



Greete-Caisa Allik

MANUAALNE JA AUTOMAATNE TÖÖRIISTA KALIBRATSIOON

LÕPUTÖÖ

Tehnikainstituut

Robotitehnika õppekava

Juhendaja: Kristo Vaher

Tallinn 2023

Autori deklaratsioon ja lihtlitsents

Mina, Greete-Caisa Allik, 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 autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendajad Kristo Vaher, Anatoly Marichev */allkirjastatud digitaalselt/*

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Greete-Caisa Allik, sünnikuupäev 11.05.1999, annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Manuaalne ja automaatne tööriista kalibratsioon“

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. 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

LÜHENDITE JA TERMINITE LOETELU	4
SISSEJUHATUS	5
1. TCP LÜHIÜLEVAADE	6
2. TCP KALIBREERIMINE	8
2.1 Meetodid TCP kalibreerimiseks	9
2.1.1 Kontaktmeetodid	9
2.1.2 Lasermõõtemetodid	11
2.1.3 Masinnägemismetodid	12
2.2 Töös võrreldavad kalibratsioonimeetodid	13
2.2.1 TCP&Z kontaktmeetod	13
2.2.2 Ristlaseriga lasermõõtemetod	15
3. MANUAALSE JA AUTOMAATSE MEETODI VÕRDLUS	17
3.1 TCP&Z kalibratsioonimeetodi käik, tulemused ja analüüs	17
3.2 Ristlaseriga kalibratsioonimeetodi käik, tulemused ja analüüs	21
KOKKUVÕTE	27
SUMMARY	28
KASUTATUD MATERJALID	29
LISAD	31
Lisa 1. RAPID programm tööorgani kalibreerimiseks TCP&Z,X meetodiga	32
Lisa 2. Hypersen HPS-LCB02 parameetrid ja joonised	34
Lisa 3. RAPID programm tööorgani kalibreerimiseks lasermõõtemetodiga	35

LÜHENDITE JA TERMINITE LOETELU

Change-of-State – kommunikatsioonimeetod, kus andmeedastus toimub koheselt monitooritava signaali väärtuse muutumise korral

FlexPendant – ABB robotkontrolleriga ühendatud õpetuspult *online*-programmeerimiseks ning roboti juhtimiseks

offline-programmeerimine – programmeerimismeetod, kus programm luuakse füüsilisest robotjaamast eemal (nt simuleeritud keskkonnas)

online-programmeerimine – programmeerimismeetod, kus programm luuakse robotkontrollerisse ühendatud õpetuspuldi abil

RAPID – ABB robotite programmeerimiseks kasutatav programmeerimiskeel

RobotStudio – ABB simulatsioonitarkvara robotite *offline*-programmeerimiseks

TCP – *tool-center point*, robottööriista aktiivne ots- või keskpunkt ehk tööpunkt

TCP&Z – manuaalne kalibreerimismeetod, kus TCP arvutatakse nelja eri liigeskonfiguratsiooniga mõõtepunkti ning Z-telje pikenduspunkti põhjal

TCP&Z,X – manuaalne kalibreerimismeetod, kus TCP arvutatakse nelja eri liigeskonfiguratsiooniga mõõtepunkti ning Z- ja X-telje pikenduspunkti põhjal

TCS – *tool coordinate system*, TCP-st lähtuv robottööriista koordinaatsüsteem

tooldata – RAPID-keele andmetüüp, mis kirjeldab robottööriista omadusi (positsioon, orientatsioon, mass, raskuskeske)

WCS – *wrist coordinate system*, roboti kuuendast lülist ehk randmest (flantsist) lähtuv konstantne koordinaatsüsteem

SISSEJUHATUS

Tootmise järjepideva automatiseerimise tõttu on tööstusrobotite turg jõudsas kasvutrendis ning võib prognooside kohaselt küündida 2030. aastaks 116,8 miljardi dollarini [1]. Tööstusrobotite rakendamine võimaldab tootmisettevõtetel optimeerida tootmisvõimekust, vähendada tööõnnetusriski ning tagada toodangu kvaliteeti ja protsesside stabiilsust. Küll aga on mainitud hüvede puhul eelduseks, et tootmises rakendatavad robotid on töökindlad ja täpsed ning siinkohal on oluliseks mõjuriks nende korrektne kalibratsioon.

Käesoleva lõputöö teema on pärit elektroonikatööstusettevõttest Ericsson Eesti AS, kus töö autor roboti programmeerijana muuhulgas tööstusrobotite kalibreerimist teostas. Antud teemavaliku ajendiks on tõsiasi, et TCP-d manuaalselt kalibreerides on tulemus - mis põhineb eeskätt visuaalsel hinnangul - sageli ebapiisava täpsusega ning operaatorist sõltuv. Ebatäpse TCP puhul on aga tarvis mõõtmist korrata, mis omakorda muudab kalibreerimisprotsessi veelgi ajakulukamaks.

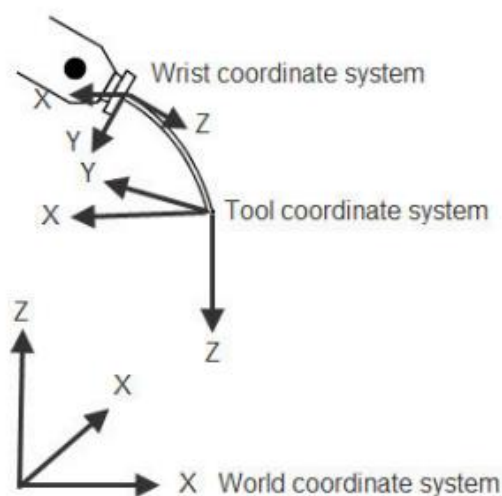
Antud lõputöö kirjeldab ja võrdleb manuaalset TCP&Z kalibratsioonimeetodit ja automaatset lasermõõtemetodit ning analüüsib mõlema meetodi efektiivust ja kalibratsioonitulemuste korratavust. Töö eesmärk on uurida, kas roboti rakenduse seisukohalt oleks manuaalse kalibratsioonimeetodi asendamine lasermõõtemetodiga võimalik ning põhjendatud.

