



Triinu Tann

KRUVIKEERAMISE SÜSTEEMI ARENDUSANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Õpperühm: RO2019

Juhendaja: Kristo Vaher

Tallinn 2023

Autori deklaratsioon ja lihtlitsents

Mina, Triinu Tann, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja (nimi, allkiri) ...Harti Vait...

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Triinu Tann, sünnikuupäev: 23.03.1998, annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose... KRUVIKEERAMISE SÜSTEEMI ARENDUSANALÜÜS...

(lõputöö pealkiri)

1. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
2. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas, allkirjastatud digitaalselt.

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	4
1. OPTIMO ROBOTICS OÜ.....	6
1.1 PAKUTAVAD TEENUSED.....	6
2. KRUVIKEERAMISE SÜSTEEM.....	8
2.1 MIKS UR ROBOTID.....	8
2.2 KRUVIKEERAJA.....	9
2.3 ROBOTLAHENDUSE KIRJELDUS	10
3. ARENDUSANALÜÜS.....	20
3.1 TEST 1 KOOD	21
3.2 LASERI TESTIMINE	27
3.2.1 TEST 2, LASERI TESTIMINE 1	28
3.2.2 TEST 3, LASERI TESTIMINE 2	31
3.3 TULEMUSTE ANALÜÜS	33
KOKKUVÕTE.....	35
<i>SUMMARY</i>	36
VIIDATUD ALLIKAD.....	38
LISAD	40
LISA 1. VAHETÜKI JOONIS.....	40
LISA 2. TEST 2, LASERI TESTIMINE 1	41
LISA 3. TEST 3, LASERI TESTIMINE 2	42

SISSEJUHATUS

Kruvikeeramise süsteemi arendusanalüüsi lõputöö on kirjutatud Tallinna Tehnikakõrgkooli robotitehnika eriala neljanda kursuse tudengi poolt, kes tegi arendusanalüüsi Optimo Robotics OÜ jaoks.

Ettevõtte Optimo Robotics OÜ on inseneribüroo, mis tegutseb Rae vallas. Nad pakuvad robotlahendusi erinevatele ettevõtetele, nende käest on võimalik saada nii tavalahendust kui ka erilahendust. Büroos on viis põhikohaga töötajat ja umbes sama palju oskustöölisi, kes igapäevaselt ei osale tööprotsessis. Tegemist on noore ettevõttega, mis alustas peaaegu kolm aastat tagasi, aga sellest olenemata on nad jõudnud juba Universal Robots-i UR+ teenusenimekirja.

Lõputöö eesmärgiks on võtta ettevõtte kruvikeeramise süsteem ning muuta see optimaalsemaks ja multifunktsionaalseks. Süsteemi hakatakse uuendama ja arendama alles suvel, kuid anti võimalus eeltöö ära teha, sellest ka analüüsi vajadus. Arendusanalüüsis võetakse ette see, mida praegune toode teha suudab, mida see võiks teha ning mida peaks tegema ja kasutama, et soovitud arendus viiks vajaliku tulemuseni.

Praegune kruvikeeramise süsteem töötab nii, et sellele on ette antud komponent ja kruvi. Töö teostamiseks on programmi kirjutatud kõik üksikasjalikult ja iga väiksemagi muudatuse puhul tuleb kogu konfigureerimine uuesti teha.

Analüüs peaks välja tooma lahenduse või lahendused, mille abil saab süsteem muuta paremaks ja lihtsamaks. Ettevõtte on andnud teatud nõuded, mida ja kuidas peaks robot edaspidi teha suutma. Põhiline soov on, et see oleks multifunktsionaalne, kiiresti programmeeritav ja suuteline tegema tööd erinevate materjalidega ja nurkade alt. Lõpptulemuseks soovitakse saada kruvikeeramise süsteemi, mis suudab tuvastada etteantud komponendi ja sellele kruvi külge kruvida, olenemata asendist ja paiknemise positsioonist.

Analüüsi teostamiseks kasutatakse Universal Robots (edaspidi UR) roboteid UR3e ja UR10e, Panasonicu laserit HG-C1200-P ja erinevaid programme- CAD programmi Autodesk Fusion 360, mida kasutati laseri ja roboti vaheliseks kinnituse loomiseks, UltiMaker- Cura-t laseri kinnituse printimiseks.

Töö esimeses peatükis tutvustatakse ettevõtet ja seda millega ettevõtte tegeleb ning milliseid lahendusi pakuvad. Teises peatükis kirjutatakse lahti, mis on kruvikeeramise süsteem ja kuidas see toimib.

Samuti on seal välja toodud miks Optimo Robotics kasutab Universal Robots-ite roboteid kruvikeeramise lahenduse jaoks. Võrdlus on selle jaoks, et ehkki ettevõtte pakub erinevaid lahendusi ABB robotitele siis ei ole kruvikeeramise süsteem nendele robotitele võimaldatud. Kolmandas peatükis kirjeldatakse kogu arendusanalüüsi töö, miks tehakse ja kuidas tehakse ja mis on tulemus. Töö lõpus on kokkuvõte, inglise keelne terviktöö kokkuvõte, kasutatud materjalid ja lisad.

1. OPTIMO ROBOTICS OÜ

Optimo Robotics OÜ on inseneribüroo aastast 2020, mis pakub innovaatilisi lahendusi ja professionaalset inseneriteenust. Ettevõtte pakub projekteerimisteenuseid tootmisettevõtetele ning aja jooksul on hakatud pakkuma rohkem robotiseerimist ja tootmise automatiseerimist. Lisaks kuuluvad nad Eesti Masinatööstuse Liitu ja ESTEN Groupi. [1]

Optimo Robotics-i valmistatud seadmed vastavad CE standarditele, neil on ka võimekus valmistada seadmeid UL standardite järgi.[1] Ettevõtte kruvikeeramise süsteem on ka Universal Robots-i poolt sertifitseeritud ja kuulub UR+ teenuste hulka. See on ettevõtte kodulehel välja toodud kui süsteem, mis sobib erinevate tootjate– telekommunikatsiooni-, elektroonika-, auto-, plastdetailide tootjatele, puidutööstusele, mööblitootjatele jne.[2]

1.1 PAKUTAVAD TEENUSED

Ettevõtte pakub kahte robotlahendus teenust, erinevad tooted ja erilahendust. Teenused sisaldavad seadmete ja robotsüsteemide 3D projekteerimist, elektrijooniste projekteerimist, programmeerimist ja testimist, seadmete ehitust ning paigaldust, järel hooldust, uuendusi ja garantiitööd.[1]

KOOSTÖÖROBOTID

Koostöörobot ehk inglise keeles *collaborative robot* ehk lühendatult *CoBot* on robotlahendus, mis muudab tööprotsesside produktiivsust ja efektiivsust [3]. Samuti on need turvalised, ei vaja turvaaedu ja on spetsiaalselt mõeldud töötamaks inimesega samas alas [4]. Ettevõtte kasutab selleks Universal Robots-i roboteid- UR5e, UR10e, UR16e. Põhilised erinevused on tööalas ja tõstetavas massis.[3]

Pakutavad lahendused on [3]:

- palletiseerimine;
- koostamine;
- keevitamine;
- kruvikeeramise;
- CNC ja survevalumasinate teenindamine;
- kvaliteedikontroll;
- poleerimine;
- liimimine, termopasta kandmine tootele;
- jootmine.

TÖÖSTUSROBOTID

Tööstusrobotite ehk *industrial robots*-i kasutamine säästab aega ja suurendab kasumit. Need robotid on töökindlad, kiired ja täpsed ning suudavad töötada erinevates keskkondades. Robotite töökindlus vähendab praagi tootmist ja tõstab toodete kvaliteeti. Tööstusrobotid saavad täita ülesandeid, mis oleks inimeste jaoks ohtlikud või ükslused. Samuti suudab robot teha tööd kiirelt, tagades stabiilse kvaliteedi ja tootlikkuse.[5]

Optimo Robotics-is kasutavad nad erinevaid ABB roboteid, sest tootevalikus on laiemaid, väiksemaid ja suuremaid roboteid. Kasutatakse kolme-, nelja- ja kuueteljelisi roboteid, mis suudavad toimida erinevates tööstusharudes- keevitamine, värvimine, palletiseerimine, painutuspinkidel ning CNC masinatel.[5]

INSENERILAHENDUSED JA AUTOMATISEERIMINE

Ettevõtte pakub universaalseid insenerilahendusi, kuna teenus koostatakse vastavalt klientide vajadustele ja soovidele. Selleks pannakse paika projekti eesmärgi, nõuded ja soovitud tulemus. Mudelite arenduseks kasutatakse SolidWorks projekteerimistarkvara. Samuti kasutatakse erinevaid masinnägemise lahendusi ning 2D ja 3D kaameraid. Automatiseerimiseks pakutakse klientidele tuge vajalike otsuste langetamisel ja ettevõtte vajaduste analüüsimiseks. [6]

SEADMETE JA ROBOTJAAMADE EHTUS

Seadmete ja robotjaamade ehituse teenus tähendab komponentide hankimist, koostamist, sõlmede ja jaama testimist, verifitseerimist. Samuti ka seadmete paigaldust ja operaatorite koolitamist. [7]

2. KRUVIKEERAMISE SÜSTEEM

Kruvikeeramise süsteemi eesmärk on võimaldada lisaseade tööstuslikele robotseadmetele ja kruvikeerajate kinnitusi eraldiseisvate või koostöörobotite jaoks. Tegemist on iseseiseva kruvikeeraja kinnitusega robotkäe jaoks.

Kõige sagedamini kasutatavad robotikonfiguratsioonid on robotkäte kujul olevad liigendrobotid. Robotkäe lülid on ühendatud liigenditega, mis võimaldavad kas pöörlevat liikumist (näiteks liigendrobotis) või translatsioonilist (lineaarset) nihet. Käe lülid moodustavad kinemaatilise ahela ja otsa, mida nimetatakse lõppefektoriks.

2.1 MIKS UR ROBOTID

Optimo Robotics on valinud oma kruvikeeramise süsteemi jaoks Universal Robots robotid. Selleks, et oleks kindel ülevaade põhjusest, miks on valitud UR robotid on välja toodud võrdlus tabel kolme erineva koostööroboti vahel. Võrreldakse Universal Robots-i roboteid, millele Optimo Robotics kruvikeeramis integratsioon sobib, ABB koostöörobotitega GoFa ja SWIFTI. Optimo kasutab neid ABB roboteid oma erilahendustes.

Võrdlus tabelis (Tabel1) tuuakse välja põhilised elemendid, mille järgi on tehtud roboti valik ehk kaal, kinnitusala suurus, TCP kiirus (*Tool Center Point/* tööriista keskpunkt), tõste-/ raskusjõudu ja robotkäe haardepikkust. Universal Robots-i valikust on tabelis UR5e, UR10e ja UR16e, sest need on sertifitseeritud UR+ teenuse valikus ja nendele robotitele sobib kruvikeeramise süsteem. ABB robotitest on valitud GoFa ja SWIFTI kaks seeriat.

GoFa robotid on oma klassi parim kiiruse, ohutuse ja kasutuslihtsusega. Robotil on palju erinevaid funktsioone, mille abil saab seda ohutult kasutada koos inimesega. Kuna tegu on koostöörobotiga, siis ei ole vaja projekteerida ja ehitada kaitsetõkkeid või piirdeid.[8]

SWIFTI roboteid on kahte sorti ja need erinevad tõstmisraskuse võimekuse poolest.

SWIFTI CRB 1100 on ülimalt kiire koostöörobot, mis on eriline oma omadustelt teha tööd tööstuslikul tasemel, aga samas on see uue generatsiooni turvalisusega. Tegemist on koostöö- ja tööstusrobotite vahepealse robotiga.[9]

SWIFTI™ CRB 1300 on samuti väga kiire töövõimega *cobot*, mida samuti kasutatakse tööstuslikult tasemel. Erinevalt eelmisest, suudab see tõsta ja liigutada kuni 11 kg raskusi, jäädes see juures

inimesele ohutuks. Kuna tegemist on ikkagi tööstuslikurobotiga, siis inimese ohutus on tagatud *SafeMove*-i ja turvaanduriga.[10]

Võrdlus UR seeria, GoFa, SWIFTI CRB 1100 ja SWIFTI CRB 1300 vahel.

Robotid	Kaal	Kinnitusala	TCP kiirus	Tõstejõud	Haardepikkus
UR5e [11]	20,6 kg	149 mm	3 m/s	5 kg	850 mm
UR10e [12]	33,5 kg	190 mm	3 m/s	12,5 kg	1300 mm
UR16e [13]	33,1 kg	190 mm	3 m/s	16 kg	900 mm
GoFa CRB 15000 [9, 14]	27 kg	165 mm	2,2 m/s	5 kg	950 mm
SWIFTI CRB 1100 [9, 15]	21,1 kg	160x172 mm	5 m/s	4 kg	475-580 mm
SWIFTI CRB 1300 [10, 16]	75-79 kg	220 mm	6,2 m/s	7-11 kg	900-1400 mm

Tabeli andmete põhjal saab hästi selgeks teha, miks kasutatakse just praegu Universal Robots-i roboteid. Robotid on kergemad arvestades sellega, milliseid raskuseid need jõuavad tõsta. Nende haarde pikkus on piisav, et tõsta etteantud raskust. Muuhulgas on TCP kiirus ühtlane kõigis kolmes robotis, mille tulemusel võib oodata kõigist robotitest samasugust taset. UR-i robotid küll vajavad suuremat ala kinnituseks, aga võrreldes ABB robotite haardepikkuse ja tõstejõuga on see kõige väiksem määraja.

2.2 KRUVIKEERAJA

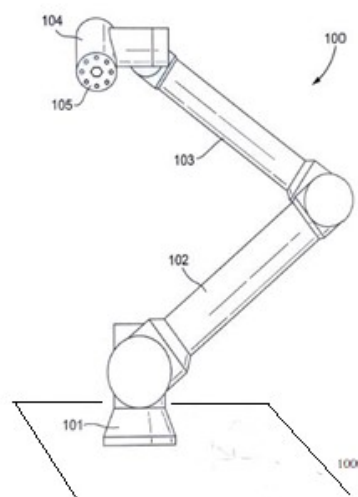
Kruvikeeramise süsteemi programmeerimine käib läbi graafilise kasutajaliidese, tänu servo-lahendusele saab kruvide kiiruseid, pöördemomenti ja kinnitussügavust seadistada kruvimise alguses, kruvituvitöö keskel ning lõpus. Kruvikeeraja otsikusse sisseehitatud turvalahendus võimaldab inimesel robotiga tööala jagada. Andur tuvastab töös olevale kruvikeerajale ettejääva takistuse ning robot peatub momentaalselt. Kruve on võimalik kinnitada momendi või kruvi sügavuse järgi. Kruvikeerajal on kolm põhifunktsiooni- kinnitamine, üle-pingutamine, lahti keeramine.[17]

Süsteemi on võimalik kasutada enamike robotitootjate robotitega, samuti lineaarsetel telgedel. Lineaarsetel telgedel liikumiste programmeerimise jaoks kasutatakse eritarkvara, mille abil on võimalik salvestada telgede liikumisi. Süsteemi on võimalik integreerida olemasolevatesse tootmisliinidesse või kasutada iseseisva seadmena.

