise õli ja pumpade tarvidus

1.1.4 Elektrimootoriga haarats

Elektrimootoriga haaratseid (sele 1.5) võib üha enam näha tööstuslikes keskkondades tänu oma headele juhtimisomadustele. Elektrimootorid kontrollivad haaratsi käppade täpset liikumist. Seda tüüpi haaratsid on paindlikud ning sobivad eri tüüpi materjalidega ümberkäimiseks. Lisaks on nad hinnasõbralikud, kuna nad ei vaja tööks spetsiaalset suruõhku ega hüdraulilist õli ning ei tekita määrdumist. Seda tüüpi haaratsite liikumist kontrollitakse kontrollierist saadava elektrilise sisendi abil.



Sele 1.5 Elektriline haarats [8]

Elektrimootoriga haaratseid võib ehitada samamoodi mitut tüüpi. Käppasid võib paigutada paralleelselt või nurga alla; käppade arv võib olla kaks, kolm või enam.

Elektrilise haaratsi kasuks räägib mitu omadust. Esiteks on võimalik kontrollida haaratsi käppade positsiooni, mistõttu on võimalik haarata näiteks poole käpa haardeulatuse pealt. Vastukaaluks tuleb pneumaatiliste ning hüdrauliliste haaratsite puhul teha läbi kogu käpa liikumistsükkel, kus haarats on kas täielikult kinnises või lahtises asendis. Elektriliste haaratsite puhul on võimalik kasutada täpset käppade positsiooni, et objekt mahuks käppade vahele. Sedamoodi „pooliku“ haaratsi lahti-kinni töotsükli kasutamine aitab võita tööajas. Järgnevas on võimalik enkooderite abil välja selgitada, kas haarats on objektist kinni haaranud või mitte ning vastav info saadetakse tagasi kontrollerrisse. Tänu sellele on lihtsam teha veatuvastust tootmistsükliks. Elektriliste haaratsitega on võimalik reguleerida haaramisjõudu ning –kiirust. Seda tehakse voolutugevuse seadistamise abil. Elektrilistel haaratsitel puudub vajadus spetsiaalse suruõhu ning hüdraulilise õli järele, mistõttu on tootmise kulud väiksemad. Tegu on puhta haaratsiga, mida saab kasutada keskkonnatundlike objektide puhul. [9]

Plussid:

- Kõrge täpsus
- Vähene ruuminõudlikus
- Madal hind
- Kerge hooldada

Miinused:

- Haaratsi keerulisem ülesehitus

1.2 Adaptiivsed haaratsid

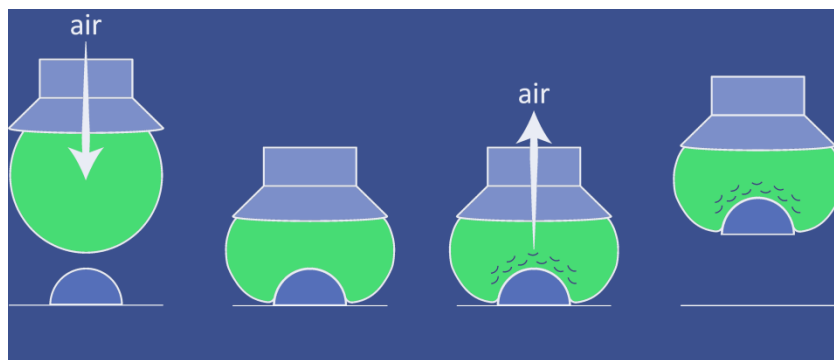
Robohaaratsite arendamine lähtub nõuetest, mida esitavad tööstuse robustsus ning majanduslik kasu, lisaks veel suurenev nõudlus paindlikkuse ning funktsionaalse integratsiooni järele. Arendustöö, mis suudab rahuldada esitatud eesmärke, võib avada uusi turuvõimalusi automatiseeritud tööstuse vallas. [10]

Teadustöö kuidas automatiseerida suurt osa koosteprotsessist, mis enamasti tehakse käsitsi inimeste poolt, esitab väljakutse, mis on teistsugune konventsionaalsete haaratsite võimekusest. Konventsionaalsed haaratsid on disainitud manipuleerima ühe või sarnase objektiga korduvalt. Manuaalne väikeste objektide koosteprotsess inimkätega on aga hoopis teistsugune. Selle jälgendamiseks on vaja paindlikku ning multifunktsionaalset haaratsit. [10]

Adaptiivse haaramise all mõeldakse olukorda, kus haaratav objekt ei ole eelplaneeritud või eelprogrammeeritud positsioonil, mistõttu kontrollsüsteem peab ise aru saama, kust, kui lähedalt ning kui tugevalt haarata. Selline olukord on sarnane iga situatsiooniga, kus objekt ei ole täpselt nõutud positsioonil ning teada orientatsiooniga. Adaptiivne haaramine on veel tähtsam protsessides, kus haaratavad objektid ei ole alati sarnase kujuga. Üks selline näide oleks merepüügi tehased, kus kalad on erineva suuruse, kuju ning kaaluga. Lisaks võib ette tulla, et haaratavad objektid on pehmed ning seetõttu võivad katki minna, väänduda või muul moel deformeeruda. See muudab automaatsetel masinatel selliste objektidega manipuleerimise raskeks ning seetõttu tuleb sellistes protsessides kasutada manuaalset tööjõudu. Adaptiivse haaramise tehnoloogia fookus on objektide haaramisel, mis on teadmatu positsiooni, kuju, orientatsiooni või pehmusega. Objektide õrnus nõuab, et adaptiivne haarats kasutab haaramisel minimaalset vajaminevat jõudu. [11]

Sel põhjusel ongi pandud suurt rõhku keerukamate ning võimekamate haaratsite arendustöösse, mis võimaldaks lähemalt jälgendada inimkäte liikuvust ning paindlikkust. Lisaks arendatakse veel teistsuguse lähenemisega haaratseid, mis kasutavad objektidega manipuleerimiseks hoopis teistsuguseid meetodeid eelpool tutvustatud neljast.

Kraanul passiivne-adaptiivne haarats (sele 1.6) aitab efektiivselt objekti haarata, välja jättes süsteemi keerukuse masinnägemise vallas. Sedasorti lähenemine asendab eraldiseisvad „sõrmed“ materjalikoguga, mis kokkupuutel mässib end objekti ümber. Selline haarats on universaalne, kuna ta on paindlik sõltumata objekti kuju keerukusest ning haaratsi kuju muutumine leiab aset ilma abistava sensorika tagasisideta. Selline passiivne protsess vähendab kontrollitavate elementide arvu ning tänu sellele on antud süsteem usaldusväärsem, odavam ning kiirem. [12]



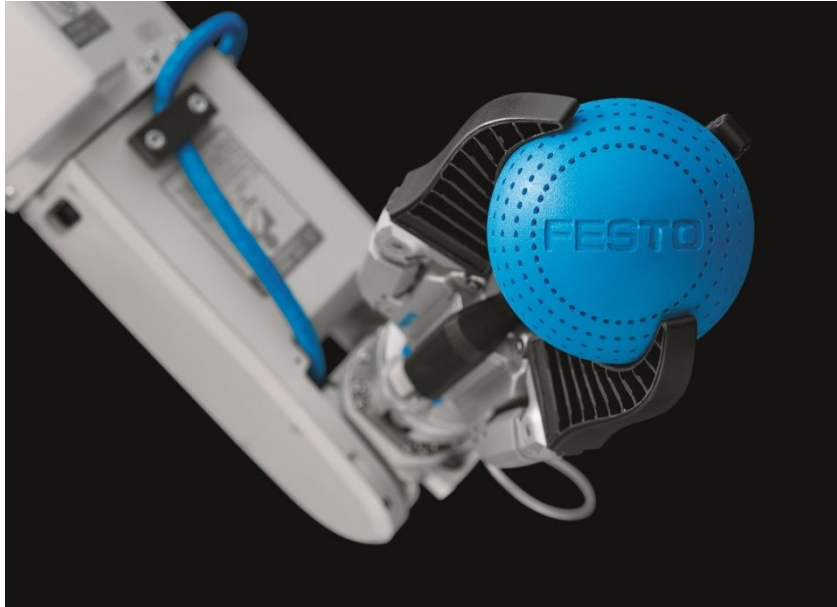
Sele 1.6 Kraanul passiivne-adaptiivne haarats koos tööpõhimõttega [13]

Laiemalt on hakanud levima robothaaratsid, mis jäljendavad inimeste sõrmede tööd (sele 1.7). Nimelt on haaratsi käpad liigendatud, et haaramisel eraldi liigendid seoks end paremini objekti ümber, mistõttu suureneks haaramise kvaliteet ning oleks võimalik haarata hõlpsalt eri kujuga objekte. Sarnase põhimõttega haaratseid on üha enam hakatud kasutama tööstuses ning üllatavalt üritatakse neid integreerida ka inimeste argielus, näiteks toidupoodides. [14]



Sele 1.7 Liigendatud käppadega robothaarats [15]

Üheks adaptiivse haaratsi läbimurdeks viimasel ajal on olnud Festo arendatud *finray* tehnoloogia (sele 1.8), mille disain sai inspiratsiooni kala uimest. Tegemist on haaratsi käppadega, mis on valmistatud õhukesest kihist painduvatest plastidest, mis tagab haaratsile kuni 90% kergema kaalu võrreldes tüüpiliste metallkäppadega haaratsitega. Kuna plastid on kokku liidetud kihiti, siis on haarats tugev ning seeläbi töökindel, kaotamata paindlikkuses. Seda tüüpi haarats koosneb tüüpiliselt kas kahest või kolmest käpast, mis siis moodustavad omavahel kolmnurga. Objektiga kokkupuutel hakkavad käpad rõhu mõjul objekti kujule adapteeruma, mässides end objekti ümber nagu seda teeb ka inimkäsi. [16]



Sele 1.8 Festo *finray* põhimõttel töötav haarats [17]

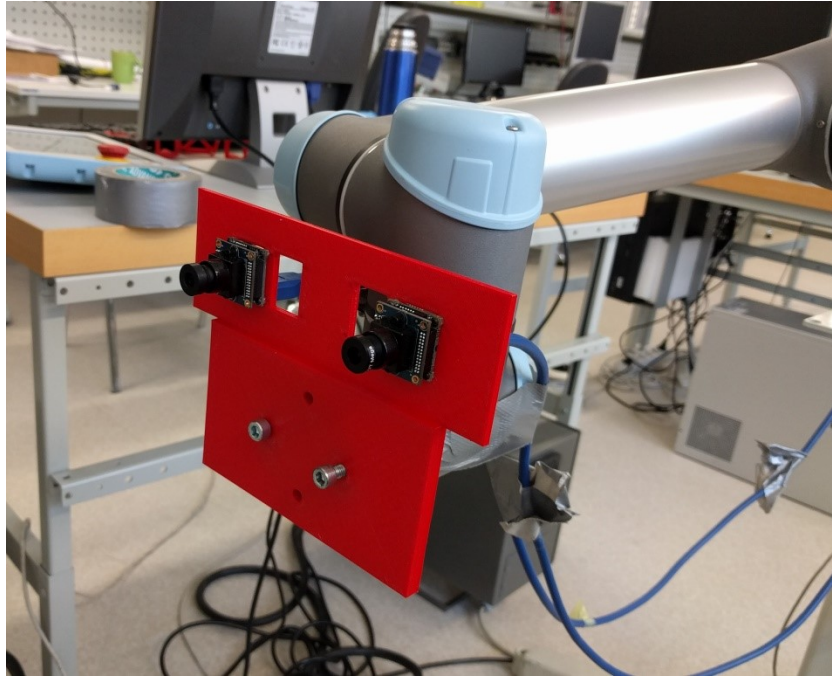
1.3 Moodullahenduse eesmärk

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis on kasutusel ning eksponeerimiseks erinevaid roboteid alustades FESTO Robotinoga ning lõpetades ABB uue generatsiooni robotiga YuMi. Robotite hulka kuulub veel Universal Robotsi robot UR5 (sele 1.9). UR5 puhul on tegemist paindliku, kerge ning koostööl põhineva robotiga, mis võimaldab automatiseerida korduvaid protsesse ning manipuleerida objektidega, mille kaal ei ületa viit kilogrammi. Peamiselt on tegu *pick-and-place* tüüpi robotiga. Robotile arendatav haarats ning kaameramoodul aitaksid tõsta instituudi turunduslikku väärtust, kuna tudengite poolt arendatud lahendused näitavad, et instituut toetab üliõpilaste ideid ning võimaldab neid ka ellu viia. Tänu sellele on instituut atraktiivsem suuremale hulgale potentsiaalsetele tudengitele ja teistele küllastajatele.



Sele 1.9 Universal Roboti UR5 [18]

Samale robotile on magistrant Lei Shi arendanud täiesti töökorras stereokaamera (sele 1.10). Siiski on tegemist väga õrna konstruktsiooniga, mis vajab arendustööd, et vältida stereokaamera purunemist. Seelt 1.10 on näha, et stereokaameraga ühendatud micro USB pordid pole kuigi turvaliselt kinnitatud, mistõttu roboti varel liikumisel võivad need lihtsalt ära murduda. Arvestades, et kaamerate maksumus on suhteliselt kõrge, tuleb disainida kaameratele tugev korpus, mis kaitseks neid löökide ning muude potentsiaalsete ohtude eest. Lisaks tuleb välja mõelda lihtne, kuid töökindel kinnitusmehhanism, mille abil oleks võimalik kaameramoodulit kergelt ning kiirelt robotiga ühendada ning vajadusel lahti võtta.



Sele 1.10 Stereokaamera LI-USB30-M021

Töö autoril on soov arendada robotile UR5 ka adaptiivne haarats, et näidata roboti potentsiaali. Arendatav haarats oleks efektiivne väiksemate objektide haaramisel, mis kaaluvad kuni paarsada grammi ning ei oma väga suurt ruumala. Võttes arvesse, et instituudil on olemas samale robotile mõeldud täielikult töökorras stereokaamera, siis on plaan haarats kaameraga ühildada, et roboti efektiivsust tõsta. Moodullahenduse arendus on esialgu teoreetiline, kuid töö autor püüab leida piisavalt lihtsa lahenduse, et haaratsit oleks vajadusel kiiresti ning hõlpsalt võimalik valmis ehitada.

2. HAARATSI KONSTRUKTSIOONILINE LAHENDUS

2.1 Haaratsi disain

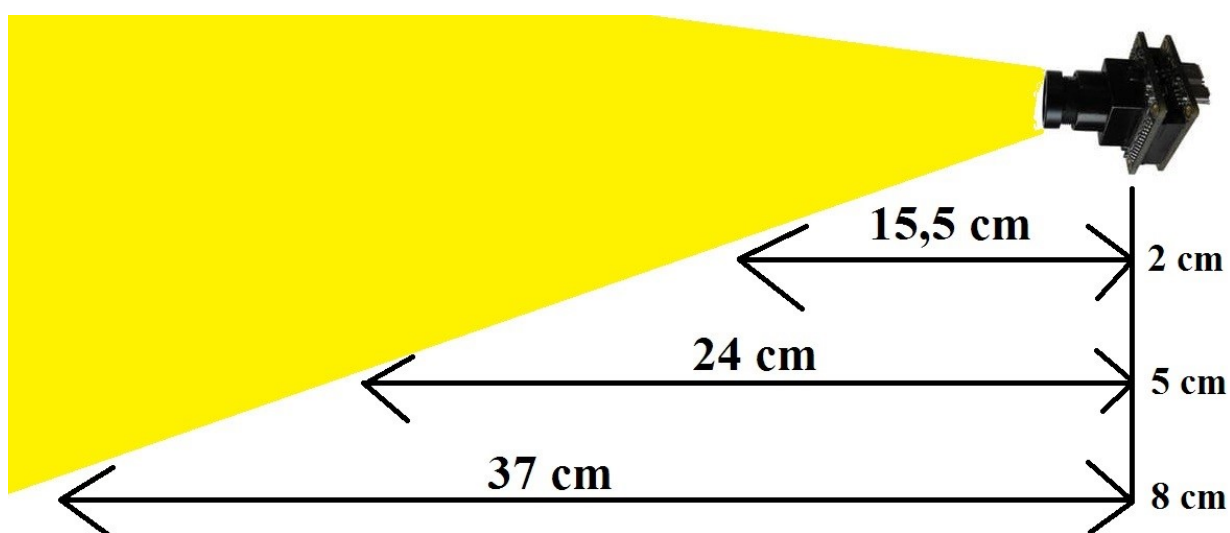
Haaratsi disainimisel tuli arvesse võtta järgnevaid asjaolusid. Esiteks pidi haarats olema õigete mõõtmetega, et ta kaamera visuaalset töövälja ei segaks. Lisaks pidi haarats olema võimeline hõlpsalt haarama erineva kujuga kuni mõnesajagrammilisi objekte. Haarats on kujundatud haarama objekte, mis ei ole laiemad kui 26 sentimeetrit. Lõpetuseks pidi haarats olema esteetiline ning piisavalt lihtsalt valmistatav.

2.1.1 Mõõtmed

Haaratsi mõõtmed tuli valida selliselt, et need sobiksid UR5 „peaga“ ning et nad ei segaks stereokaamera LI-USB30-M021 (selel 1.10) visuaalset töövälja. Stereokaamera visuaalse töövälja selgitamiseks tehti vajalikud mõõtmised koos magistrandiga, kes töötab stereokaamera projektiga. Mõõdeti kui kaugelt satub objekt kaamera vaatevälja.