Lõputöö koosneb kolmest peatükist. Esimene peatükk annab lugejale ülevaate, mida TCP endast kujutab, milles seisneb TCP kasutamise otstarve ning millise koordinaatsüsteemi suhtes see on defineeritud. Teine peatükk rõhutab TCP kalibreerimise vajalikkust, esitleb erinevaid meetodeid kalibratsiooni sooritamiseks ning kirjeldab põhjalikult lõputöös käsitletavaid manuaal- ja automaatmeetodeid. Kolmandas peatükis on kirjeldatud mõlema kalibratsioonimeetodi käiku ning esitatud ja analüüsitud kalibratsioonikatsete tulemused.

1. TCP LÜHIÜLEVAADE

Robotikavaldkonnas tähistab TCP ehk *tool-center point* lõpplüli (tööriista) ots- või keskpunkti, mida robot kasutab enese positsioneerimisel orientiirina. Roboti liikumine on TCP-ga üldjuhul alati seotud, kuna selles punktis kohtub lõpplüli töödeldava kehaga. Mingisuguse positsiooni salvestamine tähendab tegelikkuses TCP asukohta ning vastava liigeskonfiguratsiooni salvestamist ning seetõttu on just TCP punkt, mis liigub mööda ettenähtud trajektoori ettenähtud kiirusega. TCP-sid on kaht tüüpi – liikuva ning statsionaarsed. Kui rakendatav tööorgan on roboti külge paigaldatud, on tegu liikuva TCP-ga, mis liigub robotiga sünkroonis (nt haaratsi, kruvikeeraja vms puhul). Statsionaarne TCP aga tähendab, et peamine tööriist on robotjaamas kindlasse asukohta fikseeritud ning TCP püsib seetõttu liikumatuna (nt punktkeevitusseadmete puhul). [2]

TCP on ka tööriista koordinaatsüsteemi (*tool coordinate system*, TCS) nullpunkt. TCP-st lähtuva koordinaatsüsteemi rakendamine võimaldab operaatoril lõpplüli liikumist paremini mõista, kuna TCS-i teljed on defineeritud vastavalt tööriista eripäradele (nt X- ja Z-telje positiivse suuna sõltuvus tööriista geomeetriast). Tööriista kahjustumise või väljavahetamise korral piisab TCP ja seeläbi ka TCS-i ümbermääratlemisest ning programmi muutmine uue lõpplüli tarbeks pole vajalik. Üldjuhul määratletakse TCP ja TCS roboti „randme“ ehk kuuenda lüli koordinaatteljestiku (*wrist coordinate system*, WCS) suhtes (vt Joonis 1), mis paikneb flantsi keskpunktis ning on konstantne. [2]



Joonis 1 TCS-i asukoht WCS-i suhtes [2]

TCP kasutamine hõlbustab tööstusroboti programmeerimist mitmel erineval moel:

1. TCP-d kasutades on roboti programmeerijal võimalik määrata tööriista asukoht ja orientatsioon ruumis liigesnurkadest sõltumata, kuna ettenähtud asendiks vajaliku kinemaatika arvutamine toimub kontrolleri automaatselt. See omakorda muudab programmide loomise ning muutmise lihtsamaks ning vähem aeganõudvaks.
2. Tööriista aktiivse punkti positsiooni ja orientatsiooni määramine võimaldab robotil tööülesandeid täita suurema täpsusega, mis omakorda tagab toodangu kõrgema kvaliteedi ning aitab vähendada praagiprotsenti.
3. Eri tööriistade TCP määramine muudab nende rakendamise paindlikumaks ning tõstab seeläbi robotsüsteemi võimekust eritüüpi tööülesandeid läbi viia.

Paljudel erimarki tööstusrobotitel on TCP ning vastav teljestik tootja poolt eeldefineeritud. Tavaliselt langeb see kokku roboti WCS-iga ning näiteks ABB tööstusrobotite ja UR koostöörobotite puhul kannab nime tool0. Robotkontrolleri mälus võib eri tööriistu vastavate (eranimeliste) TCP-dega olla mitmeid, kuid aktiivne saab neist korraga olla vaid üks. [2]

2. TCP KALIBREERIMINE

Robottööriista kalibreerimine on kriitiline samm, et tagada tööülesannete korrektne, täpne ning tõhus sooritamine. Üha pisemate komponentide käsitlemise ning protsesside süveneva keerukuse ja nõudlikkuse tõttu mängib hoolikalt kalibreeritud TCP ning vastava teljestiku määratlemine järjest olulisemat rolli [3]. Tüüpiliselt on tööstusrobotite puhul liigutuste korratavus märgatavalt parem kui täpsus, kuid erinevaid kalibratsioonimeetodeid rakendades on võimalik täpsust suurendada [10].