Kruvikeeramise süsteem on vastavuses ISO/TS15006 standardiga.[17] ISO/TS15006 standard määratleb ohutusnõudeid uue põlvkonna tööstusrobotitele, mida saavad kasutada koostöörobotid.[18] UR robotiga liidestamisel kasutatakse kruvikeeraja ja söötja juhtimiseks Optimo URCAP-i tarkvara, mille juhtimine toimub läbi Universal Robots-i puutetundliku ekraani.[17]

2.3 ROBOTLAHENDUSE KIRJELDUS

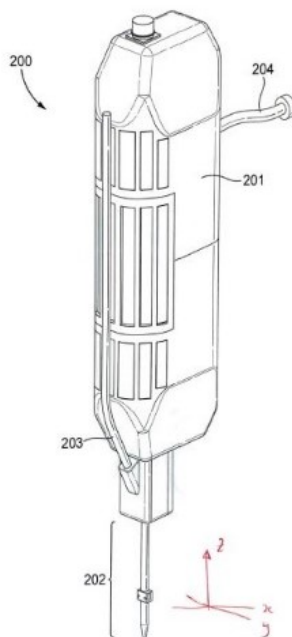
Robot, mille külge hakatakse kinnitada kruvikeeramismoodulit on näidatud pildil 1 (Pilt 1). Robotkäsi 100 on kinnitatud alus 101, mis kinnitab roboti pinnale 1000. Esimene lüli 102 on aluse 101 külge kinnitatud nii, et see saab pöörelda ümber vertikaalse ja horisontaalse telje. Sisemised servomootorid ühendavad alust 101 ja esimest lüli 102, et saaks pöörata õlga ümber horisontaal- ja vertikaaltelje. Teine lüli 103 on ühendatud pöörlevalt esimese lüli 102 otsaga ümber telje, mis on üksteisega risti. Teise õlaotsaga on ühendatud otsefektor 104, millel on kolm liikumisaset. Lõppefektor on mehaaniline liides 105, mille külge saab kinnitada täiendavaid seadmeid. Servomootorid on esimese ja teise lüli vahel ning lõppefektoris, et liigutada seda mistahes punkti roboti käe tööulatuses. Robotkätt juhib riistvaral töötav juhttarkvara. Riistvara võib olla integreeritud käe külge või on tarkvara laetud puutetundlikule tahvlile/arvutile.[19]



Pilt 1 Roboti joonis

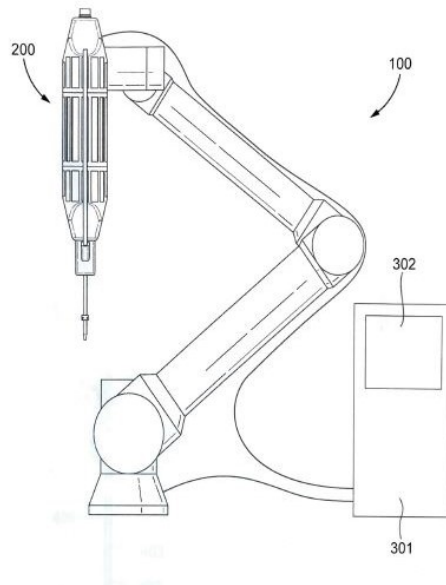
Pildil 2 (Pilt 2) on kujutatud robotkäe kruvikeeraja kinnitus 200. Kruvikeeraja kinnitus 200 sisaldab korpust 201, mille sees on juhtmootorid ja muud juhtivad riistvarad. Kruvikeeraja kinnitusel 200 on alumine tööriistaosa 202, mis on ette nähtud kruvide käsitlemiseks ja paigaldamiseks. 203 on toititoru, mis on sobilik erinevate kruvide ettesöötmiseks, näiteks vaakumsüsteemiga. Elektroonilise liidese ühendus 204 annab sisendi kruvikeeraja programmeerimise- ja juhtimisliidesele. Koordinaadid x ja y määratlevad tasapinna, samas kui z -suund on defineeritud risti x - y tasapinnaga. Tööriista osa on joondatud z -suunaga.[19]

Tavalised kruvikeeraja kinnitused tuginevad robotkäe servomootoritelt saadavale tagasisidele, et teha kindlaks, kui palju jõudu z -suunas rakendatakse. See tähendab, et kruvikeeraja ja robotkäsi peavad suutma omavahel suhelda, mis muudab nende kahe üksuse integreerimise keerukamaks. Selle süsteemi puhul kasutatakse z -suunalist jõudu, mis antakse kruvikeeraja kinnitusele 200.[19]



Pilt 2 Kruvikeeramismoodul

Pildil 3 (Pilt 3) on kujutatud robotkäe 100 külge paigaldatud robotkruvikeeraja kinnitus 200. Kruvikeeraja on kinnitatud robotkäe 100 mehaanilise liidese 105 külge. Eraldi olevas seadmes 301 on tarkvara ja riistvara, juhtelektroonika ja kasutajaliides 302, et anda juurdepääs robotkäele 100 ja kruvikeeramis süsteemile 200. Teise võimalusena saab kasutada kruvikeeraja kasutajaliidest ja juhtimistarkvara, need töötavad erinevates arvutiterminalides ning on erinevad robotkäe juhtimistarkvarast. Seade 301 sisaldab kahte eraldi riistvarakomplekti, millest üks on mõeldud robotkäe 100 juhtimiseks ja teine kruvikeeraja kinnituse 200 juhtimiseks.[19]



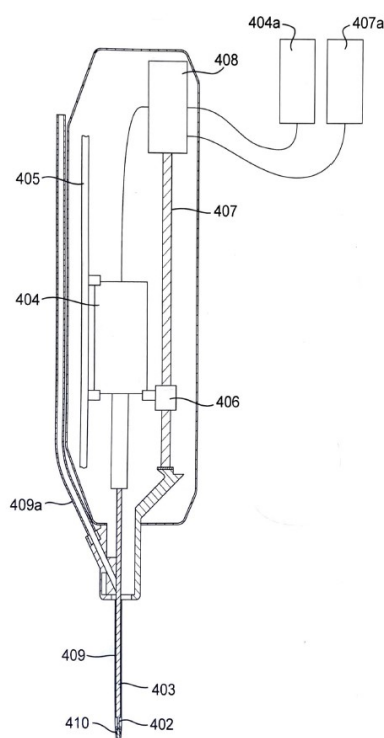
Pilt 3 Kruvikeeramis süsteem

Pildil 4 (Pilt 4) on kujutatud robotkruvikeeraja kinnituse komponendid. Komponendid asuvad korpuse 201 sees. Tööriist 401 koosneb tööriista otsast 402 ja võllist 403. Tööriistaotsal 401 on lamedad otsad ja kuusnurkne ristlõige ning see on paigutatud nii, et saaks haarata kruvi. Võll 403 telg määrab z-suunda, et see saaks pöörelda. Võll 403 on ühendatud tööriistamootoriga 404. Tööriistamootoriks on servomootor, mille väljundmoment on vahemikus 1-2 Nm, pöörlemiskiirus 3000 p/min ja kodeerija eraldusvõime 120 000 impulssi pöörde kohta või rohkem. Tööriista mootor 404 on kinnitatud korpusesse, mis on paigutatud nii, et seda saab mööda siini 405 üles ja alla liigutada. Servomootor on ühendatud välise võimendiga 404A, mis juhib asendit, kiirust ja tööriista mootori pöördemomenti 404. Tööriista mootoril 404 on pöördkooder, mis väljastab mootori telje absoluutse nurgaasendi, mille järgi saab määrata tööriista otsa 402 asendit.[19]

Tööriista mootori korpusel on tugiklamber, see toetab sisekeermega mutrit 406, mis omakorda haakub välisekeermega võlliga 407 nii, et keermestatud võlli 407 pöörlemine põhjustab tööriista mootori vertikaalse liikumise piki siini 405 z-suunas. Keermestatud võllil 407 on 10 mm sammuga trapetsikujuline juhtkruvi. Lisaks saab kasutada 6 mm, 8 mm, 12 mm, 14 mm jne juhtkruve. Sellise kõrge spiraaliga juht- ja järsu keermega kruvi ning mutri paigutusega on võimalik kiiresti reguleerida väikeseid koormusi.[19]

Keermega võll 407 on ühendatud z-suunalise mootoriga 408. Z-suunaline servomootor 408 on sarnane 404-ga, kuid sellel on väiksem võimsus. Sellel on vaja ainult pöördemomenti vahemikus 0,2–0,4 Nm, mida juhib väline võimendi 407A. Kombinatsiooniga, kus on suure jõudlusega

Tööriist 401 on liigutatav tööriistakorpuse toru 409 sees, mis ulatub põhikorpuse 201 alla. Tööriistakorpuse toru 409 pikkus valitakse vastavalt tööriistale 401, et oleks tagatud ligipääsetavus. Kruvi etteandetoru 409a on näidatud ülaosas. Tööriista 402 ots on sisse tõmmatav ja selleks kasutatakse z-suunalist servomootorit 408, mis on kruvi ettesöötmiss toru otsas nii, et kruvi võib siseneda tööriista korpuse torusse 408. Tööriista korpuse toru 408 otsas on „lõuad“ 410, mis hoiavad kruvi kinni enne, kui see on paigaldatud.[19]



13

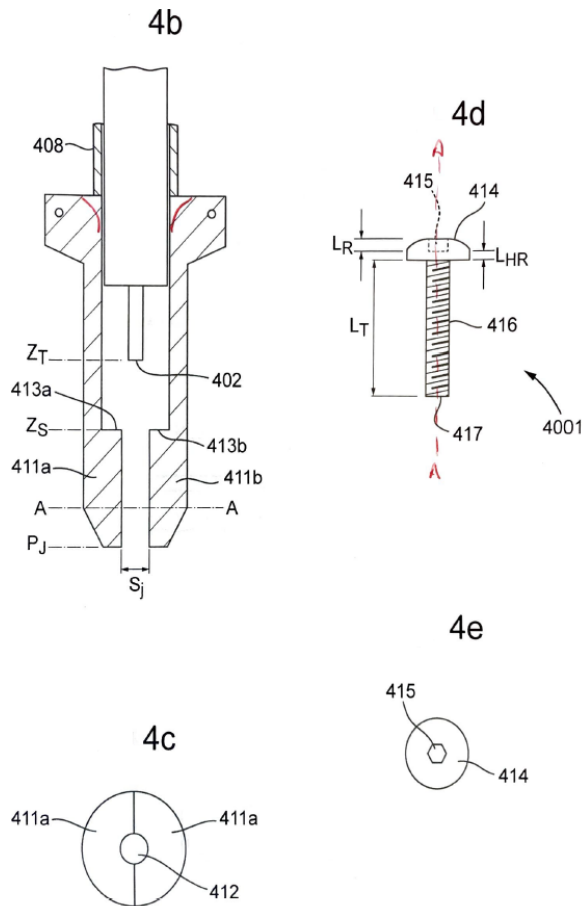
Kruvi kinni hoidmise „lõuad“ on üksikasjalikumalt näidatud pildil 5 (Pilt 5) näide 4b, kus on „lõugade“ vertikaalne ristlõige. Korpuse toru lõpeb hinge osaga, mis toetab kahte kinnituse osa 411a, 411b. Tööriista otsaprofiil on poolringikujuline poolringikujulise avaga nii, et kui osad on suletud, moodustavad need koos ringikujulise ava 412, millest kruvi ots saab välja ulatuda. 4c näitab, kuidas on kujutatud tööriista ristlõiget mööda joont AA. 4b pealt on näha ümmargune ava 412. Pildil 5 on kujutatud tööriistade ristlõige suletud asendis, mille vaheline ruum S_j on piisavalt suur, et mahutada paigaldatava kruvi. Tööriistal on sisemine osa 413a, 413b, mis toetab ja hoiab kruviotsa enne paigaldamist. Tööriist 410 avaneb, et kruvi vabastada paigaldamiseks. Tööriista otsa asend P_j on 3-mõõtmeline koordinaat ja on alati fikseeritud lõppefektori P_E suhtes. Lõugade asend P_j on võrdluspunkt, millest mõõdetakse kruvikeeraja kõiki teisi asendeid. See punkt on fikseeritud kruvikeeraja enda suhtes, kuna see on kinnitatud korpuse külge. Punkt liigub robotkäe suhtes ja seetõttu määrab robotkäsi selle asukoha. Robotkäsi on programmeeritud liigutama seda punkti vajaliku kruvi paigaldusasendisse.[19]

Kruvi sisemised osad 413a ja 413b on vertikaalse z-telje asend Z_S , mis on P_j suhtes teada. Z_S on fikseeritud võrdluspunkt. Tööriista otsa 402 z-telje asend Z_T on teada z-telje mootori 408 kodeerija antud teatest ja see on muutuv.[19]

4d näitab üksikasjalikumalt paigaldatava kruvi 4001 külgvaate. Kruvil 4001 on ots 414 koos kuusnurkse süvendiga 415 kuusnurkse pinnaga tööriista otsa 402 vastuvõtmiseks. Kruvipea 414 pealtvaade on näidatud 4e peal. 416 on kindla sammuga keere P_S , kindel pikkus L_T ja see asetseb kruvikeerme otsa 417 ja pea 414 alumise külje 418 vahel. Keere on orienteeritud piki telge AA. Tööriista võlli 403 telg, kui see on kruviga ühendatud, joondub selle teljega, mis määrab telje z-suuna. Süvendil 415 on teadaolev sügavus (L_R) ja süvendi põhjas on teadaolev kaugus (L_{HR}) kruvipea alumisest küljest. Kruvi mõõtmete täpne tundmine on süsteemi toimimiseks oluline, kuna kruvi 4001 paigaldamisel hoitakse hoolikalt tööriista otsa ja kruvi vahelist kaugust. Iga paigaldatava kruvi mõõtmed registreeritakse. Salvestatud mõõtmed hõlmavad järgmist:[19]

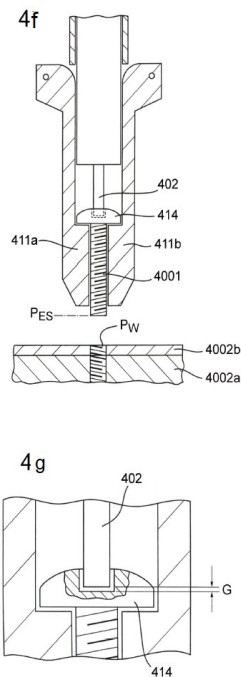
- Kruvi samm, P_S
- Keerme pikkus, L_T
- Süvendi sügavus, L_R
- Süvendiasend, L_{HR}

Kruvi L_T keerme pikkust kasutatakse kruvi otsa absoluutse asendi (P_{ES}) arvutamiseks, mis ulatub tööriista otsast natuke välja. See annab piisava algse pikkuse, et kruvi haakuks komponendiga, millesse kruvi paigaldatakse.[19]