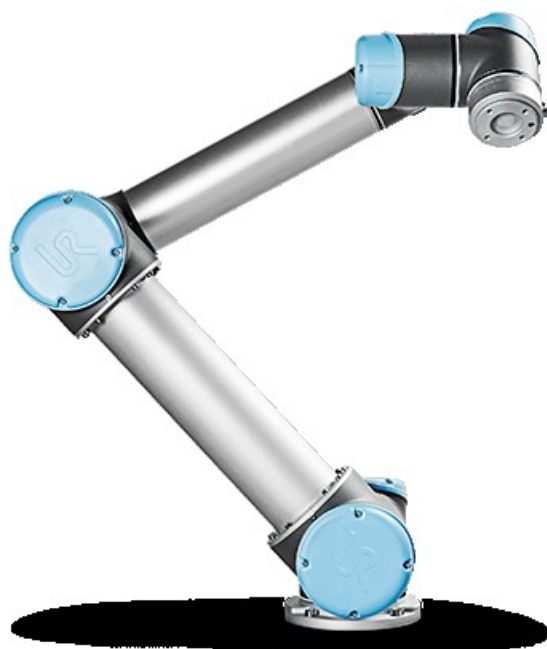
Kaamera vaatevälja mõõtmistulemused:

- 2 cm kaamerast allpool – 15,5 cm.
- 5 cm kaamerast allpool – 24 cm
- 8 cm kaamerast allpool – 37 cm

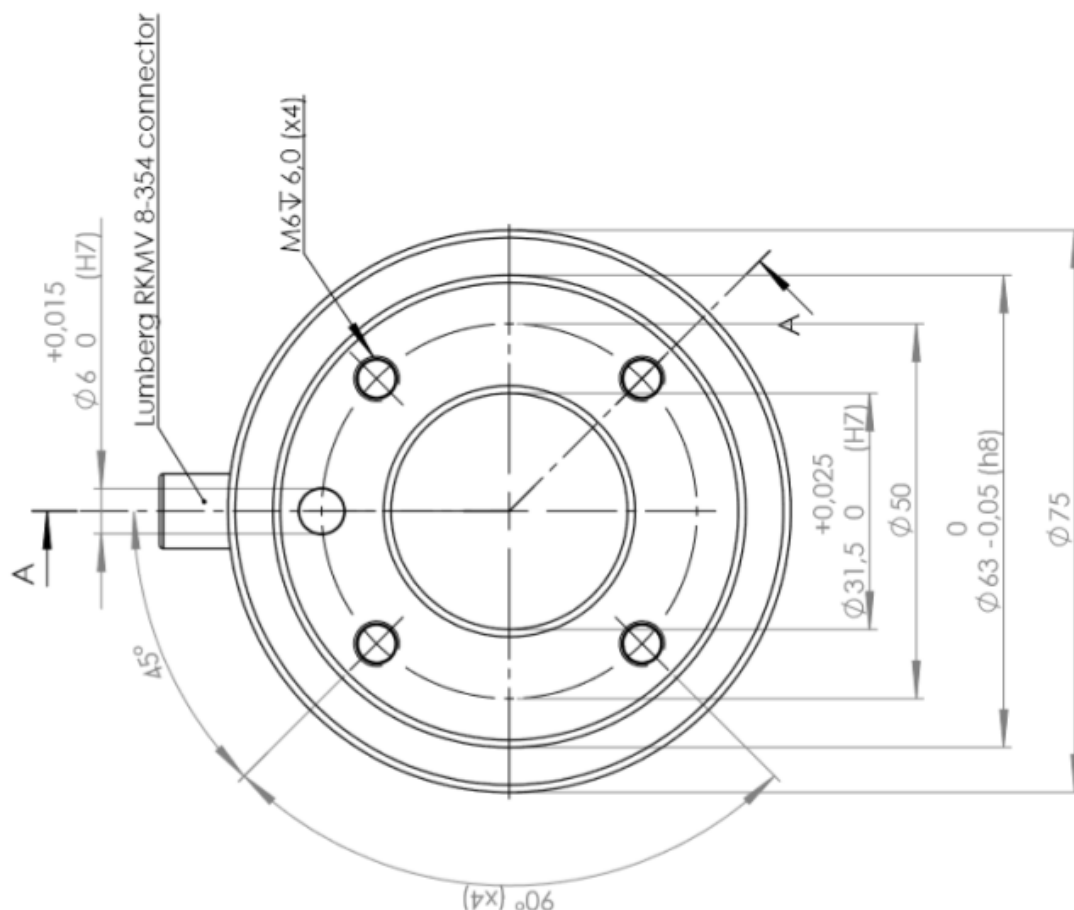


Sele 2.1 Stereokaamera LI-USB30-M021 vaatevälja mõõtetulemused

Teine tähtis element, millega tuli haaratsi gabariitide valimisel arvestada, oli UR5 „pea“ mõõtmed. Seda sellepärast, et kui disainida haarats, mis peab olema ka esteetiline, siis peab see visuaalselt sobima ka robotiga, mille külge ta mõeldud on. Seega ei saa disainida suuremõõtmelist haaratsit, mis ei ühti oma mõõtmetelt roboti omadega.



Sele 2.2 UR5, kus on näha „pea“ kujundust [19]



Sele 2.3 UR5 „pea“ mõõtmed millimeetrites [20]

Selelt 2.3 on näha, et haaratsi baasi kuju võiks kindlasti olla ümar nagu on ka UR5 „pea“. Selelt 2.3 on nähtav, et kõige paremini sobib haaratsi baasi diameetriks 63 mm, mis ühtib robotiga UR5 ning näeks ilus välja. Lisaks on sel tasandil veel 4 kinnitusauku, mille abil siis moodul robotiga ühendada. Neid parameetreid võeti arvesse haaratsi disainimisel.

2.1.2 Haaratsi tüüp ja käpad

Haaratsi tüübi valimisel on tähtis lähtuda vajadusest ning nõuetest, millele robot peab vastama. Esimeses peatükis anti ülevaade levinumatest haaratsi tüüpidest ning nende plussidest miinustest. Neid samu plusse-miinuseid ning haaratsi tüübiga seonduvaid eripärasid on tarvis teada haaratsi valmistamisel. Tuleb lähtuda ka instituudi nõuetest haaratsile.

Instituudi nõuded haaratsile:

- Esteetiline,
- tõstab erineva kujuga objekte,
- suudab tõsta objekte, mis kaaluvad mõnisada grammi,
- kiiresti ning kergelt robotiga ühendatav,
- piisavalt lihtne valmistada.

Haaratsi ülesehituse poolest on tähtis teada, missugusel toitel haarats töötama hakkab, kas on tarvis selle jaoks suruõhku, hüdraulilist õli või hoopis midagi muud. Võttes arvesse olukorda, kus instituut kasutab robotit UR5 tihti külustustel eksponaadina, siis oleks hea kui haarats ei oleks sõltuv lisavajadustest. Kui robotit tahta kasutada raamatukogus nagu seda tehti näiteks teadlaste õöl, siis seal ei ole võimalik kasutada suruõhku. Seega kõige kindlam on kasutada elektrilist lahendust, kuna elektritoide on igal pool kättesaadav.

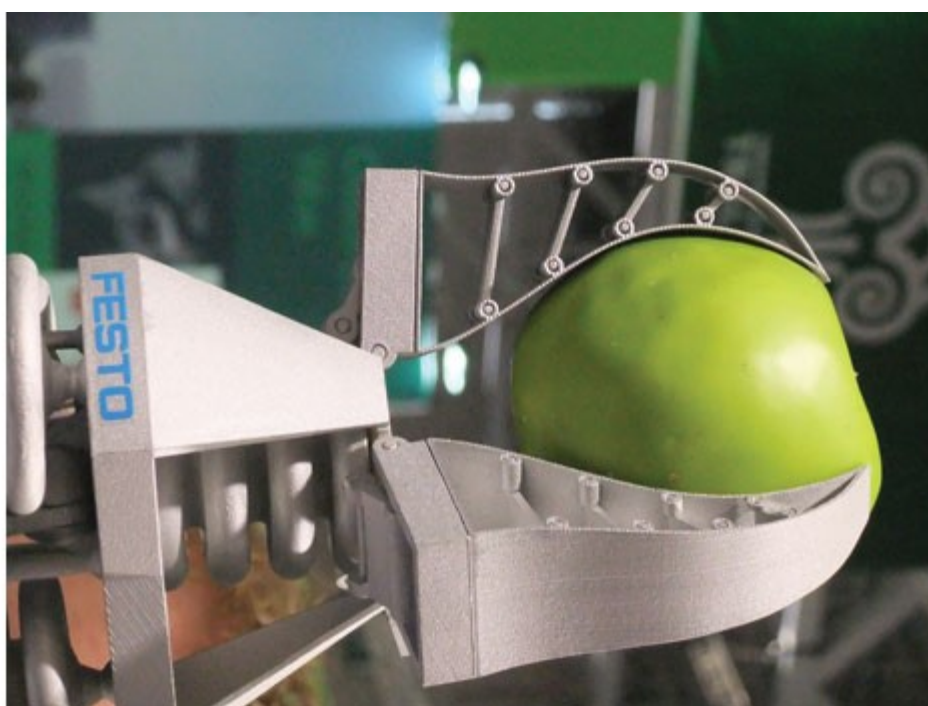
Instituut soovib, et haarats peab olema võimeline tõstma erineva kujuga objekte, mis kaaluvad maksimaalselt mõnisada grammi. Seega pole mõtet kasutada hüdraulilist haaratsit, mis on mõeldud rasketööstuses suurte ja raskete objektide tõstmiseks. Vaakumi ning pneumaatika peal töötavad haaratsid nõuavad lisavahendeid õhu näol. Elektrilise haaratsi puhul on võimalik mängida haardetugevusega vastava mootori valikul ning puuduvad lisavajadused, mistõttu on nõuetest lähtuvalt parim kandidaat elektriline haarats.

Haaratsi käppade valikul tuleb arvestada, et haarats peab suutma haarata erineva kujuga objektidest. Tänu sellele nõudele ei ole mõttekas kasutada paralleelseid käppasid, mis ei suuda kohanduda objekti kujuga. Sellise olukorra lahendamiseks on parim variant kasutada adaptiivseid käppasid, mis kohanduvad vastavalt haaratava objekti kujule. Esimeses peatükis räägiti, et adaptiivseid käppasid on kasutusel mitmeid, nende hulgast tuleb välja valida parim lahendus, mis antud nõuetega kõige paremini sobiks. Kuna vaakumit ega suruõhku ei kasutata, siis ei saa kasutada graanulpõhimõttel töötavat adaptiivset haaratsit, mis nõuab töötamiseks vaakumit. Järele jääb liigendatud käppade kasutamise võimalus või hoopis kasutada Festo arendatud *finray* tehnoloogiat.

Liigendatud käppadega haaratsid pakuvad piisavalt paindlikkust, et haarata erineva kujuga objekte. Samas on selliste haaratsite ise valmistamine kallis ning töömahukas, kui on soov

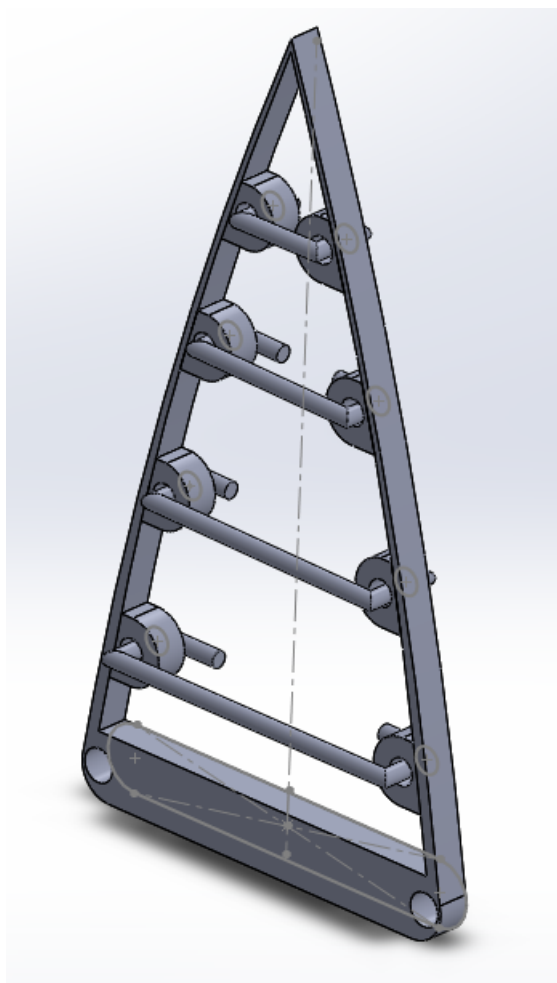
tagada nende efektiivne töö. Lähteülesande nõue aga oli, et haaratsit peaks olema võimalik valmistada piisavalt hõlpsalt.

Festo *finray* tehnoloogia pakub head paindlikkust ning seda ei ole raske valmistada, kui on olemas 3D printer nagu TTÜs. *Finray* tehnoloogia kasuks räägib haaratsi võime end objekti kujuga täielikult kohandada tänu painduvale konstruktsioonile. Selline kohandumine välistab ka objekti lõhkumise, kuna jõud mõjuvad ühtlaselt kogu haaratsi ulatuses. Tänu nendele omadustele otsustati kasutada haaratsi disainimisel just Festo *finray* tehnoloogial põhinevaid käppasid, mida võib näha seel 2.4. [16]



Sele 2.4 Festo *finray* tehnoloogial põhinev haarats [21]

Samal printsiibil töötava haaratsi valmistamiseks tuli esmalt sarnasest lahendusest teha CAD joonis (sele 2.5). CAD joonise tegemisel võeti eeskujuna Festo enda tehtud haaratsite piltidest ning GrabCADist allatõmmatud sarnastest mudelitest. Viimast tehti põhjusel, et kui isetehtud disain on sarnane juba varasemate lahendustega, mis on reaalselt 3D prinditud ning veendunud, et need töötavad, siis võib kindel olla, et ka enda valmistatud disain töötab nii nagu peab. Otse GrabCADist allatõmmatud mudeleid ei saanud kasutada sellepärast, et need ei olnud täpselt õigete mõõtudega ning olid stl-failivormingus, mida ei ole võimalik üle kanda SolidWorksi, et nendega edaspidi efektiivselt tööd teha.



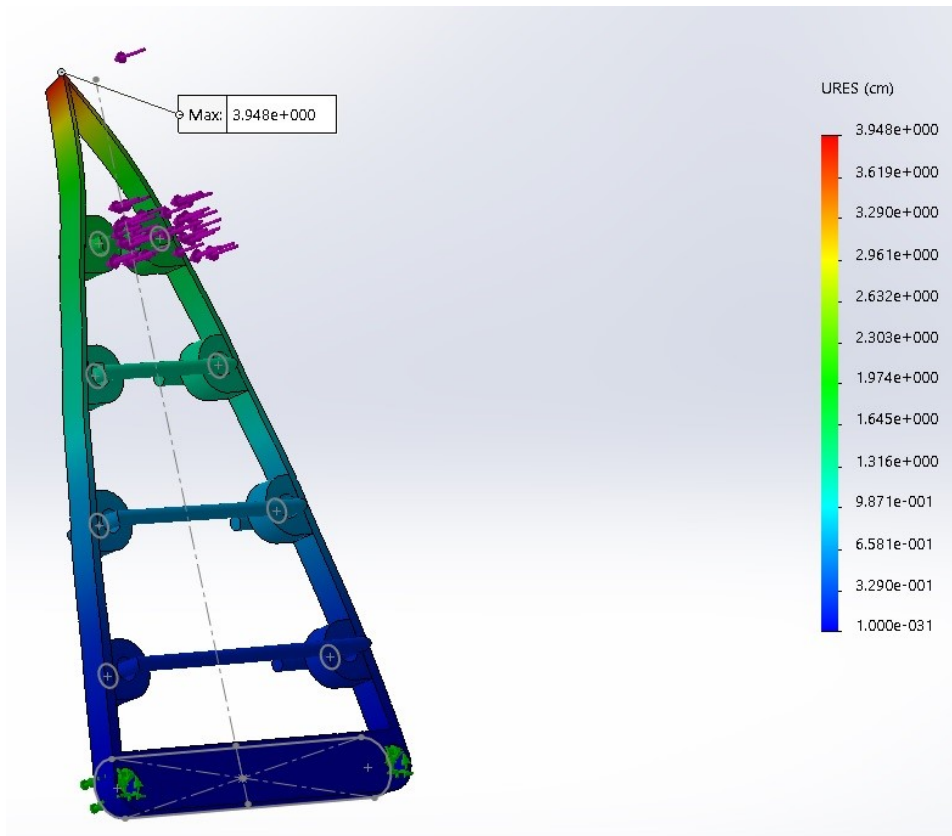
Sele 2.5 CAD joonis *finray* haaratsiotsast

CAD jooniselt võib mõõta, et antud käpa pikkuseks on 123 mm ning laiuks on 65 mm. Tegemist ei ole ülemäära suure haaratsiga, vaid täpselt vajaliku suurusega, et manipuleerida keskmise suurusega objektidega. Seel 2.6 võib näha, et konstruktsioon koosneb raamist ning raami ühendavatest lülidest. Raami ühendavate liikuvate lülide mõte on tagada olukord, kus haarats kohandab ennast vastavalt objektile. Raami seinad on piisavalt õhukesed, et tagada paindlikkus, kuid samas tugevast EOS PA12 materjalist, et tagada käpa vastupidavus. Ühenduslülid ja raam on valmistatud samast materjalist.



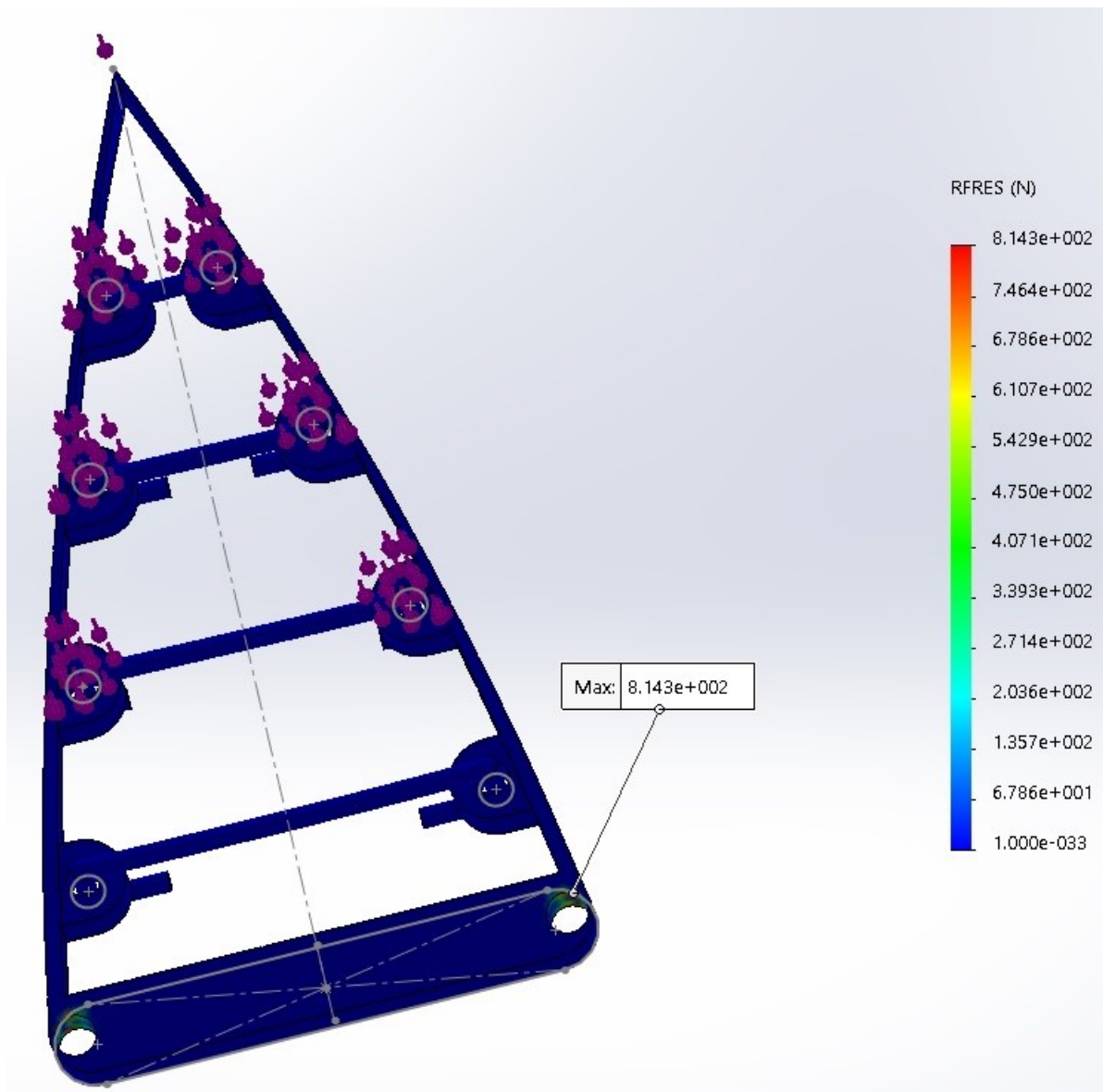
Sele 2.6 Fingripperi renderdus

Tähtis on teada kui suuri jõudusid antud käpp suudab taluda. Kõige nõrgem on käpp surve vastu, mis tuleb tema pealispinnaga risti. Selle jaoks tehti SolidWorks'is simulatsioon, et teada saada detaili deformatsiooni teatud jõudude juures. Seel 2.7 on näha, et jõudude mõjul on käpp saanud deformeeruda. Nimelt on rakendatud käpa otsa jõud suurusega 200 N ning samamoodi otsa lähedal olevale kinnituskohale 200 N, mis kokku teeb 400 N. Deformatsioon käpa otsas on peaaegu 4 cm ning liitekohast umbkaudu 2 cm. Seega on 400 N juba liiga suur jõud haaratsi jaoks. Vaadates deformatsioone võib teha järelduse, et haarats suudab ilma suuremate muudatusteta vastu panna jõule 100 N, mistõttu tekkiv elastne deformatsioon on väike ning haarats suudab enda esialgse kuju taastada. Paksema käpa puhul on lubatud jõud suuremad.