Üldjuhul eeldavad tööstusrobotid, et nende flantsi külge ei ole tööorganit paigaldatud, mistõttu kasutatakse TCP vaikimisi väärtusena kujuteldavat punkti flantsi keskpunktis (eelmainitud tool0). Seega on TCP kalibreerimine lihtsustatud võttes TCS-i üle kandmine roboti kuuendalt teljelt tööriista ots- või keskpunkti, mistõttu võib TCP-d defineerida ka kui transformatsiooni roboti flantsist. TCP asukoha määramine on vajalik, kuna tööstusrobotite tootjad eeldefineerivad kinemaatikaarvutusi üldjuhul vaid esimesest kuuenda lülini ehk baasteljestikust randmeteljestikuni. Flantsile paigaldatud tööorgani asukohast ega asendist robot vaikimisi teadlik ei ole. [2] Kui flantsi külge näiteks pintsel kinnitada, ei teaks robot, kus pintslipea roboti randme suhtes asub. Seetõttu on oluline roboti jaoks defineerida, kui kaugel mööda X-, Y- ja Z-telge tööriista otspunkt (antud näites pintslipea) roboti flantsist asub.

Tööriistade (ja üldise robotjaama) kalibreerimise tõttu on tööstusrobotit võimalik edukalt *offline*-programmeerida, kuna kalibratsiooni käigus ühildatakse CAD-mudelist lähtuvad koordinaadid füüsilise robotjaama koordinaatsüsteemi(de)ga ehk simuleeritud keskkond seotakse reaalse füüsilise keskkonnaga. Kui *online*-programmeerimise käigus positsioone manuaalselt õpetades ei mängi roboti kõrge täpsus niivõrd suurt rolli (palju olulisem on pooside korratavus), siis *offline*-programmeerimise jaoks on koordinaatide täpsus kriitiline [10]. Pelgalt simulatsioonipõhiste koordinaatidele tuginedes esinevad roboti liikumises kõrvalekalded ettenähtud trajektooriga ja positsioonidest (vt Joonis 2), kuna simuleeritud ning reaalse keskkonna vahel esinevad tahes tahtmata erinevused. Kõrvalekallete likvideerimiseks võrreldakse kalibreeritud TCP-d roboti kinemaatilise mudeli nominaalväärtusega ning erinevuste korral toimub integreeritud optimeerimisalgoritmi abil väärtuste automaatne

uuendamine. Protsessi tulemuseks on parandatud mudel, mis suudab roboti liikumist tõsemalt väljendada. [4], [10]



Joonis 2 Kalibreerimata TCP kõrvalekalle ettenähtud trajektooriga [4]

TCP-d on üldjuhul tarvis kalibreerida järgnevatel juhtudel:

- roboti või robotjaama esmasel installeerimisel (*commissioning*);
- roboti või robotjaama asukoha muutmisel;
- uue tööriista kasutuselevõtu korral;
- tööriista geomeetria muutmise korral;
- tööriista kahjustumise korral;
- roboti flantsi hooldamise või eemaldamise korral;
- roboti mehaaniliste komponentide kulumise korral;
- roboti konfiguratsiooni muutmise korral.

2.1 Meetodid TCP kalibreerimiseks

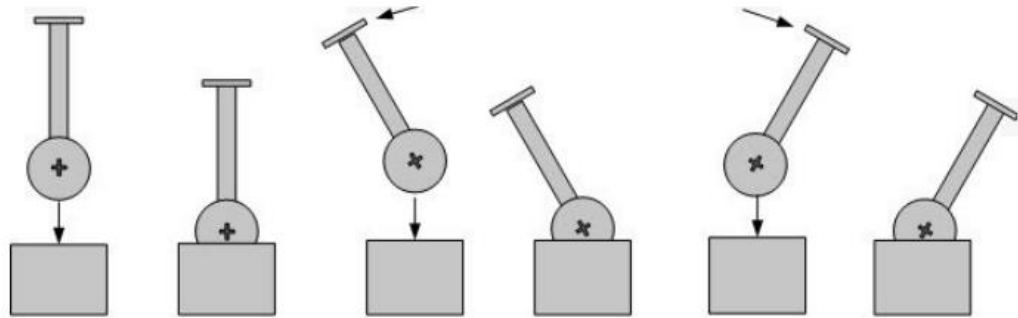
Kalibreerimismeetodeid uurivate ning arendavate teadlaste eesmärk on muuta antud protsess üha kiiremaks, usaldusväärsemaks ning kasutajasõbralikumaks. Teadustööde käigus on välja pakutud mitmeid erinevaid lahendusi, mida võib laias laastus jagada kolme peamisesse rühma:

1. mehaanilist takistust rakendavad meetodid (kontaktmeetodid);
2. lasermõõtesüsteemi rakendavad meetodid;
3. masinnägemist rakendavad meetodid. [5]

2.1.1 Kontaktmeetodid

Manuaalset kalibratsiooni sooritatakse üldiselt mingisugust mehaanilist takistust kasutades ehk kontaktmeetodil. Kontaktmeetodi peamiseks eeliseks on selle robustsus ning lihtsus. Kuigi tavaliselt on takistuseks teravatipulised mõõtevahendid, siis näiteks Bergström [4] rakendas oma teadustöös

hoopis kerakujulise otsaga „sondi“ ning kausjat kalibratsioonipesa. „Sondi“ ots sisestatakse pesa ning robot juhitakse vähemalt nelja erineva liigeskonfiguratsiooniga asendisse (vt Joonis 3). Salvestatud asendite põhjal saab TCP edukalt defineerida. Mehaanilise takistusena võib muuhulgas kasutada veel ka tõmbetraadiga andureid [5] või mõõteplaadiga varustatud lineaarse nihke andureid [3], [11].