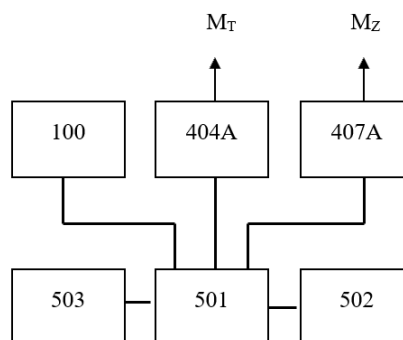
Pilt 5 Kruvi kinni hoidmise „lõuad“

Pildil 6 (Pilt 6) 4f kujutab tööriista 410, mille kruvi 4001 on paigas ja tööriista ots 402 on ühendatud ning valmis kahe komponendi 4002a, 4002b ühendamiseks. Komponentidel on eelnevalt puuritud ja keermestatud auk, mis asub robotkäe aluse P_B asukoha suhtes teadaolevas asendis P_H . Kruviotsiku P_{ES} asend arvutatakse lõugade asendist P_J , keerme L_T pikkusest ja robotkäe otsaefektori P_E asukohast selle põhiasendi P_B suhtes. Samal pildil on 4g, mis kujutab kruvipea 414 ja tööriista otsa 402 lähivaadet. Tööriista otsa ja kruvipea süvendi 415 põhja vahele on määratud tühimik G . Paigaldusprotsessi ajal jääb see paika, olles ainsaks kruvile rakenduvaks jõuks, see tähendab, et z-suunalist jõudu ei rakendata. Pöördemomenti tekitavad tööriista otsa kuusnurksed küljed, mis haakuvad süvendi kuusnurksete külgedega.[19]



Pilt 6 Kruvi kinnitamise tööriist

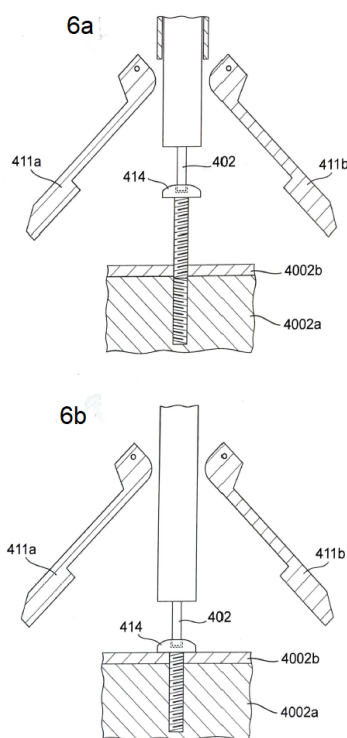
Seadmes 301 asuv kruvikeeraja kinnitusriistvara on skemaatiliselt näidatud pildil 7 (Pilt 7). Protsessor 501 on ühenduses seadmega 502. Mäluplokk 502 sisaldab andmebaasi paigaldatavat kruvi tüüpi iseloomustavate parameetrite ja teabe salvestamiseks. Kruvide paigaldamisega seotud teavet ja kruvi paigaldamise kiirus ja pöördemomenti, milleni kruvi tuleb paigaldada. Kruvide paigaldusteavet saab sisestada käsitsi või kasutada õpetamisrežiimi, kus kruvikeeraja positsioneeritakse käsitsi ning koordinaadid ja muud parameetrid õpitakse ja salvestatakse, et tööjärjestust saaks automatiseerida. Protsessor 501 on pandud täitma mitmeid toiminguid, kasutades andmebaasi 502 salvestatud väärtusi ja on seatud edastama käske tööriistamootori võimendile 404A ja z-suunalisele mootorile 407A. Samuti on korraldatud juhiste edastamine robotkäe juhtimisriistvarale. Protsessori külge on kinnitatud liides 503, mis sisaldab kuva- ja andmesisestusvahendeid.[19]



Pilt 7 Kinnitusriistvara skeem

Automaatne protseduur toimub juhul, kui kasutaja on valinud liidese kaudu kruvi tüübi. Seejärel arvutab protsessor 501 nihke kruvi otsa (P_{ES}) ja otsaefektori asukoha vahel. Järgmiseks arvutatakse kruvi kalde funktsioonina z-suunalise mootori pöörlemiste arvu tööriista otsa pöörde kohta. Edasi saadab protsessor signaali z-suunalisele mootorivõimendile, et tööriista ots täielikult tagasi tõmmata ja kruvi sööturist laadida. Siis saadab protsessor robotkäele signaali kruvikeeraja kinnituse liigutamiseks nii, et P_{ES} oleks esimese augu asendis P_H . [19]

Kui $P_{ES} = P_H$, on kruvi ja tooriku 4002a ava keermed joondatud ja haardumiseks valmis. Protsessor 501 saadab juhtsignaali z-asendi mootori käitamiseks, kuni tööriista ots 402 haakub kruvipea süvendisse 415, jättes tööriista otsa ja kruvis oleva süvendi põhja vahele eelnevalt määratud 0,05 mm vahe. Seejärel saadab protsessor 501 signaali tööriista avamiseks, nagu on näidatud pildil 8 (Pilt 8) 6a. Kruvi jääb paigale, jäädes töödeldava detaili 4002b ja tööriista otsa 402 vahele, protsessor annab tööriista mootorile sisendi ja tööriista ots haakub. Kui kruvi pöörleb, liigub see allapoole komponendi keermestatud avasse, mis on võrdne kruvi sammuga $Pitch_s$, korrutatuna kruvile rakendatud pöörete arvuga N_s . [19]



Pilt 8 Tööriista joonis

Protsessor käitab z-suunalist mootorit, et pöörata juhtkruvi vastava arvu pöörete võrra (N_{LS}), et säilitada vahe G tööriista otsa ja kruvipea süvendi põhja vahel. Protsessor arvutab z-suunalise

mootoriga juhtkruvile rakendatud pöörete arvu N_{LS} funktsioonina kruvile rakendatud pöörete arvust N_S järgmiselt:[19]

Kruvi paigaldamiseks tuleb nulljõudu rakendada z-suunas tööriista otsa asendi z-koordinaadi muutusega ΔzP_T ja hoida võrdsena põhja z-koordinaadi muutusega kruvisüvendist, ΔzP_R :

$$\Delta zP_T = \Delta zP_R \quad (1)$$

Kruvi süvendi põhja z-koordinaadi muutus ΔzP_R sõltub kruvi sammust $Pitch_S$ ja kruvile rakendatud pöörete arvust N_S :

$$\Delta zP_R = Pitch_S \times N_S \quad (2)$$

Tööriista otsa 402 z-koordinaadi muutus ΔzP_T sõltub juhtkruvi sammust $Pitch_{LS}$ ja juhtkruvi 407, N_{LS} pöörete arvust, mida rakendab z-suunaline mootor 408:

$$\Delta zP_T = Pitch_{LS} \times N_{LS} \quad (3)$$

Ühendades võrrandid (2) ja (3) võrrandiks (1), on pöörete arv, mis tuleb z-suunalise mootoriga 408 juhtkruvile rakendada, sõltudes pöörete arvust, mille tööriist kruvile teeb. mootor 404 on antud kui:

$$N_{LS} = N_S \times \frac{Pitch_S}{Pitch_{LS}} \quad (4)$$

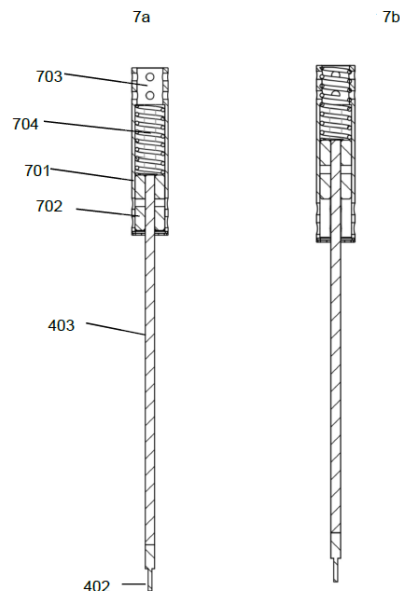
Pöörete arv võib olla täisarv või täisarvu osa. Näiteks kui kruvi samm on 0,5 mm ja juhtkruvi samm on 10 mm, peaks z-suunaline mootor liikuma 0,05 pööret (või 6550 kodeerija impulssi eraldusvõimega 131 000 p/min kodeerija puhul) iga tööriista pöörde kohta.[19]

Kruvi pikkusega 50 mm ja sammuga 0,5 mm ja juhtkruvi sammuga 10 mm tuleb kruvi täielikult paigaldada tööriista mootoriga 100 korda. Seetõttu peaks z-suunaline mootor pöörlema 5 korda samaaegselt, et kruvi oleks täielikult paigaldatud ilma z-suunas rakendatava jõuta. Täielikult paigaldatud kruvi on näidatud 6b (Pilt 8). Protsessor juhib kruvi keeramise kiirust ja pöördemomenti, milleni see kinni keeratakse. Suure täpsusega vahelduvvoolu servomootorite kasutamine võimaldab kruvi paigaldada kiiresti, suure täpsusega ja nulljõuga z-suunas. [19]

Protsessor käsib z-suunalisel mootoril tööriista ots täielikult tagasi tõmmata, tööriista sulgeda ja uus kruvi asemele panna. Samal ajal käsib protsessor robotkätt liigutada kruvikeerajaga vastavalt programmile järgmisesse asendisse. Seejärel korratakse protsessi. Kiire ja täpne juhtimine tööriista

otsa z-asendi üle võimaldab null-jõudu z-suunas, aga ka minimeerida iga kruvi paigaldamise vahelist aega, kuna robotkäe ajal saab laadida ja paika panna uue kruvi. [19]

Pildil 9 (Pilt 9) on kujutatud kruvide kiirvahetit, mis töötab z-suunalise nulljõu võimele. Tööriista völli paigaldatakse mootorisse vedruga koormatud toru 701 kaudu. Tööriista otsa 402 vastas olev völli 403 ots paikneb kinnitusplokis 702, mis võib vabalt liikuda torus 701 z-suunas, kuid pöörleb toru sees. Toru ülemine ots 703 on kinnitatudööriista mootori külge. Paigaldusploki 702 ja toru ülemise otsa 703 vahel asub vedru 704, mis surub völli teadaolevasse asendisse allapoole. Toru ülemises otsas asub mikrolüliti, mis aktiveerub, kui völli liigub torus ülespoole, nagu on näidatud 7b peal. Mikrolüliti on ühendatud protsessoriga 501, mis võib mikrolüliti aktiveerimisel peatada robotkäe võiööriista otsa igasuguse liikumise. See võib juhtuda, kui kasutaja paneb oma käe kogemata seadme ette. Kruvikeeraja kinnitus sisestab kruvid, avaldades kruvipeale ainult pöördejõudu.[19]



Pilt 9 Kruvide kiirvaheti

3. ARENDUSANALÜÜS

Kruvikeeramise süsteemi arendusanalüüsi eesmärgiks on välja selgitada, kuidas muuta praegune lahendus paremaks ja multifunktsionaalseks. Soovitakse saada kruvikeeramise süsteemi, mis suudab tuvastada etteantud komponendi ning sellele kruvi külge kruvida olenemata asendist ja paiknemise positsioonist. Eelnevalt välja toodud süsteem peab nüüd uuenduse puhul säilima, aga peaks täitma järgmisi ülesandeid:

- Saab kasutada ühte koodi.
- Robot on konfigureeritud nii, et uue komponendi kasutamisel ei pea kogu õpetamise protsessi läbi tegema.
- Tuvastada erineva nurga ja kõrguse pealt komponente, et ettevõtte saaks hiljem kasutada masinnägemist süsteemis.

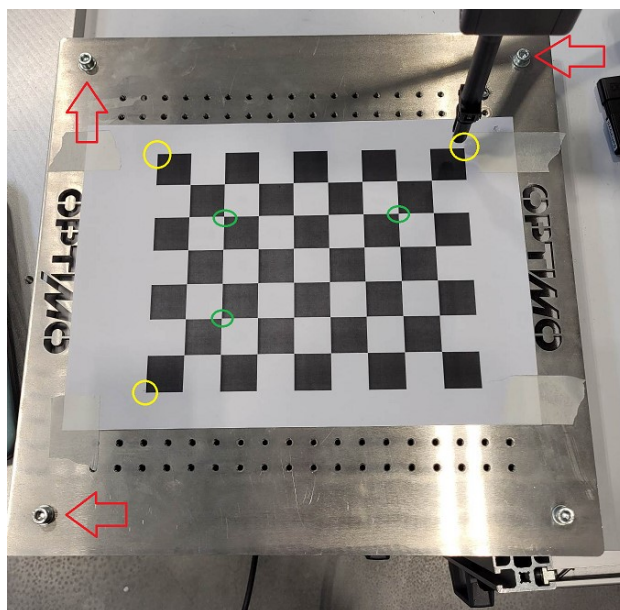
Süsteemi eesmärkide teostamiseks sooritati kolm testi. Esimene test tehti koodi kontrollimiseks ja selleks kasutati UR10e-d ja kruvikeeramise süsteemi, et tasapinna punkte oleks kergem määrata peene otsaga (kruvikeeraja ots). Kood oli eelnevalt valmis kirjutatud Harti Vait poolt simulatsiooni peal, mis selles keskkonnas toimis ideaalsest. Teise testi tegemiseks valiti välja laser. Laseriga testiti, milliseid materjale see tuvastada suudab 120°-60° nurga alt. Laser peaks selliste nurkade puhul tuvastama vähemalt nelja erinevat materjali, et test oleks edukas. Kolmanda testi eesmärgiks oli kontrollida kui täpne on laseri tulemus ja kui kõrgelt on mõõtnis kaugus juba täpne. Testi teostamiseks võeti tööpinnast kaugeim punkt ja hakati liikuma selle suunas 0,10 mm kaupa. Viimase testiga loodeti leida maksimaalne parim kõrgus, et saaks edasisi samme hakata masinnägemise suunas tegema. Testide loetelu ja eesmärgid on välja toodud järgnevas tabelis:

Testid	Eesmärk	Mitu katset?	Edukaks loetakse kui
Test 1	Testida koodi	9 katset	Kood toimib ja ebaõnnestumiste põhjuseks on robotkäe enda võimekuse piir.
Test 2, Laseri test 1	Kas laser suudab tuvastada erinevaid materjale ja mis on laseri näit.	8 materjali, 10 erinevat komponenti	Laser suudab tuvastada vähemalt nelja erinevat materjali.
Test 3, Laseri test 2	Laseri täpsus	1 katse	Leitakse stabiilne kõrgust, millest enam mõõtetäpsus ei kõigu.

Testide läbiviimiseks kasutati UR 10-e, millel pidi alustuseks tööriista konfigureerima, sest robot oli vahepeal muudeks tegevusteks kasutusel. Konfigureerimiseks pandi paika TCP/*Tool Center Point*/tööriista keskkoh, orientatsioonid, kasulik koormus ja raskuskese. Edasi seadistati tööpind, kus määrati kindlaks tasapinnad ja asendimuutujad. Tasapinna määramiseks võeti punktid P_1 , P_2 , P_3 ja määratakse aluse peal kolm kohta, mis on all oleval pildil näidatud punaste nooltega (Pilt 1). P punktide kohad määratakse ja jäetakse meelde selle punkti x , y , z , rx , ry , rz koordinaatidega.