Sele 2.7 Käpa deformatsioon sentimeetrites

Haaratsile on ühtlaselt jaotatud jõud 400 N. Selet 2.8 selgub, et antud jõule tekib kinnituskohtades vastureaktsioon, mille suurus on ümardatult 8 N. Vastureaktsiooni suhteliselt väike suurus tuleneb olukorrast, kus haarats deformeerub surve all tänu materjali omadustele.



Sele 2.8 Käpa vastureaktsioonid kinnituskohtades

Selel 2.9 on näha käpa paksem versioon. Kui on teada, et tuleb haarata rohkem ümaraid esemeid, siis tuleb suurem kokkupuutepind kasuks. Suurem kokkupuutepind tagab parema haaramise ja tugevama kontakti. Enne 3D printimist veendutakse missuguste objektidega haarats peamiselt manipuleerima hakkab ning sellest sõltuvalt valitakse käpa paksus.



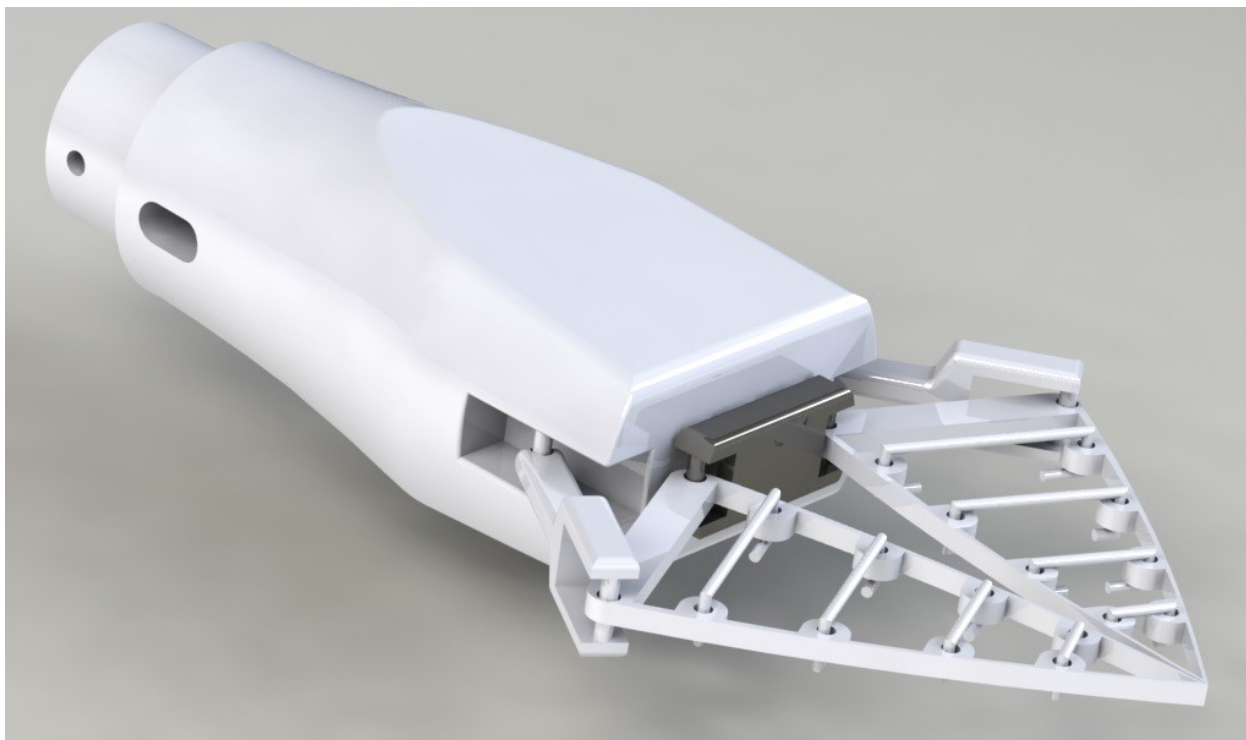
Sele 2.9 Käpa paksem verisoon

Vastavat lahendust kasutades võib olla veendunud, et haarats suudab manipuleerida erineva kujuga objektidega ilma suurema vaevata. Arvestada tuleb asjaoluga, et haarats ei suuda objekti ainult käpa tipuga haarata, seega tuleb robotile anda informatsioon, kui sügavalt objekti tuleb haarata. Käpa mõõdud on õiges suurusjärgus, et haarata nii väikeseid kui ka keskmise suurusega objekte.

2.1.3 Lõpptulemus

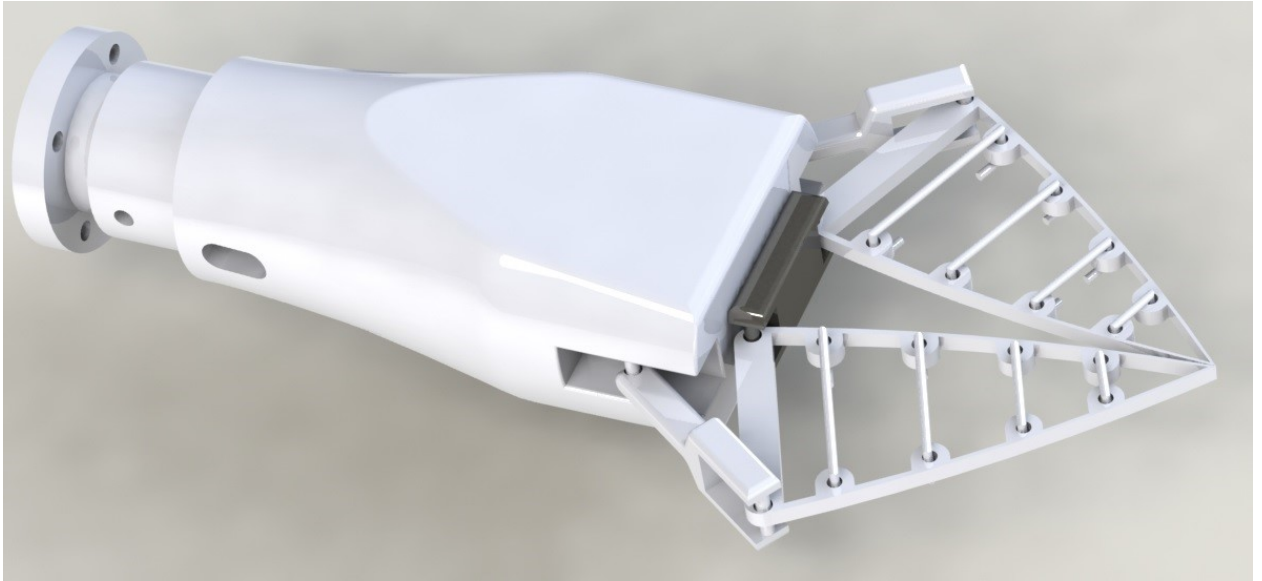
Arvesse võttes sobivaid gabariite ning haaratsi käppade lahendust võib haaratsi disaini lõpptulemust näha seel 2.10. Lihtsustatult koosneb haarats kolmest osast: kestast,

mootorist ning *finray* käppadest. Mootori jaoks on kesta spetsiaalselt tehtud avaus, kuhu mootor paigaldada, lisaks on kesta veel teine ava, kust saab läbi tuua mootori kaabelduse.

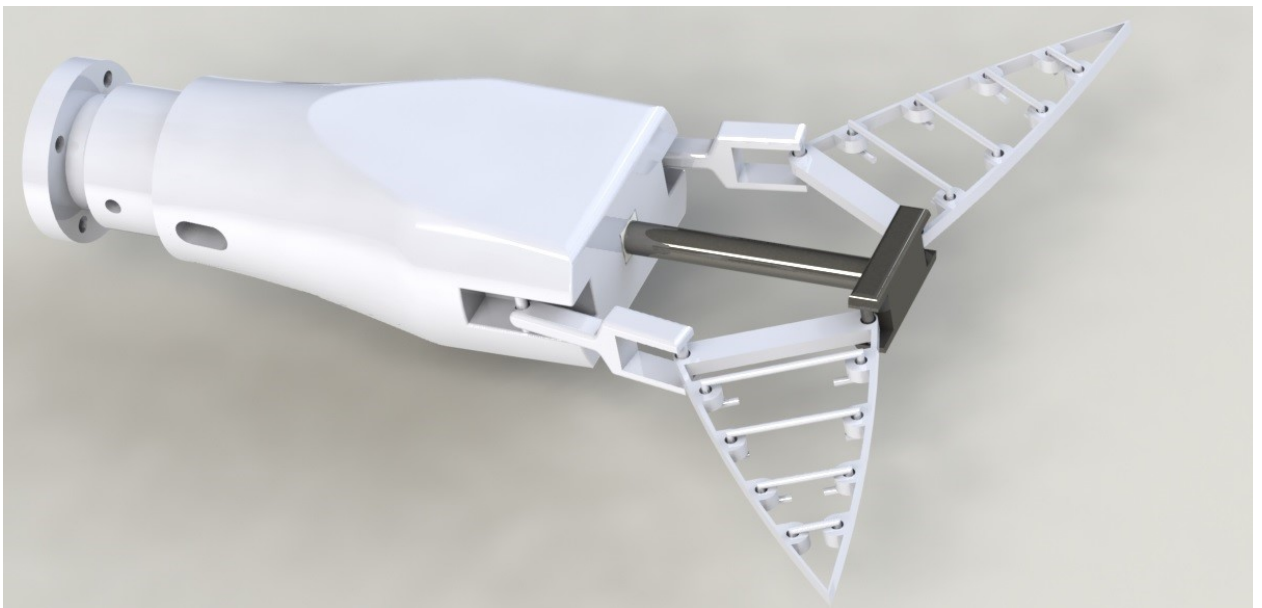


Sele 2.10 Haarats

Haaratsi tööpõhimõte on lihtne – elektriline mootor liigutab võlli, mille külge on ühendatud käpad. Võlli liikumisel edasi käpad avanevad (sele 2.12) ning võlli liikumisel tagasi käpad tõmbuvad kokku (sele 2.11). Selline töömeetod on efektiivne, välistades konstruktsiooni keerukusest tulenevaid komplikatsioone.



Sele 2.11 Haarats kinniste kokku tõmmatud käppadega



Sele 2.12 Haarats lahtiste käppadega

3D printimisel kasutatav materjal on firma EOS poolt valmistatav polüamiid PA12 ehk lihtsamalt öeldes nailon. Materjali täpsemad omadused on kirjeldatud lisan 4.

2.2 Haaratsi ühendamine robotiga ning sobiva mootori valik

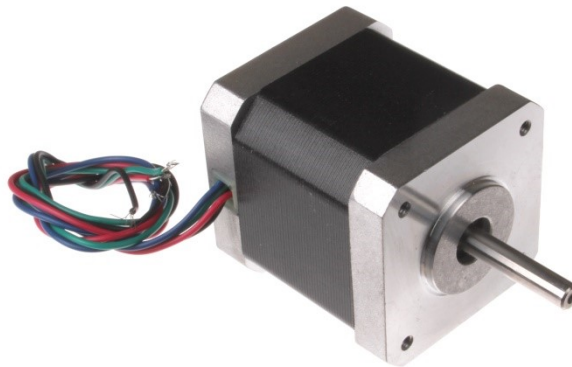
Siin alapeatükis selgitatakse, kuidas ühendada haarats robotiga. Näidatakse missugused on UR5 võimalused haaratsi ühendamiseks ning selle juhtimiseks. Lisaks käsitletakse sobiva mootori valikut.

2.2.1 Sobiva mootori valik

Elektrilise haaratsi liigutamiseks on tarvis sobivat mootorit, mis täidaks etteantud kriteeriume. Nimelt peab ta mahtuma haaratsi korpusesse ning omama piisavat võimsust, et üles tõsta mõnisada grammi kaaluvad objektid. Korpuse, mille sisse mootor mahtuma peab, pikkus on 154 mm ning diameeter on 63 mm.

Peale mõõtude tuleb otsustada, mis laadi mootorit kasutada. Kas kasutada servomootorit, tavalist DC mootorit, samm-mootorit või midagi muud. Haaratsi disain määrab ära, et mootor peab olema lineaarse liikumisega. Lineaarse liikumisega mootorid on tüüpiliselt mõnevõrra kallimad kui mittelineaarsed mootorid tänu oma lisamehaanikale, mis muundab mootori liikumise üle lineaarseks liikumiseks. Siiski leiti, et see ei ole väga suur hind, mida maksta, kuna suurem osa haaratsist on võimalik 3D printida, mis hoiab kulud suhteliselt madalal. Lisaks on tähtis, et mootor oleks töökindel, seega on mõttekas soetada kallim, kuid töökindel mootor.

Samm-mootori (sele 2.13) kasuks räägib tema hind ning kättesaadavus võrreldes näiteks servomootoriga. Tänu oma ülesehitusele on samm-mootor õigetes tingimustes äärmiselt täpne ning positsioneerimise jaoks ei ole tarvis eraldi enkoodrit, kuna sammude järgi on teada mootori asend. Samm-mootori miinuseks on võrreldes teiste mootoritega vibratsioonist tekkiv lärm. Samm-mootor kaotab kiiruse suurenedes suurel hulgal väändejõudu, mistõttu haaramise jõud väheneb suurematel kiirustel. Veel võib samm-mootor sattuda resonantsi teatud kiirustel, mis põhjustab liigset vibratsiooni, vahele jäetud samme ning langenud täpsust. Samm-mootori juhtimiseks on tarvis veel eraldi juhtelektriskeemi või mikrokontrollerit nagu näiteks Arduino või Raspberry PI. Tänu oma omadustele on samm-mootorid tavaliselt kasutuses aeglasemat liikumist, kuid täpsust nõudvates lahendustes nagu näiteks 3D printerid. [22]



Sele 2.13 Samm-mootor [23]

Servomootorite (sele 2.14) kahjuks räägib kõrgem hind ning enkoodri vajadus positsioneerimiseks. Siiski on kõrgema hinna eest ka palju häid omadusi. Tänu enkoodrile on servomootor täpne. Servomootor ei vibreeri nii palju ning tänu sellele on seda tüüpi mootori töö vaiksem. Kui servomootoritele antakse positsioon, kuhu nad peavad liikuma, siis nad viivad läbi vastava liikumise ning jäävad seda positsiooni hoidma ning takistama igasugust vastupidist liikumist, mida talle üritatakse rakendada. Servomootorite kasuks räägib veel kiirem efektiivne töökiirus, kus väändejõud ei lange. Haaratsi jaoks tähendab see kiiremat liikumist ning töökindlust haaramisjõu aspektist suurematel kiirustel. Servomootoreid kasutatakse näiteks robotkätes ja muudes sarnastes lahendustes, kus on tarvis nii täpsust kui kiirust. [22]



Sele 2.14 Servomootor [24]

DC mootorite (sele 2.15) kahjuks siin olukorras räägib päris palju asju. DC mootoreid kasutakse tavaliselt igasugustes jahutusventilaatorites ja muudes sarnastes rakendustes, kus mootor peab pidevalt töötama niikaua kuni vool peal on. Lineaarsete DC mootorite hind on

kõrge ning nende tõukejõud ei ole kõige suurem. Lisaks puudub neil võimalus mootori asendit kontrollida ilma lisaseadmeteta. Seega DC mootor selle projekti jaoks ei sobi. [22]



Sele 2.15 DC mootor [25]

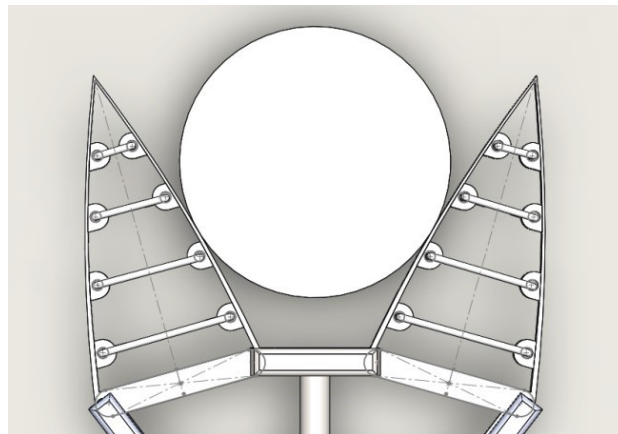
Eelnevat arvesse võttes leiti, et kõige mõistlikum on kasutada lineaarset servomootorit, kuna tegemist on täpse, vaikse ning töökindla mootoriga. Järgnevas tuli otsida sobivate näitajatega mootor, mis mahuks ilusasti korpusesse, oleks piisavalt pikk ning omaks vajalikku jõudu, et tagada haaramistugevus.

Pärast mõnda aega otsimist leiti sobiv mootor (selel 2.16) Actuonix L12-R-100-210-6 [26]. Tegemist on lineaarse liikumisega servomootoriga, mille võll käib välja 100 mm kaugusele. Mootori korpus on valmistatud alumiiniumist, sel on metallist ülekandesüsteem ja messingist kruvi. Mootoriga kaasneb ka sisseehitatud mikrokontroller, mis annab erinevaid võimalusi mootori konfigureerimiseks.



Sele 2.16 Actuanix L12-R-100-210-6 lineaarne servomootor [27]

Tähtis on teada kui suured jõud mõjuvad objektile haaramisel. Arvesse tuleb võtta mootori efektiivset jõudlust 42 N ning haaratsi geometriat. Arvutused on ainult hinnangulised, kuna reaalse tulemuse arvutamiseks on tarvis väärtuseid, mida hetkel teada ei ole. Võetakse tõenäoline olukord, kus haaratakse objektist, mis on positioneeritud käpa keskele nagu on näha seel 2.17.



Sele 2.17 Tõenäoline objekti positioneerimine käppade vahel

SolidWorks simulatsioon andis mõjuvaks jõumomendiks 4,62 Nm. Teada on jõumomendi valem:

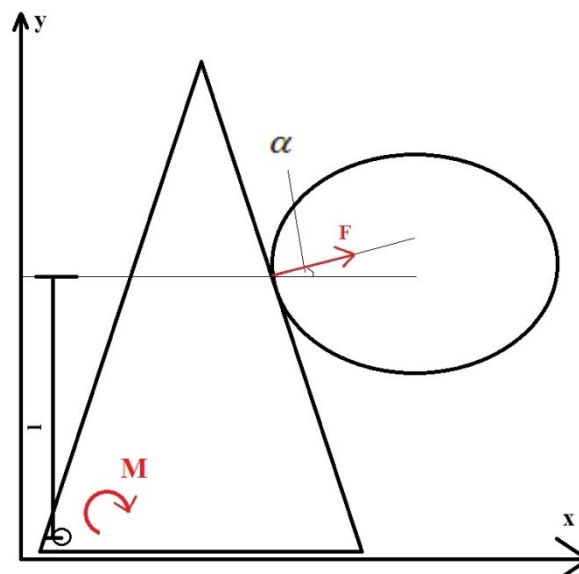
$$M = F \cdot l \cdot \cos \alpha, \quad (2.1)$$

kus M – jõumoment, Nm,
 F – jõud, N,
 l – jõuõlg, m,
 α – nurk telje ja jõu vahel, kraad°.