Joonis 3 Bergströmi "sondi ja pesa" meetod [4]

Kuigi mehaaniliste takistuste kasutamine TCP kalibreerimiseks on laialt levinud, ei ole antud (manuaalne) meetod sugugi optimaalne, kuna

- roboti käsitsi mõõteasenditesse juhtimine on aeganõudev;
- mõõteasendite valim on väike (tavaliselt 4-6 asendit) ning lisapositsioonide kasutamine süvendab ajakulu veelgi;
- mõõteasendite korrektsus (mõõtevarraste kokkupuutepunkti täpsus) on subjektiivne, kuna operaator viib mõõtevardad omavahel kontakti silma järgi;
- esineb kõrgem risk mõõtevahendeid, tööriista või robotit kahjustada;
- mõõtevarraste tippude kulumise korral mõõtetäpsus väheneb;
- kontaktmeetodid ei anna painduva tipuga tööriista kalibreerimisel usaldusväärset tulemust.

[3], [5], [6], [9]

2.1.2 Lasermõõtemetodid

Enamlevinud mittekontaktmeetodina kasutatakse TCP kalibreerimiseks erinevat tüüpi lasermõõteandureid. Lasermõõtemetodite peamised eelised kontaktmeetodite ees on suurem mõõtetäpsus, kiirem ning tõhusam kalibreerimisprotsess, tulemuse sõltumatus operaatorist ning paindlikkus kalibreerida keerulise geomeetriaga või painduvaid tööriistu [5], [6]. Üheks populaarseks lasermõõtelahenduseks on ABB BullsEye süsteem (vt Joonis 4), mida kasutatakse näiteks keevituspõletite kalibreerimiseks [7]. Põleti ots juhitakse läbi laserkiire ning TCP määramine toimub eeldefineeritud mõõteasendite tõttu täiesti automaatselt. Hao Gu jt aga soovitasid oma teadustöö põhjal kasutada ühe laserkiire asemel kaht ristuvat kiirt, mis läbi on kalibreerimiseks kuluvat aega võimalik vähendada lausa 50% võrra [3].



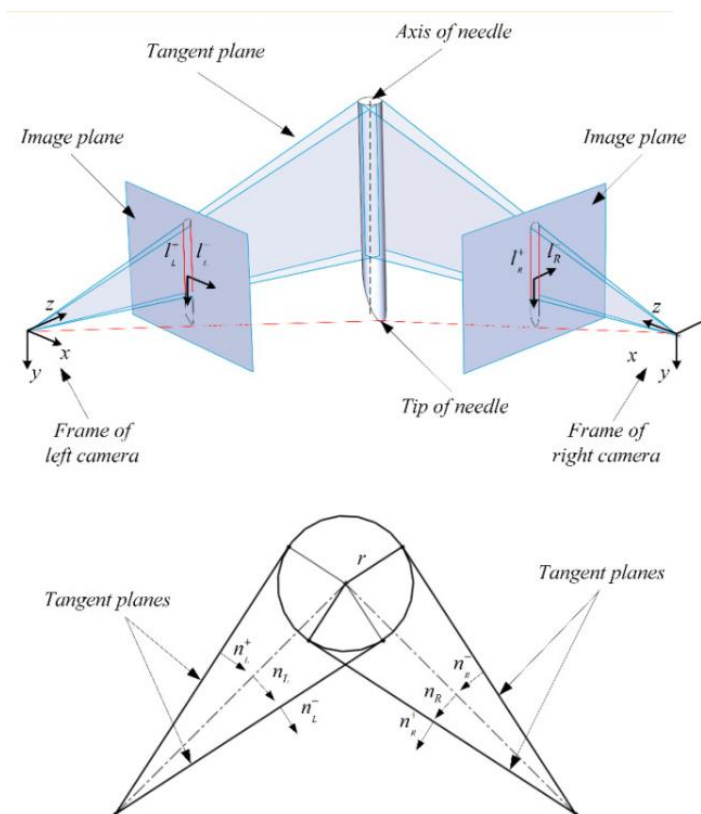
Joonis 4 ABB Bullseye kalibratsioonisüsteem [7]

Küll aga on lasermõõtemetodite kasutamisel omad miinused:

- kalibreerimiseks vajalik tehnika on kulukas ning keerulisemad seadmed nõuavad efektiivseks paigaldamiseks ja rakendamiseks operaatori väljaõpet;
- seadmed võivad olla erinevate keskkonnategurite suhtes väga tundlikud;
- teatud laserseadmed on ruuminõudlikud ning ei pruugi sobida kitsastes oludes kasutamiseks;
- mõõtemüra, keskkonnamuutuste jm tõttu võib mõõtetulemus olla ebausaldusväärne. [3], [6]

2.1.3 Masinnägemismeetodid

Sarnaselt lasermõõtmisele on ka masinnägemise kasutamisel TCP määramiseks tegu mittekontaktmeetodiga. Masinnägemise rakendamine võimaldab tööriistu kalibreerida suure täpsusega, ülimalt kiiresti ning operaatorist sõltumatult. Oluliseks eelseks on ka võimekus kalibreerida keeruka geomeetria ja erineva pinnatöötlustega tööriistu. [3], [5], [6] Hallenberg arendas oma teadustöös lihtsa ning taskukohase mõõtesüsteemi, kus kasutatakse üht USB-kaamerat ja OpenCV koodivaramut pilditöötusalgoritmide jaoks [8]. Zhang jt töötasid välja arstisõbraliku binokulaarse meetodi (vt Joonis 5), mis aitab kõrge mõõtetäpsusega kalibreerida nõelu punktiooni tarbeks. Binokulaarse masinnägemise eelseks ühe kaamera süsteemide ees on kolmemõõtmelisus ja sügavustaju, mis võimaldab TCP-d määrata veelgi täpsemalt. [5]