3.1 TEST 1 KOOD

Test 1 tegemiseks alustati TCP konfigureerimisega ehk õpetati robotile selgeks üks kindel punkt erinevate TCP nurkade alt. Orientatsiooni jaoks tuli veenduda, et kui vaadeldakse roboti põhja ja roboti tööriista, siis kolm liikumissuunda on vastavuses. Kasuliku koormuse ja raskuskeseme välja arvutamiseks liigutati robot erinevatesse positsioonidesse, mille tulemusel kirjutas robot c_x , c_y ja c_z mõõtmised ja arvutas välja oma raskuskeseme.



Pilt 10 Konfigureerimine ja testi ettevalmistus

Test 1 jaoks anti olemasolev kood, mis oli koostatud ja eelkatsetatud mudeli peal. Roboti peal katsetamiseks oli vaja muuta tasapinda ehk viia pind madalamale- kõrgemale, keerata 45° paremale ja vasakule, 90° ja panna tööpind vertikaalselt 75° ja/või madalama nurga alla.

Etteantud kood pidi võimaldama tööriistal nii palju kui võimalik liikuda punktidesse olenemata sellest, mis asendis on töötasapind või mis pidi on keeratud testpaber. Liikumise võimekus sõltus sellest, kas robot oli võimeline etteantud nurkasid võtma ilma, et kruvikeeramise süsteem oleks

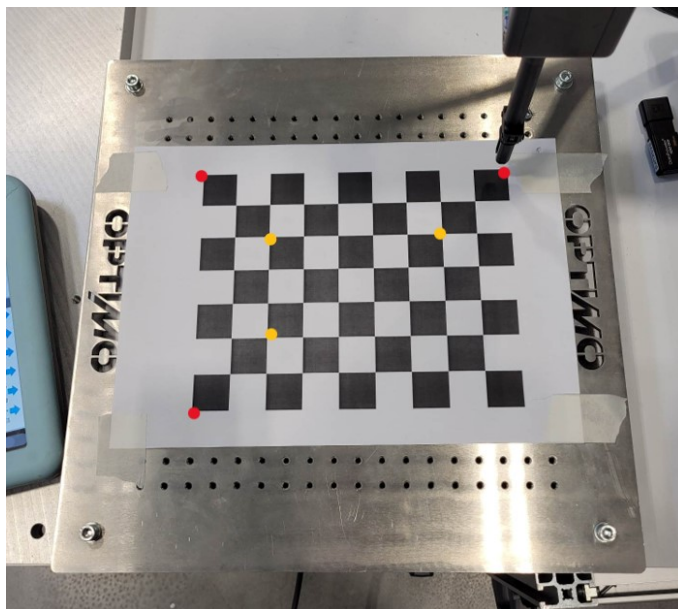
liikunud vastu robotkätt. Selleks määrati tasapinnal (vaata pilti 10) kolm muutuvat punkti (kollased) ja kolm kindlaks jäävat punkti (rohelised) sama tasapinna suhtes.

Kokku tehti 9 katset, mille tulemused on välja toodud järgnevalt koos illustratiivse pildiga. Testpind 1 oli tears-plaat, mida paigutati laua suhtes ja testpinda 2 (A4 paber) pöörati horisontaalselt plaadi peal. TCP suunda muudeti vastavalt vajadusele testpinna 1 suhtes või erinevate võimaluste testimiseks. Tulemused loeti õnnestunuks, kui TCP liikus etteantud punktidesse ja ei põrganud seda tehes vastu testpinda.

KATSED

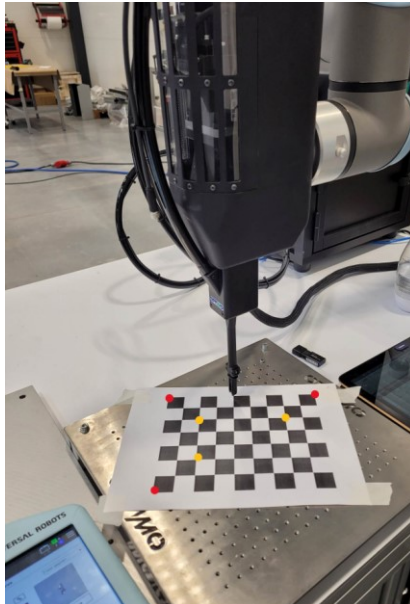
Esimesed viis katset on tehtud ainult ühtlasel tasapinnal ja muudetud on tasapinda 2 erinevates suundades 45° ja esimese kolme katsega on TCP otse. Esimesed katsed tehti sellised, et veenduda koodi töötamises. Järgmised katsed tehti selleks, et teada saada, mis võiks olla kõige suurem tasapinna erinevus, kus kood enam ei toimi.

Katse 1. Testpind 1 on laua peal ühtlaselt ja testpind 2 on horisontaalselt. TCP on liigutatud punktidesse nii, et terve testimise käigus oleks see sirgelt ja otse. Test loeti õnnestunuks, sest TCP liikus kõigist punktidest läbitud ja robot ei põrganud selle juures kordagi vastu lauda ega iseennast.



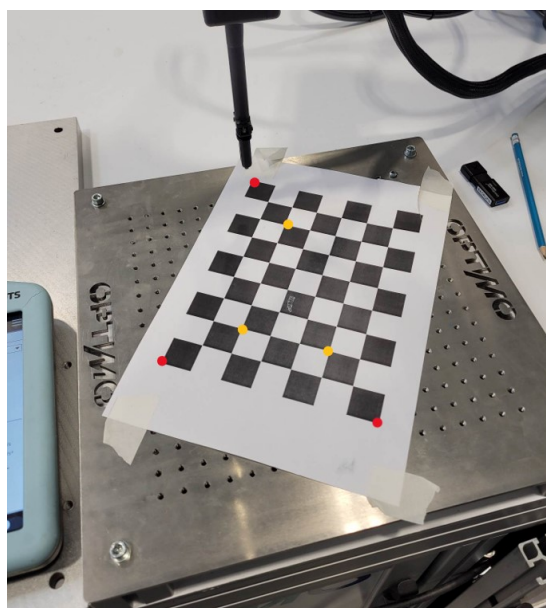
Pilt 11, katse 1

Katse 2. Testpind 1 on ühtlaselt lauaga ja testpind 2 on keeratud 45° paremale horisontaalselt. TCP on terve testimise käigus igas punktis sirgelt ja otse. Test õnnestus, sest kõik punktid said läbitud ja robot ei pörganud kordagi vastu lauda ega iseennast.



Pilt 12, katse 2

Katse 3. Testpind 1 on lauaga ühtlaselt ning testpind 2 on keeratud 90° paremale, TCP oli terve testimise käigus otse ja sirge. Test ebaõnnestus, kuna peale kolme muutuvat punkti ehk punastest punktidest edasi liikudes kollastesse kohtadesse pörkas kruvikeeramise ots vastu testpinda 2.



Pilt 13. Katse 3

Katse 4. Testpind 1 on ühtlaselt lauaga ja testpind 2 on horisontaalselt, TCP on igas punktis erineva 45° nurgaga. Test õnnestus, kuna TCP oli erinevate nurkade all ja seeläbi ei liikunud testpindadele ega iseendale vastu.



Pilt 14, katse 4

Katse 5. Testpind 1 oli ühtlaselt lauaga, testpind 2 on keeratud 45° paremale. TCP on testimise käigus 45° nurgaga. Test ebaõnnestus, kuna esimesest punktist liikudes teise punkti pörkas TCP vastu testpindasid. TCP asendit muudeti nii, et igasse punkti saaks liikuda ilma testpinna kokkupuudeta ja ilma, et robot vastu ennast läheks. Katse sooritati uuesti, aga ka siis ei suutnud robot katset lõpuni viia, kuna liikudes kollastesse punktidesse jäi süsteem robotkäe liigutuste tegemiseks ette.



Pilt 15, katse 5

Katse 6. Testpind 1 on kallutatud kergelt vasakule, testpind 2 selle peal on horisontaalselt testpinna 1-ga ja TCP on terve testimise käigus kerge nurga all. Test õnnestus, kuna olenemata pinna muutusest said kõik punktid läbitud ja robot ei põrganud selle juures kordagi vastu ennast.



Pilt 16, katse 6

Katse 7. Testpind 1 on kõrge kalde all vasakule, testpind 2 selle peal on horisontaalselt. TCP oli testpindadega sama nurga alla sätitud. Test ebaõnnestus, kuna kolme punase punktiga toimus kokkupuude testpindadega ja kolme kollase samaks jääva punktini ei jõudnud, sest robot jäi iseendale ette.



Pilt 17, katse 7

Katse 8. Testpind 1 on pandud nii, et toetuspind asub vasakul pool ülemise nurga all. Testpind 2 on selle peal horisontaalselt. TCP on igas punktis kerge nurgaga, aga mis jääb testi käigus ühtlaselt samaks. Test oli edukas, kuna olenemata pinna muutusest said kõik punktid läbitud ja robot ei pörganud selle juures kordagi vastu ennast.



Pilt 18, katse 8

Katse 9. Testpind 1 on pandud peaaegu 90 ° nurga alla. Testpind 2 on selle peal horisontaalselt. TCP on igas punktis testpinnaga sama nurga all. Test ebaõnnestus, kuna kruvikeeramise otsik sõitis testpinna 1 sisse korduvalt ja ei suutnud liikuda mitte ühtegi punkti, ei punastesse punktidesse ega ka kollastesse.



Pilt 19, katse 9

JÄRELDUS

Test ühe põhjal tuli välja, et kui robotkäe küljes olev kruvikeeramise süsteem oli paremale kallutatud siis katsetused ebaõnnestusid. Põhjuseks oli see, et TCP liikus paigast, aga kui TCP oli vasakule kallutatud, siis süsteem pörkas vastu robotkätt ja takistas liikumist. Teatud nurkade alt sai robot etteantud ülesandega hakkama. Test loeti edukaks, kuna kood toimis. Ebaõnnestumised olid tingitud sellest, et robotkäsi ei suutnud liikuda eelnevast asendist teise ilma, et oleks läinud iseendale vastu või kruvikeeramise süsteem takistas liikumist.

3.2 LASERI TESTIMINE

Ettevõttel oli soov kasutada laserit masinnägemise jaoks, et edaspidi suudaks süsteem tuvastada materjali ja komponendi kaugust. Masinnägemist ei testitud ühegi kaameraga, aga kaamera valiku eelduseks sooritati vajalikud testid laseriga. Sobilikuks variandiks vaadeldi kolme erinevat tüüpi lasereid, mis oleks sobinud nõuetele. Nendest valiti välja üks katsetamiseks ja edaspidiseks kasutamiseks. Tabel ja andmed, mis said laseri valimisel määravaks:

Laser	Mõõtmiskaugus	Mõõtevahemik	Laseri klass ¹	Tuvastuse aeg
Panasonic HG-C1200-P [20]	200 mm	±80 mm	2	Reguleeritav kiirus 1,5 ms/ 5 ms/ 10 ms
Optical level sensor O1D300 [21]	15 m	0,2-10 m	2	6 ms
Banner LM80KIQP [22]	100 mm	40-80 mm	1	2,1 s

¹ Laseri klass- ohutusklass, number viitab sellele kui palju võib laser inimest vigastada, üldiselt silma sattumisel. On ka selliseid, mis võivad nahka kahjustada, aga need on juba tööstuslikud lasereid. 1 on kõige ohutum, 4 on kõige ohtlikum.

Võrdluse põhjal sai otsustada, et edaspidi kasutatakse Panasonic laserit HG-C 1200-P, kuna sellega saaks kõige paremini tuvastada erineva kuju ja suurusega komponente. Mõõtevahemik on üldiselt täpne. Laseri tuvastamise aeg on reguleeritav ja teistest valikutest kõige kiirem.

Järgmise sammuna oli testimise alustamiseks vaja laserile luua kinnitus robotkäe külge, et saaks määrata laseri tuvastamise täpsust robotkäe liigutamisel. Vahetüki joonistamiseks kasutati CAD programmi Autodesk Fusion 360, mudel on toodud lisas (Lisa 1). Mudeli printimiseks kasutati UltiMaker- Cura-t.

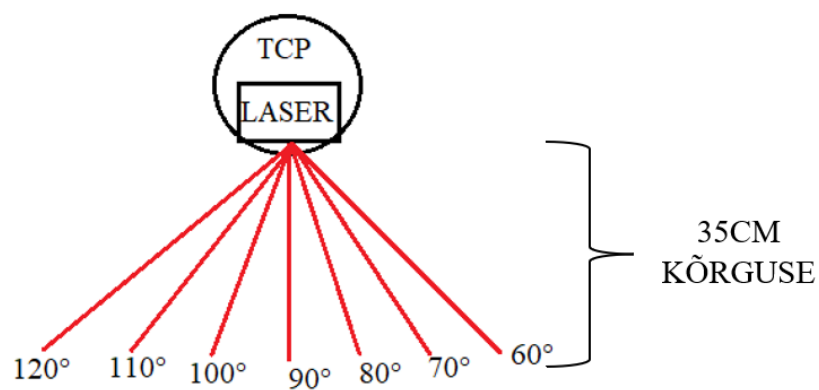
3.2.1 TEST 2, LASERI TESTIMINE 1

Laseri testimine esimeseks eesmärgiks oli välja selgitada, kas laser tuvastab erinevaid materjale ja kus jookseb tuvastamise piir. Selle jaoks pandi paika TCP, orientiirid, raskuskeseme ja keskkoha. Kasutati teras-alust, mille peal oli teip ja musta markeriga tehtud täpp. Konfigureerimise faasis tuli juba välja, et laserile ei sobi teatud nurkade alt süsimust toon nagu oli selleks markeriga tehtud must täpp. Need nurgad aga olid sellised, kust robot ei saaks ja ei hakkaks nii kui nii kruvima.