Teisendades valemit 2.1 saame uue valemi vastava jõu arvutamiseks:

$$F = \frac{M}{l \cdot \cos \alpha} \quad (2.2)$$

Selel 2.18 on antud lihtsustatud skeem:



Sele 2.18 Jõudude lihtsustatud skeem

Asendame valemis 2.2 numbrilised väärtused:

$$F = \frac{4,62}{0,057 \cdot \cos 20^\circ} \approx 86,25 \text{ N}$$

Hinnanguline haardetugevus kõige tõenäolisemas objekti asukohas on 86,25 N ühe käpa kohta, mis on piisav kergemate objektide tõstmiseks. Arvesse tuleb võtta, et tegemist on jõuarvutusega, mis on lihtsustatud ning milles pole arvestatud erinevaid tegureid nagu hõõrdejõud, materjali omadused ja nii edasi.

2.2.2 Mootori ühendamine ning juhtimine

Mootor on paigutatud haaratsi korpuse sisse ning seeläbi füüsiliselt robotiga kinnitatud. Tähtsam küsimus on see, kuidas mootorit juhtida UR5 võimalustega. Kõigepealt tuleb vaadata, missugused võimalused on olemas robotil UR5, et mootorit juhtida. Pärast pikka otsimist manuaalidest sai selgeks, et UR5 ei võimalda iseenesest muuta PWMi ehk *pulse width modulationit*. Läbi väljundite on võimalik muuta pinget ning volutugevust, mis võimaldavad antud mootorit juhtida.

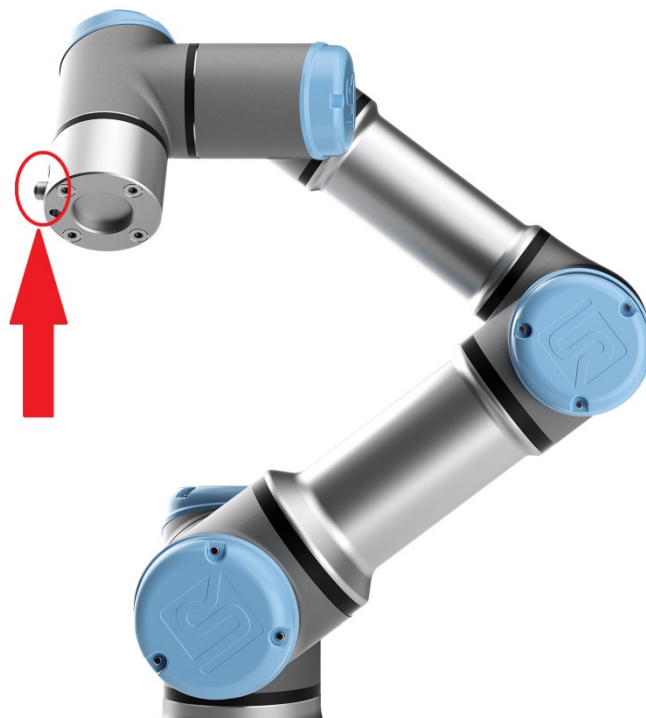
Mootorit L12-R-100-210-6 on võimalik juhtida mitmel erineval moel tänu sisse ehitatud mikrokontrollerile. Võimalikud konfiguratsioonid on järgmised: otspunktide järgi liikumine, potentsiomeetriga liigutamine, RC lineaarne servo ja integreeritud mikrokontroller, kus saab kasutada nii RC servo varianti, tööstuslike masinate töörežiimi kui ka pingega juhtimist. Viimast varianti on tarvis UR5ga kasutamiseks.

Mootorit L12-R-100-210-6 on võimalik juhtida integreeritud režiimi korral pingega 0 V kuni 5 V. Võll liigub vastavalt antud volutugevusele: kui on vastavale klemmile antud pinge 0 V, siis võll on nullasendis ning kui antakse maksimaalne pinge 5 V, siis liigub võll enda maksimaalsesse positsiooni. Kõik vahepealsed asendit saavutatavad vastava pingega.

Robotil UR5 on võimalik ühendada välised seadmed kontrollerisse. Selle jaoks, et midagi sinna ühendada, peavad olema pikad ühendusjuhtmed ning tänu sellele võivad juhtmed takerduda roboti liikumisel ja võib tekkida materiaalne kahju asjade purunemisel. Õnneks on robotil veel olemas sisendite/väljundite jaoks mõeldud ühenduskoht ka roboti „peas“, mis on näidatud seel 2.20 koos sisendite/väljunditega seel 2.19. Selle ühenduspunkti jaoks on tarvis kasutada spetsiaalset tööstuskaablit Lumberg RKMV 8-354 (seel 2.21). Antud tööstuskaabli abil on võimalik ühendada haarats roboti „peaga“, mistõttu ei ole tarvis vedada pikki kaableid kontrollerisse, vaid piisab mõnest sentimeetrist, et ühendus toimiks.

Color	Signal
Red	0V (GND)
Gray	0V/+12V/+24V (POWER)
Blue	Digital output 8 (DO8)
Pink	Digital output 9 (DO9)
Yellow	Digital input 8 (DI8)
Green	Digital input 9 (DI9)
White	Analog input 2 (AI2)
Brown	Analog input 3 (AI3)

Sele 2.19 Ühenduskoha sisendid ja väljundid [28]



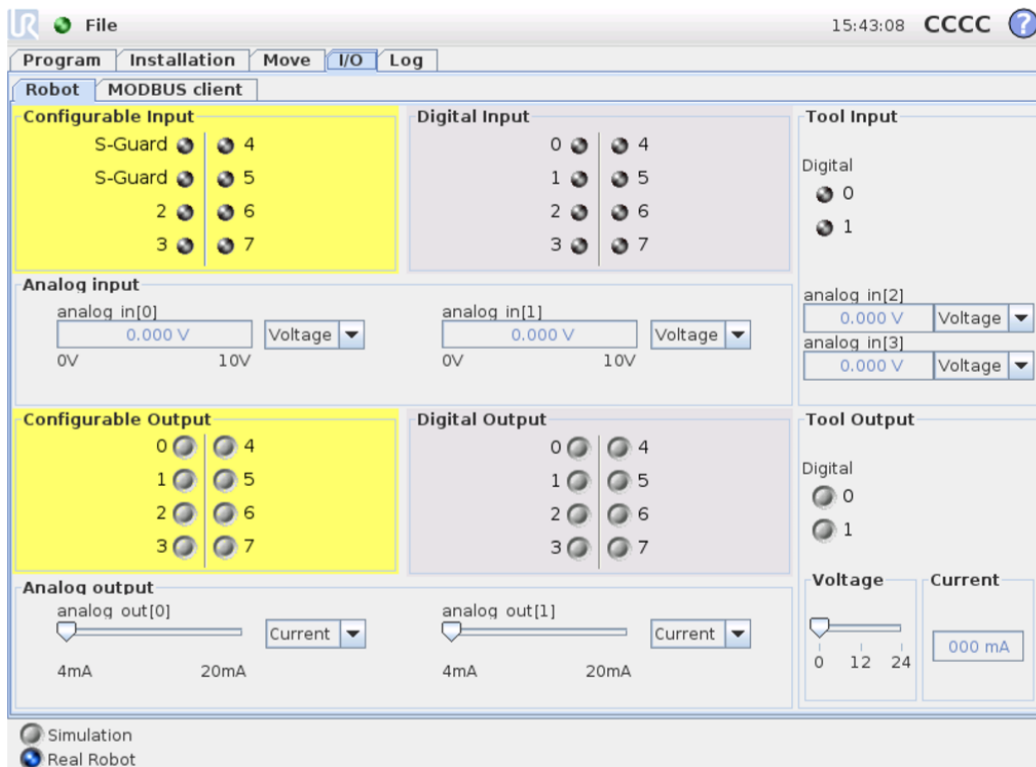
Sele 2.20 Roboti „pea“ küljes olev ühenduskoht [29]



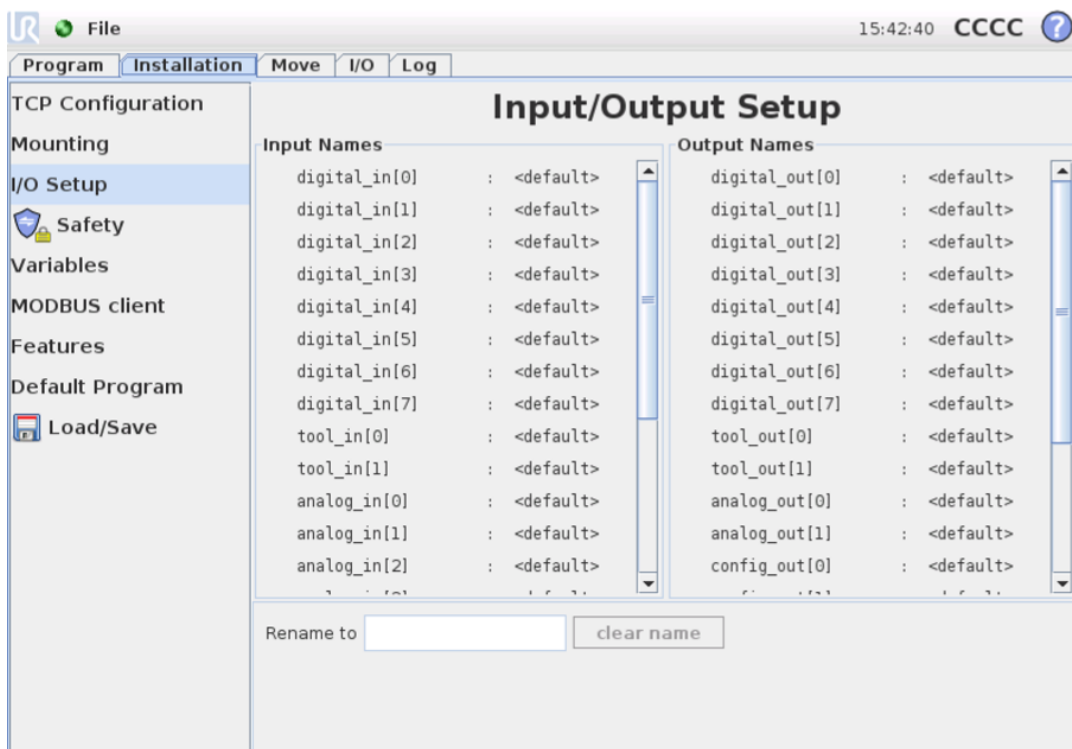
Sele 2.21 Lumberg RKMV 8-354 tööstuskaabel [30]

Mootor L12-R-100-210-6 vajab töötamiseks toitevoolu 12 VDC, mida UR5 ka võimaldab. Lisaks on võimalik antud sisendite/väljundite ühenduskohast kätte saada pinge -0,5–26 V, mis on enam kui piisav mootori juhtimiseks, kuna tarvis on 0 V kuni 5 V. Mootori juhtimiseks ongi tarvis muuta digitaalse väljundi väärtust 0-5 V piires. Väljundi väärtust on lihtne muuta manuaalse juhtimise korral I/O lahtris, mis on näha seel 2.22. Seega, manuaalse juhtimise korral saab haaratsiga väga lihtsalt tööd teha: liigutatakse haarats sobivasse positsiooni ning seejärel I/O lahtrist valitakse sobiv pinge, et objekti haarata. Automaatse juhtimise jaoks on tarvis kirjutada robotile programm, mida käsitletakse neljandas peatükis.

Mõttekas on väljunditele/sisenditele nimed panna, et oleks selge, mida mingi sisend/väljund tähistab. Selle jaoks on UR5l olemas samamoodi vastav tööväli (seel 2.23). Valides vastava sisendi/väljundi, avaneb lahter, kuhu saab nime kirjutada. Lisaks avanevad mõned valikuvariandid. Nende hulgas on võimalus seadistada sisendit/väljundit vastavale väärtusele programmi lõppedes või siis valida variant, kus programmi lõppedes sisend/väljund jääb samaks, mis ta antud hetkel on. Lisaks on võimalus seadistada, kas sisendit/väljundit saavad muuta operaatorid I/O töölahtrist või võib seda teha ainult programm, mis on robotisse kirjutatud.



Sele 2.22 I/O töölahter [31]



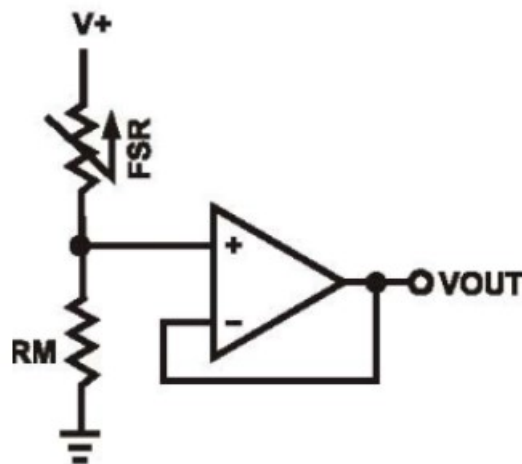
Sele 2.23 I/O seadistuslahter [32]

Haaratsi üks tähtsamaid omadusi on tema haaramiskvaliteet. Nimelt on tarvis teada, kas objektist on täielikult haaratud piisava tugevusega, et objekti maha ei pillataks. Teine tähtis

omadus on habrastest objektidest haarata piisavalt õrnalt, et nende purunemist vältida. Antud haarats on küll adaptiivne ning jaotab objektile asetatud rõhu terve käpa ulatuses ühtlaselt ära, aga oleks tarvis lisaelementi, mis annaks jõudude arvulise väärtuse ning tõstaks töökindlust.

Jõutundlik takisti on hea lahendus antud küsimusele. Jõutundlik takisti on materjal, mille takistus muutub kui sellele mõjuvad jõud. See koosneb juhtivast polümeerist, mis muudab oma takistust kindla teadaoleva väärtuse jagu teatud jõu korral. Sobivaks osutus mudel 408 FSR Interlink Electronicsilt.

Antud jõutundliku takisti takistus väheneb temale asetatud jõu suurenedes. Jõuvahemik, mida takisti talub, on 1-100 N. Tellides tuleb ta 622,3 mm pikkusena, aga seda võib lõigata omale vajaminevasse mõõtu. Antud projekti raames tuleks lõigata 122 mm pikkune jupp, mis ühtib kontaktpinna pikkusega. Ühendusteks on tal kaks klemmi, millest üks on toitepinge +5 V ning teine on väljund V_{out} . Takisti toimimiseks on tarvis koostada vastav elektriskeem, mis on antud seel 2.24. Kuna elektriskeem on lihtne ning komponendid väikesed, siis ei võta skeem palju ruumi ja mahub haaratsi korpuse sisse ära, kuhu on ruumi jäetud vastavateks olukordadeks.

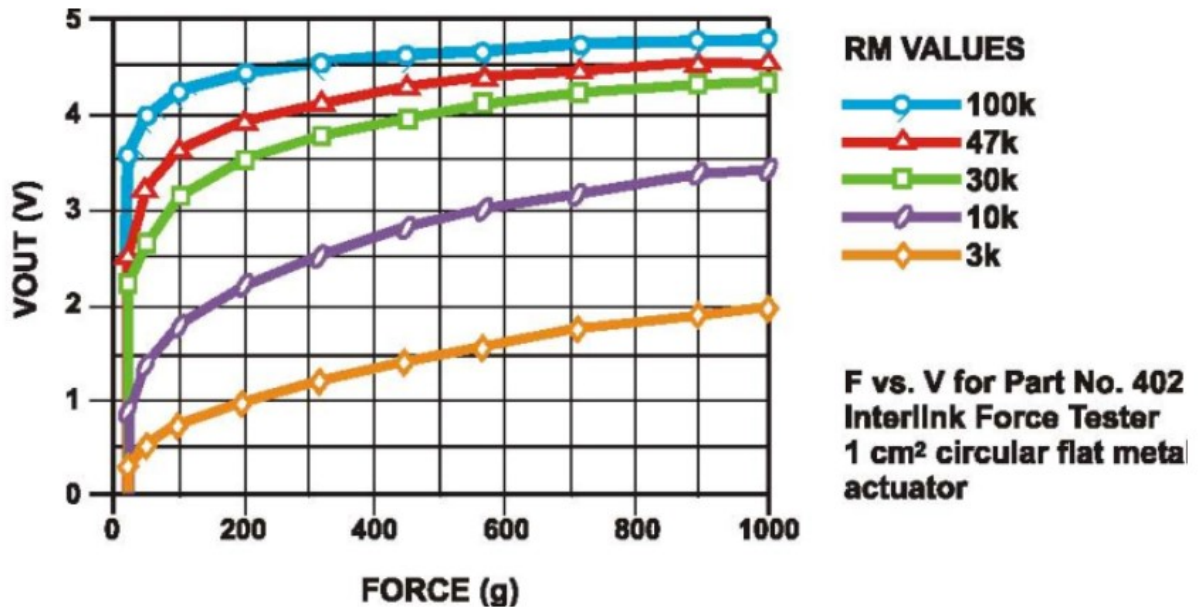


Sele 2.24 Jõutundliku takisti elektriskeem [33]

Tagastatav väärtus V_{out} arvutatakse vastava valemiga:

$$V_{out} = \frac{R_M V}{(R_M + R_{FSR})} \quad (2.3)$$

Seega tuleb valida takisti R_m väärtus vastavalt vajadusele. Seel 2.25 on antud jõutundliku takisti omadused sõltuvalt takisti R_m suurusest ning asetatud jõust.



Sele 2.25 Jõutundliku takisti karakteristik sõltuvalt takisti R_m valikust ja mõjuvatest jõududest [34]

Vastava toitepinge +5 V saab jõutundlik takisti roboti küljes olevast sisendite/väljundite ühenduskohast valitud digitaalsest väljundist. V_{out} väärtus kuvatakse sarnaselt vastavasse digitaalsesse sisendisse. Kuna V_{out} annab tagasi pinge väärtuse, siis tuleb see teisendada programmiselt mõjuvaks jõuks. Kuna V_{out} on seotud digitaalse sisendiga, siis on lihtne lugeda selle sisendi väärtus koodi sisse ning teostada matemaatilisi tehteid, et kätte saada mõjuv jõud. Lisaks saab leitud jõu salvestada eraldi muutuja alla. Tänu sellele saab panna koodis haaratsile piirangud peale, et kui antud muutuja väärtus ületab mingit etteseadud piirväärtust, siis haarats enam edasi ei haara. Seega on võimalik veenduda, et haprad objektid ei puruneks ning jälgida kui tugevalt haarats objektist kinni hakkab.