Joonis 5 Zhangi binokulaarne masinnägemismeetod [5]

Eelnevatele mõõtemetoditele sarnaselt on ka masinnägemise kalibreerimiseks kasutamisel olulisi puudjääke, näiteks

- kaamerad ning vajalikud lisaseadmed on kulukad;
- mõõtesüsteemi kokku panemine on keeruline ning eeldab, et tehnikul või operaatoril on muuhulgas kogemust valgusallikate ja kaamera paigaldamise ning pilditöötusalgoritmidega;
- mõõtmisel võib piiravaks faktoriks olla ka kaamera ebapiisav vaateväli;

- mõõtesüsteem on väga tundlik erinevate keskkonnatingimuste suhtes (valgus, õhuniiskus, tolm, vibratsioon jne);
- sageli ei ole üht kaamerat rakendavate süsteemide mõõtetäpsus teatud protsesside jaoks piisav. [5], [6], [9]

2.2 Töös võrreldavad kalibratsioonimeetodid

Antud lõputöös on uurimisalusteks kalibreerimismeetoditeks valitud TCP&Z manuaalne kontaktmeetod ning kahe ristuva kiirega laserandurit rakendav lasermõõtemetod.

2.2.1 TCP&Z kontaktmeetod

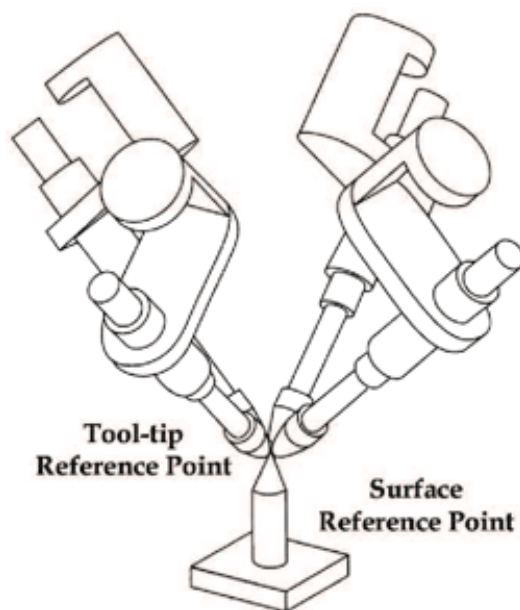
Tavapärane praktika on tööstusrobotite lõpplüliti ots- või keskpunkti määramiseks kasutada viiepunktilist kontaktmeetodit ehk teisisõnu TCP&Z kalibreerimismeetodit. TCP&Z meetodi rakendamine on niivõrd levinud, kuna kalibreerimisprotsess on suhteliselt lihtne ning ei nõua lisaseadmeid (laserandurid, kaamerad jms). Sellisel moel TCP-d kalibreerida on mõistlik, kui roboti töösooritustelt oodatakse pigem korratavust kui väga kõrget täpsust (nt suuremate detailide palletiseerimine) ning kui kalibreerimistarkuste hinda üritatakse hoida võimalikult madalana. [4]

TCP&Z kalibratsiooni sooritamiseks on tarvis vaid kaht teravatipulist mõõtevarrast, millest üks fikseeritakse roboti tööalal hõlpsasti ligipääsetavasse asukohta (täidab orientiiri rolli) ning teine vajadusel tööriista kesk- või otspunkti külge. Juhul kui kalibreeritava tööorgani geomeetria sarnaneb mõõtevardaga (nt liimidosaatore koonusjas otsik, keevituspõleti ots jms), kasutatakse seda ühe mõõtevarda asemel (vt Joonis 6). Orientiiri mõõtmed ei oma kalibreerimisel tähtsust – oluline on vaid võimalikult terava tipu olemasolu.



Joonis 6 Näiteid kalibreeritavatest tippudest

Kalibreerimisprotsessi käigus juhitakse mõõtevarda tipp või koonusja tööriista ots (kalibratsioonipunkt) manuaalselt orientiiriga kokkupuutesse, kasutades selleks vähemalt nelja erinevat roboti asendit (vt Joonis 7). Mõõteasendite liigeskonfiguratsioonid peaksid teineteisest võimalikult palju erinevama, kuna seeläbi tagatakse kalibreeritud TCP täpsus. Kalibratsiooni käigus kasutatakse eri asendite kinemaatilisi parameetreid nominaalmudeli automaatseks uuendamiseks ning TCP asukoha ja orientatsiooni arvutamiseks. Juhul kui mõõteasendid on liiga sarnased ja parameetrid seetõttu kattuvad, on kalibratsiooni tulemus vähemtäpne. Samuti peaksid kalibreeritava tööriista eri asendid orientiiri suhtes 360 kraadi ulatuses ühtlaste vahemaadega paiknema, et tagada kalibratsiooni korrektsus kogu tööalas. Nurk koonusja tööriista või tööriista külge kinnitatud mõõtevarda ning orientiiri vertikaaltelje vahel peaks võimalusel jääma 30 kuni 45 kraadi vahemikku. [13]