Materjalid, mida sooviti tuvastada olid:

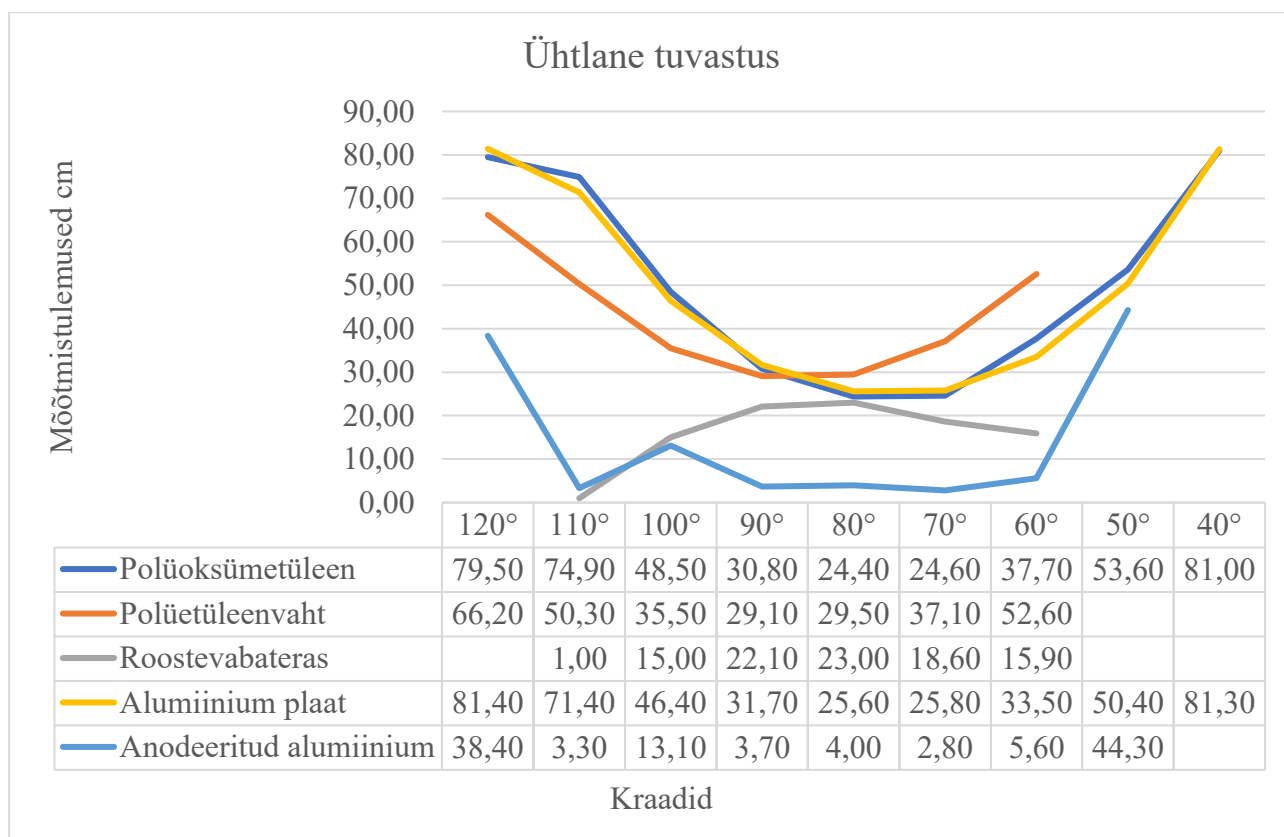
- vineerplaat,
- plastmasskaas,
- roostevabateras,
- alumiinium,
- anodeeritud alumiinium,
- polüetüleenvaht,
- polüoksümetüleen (POM)
- plastik.

Materjalide nägemise testimiseks pandi laser robotkäega 90° nurga alla ja umbes 35 cm kõrgusele. Testimise eesmärk oli hoida robot ühel kõrgusel ja liigutada TCP-d, mille küljes laser oli. TCP-d liigutati 10° võrra paremale ja vasakule, näidatud alloleval pildil (Pilt 20). Mõõtmistulemused on välja toodud lisas (Lisa 2), kus on kirjas materjal, laseri näit ja robotkäe TCP nurk. Arvestatavad nurgad jäävad 110 °- 60 ° vahemikku.



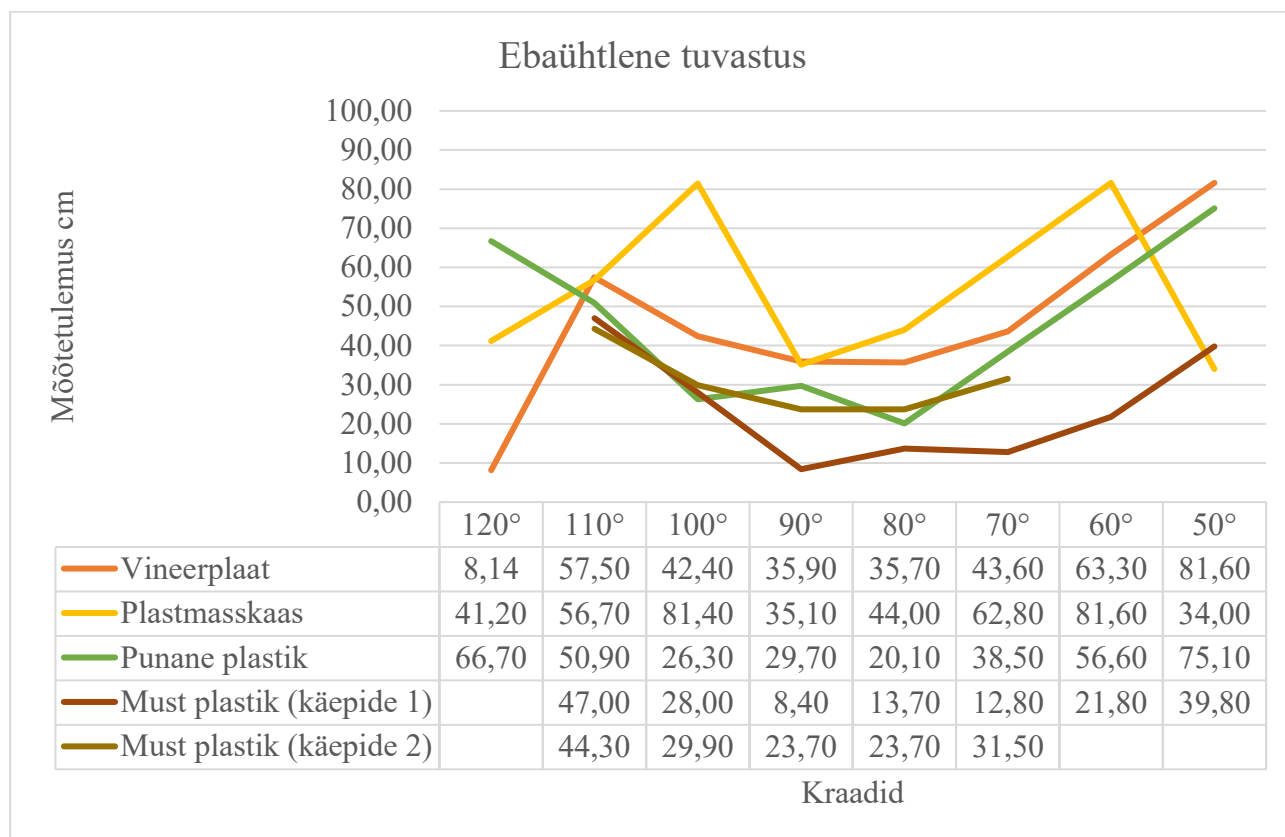
Pilt 20 Test 2, Laseri testimise 1 visuaalne näide

Laser tuvastas ühtlaselt (Pilt 21) polüoksümetüleen, polüetüleenvahtu, alumiiniumi ja anodeeritud alumiiniumi, millest kolme materjali puhul sai kirja väiksema nurga tulemused. Selliste nurkade all ei saa aga kruvikeeramise süsteemi kasutada, sest puudub piisav kokkupuude ja jõud kruvi keeramiseks. Anodeeritud alumiiniumi puhul oli kasutatud komponenti, mille pinnal olid tasapinna muutused, sellest ka kerged võnked mõõtmistulemustes.



Pilt 21 Test 2, Laseri test 1. Ühtlane tuvastus

Ebaühtlane tuvastamine (Pilt 22) oli läbipaistval plastmassist kaanel- läbipaistev, vineerplaadiga-roboti vari ja kliendi plastik tooted. Vineerplaadi ja plastmasskaane tulemused olid ebaühtlased ainult selle pärast, et roboti vari jäi pinnale. Kliendi plastikust materjalidest katseesemete tulemused olid kehvad kuna, kasutatavad komponendid olid väiksed võrreldes teiste testitavate materjalidega. Samuti segas ühtlase mõõtetulemuse saavutamiseks materjali töötlus. Käepideme 1 ja 2 komponendi puhul ei andnud laser tulemust kui laserikiir laskus peegelduval pinnale. Nagu ka vineerplaadi ja plastmasskaane puhul mõjutas ka viimast materjali roboti vari.



Pilt 22 Test 2, Laseri test 1. Ebaühtlane tuvastus

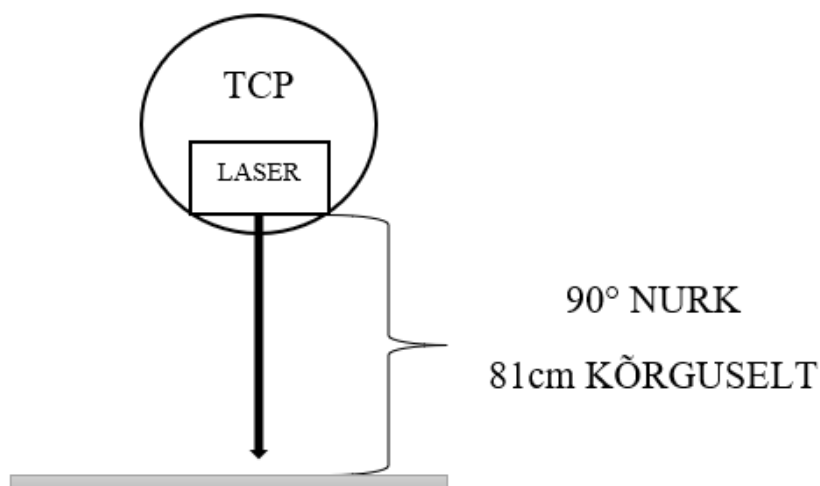
JÄRELDUS

Test 2, laseri testimine 1 kokkuvõtteks võib järeldada, et laser suudab tuvastada erinevaid materjale, kuid mõõtenäit muutub iga materjaliga ja kraadiga. Ühtlase- ja mitte ühtlase tuvastamise põhjuseid on mitu. Laser tuvastas igat materjali 90° nurga all väga hästi, kuid kui TCP oli liigutatud üle 100° paremale, siis tuvastamine läks kehvemaks. Põhjuseks võis olla vari, mis tekkis robotist ja segas tuvastamist. 90° vasakule ehk 80° poole liikudes oli laseri näit ühtlasem ja sai ka mõõta väiksemate nurkade all olevaid laseri tulemusi. Ka selle põhjuseks võis olla valguse ja varju erinevus.

3.2.2 TEST 3, LASERI TESTIMINE 2

Laseri testimise teiseks eesmärgiks oli mõõta pinna kaugust laserist, et vaadata, kui täpne see on. Pinnaks, mille peal kaugust testiti, oli alumiinium, sest testist 2 laseri testimine 1 tulemus andis selle pinna peal kõige paremaid tulemusi.

Laseri ja alumiinium pinna kauguse mõõtmiseks kasutati indikaatorkella. Mõõtmist alustati kõige kõrgemast võimalikust laseritulemusest, et näha mis on selle +/- eksimus. Mõõtmisi tehti laseri näidu järgi 81- 0 cm (Pilt 23) ja pandi kirja laseri mõõtetulemused 0,1 cm täpsusega. Laseri andmetes oli kirjas, et eksimus on 200 μ m ning mõõtekaugus on kõige täpsem alates 20 cm. Laseri eksimus täpsus sõltub kaugusest ja nurgast ehk kui laser on materjaliga ühtlaselt horisontaalselt siis mõõtetäpsus on 200 μ m kui asendit muuta siis muutuba ka täpsus. Selleks, et oleks ettekujutus, kuidas testi sooritati on abiks all olev pilt (Pilt 23). TCP külge on kinnitatud laser, mis on suunatud all 90° nurgaga. Samuti on toodu välja musta noolega mõõtmise suund. Hall kast kujutab alumiinium pinda.



Pilt 23 Test 3, Laseri testimise 2 visuaalne näide

Järgneval pildil (Pilt 24) on välja toodud laseri täpsuse mõõtmistulemused graafikul. Mõõtmisi alustati 81,50 cm pealt, aga selgema pildi loomiseks on graafikule toodud 80,90 cm kõrgusest mõõtmised. Mõõtmistulemuste vahemik on 0,20 ja 1,60 cm vahel ja mõõdetava laseri näit on 0,9 cm ja liikudes ühe mm võrra väiksemaks. Mõõtmisel olid need arvud 80,90 cm; 80,80 cm; 80,70 cm jne, selleks, et need graafikule kanda. Tabelis on loogilisemaks visuaaliks kirjas 0,9 cm, ja 0,80 cm kirjas.

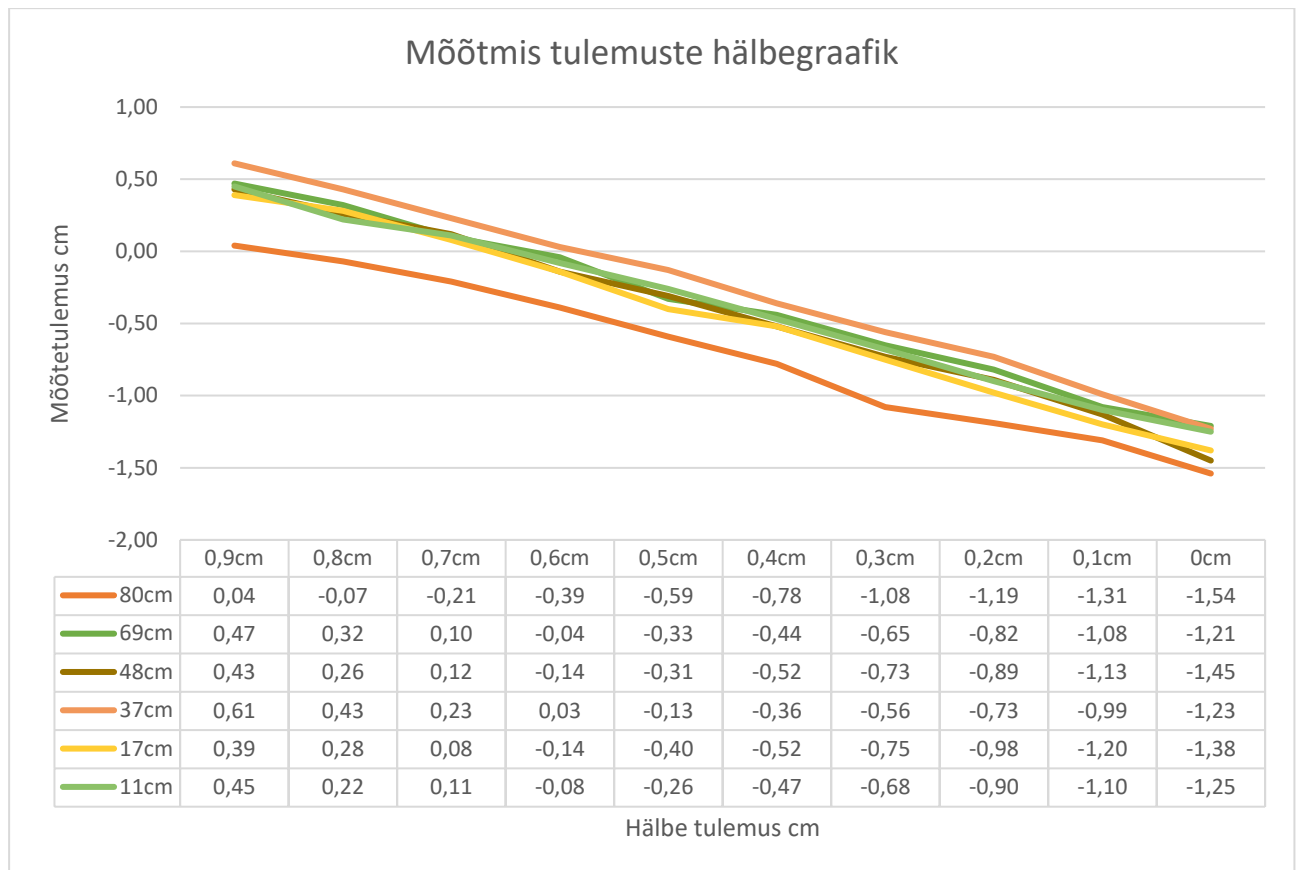


Pilt 24 Test 3, Laseri test 2. Laseri täpsus alumiinium pinnal 90° nurk

Mõõtmistulemuste pealt on näha, et mida lähemale jõuti laseri andmetes maksimaalsele mõõtmiskaugusele, seda täpsemaks ja ühtlasemaks muutus mõõtmistulemus. Laseri andmetes on kirjas, et kõige parem ja täpsem mõõtetulemus on 20cm pealt. Testimise käigus selgus, et täpsus on saavutatav juba alates 35 cm pealt. Andmed graafikul pannes on näha, et ühtlased ja täpsed tulemused on saavutatavad juba 37cm pealt. Kogu testi tulemused on välja toodud lisas (Lisa 3).