Mootori spetsifikatsioonidest (lisa 1) võib näha, et maksimaalne töökiirus $v_l = 13$ mm/s. Üks haaratsi käpp kaalub 10 g ehk kaks käppa kaaluvad 20 g. Mootor suudab arendada maksimaalset jõudu $F_l = 42$ N. Teisendades 21,12 g njuutoniteks saame 0,2071 N. Seega käppadest tuleva raskuse all on nüüd mootori jõudlus:

$$F_2 = 42 - 0,2071 = 41,79 \text{ N} \quad (2.4)$$

kus F_2 – mootori arvatud jõudlus

Leidmaks nüüd võimalikku maksimaalset haaratsi töökiirust kasutame võrde põhiomadust:

$$v_2 = \frac{F_2 v_1}{F_1} = \frac{13 \times 41,7929}{42} \approx 12,94 \text{ mm/s} \quad (2.5)$$

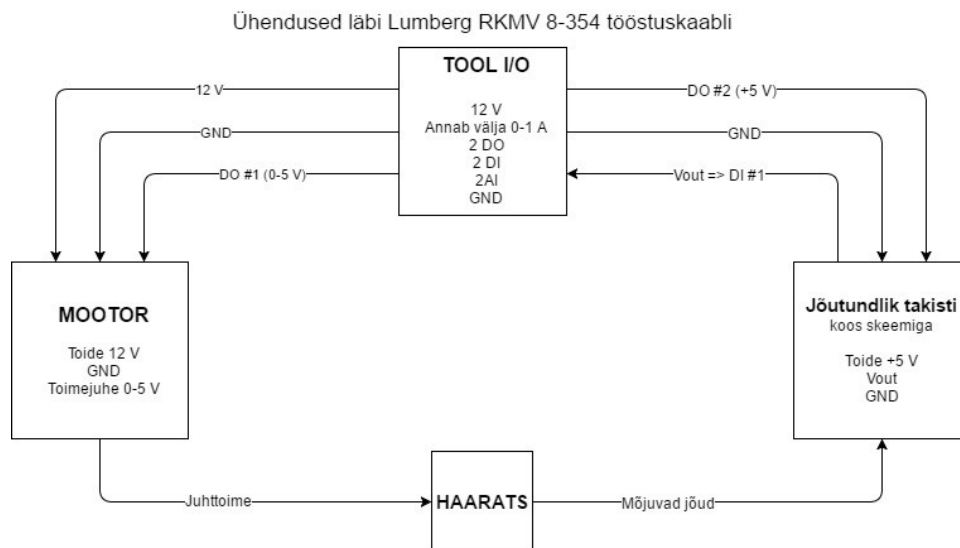
kus F_2 – mootori arvatud jõudlus

F_1 – mootori esialgne jõudlus

v_1 – algne töökiirus

v_2 – arvatud töökiirus

Nagu näha, siis haaratsi käpad ei mõjuta mootori kiirust oluliselt ning töökiirus jääb peaaegu samaks. Kuna mootori maksimaalne tööpikkus on 100 mm, siis saavutab ta selle ligikaudu 8 sekundiga.



Sele 2.26 Üldine ühendusskeem

Selel 2.26 on näidatud üldine ühendusskeem, kuidas mootor, haarats, jõutundlik takisti ning *tool* I/O üksteisega ühendatud on. *Tool* I/O annab vajaliku toite ning maanduse mootorile ning jõutundlikule takistile. Lisaks tuleb *tool* I/O kaudu juhtpinge 0-5 V mootorile, mis liigutab mootorit ning seeläbi haaratsit. Kui haaratakse objektist, siis hakkavad jõutundlikule takistile mõjuma jõud. Need jõud tõlgendatakse ümber pingeks

jõutundliku takisti poolt ning edastatakse *tool I/O*'sse, kust edasi nende andmetega juba tegeletakse programmiliselt.

Haaratsi maksumus on tähtis küsimus Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudile. Tabelis 2.1 on näidatud kasutatavate komponentide maksumus. Osad komponendid on võimalik leida ka instituudist.

Tabel 2.1 Haaratsi maksumus

Komponent	Kogus (tk)	Hind (€)
Mootor L12-R-100-210-6	1	63,10
Jõutundlik takisti FSR 408	2	37,80
Takisti skeemi	1	Marginaalne, ülikoolist
Operatsioonivõimendi LM741	4	3,50
3D printimine	-	-

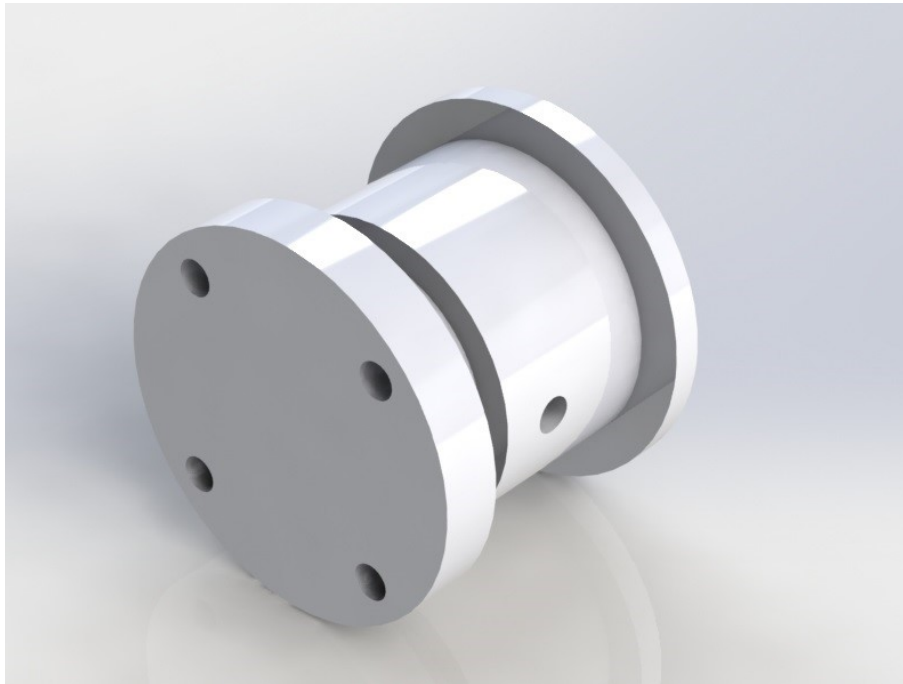
Kokku: **104,40 €** + 3D printimine

2.3 Haaratsi ühenduslüli

Haaratsi robotiga UR5 ühendamiseks on tarvis vastavat ühenduslüli. Eesmärk on teha haaratsi vahetamine lihtsaks, kiireks, kuid samas ka veenduda selles, et ühendus oleks töökindel. Kuna haarats ise on suhteliselt kerge, kuna on valmistatud peamiselt 3D prinditud plastist, siis ei mõju ka väga suured jõud haaratsile. Seega ei ole tarvis äärmiselt tugevat kinnitust teha, kuna selle jaoks pole vajadust.

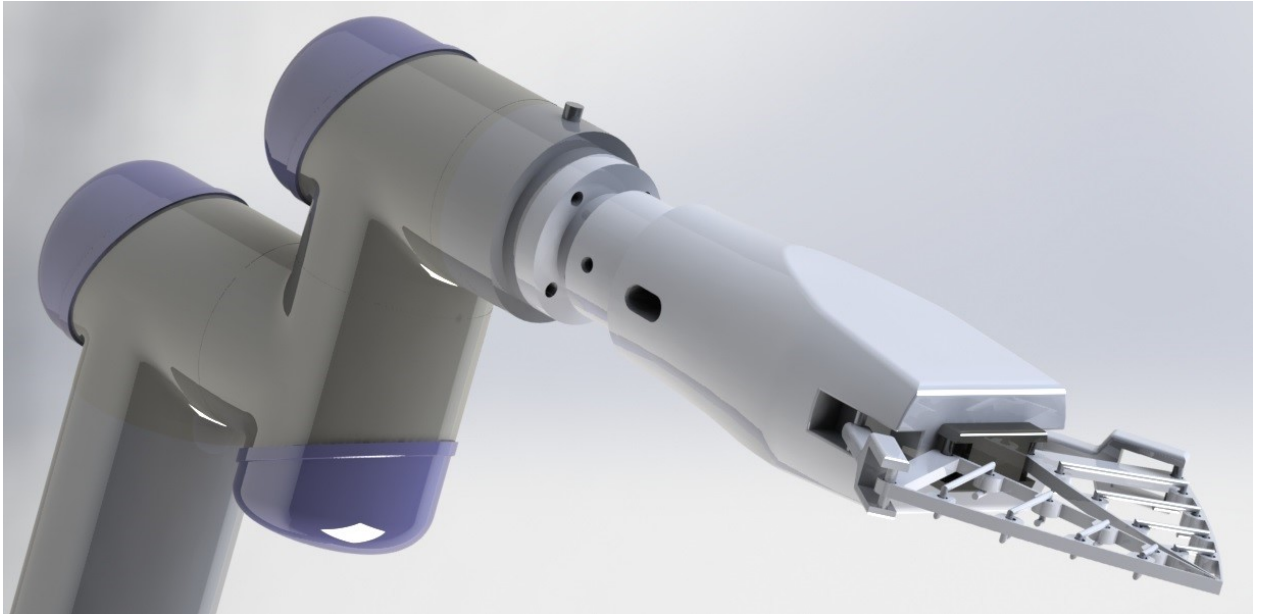
Ühenduslüli lahenduse jaoks oli mitu varianti. Kas tekitada kaks niiöelda šahti, üksteise sisse libisevad ning klambriga kinnitatakse. Veel oli mõte kasutada kahte silindrilist kujundit, mis üksteise sisse käivad ning kinnitatakse kolme poldiga eri külgedest. Siiski see variant ei sobinud, kuna plasti ei ole mõtet keermestada, kuna keere väsis kiirelt ära. Idee silindrilisi kehasid kasutada säilis. Lahendust võib näha seel 2.27. Kolm polti asendati ühe läbiva poldiga, mille otsa keeratakse mutter, mis lukustab kaks keha omavahel kokku. Silindri avad on omavahel täpselt kohakuti (näha seel 2.29) kui üks silinder lõplikult teise

sees on, mistõttu ei saa tekkida mingeid suuri loginaid. Vibreerimist vähendab ka tugevalt kinni keeratud mutter.

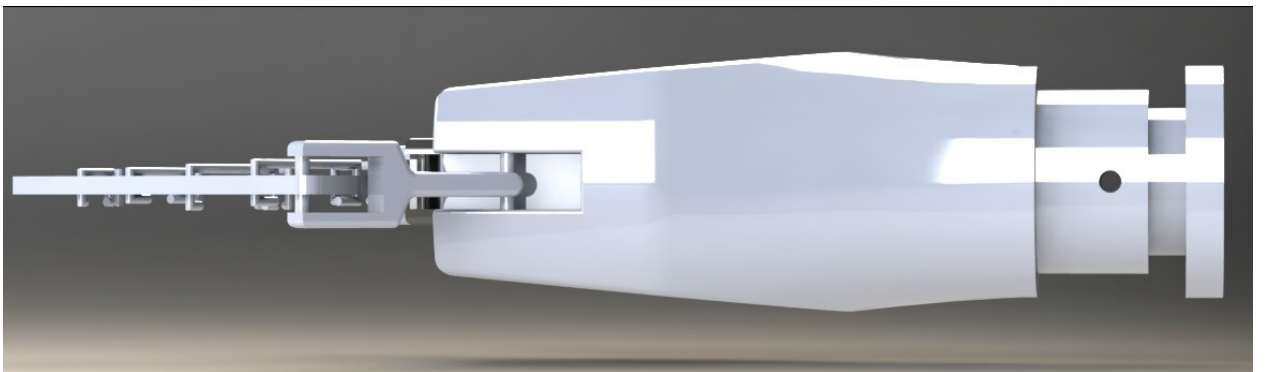


Sele 2.27 Ühenduslüli

Nelja avaga lülipool kinnitub poltidega roboti UR5 külge. Teine pool on haaratsi korpuse külge disainitud. Haarats ei pea tegema päevas tuhandeid liikumisi, sest haaratsi eesmärk pole tegutseda tootmisliinil, vaid olla katseseade instituudile. Tänu sellele ei ole vaja karta ka kinnituse väsimist pikema perioodi jooksul. 3D printimise eelis on, et kui mingi ühenduslüli või detail kannatada peaks saama, siis on võimalik sama detail uuesti välja printida ning katkisega ära vahetada. Selel 2.28 on näha ühenduslüli ka roboti külge ühendatult.



Sele 2.28 Haarats koos ühendusega roboti UR5 küljes



Sele 2.29 Haaratsi külgvaade, kus on täpselt näha ühenduslüli aukude ühtivus

3. KAAMERAMOODULI ÜLESEHITUS

3.1 Kaameramooduli disain

Kaameramooduli disainimisel tuli arvestada mitmeid asjaolusid. Kaameramoodul pidi olema piisavalt esteetiline ja samas pidi andma kaitset kaameratele ning veenduda tuli, et haarats ei hakkaks kaamerate tööväljasid segama. Nende omaduste tõttu ei olnud võimalik disainida väikest moodulit, mida oleks ilus vaadata. Tuli lähtuda pigem praktilisusest. Lisaks pidi moodul tagama mõlemapoolsed kinnitused, nii kaameramooduli kinnituse roboti külge kui ka haaratsi kinnituse kaameramooduli külge. Järjekordne põhjus, miks ei olnud võimalik disainida väikesemõõtmelist kaameramoodulit. Esteetilistel kaalutlustel otsustati kasutada klassikalist ristküliku stiili, mis oma uudsusega ei häiriks silma. Teine variant oleks olnud alt kitsenev spliinidega variant, aga kardeti, et seesugune uudsem lahendus võib silmale häiriv olla. Seledel 3.1 ja 3.2 on näha kaameramooduli disain.

Mooduli ülesehitus on lihtne. Moodul koosneb kahest osast, esiküljest ning tagaküljest, mis pärast kaamera sisse asetamist omavahel kinnitatakse selleks ettenähtud aukudest. Mõlema külje sisse on jäetud avaused täpselt kaamera mõõtude järgi. Kaamera väljaulatuv osa mahub täpselt esikülje avaustest läbi kuni jääb karkassi taha pidama. Kaamera karkass jääb kahe külje vaheliste avauste sisse. Tagumisel küljel on avaused micro USB 3.0 jaoks ning teiste ühenduste tarbeks. Micro USB 3.0 jaoks jäetud avaus on mitu sentimeetrit pikk, et USB otsik, mis on kaameraga ühendatud, oleks kindlalt paika fikseeritud, et kaitsta hapraid detaile, millega ühendus tagatakse.



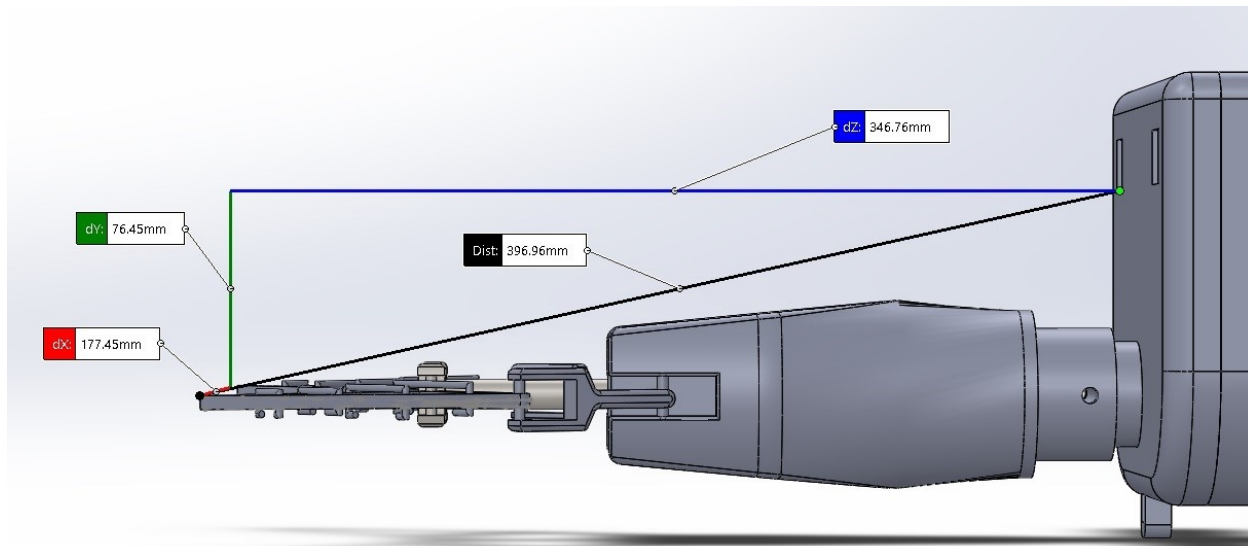
Sele 3.1 Kaameramooduli esikül



Sele 3.2 Kaameramooduli tagukül

Kaameramooduli disainimisel tuli arvesse võtta haaratsit, et haarats ei hakkaks kaamera-pilti segama. Selle välistamiseks on paar varianti, millest üks on teha väiksemate mõõtu-dega haarats, mis toob kaasa haaratsi võimekuse kao natuke suuremate objektide haaramisel. Teine variant oli liigutada kaameraid ülespoole ehk teha moodul kõrgem ning haaratsi kinnitus mooduli alumisse otsa jätta. Tänu sellele muutus kaameramoodul küll mõõtmetelt suuremaks, aga säilis haaratsi ja kaamerate vaheline tööharmoonia. Teises peatükis olid toodud kaamera vaatevälja mõõdud. Distsantsile 76,45 mm vastab kaugus dZ

353,68 mm, kust alates objekt hakkab kaamera vaatevälja segama. Seel 3.3 on näha, et haarats ei jää kaamera töövälja segama. Võll on asetatud sellisele kaugusele, kus moodulite vaheline kaugus on maksimaalne.



Sele 3.3 Moodulite vahelised kaugused

Põhjus, miks moodul on suhteliselt suuremõtmeline on vajadus kaitsta kaameraid. Kaamerad on mooduli ülemises otsas kindlalt korpuse sisse kinnitatud. Kui moodul teha väiksemõtmeline, siis ei ole kaameraid kaitsmas piisavalt materjali, mis löögi enda sisse ära summutaks. Lisaks on tarvis kinnitada ka haarats kaameramooduli külge ning seda saab teha efektiivselt kui on piisavalt pinda, kuhu haarats üldse kinnitada.

Haarats kinnitub kaameramooduli külge samasuguse põhimõttega nagu roboti külge. Kaameramoodulil on samasugune disainielement esikülje peal nagu seda on ühenduslüli robotiga. Tagumisel küljel on samasugune lahendus nagu seda on haaratsi ühendus robotiga.

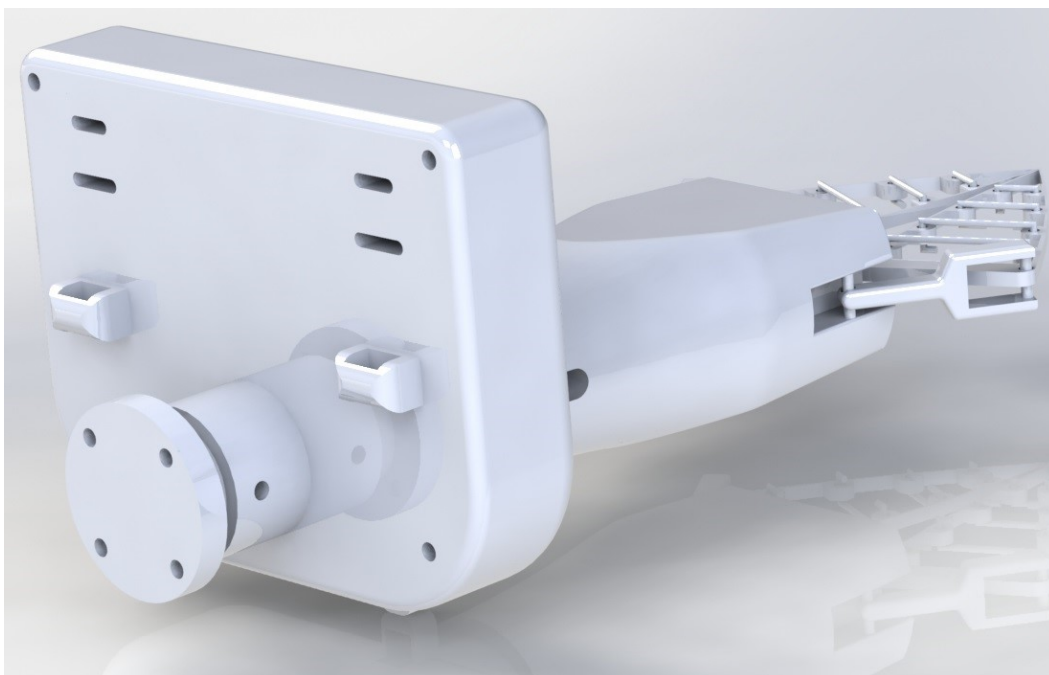
Seledel 3.1 ja 3.2 on näha mooduli alumises osas olev detail haaratsist tulevate juhtmete fikseerimiseks. Juhtmed lähevad läbi avause, mis need fikseerib, et nad roboti töötamise ajal ees ei oleks. Detail disainiti mooduli alumisse osasse seepärast, et seal haaratsi juhtmed ei sega kaamera tööd. Kui sarnane lahendus oleks mooduli ülemises osas, siis võivad haaratsi juhtmed liikuda kaamerate ette ning seeläbi tööd segada.