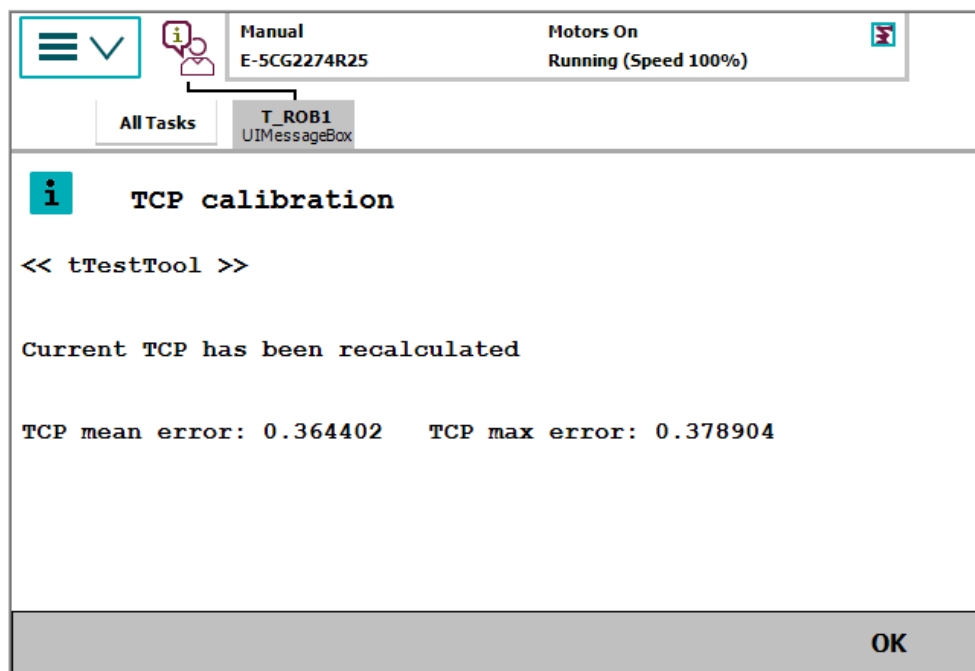


Joonis 7 Erinevad asendid TCP kalibreerimisel [2]

TCP&Z meetodiga tööriista kalibreerides määratakse lisaks TCS-i lähtepunktile ka Z-telje positiivne suund. Selleks peab mõõtevarras või tööriist olema ühes salvestatud mõõteasendis orientiiriga mööda Z-telge joondatud. Antud asukohast liigutatakse kalibratsioonipunktiga lineaarselt mööda vertikaaltelge orientiiri kohale ilma, et tööriista joondust vahepeal muudetaks ning roboti uus asend salvestatakse viienda kalibratsioonipunktina (*Z-elongator*). Kui tööriista geomeetria eeldab ka X-telje positiivse suuna määramist (nt telje joondamine haaratsi „sõrmedega“), kasutatakse TCP&Z,X meetodit, mispuhul määratakse horisontaalselt orientiirist eemale liikudes kuues kalibratsioonipunkt (*X-elongator*). [13]

UR koostöörobotite puhul on TCP defineerimiseks õpetamisseadmes (*teach pendant*) eraldi kasutajaliides, kuhu on võimalik TCP koordinaadid ja orientatsioon ükshaaval käsitsi sisestada või need TCP&Z meetodi abil automaatselt kalkuleerida. ABB tööstusrobotite tööorganite (ja ka

ülejäanud robotjaama komponentide) kalibreerimiseks aga on tarvis aktiveerida eraldi programm, mis sõltuvalt tellitud lahendusest võib robotkontrolleris juba valmiskujul eksisteerida või peab roboti programmeerija selle ise kirjutama (vt Lisa 1. RAPID programm tööorgani kalibreerimiseks TCP&Z,X meetodiga). Lisaks juhiste, kuidas operaator peaks kalibratsioonimeetodit läbi viima, annab kalibratsiooniprogramm FlexPendanti kaudu ka tagasisidet kalibratsiooni täpsuse kohta ehk kui suur oli keskmine mõõtehälve (*mean error*) ja maksimaalne mõõtehälve (*max error*) (vt Joonis 8). ABB robotite puhul on tavaks korrata manuaalset kalibratsiooniprotsessi seni, kuni maksimaalne mõõtehälve jääb alla 0,1 mm.