Järgmisel pildil (Pilt 25) on kujutatud samade tulemuste hälvet. Hälbe arvutamiseks kasutati allolevat valemit (5), kus d on hälve, N cm on arvu 0,1 cm muutuja ja lahutati sellest saadu N_{cm} A_{cm} mõõtetulemus:

$$d = N_{cm} - A_{cm} \quad (5)$$



Pilt 25 Test 3, Laseri test 2. Mõõtmistulemuste hälve

Hälve arvutused tehti selle jaoks, et näha kui palju eelneva graafiku tulemused tegelikkuses kõiguvad ja kas laseri andmetes olev 0,1 cm täpsus on sama. Nagu jooniselt on näha siis tulemused on väga erinevad lubatust. Reaalsuses aga katseid tehes oli näha, et tulemused muutusid iga 1 mm-ga sentimeetri kohta.

JÄRELDUS

Test 3, laseri testimine 2 põhjal võib järeldada, et laserit on võimalik kasutada 81 cm pealt, millest 37 cm on võimalik saada juba üsnagi täpseid tulemusi. Kindlasti mõjutab laseri täpsust ja mõõtmis tulemust kasutatav materjal, kaugus ja nurk. Selle testi tulemuste põhjal on valitud laser sobilik kruvikeeramise süsteemi parendamise jaoks.

3.3 TULEMUSTE ANALÜÜS

Kruvikeeramise süsteemi arendusanalüüsiks sooritati kolm testi. Esimene test koosnes 9 katsest, mille käigus katsetati ettevõtte poolt antud koodi. Teine test seisnes selles, kas laser suudab tuvastada vähemalt nelja erinevat materjali 35cm kõrguselt ja mis on laseri tulemus 120°-60° nurga alt.

Kolmanda testiga taheti leida üks kindel kõrgus alates, millest mõõtetäpsus oluliselt ei muutu. Kolme testi põhjal, mida sooritati kruvikeeramise süsteemi arendamiseks on võimalik süsteem muuta optimaalsemaks ja multifunktsionaalsemaks.

Test 1 tegemiseks kasutati koodi, mis oli eelnevalt simulatsiooni peal valmis kirjutatud. Reaalsuses toimis kood nii kaua, kuni robot tööpinna vastu ei liikund ja iseendale taksituseks ei jäänud. Kõige paremad tulemused olid siis kui testpind oli suhteliselt ühtlane tööpinnaga. Kõik need asendid, millesse TCP sai panna pidid olema võimalikult suure vahemaaga robotkäe õlast. Vastasel juhul põrkas kruvikeeramise süsteem vastu õlga ja roboti turvasüsteem panin koodi seisma.

Test 2, laseri testimine 1 eesmärk oli välja selgitada mitut erinevat materjali on võimalik laseriga testida. Selle jaoks kasutati kaheksat materjali ja ühteistkümme komponenti. Kõige paremini tuvastas laser alumiiniumi, anodeeritud alumiinium, polüetüleenvahtu ja polüoksümetüleen. Nende testitulemused olid kõige paremad, kuna need ei peegeldanud tagasi ja nende materjalide puhul ei olnud oluline, kas roboti vari jäi peale või mitte. Kehvema tulemused saadi vineerplaadiga, plastmasskaanega ja tavalise plastikuga, millest kaks olid süsimustad ja töödeldud pinnaga ja viimane väike punane komponent. Nende materjalide puhul oli oluline, et roboti vari ei langeks peale ja kolme plastik komponendi paigutus laseri all.

Test 3, laseri testimine 2 teostati selle jaoks, et katsetada laseri piire. Selle jaoks võeti kõige kõrgem punkt tasapinnast mida laser näha suutis ja hakati sellel lähemale liikuma. Testi käigus selgus, et laseri täpsus on saavutatav juba 15cm enne andmetes kirjas olevat 20cm-t. Tulemuste puhul on oluline meele pidada, et test oli sooritatud nii, et laser oli otse testpinna kohal ja liiguti ainult ühes suunas. Tulemused võivad olla erineva kui laser on tööpinnaga mõne muu nurga all.

KOKKUVÕTE

Lõputöö kruvikeeramise süsteemi arendusanalüüsi eesmärgiks oli võtta ettevõtte kruvikeeramise süsteem ning muuta see optimaalsemaks ja multifunktsionaalseks. Analüüsi käigus sooritati kolm testi, selleks, et kruvikeeramise süsteem suudaks tuvastada etteantud komponendi ja sellele kruvi külge kruvida, olenemata asendist ja paiknemise positsioonist.

Arendusanalüüsi käigus teostati kolm testi, mille käigus testiti ettevõtte poolt saadud koodi ehk Test 1 Kood, seejärel valiti välja laser, mida testiti kahel viisil ehk test 2, laseri testimine 1 ja test 3, laseri testimine 2. Kõik testimised viidi läbi Optimo Robotics-is ning kasutati UR10e ja nende kruvikeeramise süsteemi.

Test 1 Kood seisnes koodi katsetamisel, mis oli loodud juhendaja Harti Vait poolt. Selle katsetamiseks tuli määrata robotil kolm muutuvat punkti tasapinnal ja kolm kindlaks jäävat punkti tasapinnal. Testi sooritamiseks pidi muutma tasapinda ja muutuvaid punkte, selleks tõsteti või liigutati tasapinda erinevate nurkade all. Kolm mitte- muutuvat punktid jäid samaks. Test loeti edukaks kui tasapinda ja muutuvaid punkte muudeti, aga mitte- muutuvad jäid samaks ning koodi käivitamisel ei põrganud kruvikeeramise süsteem vastu testpinda ja ennast vaid läbis etteantuid punkte.

Test 2 Laseri testimine 1 eesmärk oli kindlaks teha, kas väljavalitud laser suudab 120°-60° kraadiste nurkade alt tuvastada erinevaid materjale. Test loeti edukaks, kui laser suutis tuvastada vähemalt nelja erinevat materjali ja vähemalt 90° pealt. Kõige paremini tuvastas laser alumiiniumi, anodeeritud alumiiniumi, polüoksümetüleen ja polüetüleenvahtu. Probleemseteks kohtadeks olid läikiva pinnaga materjalid- vineerplaat, plastmasskaas ja töödeldud plastik. Selle testi põhjal sai kindlaks teha, mis materjale saaks edaspidi kasutada ja mis on laseri võimekuse tase.

Test 3 Laseri testimine 2 eesmärgiks oli vaadelda kui kõrgelt on laseril juba nägemis tuvastus. Testi sooritamiseks võeti teras-pind ja laseri kõige kaugem tuvastamispunkt sellest. Mõõtmisi hakati sooritama 81cm kauguselt iga sentimeetri 10mm täpsusega. Test oli edukas, kui mõõtetäpsus jäi samaks või muutus paremaks.

Arendusanalüüsi järeldusel võib kindlalt väita, et kruvikeeramise süsteemi on võimalik muuta optimaalsemaks. Koodi kasutades saab algse programmi ja roboti seadistamise muuta kiiremaks. Kasutades laserit saab süsteemi muuta multifunktsionaalsemaks ning olenemata kõrgusest ja nurgast robotsüsteem suudab tuvastada etteantud kohti ja toimetada selle piires.

SUMMARY

The final thesis on „The development analysis of the screwdriving system“ was written by a fourth-year student of the robotics major at Tallinn University of Technology, who did the development analysis for Optimo Robotics OÜ.

The aim of the thesis is to take the Optimo Robotics screwdriving system and make it more optimal and multifunctional. In the development analysis, what the current product can do, what it could do, and what it should do and use, so that the desired development leads to the required result, is undertaken.

The current screwdriving system works by being given a component and a screw. Everything in the program is written in detail to perform the work, and for every minor change, the entire configuration must be redone.

The analysis should identify a solution or solutions that can make the system better and simpler. The company has given certain requirements, what and how the robot should be able to do in the future. The main desire is that it should be multifunctional, quickly programmable, and able to work with different materials and from different angles. The result is a screwdriving system that can detect a given component and screw to it, regardless of position and location.

During the development analysis, three tests were performed, in which a script provided by the company was tested, i.e., Test 1 Script, then a laser was selected, which was tested in two ways, i.e., Test 2, Laser Testing 1 and Test 3, Laser Testing 2. All testing was performed at Optimo Robotics and used the UR10e and their screwdriving system.

Test 1 Script consisted of testing a script created by instructor Harti Vait. To test this, the robot had to be assigned three variable points on the plane and three fixed points on the plane. To perform the test, the plane and changing points had to be changed, for this the plane was raised or moved at different angles. The three non-changing points remained the same. The test was considered successful if the plane and the changing points were changed, but the non-changing ones remained the same, and when the program was started, the screwdriving system did not hit the test surface and only passed through the predetermined points.

Test 2 Laser testing 1 aimed to determine whether the selected laser can detect different materials from angles of 120°-60° degrees. The test was considered successful if the laser could detect at least four different materials and from at least 90°. The laser detected aluminum, anodized aluminum,

polyoxymethylene and polyethylene foam best. The problem areas were materials with a shiny surface - plywood, plastic cover, and processed plastic. Based on this test, it was possible to determine what materials could be used in the future and what the level of laser capability would be.

Test 3 The purpose of laser testing 2 was to see how high the laser's vision detection is. To perform the test, the steel surface and the farthest detection point of the laser were taken from it. Measurements were taken from a distance of 81 cm with an accuracy of 10 mm for each centimeter. The test was successful if the measurement accuracy remained the same or improved.

At the conclusion of the development analysis, it can be confidently stated that the screwdriving system can be made more optimal. By using a script, the initial program and robot setup can be made faster. By using a laser, the system can be made more multifunctional, and regardless of the height and angle, the robot system can detect predetermined places and deliver within it.

VIIDATUD ALLIKAD

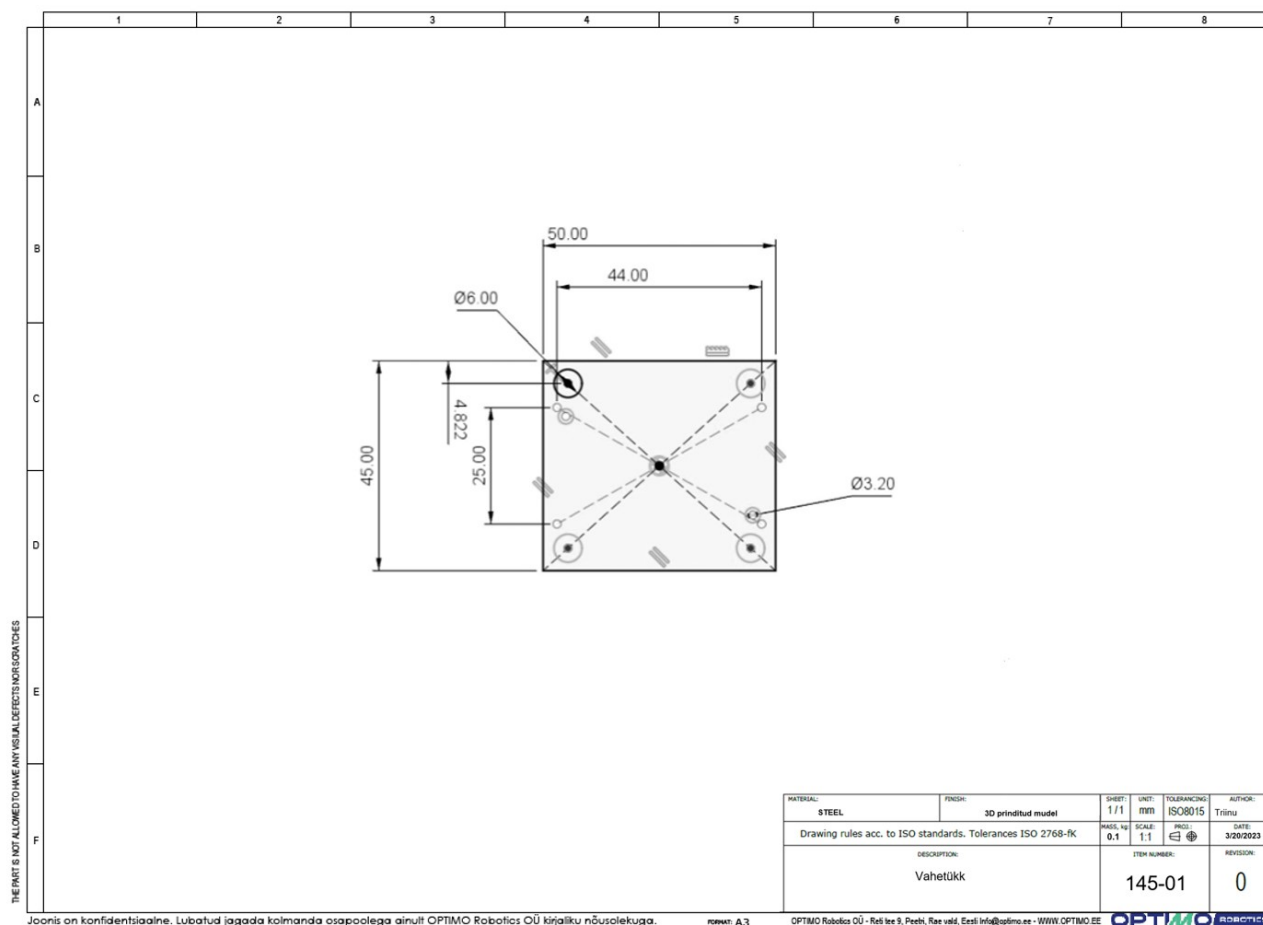
- [1] 28. märts, 2023. [Online]. Available: <https://optimo.ee/meist/>.
- [2] 04. aprill, 2023 [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/plus/products/optimo-robotics/optimo-screwdriving-system-with-automatic-feeding/>
- [3] 28. märts, 2023. [Online]. Available: <https://optimo.ee/teenused/koostoorobotid/>
- [4] 04. aprill, 2023. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/products/collaborative-robots-cobots-benefits/>
- [5] 28. märts, 2023. [Online]. Available: <https://optimo.ee/teenused/toostusrobotid/>
- [6] 28. märts, 2023. [Online]. Available: <https://optimo.ee/teenused/insenerlahendused-ja-automatiseerimine/>
- [7] 28. märts, 2023. [Online]. Available: <https://optimo.ee/teenused/seadmete-ja-robotjaamade-ehitus/>
- [8] 18. aprill, 2023 [Online]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/crb-15000>
- [9] 18. aprill, 2023 [Online]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/crb-1100-swifti>
- [10] 18. aprill, 2023 [Online]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/crb-1300-swifti>
- [11] 18. aprill, 2023. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/media/1807465/ur5e-rgb-fact-sheet-landscape-a4.pdf>
- [12] 18. aprill, 2023. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/media/1807466/ur10e-rgb-fact-sheet-landscape-a4-125-kg.pdf>
- [13] 18. aprill, 2023. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/media/1811483/ur16e-rgb-fact-sheet-landscape-a4.pdf>
- [14] 18. aprill, 2023. [Online]. Available: <https://new.abb.com/news/detail/74323/prsrl-abb-launches-gofa-higher-payload-cobot-for-collaborative-tasks-up-to-5kg>
- [15] 18. aprill, 2023. [Online]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A8562&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