Kaameramoodul on 3D prinditud, kasutatud on samamoodi ettevõtte EOS poolt pakutavat materjali PA12 ehk nailonit. Materjali omadused on antud lisas 4.

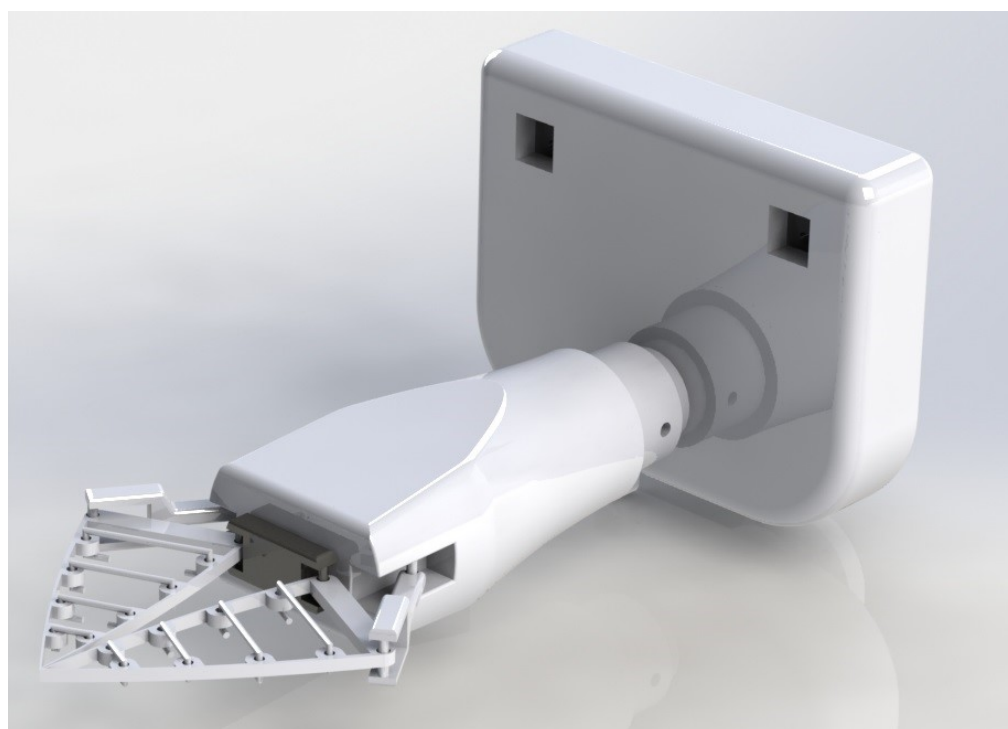
Edasistel seledel on näidatud, kuidas on ühendatud omavahel kaks moodulit ning kuidas on ühendused robotiga UR5. Moodulid kaaluvad kokku 2,2 kilogrammi.



Sele 3.4 Kaameramoodul ühendatud robotiga UR5



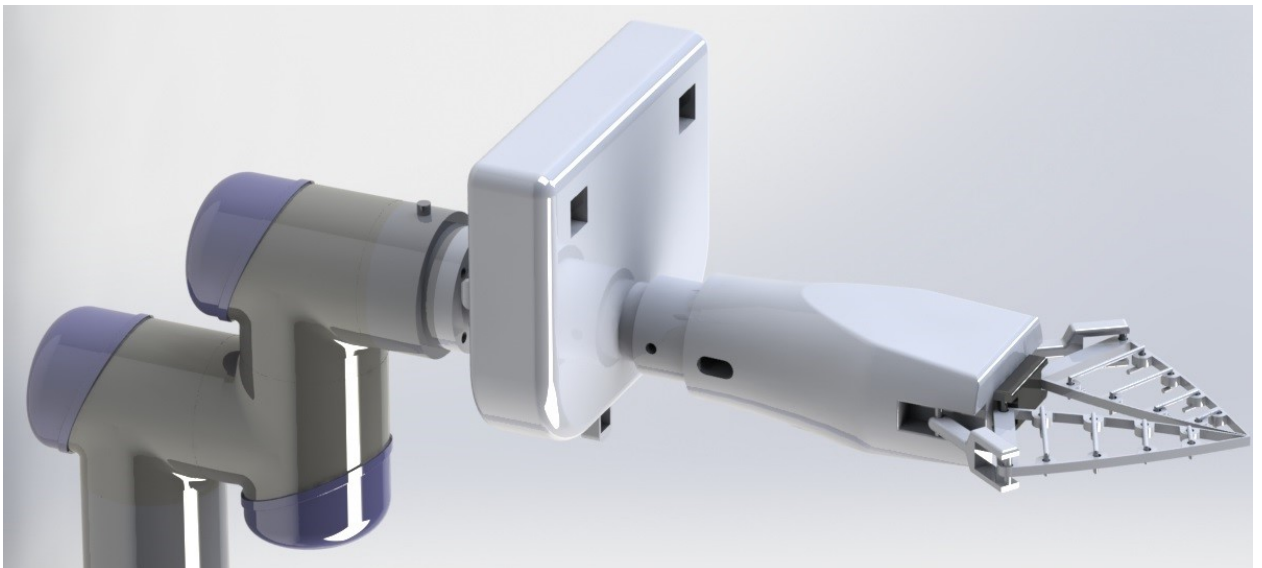
Sele 3.5 Üldlahendus tagumise külje perspektiivist



Sele 3.6 Üldlahendus eesmise külje perspektiivist



Sele 3.7 Üldlahenduse pealtvaade



Sele 3.8 Moodulid ühendatud robotiga UR5

3.2 Kaablite lahendus

Robotil UR5 on kuus vabadusastet, mis tähendab, et tegemist on hästi liikuva robotiga. Kaameratel on ühendatud micro USB 3.0 juhe, mis on ühendatud UR5 kontrollerrisse. Kui juhtmed lahtisena jätta, siis need hakkavad tõsiselt segama roboti tööd ning roboti takerdumisel juhtmetesse võivad kannatada saada ühendused ja kallid kaamerad ise. Seetõttu on tarvis leida mingisugune lahendus, mis elimineeriks vabalt ripuvad juhtmed.

Tegemist on levinud probleemiga UR5 puhul, seega võis leida materjali inimestelt, kes on sarnase probleemiga juba vastakuti seisnud. Alapeatükis tutvustatakse olemasolevaid lahendusi ning lõpetuseks tehakse soovitus, millist lahendust oleks mõistlik kasutada.

IGUS *energy chain* näol on tegemist plastist tuubiga, mis on kinnituste abil ühendatud roboti telgede külge. Tegemist on pigem suuremõõtmelise lahendusega, mis on kasulik kui robotiga oleks ühendatud suurel hulgal erineva mõõtudega juhtmeid. Lõputöö raames tuleb kinnitada lihtsalt kaks juhet, mistõttu see lahendus oleks liiast.



Sele 3.8 IGUS energy chain [35]

Kaitsvad käised roboti telgede ümber on järgmine lahendus juhtme probleemidega tegelemiseks. Selle jaoks tuleb tellida spetsiaalselt tehtud kaitsekäised roboti telgede ümber. Käistes on spetsiaalne kanal, kust saab juhtmed läbi ajada, et neid kaitsta ja fikseerida.



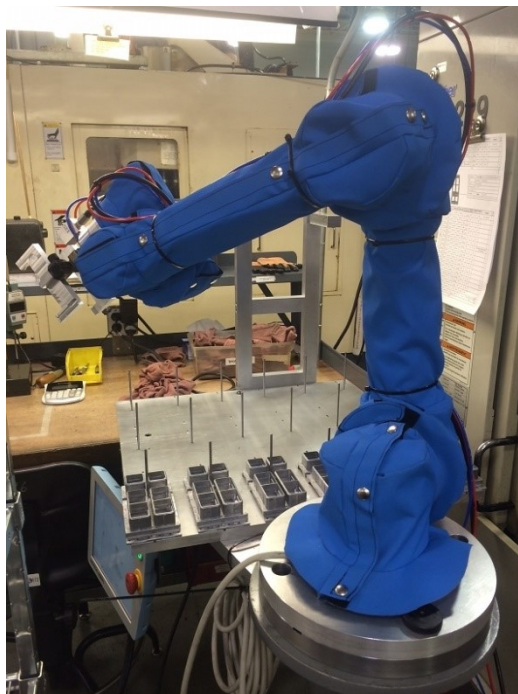
Sele 3.9 Kaitsvad käised robotil UR5 [36]

Velcro One-Wrap on tüüpiline takjariba kinnitussüsteem. Takjariba tuleb tõmmata üle juhtmete ning ümber roboti telje tugevalt kinnitada. Selle lahenduse miinuseks on võimalus, et kinnitus võib hakata liikuma. Selle tarbeks oleks tarvis kinnitus näiteks roboti telje külge liimida. Kui on tarvis ühendada ainult haarats ilma stereokaamerata, siis on tarvis jälle liimitud kinnitus lahti tõmmata, mis on lisavaev.



Sele 3.10 Velcro One-wrap [37]

Robosuit on lahendus, mis katab roboti vastava „ülirkonnaga“, mis on karedast materjalist, mistõttu juhtmed ei libise mööda riidet. Siiski tuleb juhtmed kinnitada roboti külge.



Sele 3.11 Robosuit UR5 jaoks [38]

Spetsiaalne kinnitusklamber on kõige lihtsam ja efektiivsem moodus lahtiseid juhtmeid kinnitada. On olemas palju erinevaid valmistooteid, mis on just sellisteks puhkudeks valmistatud. Tavaliselt on nende kinnitamine kerge ning ei nõua suurt ajakulu ega erilisi tööriistu. Kui kaameramoodulit ei ole tarvis kasutada, siis saab vastavad klambrid kiirelt lahti ühendada. Lisaks näeb lahendus kena välja. Roboti liikumisel on klambritega kinnitatud juhtmed alati liikumisega kaasas, mistõttu nad ei jää roboti tööle ette.



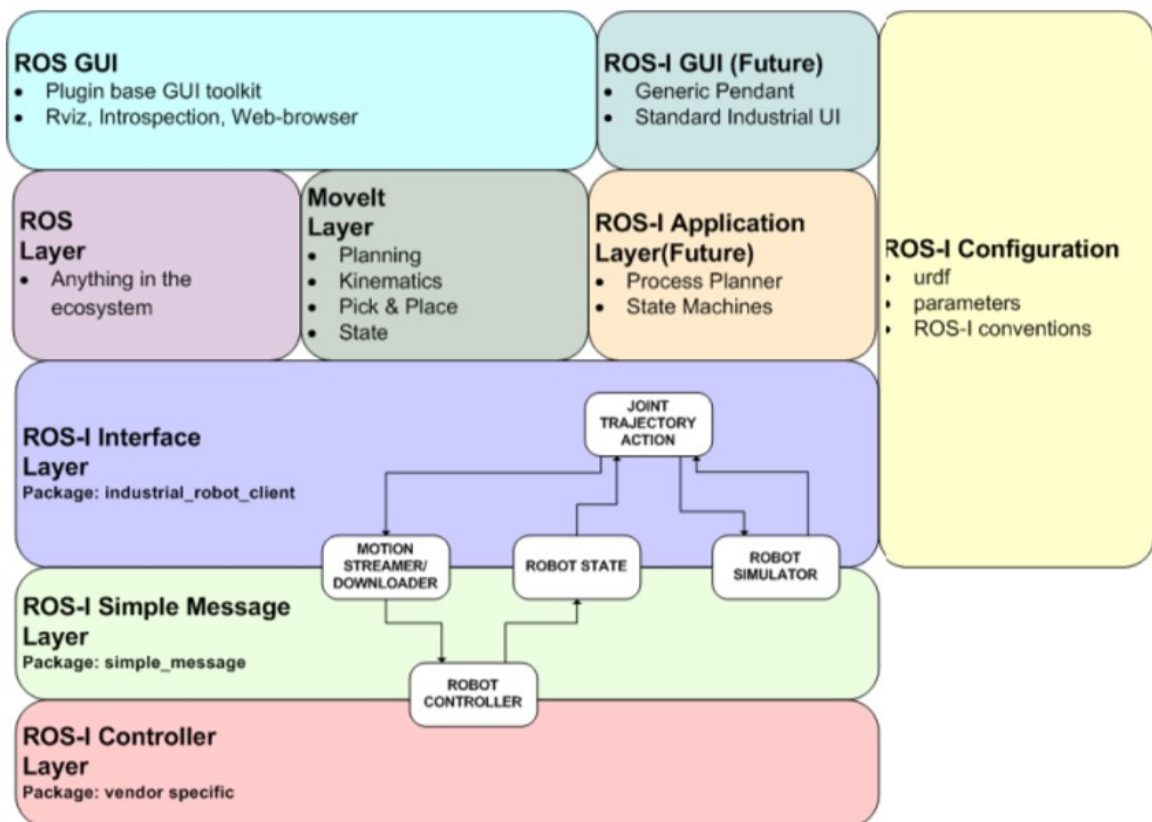
Sele 3.12 Spetsiaalsed kinnitusklambrid robotile UR5 [39]

Tänu spetsiaalse kinnitusklambri esteetilisusele, kiirele monteerimisvõimalusele ning paindlikkusele leiti, et selline lahendus sobiks kõige paremini ka Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis kasutatavale robotile UR5. Kiire monteerimisvõimalus lubab hõlpsalt vahetada kahte moodulit ilma suurema ajakuluta.

4. HAARATSI JA STEREOKAAMERA VAHELINE SUHTLUS

Kahe mooduli maksimaalse efektiivsuse saavutamiseks on tarvis nende omavaheline suhtlus. Tarvilik on saada stereokaamerast vastava objekti asukoht, mida haarats järgnevalt manipuleerima peab. Selle suhtluse korraldamiseks on hea aluseks võtta magistrandi Lei Shi lõputöö, kes arendas antud stereokaamera.

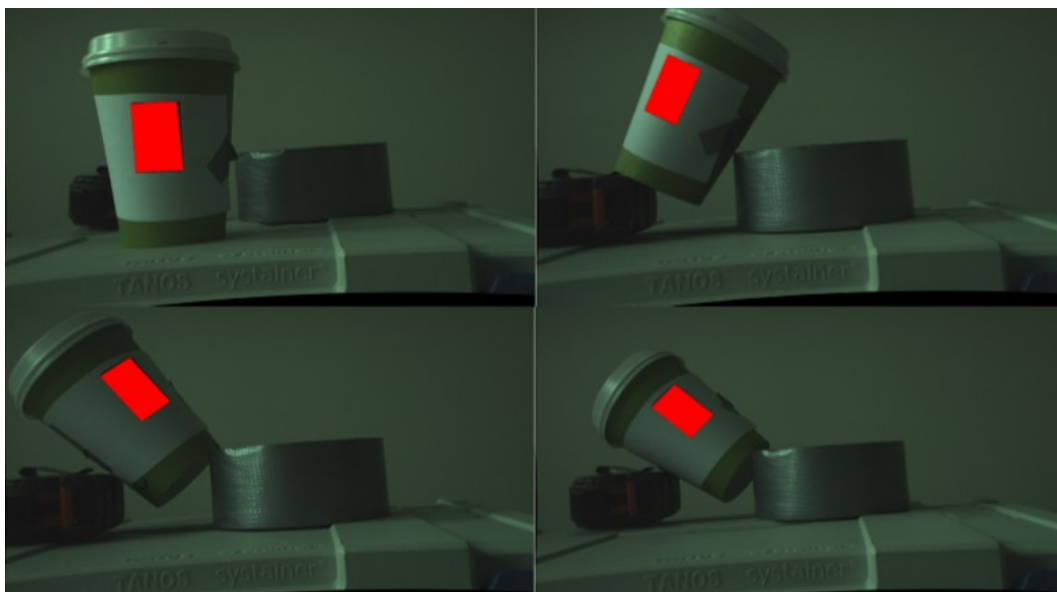
Kogu tarkvara põhineb ROS süsteemil. Suurim põhjus ROS'i eelistamiseks on fakt, et tegemist on paindliku platvormiga. Kui tarkvara on ROS keskkonnas välja arendatud, saab seda siduda teiste manipulaatoritega ilma, et seda tarkvara mingil moel muutma peaks. Lisaks soosib ROS'i arhitektuur tiimitööd ning edasist arendamist. ROS ülesehitus kätkeb endast „tuuma“ ning temale alluvaid eraldiseisvaid „sõlmesid“. Need „sõlmed“ peavad üksteisega infovahetust, mida uuendatakse perioodiliselt. Tänu sellele saab informatsiooni saata ühest „sõlmest“ teise. Näiteks saab edastada sarnaselt ühest üksusest kaamerapilti teise. [40]



Sele 4.1 ROS ülesehituse skeem [41]

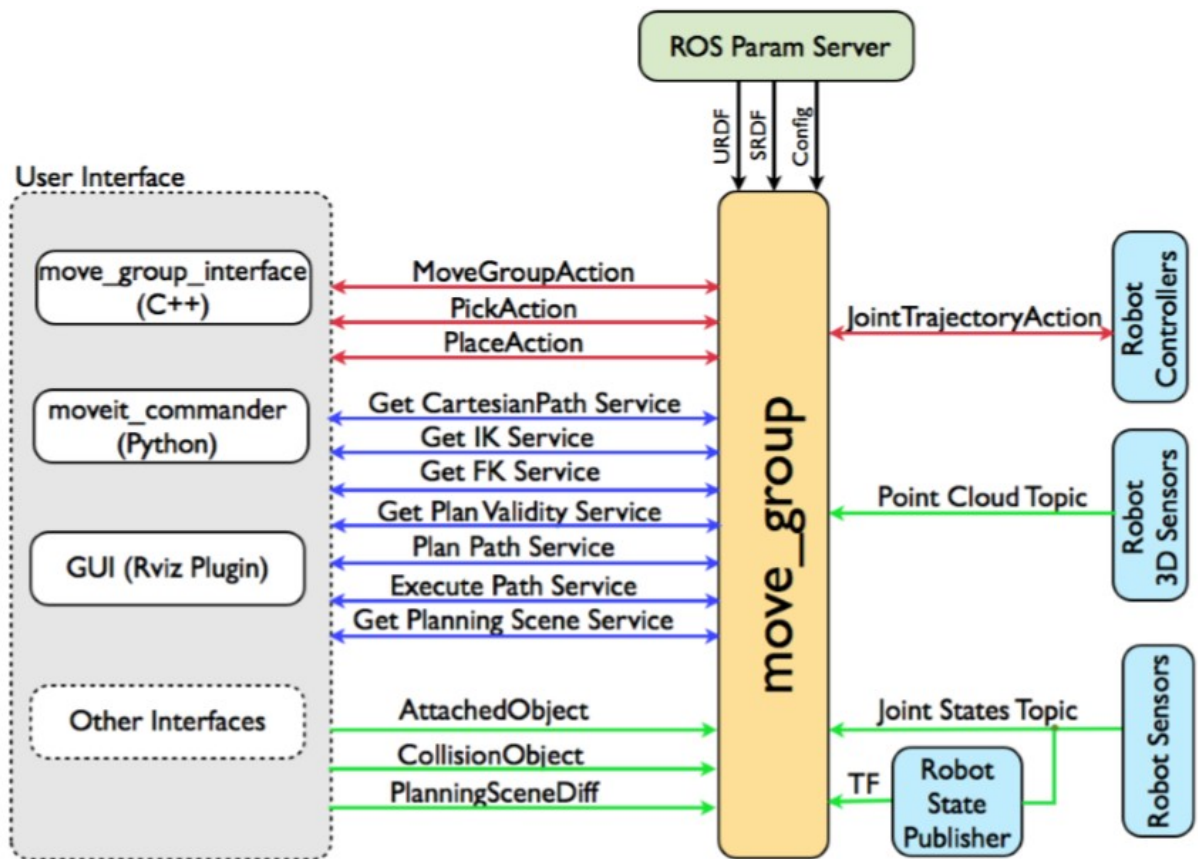
Täpselt samal põhimõttel on võimalik ka suhelda kaamerale ning haaratsil. Seel 4.1 on antud ülesehituse illustratsioon. Kuna Universal Robots on teinud ROS integratsiooni oma robotites äärmiselt lihtsaks, siis on ka kahe mooduli omavahelist suhtlust lihtsam korraldada. Õnneks on roboti juhtimissüsteemile ROS süsteem lahti pakitud koos lisadega ning uued draiverid peale laetud. Kaamerast saadakse objekti koordinaadid, mis seejärel salvestatakse ühes „sõlmes“ ning saadetakse seejärel teise üksusesse või siis otse „tuuma“.