Joonis 8 Tagasiside FlexPendanti dialoogiboksis

2.2.2 Ristlaseriga lasermõõtemeetod

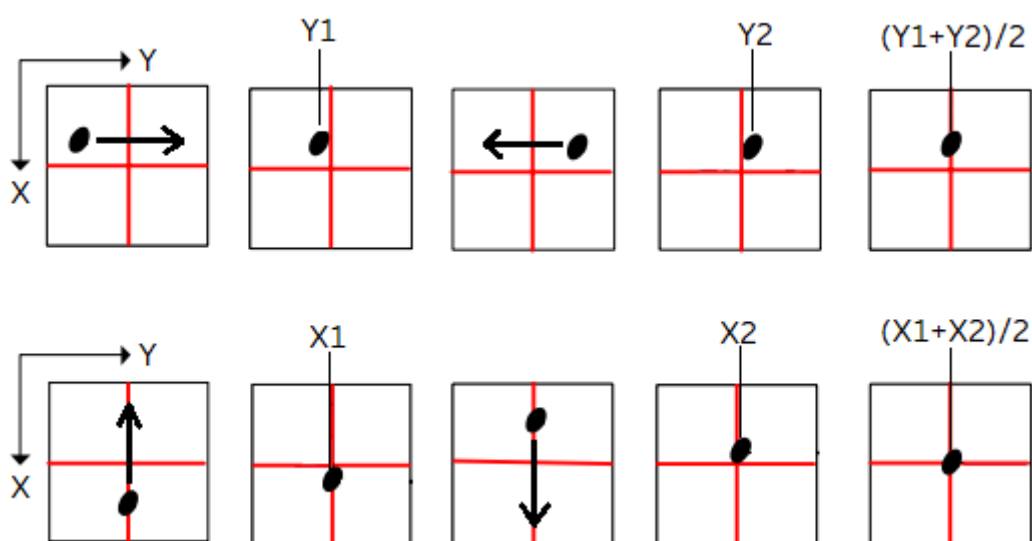
Kalibratsiooniprotsessi automatiseerimise eesmärgil on töös uurimise alla võetud ristlaserit rakendav lasermõõtemeetod. Ristlaserit kasutatakse näiteks AIM Roboticsi automaatkalibratsiooni seadmes, mis kujutab endast *plug-and-play* lahendust UR koostöörobotite tööorganite kalibreerimiseks [14]. Antud meetodil TCP kalibreerimiseks on mõõteseadmeks valitud eeskätt toote hinnast ning spetsifikatsioonidest (vt Lisa 2. Hypersen HPS-LCB02 parameetrid ja joonised) lähtuvalt Hyperseni HPS-LCB02 ristlaserandur (vt Joonis 9). Seade koosneb kahest ristuvast laserist, millega on võimalik tuvastada objekte diameetriga alates 0,2 mm. Ristuvate laserkiirte tõttu saab tööorganit samaaegselt kalibreerida kahes teljes. [15] Sama toodet kasutatakse näiteks ABB Hiina tehastes robottööriistade kalibreerimiseks. Ristlaser ühendatakse robotkontrolleri I/O-moodulisse digitaalse sisendina (DI) ning suhtlus toimub mingit tüüpi andmesideprotokolli kaudu (nt DeviceNet). Anduril on kummagi

laseri jaoks eraldi digitaalne väljund (DO), mille signaal aktiveerub, kui kalibreeritav tipp blokeerib laserkiire.



Joonis 9 Hypersen HPS-LCB02 andur [15]

TCP automaatseks ristlaseriga kalibreerimiseks liigutab robot kalibreeritavat keha esmalt lineaarselt mööda Y-telge, et tuvastada punktid, kus keha tabab Y-kiirt (vt Joonis 10). Mainitud punktide keskmistamise teel leitakse positsioon, kus keha ristlõike keskpunkt paikneb täpselt Y-kiirel. Seejärel liigutab robot keha lineaarselt mööda X-telge ning punktid, kus see X-kiirt tabab, taaskord keskmistatakse. Tasapinnalise liikumise lõppedes peavad mõõtevarda või tööorgani ristlõike keskpunkt ning laserkiirte ristumispunkt ühtima. Tasapinnalist liikumist korratakse üldjuhul kahel või enamal erineval kõrgusel, et tuvastada mõõtevarda või tööorgani kaldenurk ja orientatsioon, kuna eri tasanditel paiknevate ristumispunktide vaheline vektor on paralleelne tööorgani Z-teljega. [3]



Joonis 10 Lineaarsed liikumised laserkiirte ristumispunkti tuvastamiseks [3]

3. MANUAALSE JA AUTOMAATSE MEETODI VÕRDLUS

Testimise eesmärgil on nii manuaalse TCP&Z meetodi kui automaatse ristlaserit rakendava lasermõõtemetodi puhul kalibreeritavaks objektiks teravatipuline mõõtevarras (vt Joonis 11), mis on kinnitatud roboti flantsi külge. Kalibratsioonimeetodite testimiseks kasutatav robotlahendus koosneb ABB IRB 1200 tööstusrobotist ning ABB IRC5 Compact kontrollierist.



Joonis 11 Kalibreeritav mõõtevarras

Mõlema kalibratsioonimeetodi korral on uurimiselusteks faktoriteks

- kalibratsioonile kuluv aeg;
- kalibratsioonitulemuste varieerumine;
- hinnanguline sobivus eritüüpi geomeetriaga tööriistade kalibreerimiseks.

3.1 TCP&Z kalibratsioonimeetodi käik, tulemused ja analüüs

TCP&Z meetodil tööriista kalibreerimiseks oli esmalt vaja koostada RAPID programm, mis oleks võimalikult kompaktne ja kasutajasõbralik ning mis annaks FlexPendanti kaudu kohest tagasisidet kalibratsiooni täpsuse kohta (vt Lisa 1. RAPID programm tööorgani kalibreerimiseks TCP&Z,X meetodiga). Loodud programm, mis on inspireeritud ABB Germany kalibratsiooniprogrammist,

koosneb nii vahe- kui mõõtepositsioonide definitsioonidest, roboti liikumisest eri positsioonide vahel ning arvutuslikust osast, kus operaatori nõusoleku korral määratakse kalibreeritavale tööriistale uus TCP ja orientatsioon. Mõõtepositsioonide salvestamise sooritab operaator manuaalselt. Defineeritud mõõtepositsioonide põhjal uue TCP arvutamiseks on kasutatud RAPID raamatukogu funktsioone MToolTCPCalib ja MToolRotCalib. Mõlemad funktsioonid eeldavad, et kalibreeritavale tööriistale, mis on programmis tähistatud tTestTool muutujana, on määratud esialgne *tooldata*. Antud juhul põhineb vaikimisi *tooldata* RobotStudio simulatsioonikeskkonnas kasutatava analoogse tööriista 3D-mudelil.

Manuaalse kalibratsiooni sooritamisel on orientiirina kasutatud robotjaamas paikneva tõstuki alusplaadi külge fikseeritud terasest mõõtevarrast. Kalibreeritav tööriist viidi visuaalse hinnangu põhjal orientiiri tipuga kontakti neljas erinevas asendis (jtPosition1 – jtPosition4) ning orientiiri tipust 5 cm kõrgusel defineeriti ka punkt Z-telje positiivse suuna määramiseks (jtZPosDir). X-telje suunda testmise käigus ei määratud, kuna kalibreeritava tööriista geomeetria on Z-telje suhtes sümmeetriline.