- [16] 18. aprill, 2023. [Online]. Available:
https://library.e.abb.com/public/6d9d4922a58b4614a799dd22ff1eebb1/SWIFTI_CRB1300-datasheet_.pdf
- [17] 28. märts, 2023. [Online]. Available: <https://optimo.ee/kruvikeeramise-lahendused/>
- [18] 25. aprill, 2023 [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/62996.html>
- [19] H. Vait and M. Vilist, "ROBOTIC SCREWDRIVER AND METHOD". Euroopa patent EP4039405, 09. jaanuar 2023
- [20] 19. aprill, 2023. [Online]. Available:
https://www3.panasonic.biz/ac/ae/search_num/index.jsp?c=detail&part_no=HG-C1200-P&large_g_cd=2&medium_g_cd=15&small_g_cd=133&series_cd=3496
- [21] 19. aprill, 2023. [Online]. Available: <https://www.ifm.com/ee/en/product/O1D300>
- [22] 19. aprill, 2023. [Online]. Available:
<https://www.bannerengineering.com/us/en/products/part.807393.html>

LISAD

LISA 1. VAHETÜKI JOONIS

Alloleval pildil on kujutatud vahetükk laseri jaoks. Komponent on 10mm paksusega ja kõik kujutatud augud on läbivalt ilma keermeta. Neli 6 mm diameetriga augud on selle jaoks, et kinnitada vahetükk roboti TCP külge ja neli 3,20 mm diameetriga augud on laseri kinnitamise jaoks.



Joonis on konfidentsiaalne. Lubatud jagada kolmanda osapoolega ainult OPTIMO Robotics OÜ kirjaliku nõusolekuga.

FORMAT: A3

OPTIMO Robotics OÜ - Reži tee 5, Peeti, Rae vald, Eesti info@optimo.ee - WWW.OPTIMO.EE

OPTIMO ROBOTICS

Pilt 26 Vahetüki joonis

LISA 2. TEST 2, LASERI TESTIMINE 1

Testiti kaheksat erinevat materjali ja kümmet erinevat komponenti. Mõõtmisi tehti 120°-40°-ni, kui töös kasutati vahemiku 120°-60°, sest 50° ja 40° tulemuste jaoks liigutati komponenti, et näha kui palju oleks laser üldse võimeline nägema.

Vineerplaat	120°	110°	100°	90°	80°	70°	60°	50°	40°
Laser	-8,14	57,50	-42,40	-35,90	-35,70	-43,60	-63,30	-81,60	
Plastmaskaas									
Laser	-41,20	-56,70	-81,40	-35,10	-44,00	-62,80	-81,60	-34,00	
Roostevabateras									
Laser		1,00	15,00	22,10	23,00	18,60	15,90		
Alumiinium plaat									
Laser	-81,40	-71,40	-46,40	-31,70	-25,60	-25,80	-33,50	-50,40	-81,30
Polüetüleenvaht									
Laser	-66,20	-50,30	-35,50	-29,10	-29,50	-37,10	-52,60		
Polüoksümetüleen									
Laser	-79,50	-74,90	-48,50	-30,80	-24,40	-24,60	-37,70	-53,60	-81,00
Punane plastik									
Laser	-66,70	-50,90	-26,30	-29,70	-20,10	-38,50	-56,60	-75,10	-81,50
Must sang/käepide									
Laser		-47,00	-28,00	-8,40	-13,70	-12,80	-21,80	-39,80	-53,60
Must ümmargune jupp									
Laser		-44,30	-29,90	-23,70	-23,70	-31,50			
Anodeeritud alumiinium									
Laser	-38,40	3,30	13,10	3,70	4,00	-2,80	5,60	-44,30	

Pilt 27 Laseri test 1 mõõtmistulemused

LISA 3. TEST 3, LASERI TESTIMINE 2

Laseri test 3, laseri testi tulemused on all toodud piltidel.

-81,00													
Kõrgus	3,72	3,81	3,88	3,92	3,94	3,95	4,00	4,21					
Laser	-81,50	-81,40	-81,30	-81,30	-81,30	-81,20	-81,10	-81,00					
Kõrgus								4,81					
-80,00													
Kõrgus	4,27	4,33	4,39	4,52	4,53	4,57	4,64	4,69	4,73	4,87			
Laser	-80,90	-80,80	-80,70	-80,60	-80,50	-80,40	-80,30	-80,20	-80,10	-80,00			
		4,29											
-79,00													
Kõrgus	0,86	0,87	0,91	0,99	1,09	1,18	1,38	1,39	1,41	1,54			
Laser	-79,90	-79,80	-79,70	-79,60	-79,50	-79,40	-79,30	-79,20	-79,10	-79,00			
-78,00													
Kõrgus	1,68	1,72	1,84	1,89	1,94	2,15	2,18	2,42	2,56	2,56			
Laser	-78,90	-78,80	-78,70	-78,60	-78,50	-78,40	-78,30	-78,20	-78,10	-78,00			
										2,60			
-77,00													
Kõrgus	2,73	2,93	3,02	3,12	3,23	3,27	3,34	3,42	3,45	3,58			
Laser	-77,90	-77,80	-77,70	-77,60	-77,50	-77,40	-77,30	-77,20	-77,10	-77,00			
				3,08	3,21								
-76,00													
Kõrgus	3,67	3,76	3,76	3,89	3,92	3,94	4,02	4,12	4,18	4,34			
Laser	-76,90	-76,80	-76,70	-76,60	-76,50	-76,40	-76,30	-76,20	-76,10	-76,00			
			3,81										
-75,00													
Kõrgus	4,35	4,63	4,67	4,78	5,02	5,02	5,18	5,44	5,49	5,81			
Laser	-75,90	-75,80	-75,70	-75,60	-75,50	-75,40	-75,30	-75,20	-75,10	-75,00			
	4,68												
-74,00													
Kõrgus	0,61	0,61	0,73	0,82	0,91	0,96	1,23	1,27	1,42	1,55			
Laser	-74,90	-74,80	-74,70	-74,60	-74,50	-74,40	-74,30	-74,20	-74,10	-74,00			
		0,68				1,00	5,11	1,29		5,51			
-73,00													
Kõrgus	1,66	1,67	1,84	1,91	1,97	2,09	2,26	2,30	2,39	2,46			
Laser	-73,90	-73,80	-73,70	-73,60	-73,50	-73,40	-73,30	-73,20	-73,10	-73,00			
						2,15							
-72,00													
Kõrgus	2,66	2,73	2,76	2,82	2,98	3,03	3,13	3,17	3,32	3,41			
Laser	-72,90	-72,80	-72,70	-72,60	-72,50	-72,40	-72,30	-72,20	-72,10	-72,00			
-71,00													
Kõrgus	3,17	3,51	3,42		3,43	3,60	3,66	3,67	3,72	4,00	4,13	4,15	4,17
Laser	-71,90	-71,80	-71,80	-71,80	-71,70	-71,60	-71,50	-71,50	-71,40	-71,30	-71,20	-71,10	-71,00
	3,43	3,76	3,70	3,68	3,81	3,59	3,66						
-70,00													
Kõrgus	4,57	4,60	4,74	4,74	4,80	4,87	4,96	5,05	5,29	5,35			
Laser	-70,90	-70,80	-70,70	-70,60	-70,50	-70,40	-70,30	-70,20	-70,10	-70,00			
Kõrgus	4,45	4,48			4,86	4,93	5,03		5,12	5,28			
-69,00													
Kõrgus	0,43	0,48	0,60	0,64	0,83	0,84	0,95	1,02	1,18	1,21			
Laser	-69,90	-69,80	-69,70	-69,60	-69,50	-69,40	-69,30	-69,20	-69,10	-69,00			
-68,00													
Kõrgus	1,35	1,45	1,50	1,64	1,73	1,80	1,96	2,03	2,00	2,07			
Laser	-68,90	-68,80	-68,70	-68,60	-68,50	-68,40	-68,30	-68,20	-68,10	-68,00			
-67,00													
Kõrgus	2,20	2,26	2,42	2,51	2,54	2,64	2,67	2,75	2,82	2,93			
Laser	-67,90	-67,80	-67,70	-67,60	-67,50	-67,40	-67,30	-67,20	-67,10	-67,00			

Pilt 28 Mõõtmistulemused 81,50-67 cm

-66,00										
Kõrgus	3,18	3,24	3,27	3,52	3,46	3,55	3,71	3,76	3,87	3,87
Laser	-66,90	-66,80	-66,70	-66,60	-66,50	-66,40	-66,30	-66,20	-66,10	-66,00
Kõrgus				3,48	3,55	3,60				3,93
-65,00										
Kõrgus	3,99	4,01	4,12	4,30	4,44	4,48	4,53	4,69	4,76	4,94
Laser	-65,90	-65,80	-65,70	-65,60	-65,50	-65,40	-65,30	-65,20	-65,10	-65,00
Kõrgus	4,07	4,15								
-64,00										
Kõrgus	5,04	5,08	5,23	5,42	5,50	5,59	5,63	5,73	5,80	5,99
Laser	-64,90	-64,80	-64,70	-64,60	-64,50	-64,40	-64,30	-64,20	-64,10	-64,00
-63,00										
Kõrgus	6,07	6,18	6,22	6,31	6,59	6,61	6,69	6,84	7,01	7,08
Laser	-63,90	-63,80	-63,70	-63,60	-63,50	-63,40	-63,30	-63,20	-63,10	-63,00
					6,43					
-62,00										
Kõrgus	1,01	1,18	1,23	1,29	1,38	1,54	1,56	1,68	1,71	1,78
Laser	-62,90	-62,80	-62,70	-62,60	-62,50	-62,40	-62,30	-62,20	-62,10	-62,00
Kõrgus		1,08			1,40		1,59			
-61,00										
Kõrgus	2,00	2,08	2,19	2,25	2,29	2,40	2,47	2,67	2,75	2,95
Laser	-61,90	-61,80	-61,70	-61,60	-61,50	-61,40	-61,30	-61,20	-61,10	-61,00
Kõrgus							2,60			
-60,00										
Kõrgus	2,96	3,01	3,15	3,34	3,47	3,43	3,61	3,82	3,79	4,00
Laser	-60,90	-60,80	-60,70	-60,60	-60,50	-60,40	-60,30	-60,20	-60,10	-60,00
Kõrgus		3,08		3,43	3,50	3,56		3,68		3,88
-59,00										
Kõrgus	4,02	4,09	4,12	4,30	4,34	4,46	4,57	4,67	4,77	4,91
Laser	-59,90	-59,80	-59,70	-59,60	-59,50	-59,40	-59,30	-59,20	-59,10	-59,00
Kõrgus				4,28		4,41				
-58,00										
Kõrgus	5,00	5,02	5,11	5,24	5,34	5,49	5,52	5,71	5,85	5,93
Laser	-58,90	-58,80	-58,70	-58,60	-58,50	-58,40	-58,30	-58,20	-58,10	-58,00
-57,00										
Kõrgus	6,06	6,18	6,26	6,30	6,38	6,51	6,62	6,63	6,71	6,69
Laser	-57,90	-57,80	-57,70	-57,60	-57,50	-57,40	-57,30	-57,20	-57,10	-57,00
-56,00										
Kõrgus	1,87	1,94	1,93	2,20	2,05	2,05	2,06	2,20	2,23	2,43
Laser	-56,90	-56,80	-56,70	-56,60	-56,50	-56,40	-56,30	-56,20	-56,10	-56,00
Kõrgus	1,79		2,00	1,86	2,14		2,11	2,17	2,38	2,49
-55,00										
Kõrgus	2,55	2,69	2,78	2,81	2,97	2,99	3,06	3,19	3,38	3,37
Laser	-55,90	-55,80	-55,70	-55,60	-55,50	-55,40	-55,30	-55,20	-55,10	-55,00
Kõrgus	2,62	2,69	2,75	2,90	2,97	3,01	3,09	3,14	3,28	
-54,00										
Kõrgus	0,31	0,44	0,59	0,79	0,79	0,91	1,17	1,25	1,31	1,44
Laser	-54,90	-54,80	-54,70	-54,60	-54,50	-54,40	-54,30	-54,20	-54,10	-54,00
Kõrgus				0,73						
-53,00										
Kõrgus	1,60	1,64	1,74	1,84	2,04	2,19	2,22	2,22	2,39	2,52
Laser	-53,90	-53,80	-53,70	-53,60	-53,50	-53,40	-53,30	-53,20	-53,10	-53,00
Kõrgus		1,68				2,16	2,23	2,28	2,40	
-52,00										
Kõrgus	2,54	2,63	2,87	2,87	2,94	3,07	3,17	3,24	3,26	3,31
Laser	-52,90	-52,80	-52,70	-52,60	-52,50	-52,40	-52,30	-52,20	-52,10	-52,00
Kõrgus			2,85							3,37