Arendatud stereokaamera on ülesehitatud nõndaviisi, et ta tuvastaks nelinurkseid objekte nagu on näha seel 4.2. Selle tarbeks annab ta objekti iga nurga XYZ koordinaadid. Tänu sellele on ümarate objektide tuvastamine raskendatud. Selle tarbeks on tarvis ümarale objektile kleepida nelinurkne märgistus, mis siis aitab kaamerale objekti tuvastada, täpsemalt siis seda märgistust tuvastada. Lisas 9 on näidatud, kuidas kaamerale käivitada ning objekti õpetada.



Sele 4.2 Kaamera on tuvastanud nelinurkse objekti [42]

ROS'i süsteemi kuulub ka MoveIT pakett, mis võimaldab planeerida liikumist, trajektoore ning telgede suhtlust ümbritseva maailmaga. Pakett toetab mitmeid roboteid, kaasa arvatud Universal Robotsi roboteid. Seel 4.3 on näha MoveIT paketi ülesehitus. Üksus nimega `move_group` tegeleb kõigi funktsionaalsustega. Kasutajaliidese poolt on toetatud C++ ja Rviz. See võimaldab paindlike integratsioonivõimalusi. [43]

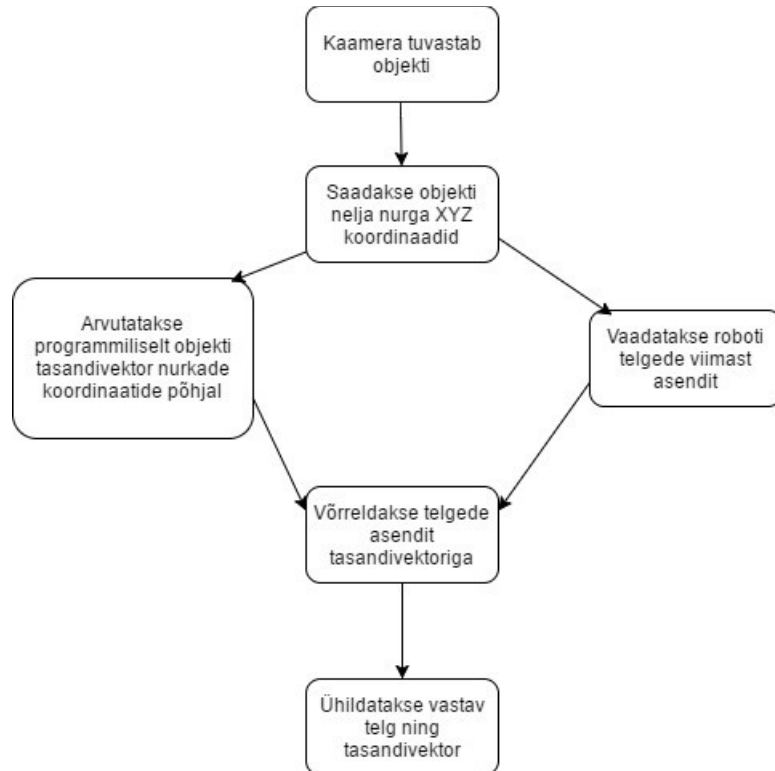


Sele 4.3 Move_group paketi ülesehitus [44]

Nagu näha võimaldab `move_group` üksus kontrollida väga suurel hulgal robotiga seotud funktsionaalsusi. Kõige enam on tarvis C++ programmeeritavat liikumiskäsklust ning *pick&place* käsklusi, kuna need on haaratsi otsesed tööväljundid. Moodulite omavaheline suhtlus käib siis läbi antud üksuste. Stereokaamera vahendusel saadakse info objekti asukoha kohta, mis siis edastatakse järgmisesse üksusesse, mis kontrollib roboti liikumist ning haaratsi toiminguid. Haaratsi avamiseks ning sulgemiseks kasutatakse vastavat digitaalset väljundit nagu on seletatud alapeatükis 2.2.2. Selle sama väljundi saab defineerida muutujaks ning pärast seda on võimalik selle muutuja väärtuseid lihtsalt koodisiseselt muuta. Lisas 5 on võimalik näha C++ näidiskoodi roboti liigutamiseks.

Üks murekohti praeguse lahenduse juures on kaamera võimekus tuvastada olukorda, kus objekt on roboti suhtes nurga all. Kaamera suudab tuvastada nelinurga iga nurga koordinaadid, aga ei suuda tuvastada, kas objekt on mingisuguse nihke all seoses robotiga. Sellise olukorra lahendamiseks on erinevaid võimalusi. Käsitleme põgusalt ühte neist. Kaamera suudab tuvastada nelja nurga koordinaadid. Nende koordinaatide puhul tuleb teha

mõningad arvutused, et kätte saada antud kujundi tasandivektor. Teada on roboti telgede viimane asetus. Seega on tarvis roboti vastav töötelg seada vastavusse antud tasandivektoriga ehk pind on risti roboti tööteljega.



Sele 4.4 Plokkdiagramm nurga all objektide haaramiseks

Kokkuvõtvalt on haaratsi ning kaamera vaheline suhtlus suhteliselt hõlpsalt teostatav tänu ROS ning MoveIT tarkvarale. Tarkvaralahendus jätab hea võimaluse tööle edasiarendusi luua ning roboti tööd efektiivsemaks muuta.

KOKKUVÕTE

Antud bakalaureusetöö käsitleb haaratsi ning kaameramooduli disainimist kuue vabadusastmega robotile UR5. Haaratsi näol on tegemist töökindla kahekäpalise konstruktsiooniga, mis töötab lineaarsel elektrimootoril. Haaratsi juhtimine käib manuaalselt läbi roboti kasutajaliidese vastavas tööaknas. Haaratsit on võimalik juhtida programmiliselt kui kirjutada C++ keeles juhtkood. Haardetugevust kontrollitakse jõutundliku takistiga, mis tänu elektriskeemile muundab talle mõjuvad jõud pingeks ning saadab selle info roboti kontrollerisse, kus saadud pinge arvutatakse ümber jõuks. Disainitud kaameramooduli korpus kaitseb kaameraid ning pakub kindlat ühendust ka micro USB 3.0 juhtmetele, mis roboti liikumisel muidu võiksid kergelt puruneda. Vabadele juhtmetele pakuti välja vastav kinnituslahendus, et need roboti töö käigus telgede taha ei takerduks. Kaameramooduli ning haaratsi disainimisel võeti arvesse kaamerate töövälja ehk haarats ei sega kaamerate tööd. Mõlemat moodulit saab kasutada nii üksikult kui ka koos. Moodulid kinnitatakse nii omavahel kui ka robotiga hõlpsalt selleks ettenähtud ühenduselemendiga, mida saab vajadusel kiirelt kokku panna ning lahti võtta. Stereokaamera ning haaratsi omavaheline suhtlus käib läbi ROSi ning sellega kaasaskäivate liideste.

Bakalaureusetöoga täideti kõik algselt püstitatud eesmärgid. Töö autor on lõpptulemusega rahul ning leiab, et töö koostamisel suuri probleeme ei esinenud. Tööle on võimalik teha veel mõningaid edasiarendusi. Lähtuvalt vajadusest on võimalik disainida haaratsile rohkem käppasid, mis lubaksid kerakujulisi objekte paremini stabiliseerida. Lisakäppade lisamisel tuleb meeles pidada kaamera töövälja. Võimalik on ka tarkvaraline edasiarendus, kus luuakse eraldi kasutajaliides, mis muudab haaratsi kontrollimise lihtsamaks, et ei peaks eraldi tööaknaid vahetama teatud tegevuste jaoks. Kaamerasüsteemi edasiarendusena oleks võimalik tekitada lahendus, mis suudab ka õppida erineva kujuga objekte, mis ei ole ainult nelinurksed.

SUMMARY

In this thesis, a gripper and camera modulus were designed for a 6 DoF robot UR5. The gripper is a reliable 2-hand construction, which is moved by a linear actuator. Controlling of the gripper can be done manually from the robot's teaching pendant in a corresponding tab. It is possible to move the robot automatically by writing code in C++ language. Gripping strength is controlled by a force sensitive resistor that transforms the pressure applied to voltage and sends that information to the robot controller, where corresponding calculations are done to get the measurement of the force. Designed camera modulus will provide protection to the cameras and ensure steady connection between the micro USB 3.0 and cameras. Connection method is proposed for the loose wiring. Camera field of view was taken into account while designing the gripper and camera modulus so that the gripper won't interrupt the camera. Both of the gripper and camera modulus can be used together or separately. They are connected with a special connection detail that ensures fast and easy mounting. Communication between the gripper and camera is done with ROS software and all the add-ons that come with ROS.

Thesis completed all the objectives that were set in the beginning. The author is pleased with the outcome of the work. Further development can be made regarding this work. It is possible to design more hands to the gripper to provide more stability while gripping round objects. Field of view of the camera should be taken into account while designing additional hands. Additional software development can also be done. It is possible to create a separate user interface to control the gripper. That would make the controlling of the gripper much faster and easier. Regarding the camera system, it could be possible to develop the system to be able to recognize different shaped objects, not just rectangular.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Vacuum grippers. [WWW] <http://www.roboticsbible.com/vacuum-grippers.html> (26.04.2017)
2. Vaakumhaarats. [WWW] https://cdn.schmalz.com/media/_processed_/area-gripping-system-fxp-cfrp_cms02d1f0939d.jpg (26.04.2017)
3. Pneumatic gripper. [WWW] <http://www.omega.nl/prodinfo/grippers.html> (26.04.2017)
4. Pneumaatilise haaratsi liikumine. [WWW] <http://www.appliedrobotics.com/wp-content/uploads/2015/12/angular1-300x175.jpg> (27.04.2017)
5. Pneumaatiline haarats. [WWW] http://media.rs-online.com/t_large/R7294870-01.jpg (27.04.2017)
6. Hydraulic grippers. [WWW] <http://www.mobilehydraulictips.com/hydraulic-grippers> (27.04.2017)
7. Hüdrauliline haarats. [WWW] http://img.directindustry.com/images_di/photo-m2/15660-8836472.jpg (27.04.2017)
8. Elektriline haarats. [WWW] <http://blog.robotiq.com/hs-fs/hub/13401/file-2505231351-jpg/images/2-Finger-85-Adaptive-Robot-Gripper-encompassing.jpg> (27.04.2017)
9. Top 5 Advantages of Servo-Electric Grippers. [WWW] <http://blog.robotiq.com/bid/37840/Top-5-Advantages-of-Servo-Electric-Grippers> (01.05.2017)
10. Vittor, T., Staab, H., Breisch, S., Soetebier, S., Stahl, T., Hackbarth, A., Kock, S. A Flexible Robotic Gripper for Automation of Assembly Tasks. – *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, 25-27 mai, 2011.
11. Monteiro, S.J. Adaptive Gripping Technology, Norwegian University of Science and Technology, 2010, lk 1-2.
12. Brown, E., Rodenberga, T., Amendt, J., Mozeikac, A., Steltz, E., Zakind, M.R., Lipson, A. and Heinrich M. Jaegera. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. – *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (44), 18809-18814.
13. Kraanulhaarats. [WWW] <http://empirerobotics.com/img/jammingschemagreen.png> (01.05.2017)
14. Monteiro, S.J. Adaptive Gripping Technology, Norwegian University of Science and Technology, 2010, lk 8-9.
15. Liigendatud sõrmedega haarats. [WWW] http://www.robotshop.com/media/catalog/product/cache/1/image/900x900/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/r/o/robotiq-adaptive-gripper_1.jpg (01.05.2017)

16. MultiChoiceGripper. [WWW] https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/333986/Festo_MultiChoiceGripper_en.pdf (01.05.2017)
17. Festo multichoice gripper. [WWW] https://www.festo.com/net/en-gb_gb/SupportPortal/Downloads/367236/352972/FTO3160%20MultiChoiceGripper%20Image%201.jpg (01.05.2017)
18. Universal Robots UR5. [WWW] http://www.zacobria.com/images/robot_complete.jpg (03.05.2017)
19. Universal Robots UR5. [WWW] <https://www.universal-robots.com/media/1003684/ur5-a-highly-flexible-robot-arm-big.png> (03.05.2017)
20. Universal Robots, UR5/CB3 User manual, ver. 3.0, rev. 15965, I lk 16.
21. Festo Finray. [WWW] <http://www.foodengineeringmag.com/ext/resources/Issues/June2012/fex0612fp4-slide-gripper.jpg?1339174134> (03.05.2017)
22. What's The Difference Between DC, Servo & Stepper Motors? [WWW] <https://www.modmypi.com/blog/whats-the-difference-between-dc-servo-stepper-motors> (09.05.2017)
23. Stepper motor. [WWW] http://2.bp.blogspot.com/-yhKSTGwrIX4/UfrLm60CnOI/AAAAAAAAADM/NY5BMn1oOp0/s1600/stepper_motor.jpg (09.05.2017)
24. Servomotor. [WWW] <https://www.electromate.com/assets/images/content/MDM-5000.jpg> (09.05.2017)
25. DC motor. [WWW] http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/61070-3666839.jpg (09.05.2017)
26. Actuonix L12-R-100-210-6. [WWW] <https://www.servocity.com/140-mm-stroke-11-lb-thrust-light-duty-linear-servo-6863> (09.05.2017)
27. Actuonix L12-R-100-210-6. [WWW] <https://www.servocity.com/media/catalog/product/cache/1/image/438x280/602f0fa2c1f0d1ba5e241f914e856ff9/1/1/116-r-140-35-6-angle-3-1500px.jpg> (09.05.2017)
28. Universal Robots, UR5/CB3 User manual, ver. 3.0, rev. 15965, I lk 28.
29. Universal Robots UR5. [WWW] <http://1.bp.blogspot.com/-hpT3H9AVDK4/UymZL7LxR5I/AAAAAAAAAC34/aYzPjmw640Y/s1600/ur-robot.jpg> (13.05.2017)

30. Lumberg RKMV 8-354 tööstuskaabel. [WWW] http://www.conrad.com/medias/global/ce/6000_6999/6100/6150/6154/1234965_BB_00_FB.EPS_1000.jpg (13.05.2017)
31. Universal Robots, UR5/CB3 User manual, ver. 3.0, rev. 15965, II lk 19.
32. Universal Robots, UR5/CB3 User manual, ver. 3.0, rev. 15965, II lk 25.
33. Jõutundliku takisti elektriskeem pilt, interlink electronics FSR 408 Data sheet, lk 1.
34. Jõutundliku takisti karakteristik pilt, interlink electronics FSR 408 Data sheet, lk 3.
35. IGUS energy chain. [WWW] <https://us.v-cdn.net/6027406/uploads/editor/ju/9vcctmymq743.png> (14.05.2017)
36. Kaitsvad käised robotil UR5. [WWW] <https://us.v-cdn.net/6027406/uploads/editor/2z/yzxk8oqotvv.jpg> (14.05.2017)
37. Velcro One-wrap. [WWW] <https://www.velcro.com/~-/media/activecommerce/velcro/products%20images/ties/9043802application.ashx?mw=445&mh=445> (14.05.2017)
38. Robosuit UR5, Võrgumaterjal, pilt) Saadaval: <https://us.v-cdn.net/6027406/uploads/editor/4d/ksoq85fq71c3.jpg> (14.05.2017)
39. Spetsiaalne kinnitusklamber. [WWW] <https://us.v-cdn.net/6027406/uploads/editor/30/vayvz6yp9lqn.jpg> (14.05.2017)
40. Lei Shi, Vision Guiding System for 6-DoF Robotic Manipulator, Tallinna Tehnikaülikool, 2017, lk 39.
41. Lei Shi, Vision Guiding System for 6-DoF Robotic Manipulator, Tallinna Tehnikaülikool, 2017, lk 41.
42. Lei Shi, Vision Guiding System for 6-DoF Robotic Manipulator, Tallinna Tehnikaülikool, 2017, lk 45.
43. Lei Shi, Vision Guiding System for 6-DoF Robotic Manipulator, Tallinna Tehnikaülikool, 2017, lk 40.
44. Lei Shi, Vision Guiding System for 6-DoF Robotic Manipulator, Tallinna Tehnikaülikool, 2017, lk 41.
45. Actuonix L12-R-100-210-6 spetsifikatsioon. [WWW] https://www.servocity.com/media/attachment/file/d/a/data_sheets_1.pdf (09.05.2017)
46. Kaamera L2.1 Kaamera LI-USB30-M021 spetsifikatsioon. [WWW] <https://www.leopardimaging.com/LI-USB30-M021.html> (02.05.2017)

47. Jõutundliku takisti FSR 408 spetsifikatsioonid. [WWW] <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/FSR408-Layout2.pdf> (16.05.2017)
48. EOS PA12 karakteristikud. [WWW] <http://eos.materialdatacenter.com/eo/material/pdf/242957/Alumide?sLg=en&rnd=1495378828891> (16.05.2017)
49. UR5 tehnilised spetsifikatsioonid. [WWW] https://www.universal-robots.com/media/1514597/101081_199901_ur5_technical_details_web_a4_art03_rls_eng.pdf (16.05.2017)
50. Universal Robots, UR5/CB3 User manual, ver. 3.0, rev. 15965, I lk 20.
51. Universal Robots, UR5/CB3 User manual, ver. 3.0, rev. 15965, I lk 26.
52. Universal Robots, UR5/CB3 User manual, ver. 3.0, rev. 15965, I lk 28.
53. Universal Robots, UR5/CB3 User manual, ver. 3.0, rev. 15965, I lk 30.