Pilt 29 Mõõtmistulemused 66,00-52 cm

-51,00										
Kõrgus	3,61	3,65	3,66	3,78	3,87	3,90	3,94	4,17	4,27	4,36
Laser	-51,90	-51,80	-51,70	-51,60	-51,50	-51,40	-51,30	-51,20	-51,10	-51,00
Kõrgus			3,69							
-50,00										
Kõrgus	4,58	4,70	4,77	4,88	5,18	5,27	5,33	5,52	5,69	5,73
Laser	-50,90	-50,80	-50,70	-50,60	-50,50	-50,40	-50,30	-50,20	-50,10	-50,00
Kõrgus			4,82	4,90	5,09		5,50	5,61		
-49,00										
Kõrgus	5,85	5,97	5,98	6,02	6,13	6,19	6,26	6,34	6,44	6,46
Laser	-49,90	-49,80	-49,70	-49,60	-49,50	-49,40	-49,30	-49,20	-49,10	-49,00
Kõrgus	5,89									6,52
-48,00										
Kõrgus	0,47	0,54	0,58	0,74	0,81	0,92	1,03	1,09	1,23	1,45
Laser	-48,90	-48,80	-48,70	-48,60	-48,50	-48,40	-48,30	-48,20	-48,10	-48,00
Kõrgus					0,85			1,14	1,32	
-47,00										
Kõrgus	1,47	1,61	1,67	1,79	1,86	1,96	2,06	2,12	2,26	2,31
Laser	-47,90	-47,80	-47,70	-47,60	-47,50	-47,40	-47,30	-47,20	-47,10	-47,00
Kõrgus	1,50		1,73		1,89	1,98				
-46,00										
Kõrgus	2,49	2,50	2,58	2,73	2,77	2,85	2,96	3,04	3,09	3,26
Laser	-46,90	-46,80	-46,70	-46,60	-46,50	-46,40	-46,30	-46,20	-46,10	-46,00
Kõrgus		2,52	2,65			2,87			3,16	
-45,00										
Kõrgus	3,28	3,41	3,50	3,56	3,73	3,78	3,85	4,03	4,13	4,28
Laser	-45,90	-45,80	-45,70	-45,60	-45,50	-45,40	-45,30	-45,20	-45,10	-45,00
Kõrgus	3,37	3,45		3,62			3,91	4,08	4,20	
-44,00										
Kõrgus	4,38	4,52	4,62	4,68	4,89	5,01	5,07	5,24	5,25	5,39
Laser	-44,90	-44,80	-44,70	-44,60	-44,50	-44,40	-44,30	-44,20	-44,10	-44,00
Kõrgus				4,73	4,91		5,18		5,30	
-43,00										
Kõrgus	0,38	0,44	0,61	0,66	0,82	0,96	1,08	1,20	1,30	1,53
Laser	-43,90	-43,80	-43,70	-43,60	-43,50	-43,40	-43,30	-43,20	-43,10	-43,00
Kõrgus				0,70			1,15	1,22	1,33	1,58
-42,00										
Kõrgus	1,65	1,78	1,84	1,96	2,04	2,16	2,17	2,36	2,44	2,49
Laser	-42,90	-42,80	-42,70	-42,60	-42,50	-42,40	-42,30	-42,20	-42,10	-42,00
Kõrgus		1,82		2,02	2,08		2,20			2,52
-41,00										
Kõrgus	2,63	2,66	2,72	2,81	2,84	2,90	3,00	3,05	3,18	3,26
Laser	-41,90	-41,80	-41,70	-41,60	-41,50	-41,40	-41,30	-41,20	-41,10	-41,00
Kõrgus		2,70	2,74			2,94		3,14	3,21	
-40,00										
Kõrgus	3,35	3,44	3,53	3,64	3,66	3,84	3,99	4,10	4,17	4,29
Laser	-40,90	-40,80	-40,70	-40,60	-40,50	-40,40	-40,30	-40,20	-40,10	-40,00
Kõrgus	3,40	3,48	3,59	3,63	3,72	3,87	4,02	4,13		
-39,00										
Kõrgus	4,37	4,47	4,62	4,70	4,82	4,87	4,92	5,11	5,23	5,38
Laser	-39,90	-39,80	-39,70	-39,60	-39,50	-39,40	-39,30	-39,20	-39,10	-39,00
Kõrgus	4,45	4,55		4,75	4,85		4,95	5,17	5,33	5,43
-38,00										
Kõrgus	5,52	5,72	5,79	5,83	5,99	6,03	6,18	6,25	6,41	6,47
Laser	-38,90	-38,80	-38,70	-38,60	-38,50	-38,40	-38,30	-38,20	-38,10	-38,00
Kõrgus	5,69	5,78		5,90			6,22	6,31		

Pilt 30 Mõõtmistulemused 51,90-38 cm

-37,00										
Kõrgus	0,29	0,37	0,47	0,57	0,63	0,76	0,86	0,93	1,09	1,23
Laser	-37,90	-37,80	-37,70	-37,60	-37,50	-37,40	-37,30	-37,20	-37,10	-37,00
Kõrgus			0,51		0,67		0,90	1,02	1,02	
-36,00										
Kõrgus	1,31	1,34	1,44	1,48	1,63	1,68	1,82	1,90	2,03	2,11
Laser	-36,90	-36,80	-36,70	-36,60	-36,50	-36,40	-36,30	-36,20	-36,10	-36,00
Kõrgus		1,38	1,47	1,60	1,61	1,76		2,00		2,20
-35,00										
Kõrgus	2,27	2,36	2,57	2,62	2,66	2,83	2,97	3,13	3,17	3,32
Laser	-35,90	-35,80	-35,70	-35,60	-35,50	-35,40	-35,30	-35,20	-35,10	-35,00
Kõrgus	2,29				2,72		3,09		3,26	3,36
-34,00										
Kõrgus	3,39	3,55	3,58	3,77	3,87	3,99	4,09	4,15	4,22	4,29
Laser	-34,90	-34,80	-34,70	-34,60	-34,50	-34,40	-34,30	-34,20	-34,10	-34,00
Kõrgus	3,47		3,70	3,78	3,94	4,04	4,12		4,25	
-33,00										
Kõrgus	4,40	4,44	4,53	4,76	4,77	4,99				
Laser	-33,90	-33,80	-33,70	-33,60	-33,50	-33,40	-33,30	-33,20	-33,10	-33,00
Kõrgus		4,49	4,62		4,83	5,04	5,13	5,15	5,20	5,30
-32,00										
Kõrgus	2,52	2,73	2,79	2,93	3,03	3,14	3,23	3,31	3,42	3,50
Laser	-32,90	-32,80	-32,70	-32,60	-32,50	-32,40	-32,30	-32,20	-32,10	-32,00
Kõrgus	2,58	2,78	2,89							
-31,00										
Kõrgus	3,59	3,73	3,80	3,88	4,00	4,06	4,16	4,25	4,30	4,43
Laser	-31,90	-31,80	-31,70	-31,60	-31,50	-31,40	-31,30	-31,20	-31,10	-31,00
Kõrgus							4,22	4,27	4,35	4,47
-30,00										
Kõrgus	4,60	4,62	4,73	4,80	4,98	5,05	5,13	5,25	5,36	5,44
Laser	-30,90	-30,80	-30,70	-30,60	-30,50	-30,40	-30,30	-30,20	-30,10	-30,00
Kõrgus		4,72	4,79	4,89		5,09	5,22	5,30	5,42	5,49
-29,00										
Kõrgus	1,52	1,60	1,66	1,72	1,80	1,89	2,05	2,14	2,20	2,29
Laser	-29,90	-29,80	-29,70	-29,60	-29,50	-29,40	-29,30	-29,20	-29,10	-29,00
Kõrgus						1,92				
-28,00										
Kõrgus	2,42	2,51	2,59	2,70	2,79	2,89	2,98	3,10	3,24	3,31
Laser	-28,90	-28,80	-28,70	-28,60	-28,50	-28,40	-28,30	-28,20	-28,10	-28,00
Kõrgus						2,92	3,07	3,13		
-27,00										
Kõrgus	3,44	3,51	3,60	3,74	3,80	3,93	3,97	4,09	4,23	4,29
Laser	-27,90	-27,80	-27,70	-27,60	-27,50	-27,40	-27,30	-27,20	-27,10	-27,00
Kõrgus		3,55	3,68		3,89		4,07	4,15		
Kõrgus										
Laser	4,42	4,48	4,62	4,77	4,79	4,95	4,98	5,12	5,24	5,31
Kõrgus	-26,90	-26,80	-26,70	-26,60	-26,50	-26,40	-26,30	-26,20	-26,10	-26,00
	4,46	4,56	4,68		4,88					
-25,00										
Kõrgus	1,52	1,65	1,70	1,80	1,86	1,99	2,13	2,21	2,28	2,44
Laser	-25,90	-25,80	-25,70	-25,60	-25,50	-25,40	-25,30	-25,20	-25,10	-25,00
Kõrgus			1,76		1,92	2,06			2,37	
-24,00										
Kõrgus	2,45	2,58	2,68	2,76	2,84	2,94	3,00	3,13	2,19	3,31
Laser	-24,90	-24,80	-24,70	-24,60	-24,50	-24,40	-24,30	-24,20	-24,10	-24,00
Kõrgus	2,53				2,89					

Pilt 31 Mõõtmistulemused 37,90-24 cm

-23,00										
Kõrgus	3,39	3,47	3,56	3,67	3,78	3,87	3,99	4,04	4,15	4,25
Laser	-23,90	-23,80	-23,70	-23,60	-23,50	-23,40	-23,30	-23,20	-23,10	-23,00
Kõrgus					3,82					
-22,00										
Kõrgus	4,29	4,42	4,45	4,56	4,70	4,74	4,84	4,96	5,01	5,12
Laser	-22,90	-22,80	-22,70	-22,60	-22,50	-22,40	-22,30	-22,20	-22,10	-22,00
Kõrgus			4,48			4,80	4,90		5,10	5,24
-21,00										
Kõrgus	1,52	1,58	1,76	1,79	1,91	1,97	2,09	2,14	2,28	2,41
Laser	-21,90	-21,80	-21,70	-21,60	-21,50	-21,40	-21,30	-21,20	-21,10	-21,00
Kõrgus							2,13	2,21	2,38	
-20,00										
Kõrgus	2,46	2,56	2,67	2,83	2,84	2,97	3,08	3,17	3,31	3,37
Laser	-20,90	-20,80	-20,70	-20,60	-20,50	-20,40	-20,30	-20,20	-20,10	-20,00
Kõrgus	2,54	2,62			2,92	3,07				3,39
-19,00										
Kõrgus	3,41	3,52	3,68	3,72	3,80	3,92	4,03	4,08	4,21	4,29
Laser	-19,90	-19,80	-19,70	-19,60	-19,50	-19,40	-19,30	-19,20	-19,10	-19,00
-18,00										
Kõrgus	4,36	4,48	4,59	4,71	4,84	4,87	4,98	5,06	5,16	5,27
Laser	-18,90	-18,80	-18,70	-18,60	-18,50	-18,40	-18,30	-18,20	-18,10	-18,00
-17,00										
Kõrgus	0,51	0,52	0,62	0,74	0,90	0,92	1,05	1,18	1,30	1,38
Laser	-17,90	-17,80	-17,70	-17,60	-17,50	-17,40	-17,30	-17,20	-17,10	-17,00
-16,00										
Kõrgus	1,54	1,67	1,90	1,98	1,99	2,10	2,21	2,29	2,37	2,50
Laser	-16,90	-16,80	-16,70	-16,60	-16,50	-16,40	-16,30	-16,20	-16,10	-16,00
Kõrgus	1,66	1,80			2,09					
-15,00										
Kõrgus	2,60	2,69	2,82	2,91	3,02	3,15	3,19	3,32	3,42	3,52
Laser	-15,90	-15,80	-15,70	-15,60	-15,50	-15,40	-15,30	-15,20	-15,10	-15,00
-14,00										
Kõrgus	3,61	3,67	3,78	3,89	3,99	4,09	4,19	4,25	4,33	4,46
Laser	-14,90	-14,80	-14,70	-14,60	-14,50	-14,40	-14,30	-14,20	-14,10	-14,00
-13,00										
Kõrgus	4,55	4,64	4,71	4,82	4,88	4,97	5,07	5,18	5,24	5,34
Laser	-13,90	-13,80	-13,70	-13,60	-13,50	-13,40	-13,30	-13,20	-13,10	-13,00
-12,00										
Kõrgus	5,42	5,55	5,66	5,76	5,85	5,90	5,99	6,09	6,19	6,29
Laser	-12,90	-12,80	-12,70	-12,60	-12,50	-12,40	-12,30	-12,20	-12,10	-12,00
-11,00										
Kõrgus	0,45	0,58	0,59	0,68	0,76	0,87	0,98	1,10	1,20	1,25
Laser	-11,90	-11,80	-11,70	-11,60	-11,50	-11,40	-11,30	-11,20	-11,10	-11,00
-10,00										
Kõrgus	1,38	1,47	1,58	1,70	1,81	1,91	2,02	2,11	2,17	2,29
Laser	-10,90	-10,80	-10,70	-10,60	-10,50	-10,40	-10,30	-10,20	-10,10	-10,00
-9,00										
Kõrgus	2,41	2,53	2,64	2,75	2,87	2,97	3,08	3,16	3,26	3,36
Laser	-9,90	-9,80	-9,70	-9,60	-9,50	-9,40	-9,30	-9,20	-9,10	-9,00
-8,00										
Kõrgus	3,48	3,60	3,70	3,79	3,91	4,00	4,11	4,24	4,33	4,43
Laser	-8,90	-8,80	-8,70	-8,60	-8,50	-8,40	-8,30	-8,20	-8,10	-8,00

Pilt 32 Mõõtmistulemused 23,90-8 cm

-7,00										
Kõrgus	4,51	4,59	4,70	4,82	4,92	5,02	5,12	5,22	5,32	5,36
Laser	-7,90	-7,80	-7,70	-7,60	-7,50	-7,40	-7,30	-7,20	-7,10	-7,00
-6,00										
Kõrgus	5,48	5,58	5,69	5,78	5,89	5,98	6,06	6,16	6,26	6,36
Laser	-6,90	-6,80	-6,70	-6,60	-6,50	-6,40	-6,30	-6,20	-6,10	-6,00
-5,00										
Kõrgus	1,06	1,10	1,20	1,30	1,37	1,48	1,56	1,66	1,77	1,85
Laser	-5,90	-5,80	-5,70	-5,60	-5,50	-5,40	-5,30	-5,20	-5,10	-5,00
-4,00										
Kõrgus	1,94	2,02	2,13	2,21	2,34	2,42	2,52	2,62	2,67	2,73
Laser	-4,90	-4,80	-4,70	-4,60	-4,50	-4,40	-4,30	-4,20	-4,10	-4,00
-3,00										
Kõrgus	2,81	2,92	2,97	3,06	3,16	3,22	3,32	3,42	3,50	3,60
Laser	-3,90	-3,80	-3,70	-3,60	-3,50	-3,40	-3,30	-3,20	-3,10	-3,00
-2,00										
Kõrgus	3,68	3,74	3,81	3,92	3,99	4,03	4,12	4,19	4,27	4,34
Laser	-2,90	-2,80	-2,70	-2,60	-2,50	-2,40	-2,30	-2,20	-2,10	-2,00
-1,00										
Kõrgus	4,42	4,52	4,59	4,68	4,78	4,86	4,92	5,01	5,09	5,19
Laser	-1,90	-1,80	-1,70	-1,60	-1,50	-1,40	-1,30	-1,20	-1,10	-1,00
0,00										
Kõrgus	5,24	5,32	5,40	5,48	5,54	5,67	5,71	5,85	5,90	5,99
Laser	-0,90	-0,80	-0,70	-0,60	-0,50	-0,40	-0,30	-0,20	-0,10	0,00

Pilt 33 Mõõtmistulemused 7,90-0 cm