LISAD

Lisa 1 Mootori spetsifikatsioon

L12 Specifications				
<u>Gearing Option</u>	<u>50:1</u>	<u>100:1</u>	<u>210:1</u>	
Peak Power Point	17N @ 14mm/s	31N @ 7mm/s	62N @ 3.2mm/s	
Peak Efficiency Point	10N @ 19mm/s	17N @ 10mm/s	36N @ 4.5mm/s	
Max Speed <i>(no load)</i>	25mm/s	13mm/s	6.5mm/s	
Max Force <i>(lifted)</i>	22N	42N	80N	
Back Drive Force <i>(static)</i>	12N	22N	45N	
<u>Stroke Option</u>	10 mm	30mm	50mm	100mm
Mass	28 g	34 g	40 g	56 g
Repeatability <i>(-I,-R,-P&LAC)</i>	±0.1 mm	±0.2 mm	±0.3 mm	±0.5 mm
Max Side Load <i>(extended)</i>	50N	40N	30N	15N
Closed Length <i>(hole to hole)</i>	62mm	82mm	102mm	152mm
Potentiometer <i>(-I, -R, -P)</i>	1kΩ±50%	3kΩ±50%	6kΩ±50%	11kΩ±50%
<u>Voltage Option</u>	6VDC			12VDC
Max Input Voltage	7.5V			13.5V
Stall Current	460mA			185mA
Standby Current <i>(-I/-R)</i>	7.2mA			3.3mA
Operating Temperature	-10°C to +50°C			
Potentiometer Linearity	Less than 2.00%			
Max Duty Cycle	20 %			
Audible Noise	55dB @ 45cm			
Ingress Protection	IP-54			
Mechanical Backlash	0.2mm			
Limit Switches <i>(-S)</i>	Max. Current Leakage: 8uA			
Maximum Static Force	200N			

1 - Control Option Specific values are identified with -I, -R, -P, -S, and LAC

2 - 1 N (Newton) = 0.225 lbf (pound-force) & 25.4mm=1 Inch

3 - A powered-off actuator will statically hold a force up to the Backdrive Force

4 - Actuators should be tested in each specific application to determine their effective life under those loading conditions and environment.

All information provided on this datasheet is subject to change. Purchase or use of Actuonix actuators is subject to acceptance of our terms and conditions as posted here: <http://www.actuonix.com/terms.asp>

Sele L1.1 Mootori Actuonix L12-R-100-210-6 spetsifikatsioon [45]

Lisa 2 Kaamera LI-USB30-M021 spetsifikatsioonid

LI-USB30-M021X 720p Global Shutter USB 3.0 Camera

Features:

- Aptina MT9M021 1.2M pixels CMOS Color / Mono Sensor
- Active pixel: 1280H x 960V
- Frame rate: 60fps
- Optical format: 1/3"
- Pixel size: 3.75x3.75um
- Global Shutter for high speed application
- RAW data USB 3.0 real time streaming
- CS / M12 lens mount support (Default: M12 lens)
- USB 3.0 interface
- Power: USB 3.0 +5VDC power source
- Compact size: 26mmx26mm
- Color Part#: **LI-USB30-M021C**
- Mono Part#: **LI-USB30-M021M**

SDK Supported:

- Source Code in C#
- Support External Trigger or Software Trigger
- Capture & Display
- OpenCV supported through Emgu
- RAW to RGB Conversion
- Save file as BMP & RAW format

Application:

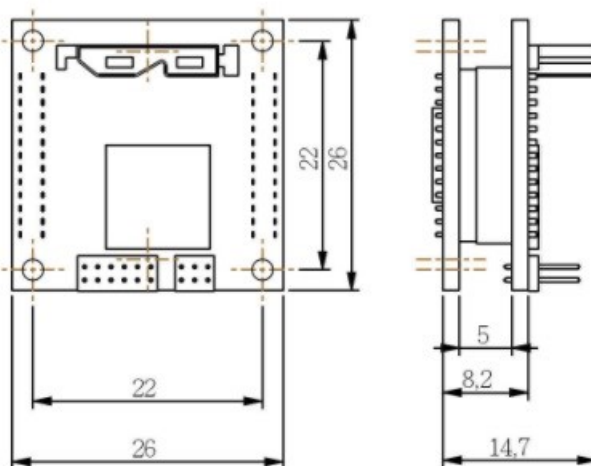
- Machine Vision
- Medical Camera
- Scientific Camera

Camera Specification:

- USB 3.0 Camera Datasheet
- USB 3.0 Camera User's Guide
- USB 3.0 Camera Setup Guide



M021 USB 3.0 Camera



M021 USB 3.0 Module

Sele L2.1 Kaamera LI-USB30-M021 spetsifikatsioon [46]

Lisa 3 Jõutundliku takisti FSR 408 spetsifikatsioonid

Device Characteristics

Feature	Condition	Value*	Notes
Actuation Force		0.1 Newtons	
Force Sensitivity Range		0.1 - 10.0 ² Newtons	
Force Repeatability ³	(Single part)	± 2%	
Force Resolution ³		continuous	
Force Repeatability ³	(Part to Part)	±6%	
Non-Actuated Resistance		10M W	
Size		622.3mm	
Thickness Range		0.2 - 1.25 mm	
Stand-Off Resistance		>10M ohms	Unloaded, unbent
Switch Travel	(Typical)	0.05 mm	Depends on design
Hysteresis ³		+10%	$(R_{F+} - R_{F-})/R_{F+}$
Device Rise Time		<3 microseconds	measured w/steel ball
Long Term Drift		<5% per log ₁₀ (time)	35 days test, 1kg load
Temp Operating Range	(Recommended)	-30 - +70 °C	
Number of Actuations	(Life time)	10 Million tested	Without failure

Sele L3.1 Jõutundliku takisti FSR408 spetsifikatsioonid [47]

Lisa 4 EOS PA12 karakteristikud

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Shore D hardness (15s)	76	-	ISO 868

3D Data	Value	Unit	Test Standard
The properties of parts manufactured using additive manufacturing technology (e.g. laser sintering, stereolithography, Fused Deposition Modelling, 3D printing) are, due to their layer-by-layer production, to some extent direction dependent. This has to be considered when designing the part and defining the build orientation.			
Tensile Modulus			ISO 527-1/-2
X Direction	3800	MPa	
Y Direction	3800	MPa	
Tensile Strength			ISO 527-1/-2
X Direction	48	MPa	
Y Direction	48	MPa	
Strain at break (X Direction)	4	%	ISO 527-1/-2
Charpy impact strength (+23°C, X Direction)	29	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength (+23°C, X Direction)	4.6	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Flexural Modulus (23°C, X Direction)	3600	MPa	ISO 178
Flexural Strength (X Direction)	72	MPa	ISO 178
Temp. of deflection under load			ISO 75-1/-2
1.80 MPa, X Direction	144	°C	
0.45 MPa, X Direction	175	°C	
Volume resistivity (X Direction)	3E12	Ohm*m	IEC 60093

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (20°C/min)	176	°C	ISO 11357-1/-3
Temp. of deflection under load			ISO 75-1/-2
1.80 MPa	144	°C	
0.45 MPa	175	°C	
Vicat softening temperature (50°C/h 50N)	169	°C	ISO 306

Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
Relative permittivity			IEC 60250
100Hz	13	-	
1MHz	10	-	
Dissipation factor (1MHz)	180	E-4	IEC 60250
Surface resistivity	5E14	Ohm	IEC 60093
Electric strength	0.1	kV/mm	IEC 60243-1

Sele L4.1 EOS PA12 karakteristikud [48]

Lisa 5 C++ kood haaratsi juhtimiseks

```
rosdep install --from-paths . --ignore-src --rosdistro kinetic
catkin build
roslaunch pr2_moveit_config demo.launch
roslaunch moveit_tutorials move_group_interface_tutorial.launch
```

```
static const std::string PLANNING_GROUP = "right_arm";
moveit::planning_interface::MoveGroupInterface move_group(PLANNING_GROUP);
moveit::planning_interface::PlanningSceneInterface planning_scene_interface;
const robot_state::JointModelGroup *joint_model_group =
    move_group.getCurrentState()->getJointModelGroup(PLANNING_GROUP);

namespace rvt = rviz_visual_tools;
moveit_visual_tools::MoveItVisualTools visual_tools("odom_combined");
visual_tools.deleteAllMarkers();
visual_tools.loadRemoteControl();
Eigen::Affine3d text_pose = Eigen::Affine3d::Identity();
text_pose.translation().z() = 1.75; // above head of PR2
visual_tools.publishText(text_pose, "MoveGroupInterface Demo", rvt::WHITE, rvt::XLARGE);
visual_tools.trigger();

ROS_INFO_NAMED("tutorial", "Reference frame: %s",
move_group.getPlanningFrame().c_str());
ROS_INFO_NAMED("tutorial", "End effector link: %s",
move_group.getEndEffectorLink().c_str());

geometry_msgs::Pose target_pose1;
target_pose1.orientation.w = 1.0;
target_pose1.position.x = 0.28;
target_pose1.position.y = -0.7;
target_pose1.position.z = 1.0;
move_group.setPoseTarget(target_pose1);
moveit::planning_interface::MoveGroupInterface::Plan my_plan;

bool success = move_group.plan(my_plan);

ROS_INFO_NAMED("tutorial", "Visualizing plan 1 (pose goal) %s", success ? "" :
"FAILED");

ROS_INFO_NAMED("tutorial", "Visualizing plan 1 as trajectory line");
visual_tools.publishAxisLabeled(target_pose1, "pose1");
visual_tools.publishText(text_pose, "Pose Goal", rvt::WHITE, rvt::XLARGE);
visual_tools.publishTrajectoryLine(my_plan.trajectory_, joint_model_group);
visual_tools.trigger();
visual_tools.prompt("next step");

moveit::core::RobotStatePtr current_state = move_group.getCurrentState();
std::vector<double> joint_group_positions;
current_state->copyJointGroupPositions(joint_model_group, joint_group_positions);
joint_group_positions[0] = -1.0; // radians
move_group.setJointValueTarget(joint_group_positions);

success = move_group.plan(my_plan);
ROS_INFO_NAMED("tutorial", "Visualizing plan 2 (joint space goal) %s", success ? "" :
"FAILED");
visual_tools.deleteAllMarkers();
visual_tools.publishText(text_pose, "Joint Space Goal", rvt::WHITE, rvt::XLARGE);
visual_tools.publishTrajectoryLine(my_plan.trajectory_, joint_model_group);
```



```

visual_tools.trigger();
visual_tools.prompt("next step");

moveit_msgs::OrientationConstraint ocm;
ocm.link_name = "r_wrist_roll_link";
ocm.header.frame_id = "base_link";
ocm.orientation.w = 1.0;
ocm.absolute_x_axis_tolerance = 0.1;
ocm.absolute_y_axis_tolerance = 0.1;
ocm.absolute_z_axis_tolerance = 0.1;
ocm.weight = 1.0;
moveit_msgs::Constraints test_constraints;
test_constraints.orientation_constraints.push_back(ocm);
move_group.setPathConstraints(test_constraints);
robot_state::RobotState start_state(*move_group.getCurrentState());
geometry_msgs::Pose start_pose2;
start_pose2.orientation.w = 1.0;
start_pose2.position.x = 0.55;
start_pose2.position.y = -0.05;
start_pose2.position.z = 0.8;
start_state.setFromIK(joint_model_group, start_pose2);
move_group.setStartState(start_state);
move_group.setPoseTarget(target_pose1);
move_group.setPlanningTime(10.0);

success = move_group.plan(my_plan);
ROS_INFO_NAMED("tutorial", "Visualizing plan 3 (constraints) %s", success ? "" :
"FAILED");

visual_tools.deleteAllMarkers();
visual_tools.publishAxisLabeled(start_pose2, "start");
visual_tools.publishAxisLabeled(target_pose1, "goal");
visual_tools.publishText(text_pose, "Constrained Goal", rvt::WHITE, rvt::XLARGE);
visual_tools.publishTrajectoryLine(my_plan.trajectory_, joint_model_group);
visual_tools.trigger();
visual_tools.prompt("next step");
move_group.clearPathConstraints();

```

Lisa 6 UR5 tehnilised spetsifikatsioonid

UR5

Performance

Repeatability	±0.1 mm / ±0.0039 in (4 mils)
Ambient temperature range	0-50°
Power consumption	Min 90W, Typical 150W, Max 325W
Collaboration operation	15 advanced adjustable safety functions. TuV NORD Approved Safety Function Tested in accordance with: EN ISO 13849-2:2008 PL d

Specification

Payload	5 kg / 11 lbs
Reach	850 mm / 33.5 in
Degrees of freedom	6 rotating joints
Programming	Polyscope graphical user interface on 12 inch touchscreen with mounting

Movement

Axis movement robot arm	Working range	Maximum speed
Base	± 360°	± 180°/Sec.
Shoulder	± 360°	± 180°/Sec.
Elbow	± 360°	± 180°/Sec.
Wrist 1	± 360°	± 180°/Sec.
Wrist 2	± 360°	± 180°/Sec.
Wrist 3	± 360°	± 180°/Sec.
Typical tool		1 m/Sec. / 39.4 in/Sec.

Features

IP classification	IP54
ISO Class Cleanroom	5
Noise	72dB
Robot mounting	Any
I/O ports	Digital in 2 Digital out 2 Analog in 2 Analog out 0
I/O power supply in tool	12 V/24 V 600 mA in tool

Physical

Footprint	Ø 149mm
Materials	Aluminium, PP plastics
Tool connector type	M8
Cable length robot arm	6 m / 236 in
Weight with cable	18.4 kg / 40.6 lbs

CONTROL BOX

Features

IP classification	IP20
ISO Class Cleanroom	6
Noise	<65dB(A)
I/O ports	Digital in 16 Digital out 16 Analog in 2 Analog out 2
I/O power supply	24V 2A
Communication	TCP/IP 100Mbit, Modbus TCP, Profinet, EthernetIP
Power source	100-240 VAC, 50-60 Hz
Ambient temperature range	0-50°

Physical

Control box size (WxHxD)	475mm x 423mm x 268mm / 18.7 x 16.7 x 10.6 in
Weight	15 kg / 33.1 lbs
Materials	Steel

TEACH PENDANT

Features

IP classification	IP20
Materials	Aluminium, PP
Weight	1.5 kg / 3.3 lbs
Cable length	4.5 m / 177 in



Sele L6.1 UR5 tehnilised spetsifikatsioonid [49]

Lisa 7 UR5 kontrolleri sisendite ja väljundite spetsifikatsioonid

Terminals	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
<i>Internal 24V power supply</i>					
[PWR - GND]	Voltage	23	24	25	V
[PWR - GND]	Current	0	-	2	A
<i>External 24V input requirements</i>					
[24V - 0V]	Voltage	20	24	29	V
[24V - 0V]	Current	0	-	6	A

Terminals	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
<i>Digital outputs</i>					
[COx / DOx]	Current	0	-	1	A
[COx / DOx]	Voltage drop	0	-	0.5	V
[COx / DOx]	Leakage current	0	-	0.1	mA
[COx / DOx]	Function	-	PNP	-	Type
[COx / DOx]	IEC 61131-2	-	1A	-	Type
<i>Digital Inputs</i>					
[EIx/SIx/CIx/DIx]	Voltage	-3	-	30	V
[EIx/SIx/CIx/DIx]	OFF region	-3	-	5	V
[EIx/SIx/CIx/DIx]	ON region	11	-	30	V
[EIx/SIx/CIx/DIx]	Current (11-30V)	2	-	15	mA
[EIx/SIx/CIx/DIx]	Function	-	PNP	-	Type
[EIx/SIx/CIx/DIx]	IEC 61131-2	-	3	-	Type

Sele L7.1 UR5 kontrolleri sisendite ja väljundite spetsifikatsioonid [50]

Terminals	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
<i>Analog input in current mode</i>					
[AIx - AG]	Current	4	-	20	mA
[AIx - AG]	Resistance	-	20	-	ohm
[AIx - AG]	Resolution	-	12	-	bit
<i>Analog input in voltage mode</i>					
[AIx - AG]	Voltage	0	-	10	V
[AIx - AG]	Resistance	-	10	-	Kohm
[AIx - AG]	Resolution	-	12	-	bit
<i>Analog output in current mode</i>					
[AOx - AG]	Current	4	-	20	mA
[AOx - AG]	Voltage	0	-	10	V
[AOx - AG]	Resolution	-	12	-	bit
<i>Analog output in voltage mode</i>					
[AOx - AG]	Voltage	0	-	10	V
[AOx - AG]	Current	-20	-	20	mA
[AOx - AG]	Resistance	-	1	-	ohm
[AOx - AG]	Resolution	-	12	-	bit

Sele L7.2 UR5 kontrolleri sisendite ja väljundite spetsifikatsioonid [51]

Lisa 8 UR5 tööriista sisendite ning väljundite spetsifikatsioonid

Color	Signal
Red	0V (GND)
Gray	0V/+12V/+24V (POWER)
Blue	Digital output 8 (DO8)
Pink	Digital output 9 (DO9)
Yellow	Digital input 8 (DI8)
Green	Digital input 9 (DI9)
White	Analog input 2 (AI2)
Brown	Analog input 3 (AI3)

Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Supply voltage in 24V mode	-	24	-	V
Supply voltage in 12V mode	-	12	-	V
Supply current in both modes	-	-	600	mA

Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Voltage when open	-0.5	-	26	V
Voltage when sinking 1A	-	0.05	0.20	V
Current when sinking	0	-	1	A
Current through GND	0	-	1	A

Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Input voltage	-0.5	-	26	V
Logical low voltage	-	-	2.0	V
Logical high voltage	5.5	-	-	V
Input resistance	-	47k	-	Ω

Sele L8.1 UR5 tööriista sisendite ning väljundite spetsifikatsioonid [52]

Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Input voltage in voltage mode	-0.5	-	26	V
Input voltage in current mode	-0.5	-	5.0	V
Input current in current mode	-2.5	-	25	mA
Input resistance @ range 0V to 5V	-	29	-	k Ω
Input resistance @ range 0V to 10V	-	15	-	k Ω
Input resistance @ range 4mA to 20mA	-	200	-	Ω

Sele L8.2 UR5 tööriista sisendite ning väljundite spetsifikatsioonid [53]

Lisa 9 Kaamera käivitamine ja õpetamine

1. Start a new command window, type command *roscore*
 2. Start a new command window, type command *bash -i -c "kdevelop"*
 3. Start a new command window, type commands
source /home/ur5/ur5_ws/devel/setup.bash
roslaunch ur_bringup ur5_bringup.launch robot_ip:=192.168.1.10
 4. Start a new command window, type commands
source /home/ur5/ur5_ws/devel/setup.bash
roslaunch ur5_moveit_config ur5_moveit_planning_execution.launch limited:=true
 5. Start a new command window, type commands
source /home/ur5/ur5_ws/devel/setup.bash
roslaunch ur5_moveit_config moveit_rviz.launch config:=true
1. Under tab 'run-current launch configuration', select different executables.
'test cam' ->start camera
'stereo'->stereo vision and pose estimation
'robot control'->control the robot
 2. To perform teaching, run 'object teaching'
After teaching, copy relevant yml file to /stereo/src
 3. To change the desired depth, change *rec_vertice_pts_model[i].z* in stereo.cpp
Details see figure below