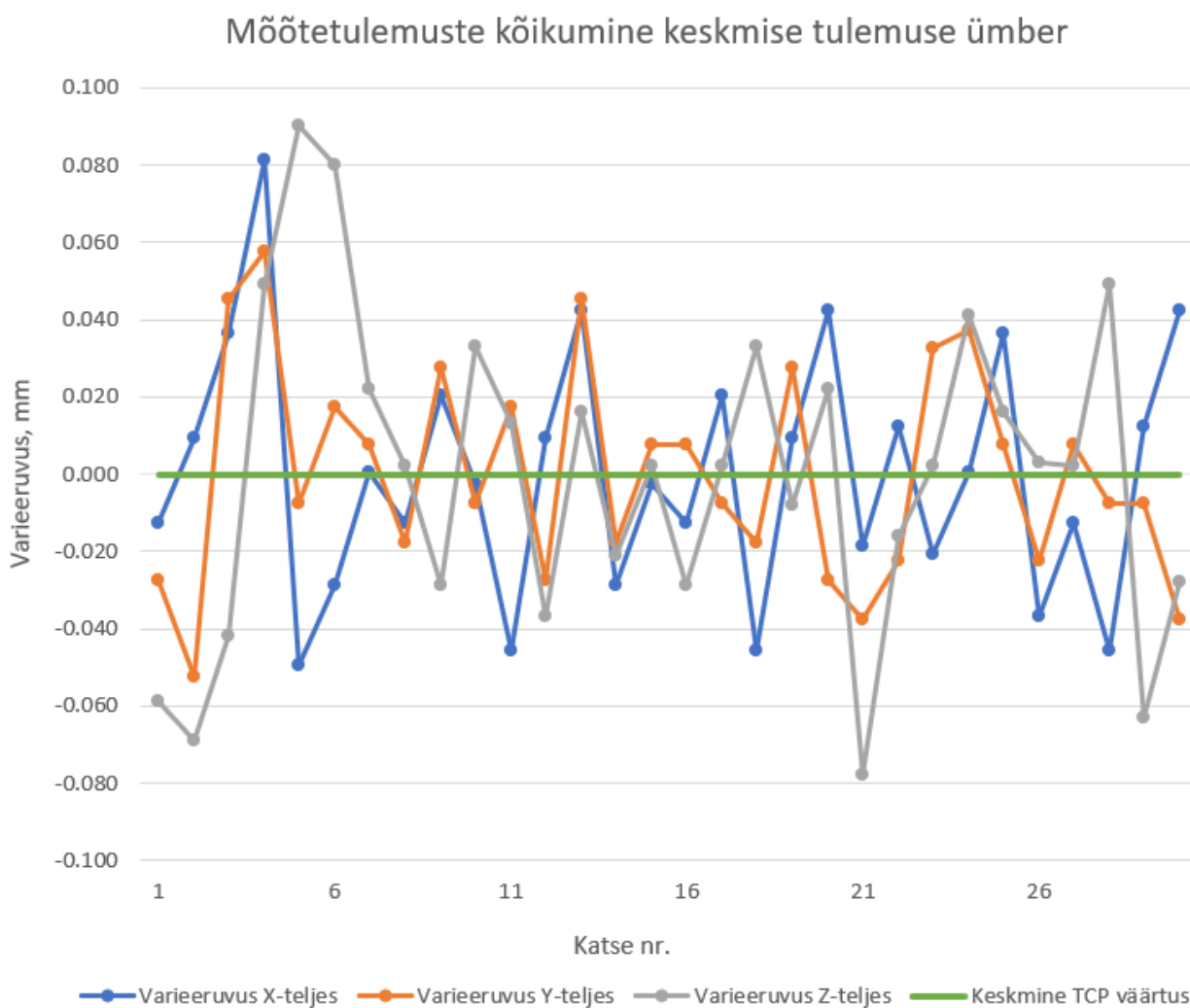
TCP mõõtmist TCP&Z meetodil korraldati 30 korda. Automaatsed liikumised eri positsioonide vahel sooritati kiirusega 30 mm/s. Juhtkangiga manuaalselt positsioone korrigeerides (*jogging*) oli liikumise sammuks 1 mm, orientiiri tipust 5 mm raadiuses vähendati kokkupõrgete vältimiseks sammu 0,05 mm-ni. Kalibratsiooniks kuluvat aega mõõdeti alates startpositsiooni (jtSafePos) saavutamisest kuni FlexPendantil uue TCP ning mõõtevea (*max error*) kuvamiseni. Mõõdetava ajahulga sisse mahtusid viis erinevat manuaalset liikumist startpositsioonist kindlasse mõõtepositsiooni, roboti vahepealsed ümberorienteerumised, mõõtepositsioonide salvestamine ning automaatne arvutuste sooritamine. Kalibreeritava tööorgani ja orientiiri asukohta ning ruumi valgustingimusi mõõtmiste vältel ei muudetud ning pärast iga sooritust salvestatud mõõtepunktid (jtPosition1 – jtPosition4) nulliti.

30 mõõtetulemuse põhjal leitud keskmine TCP väärtus on esitletud allolevas tabelis (vt Tabel 1), kusjuures esitletud väärtused on defineeritud roboti flantsi suhtes. Tabelis on esitatud ka suurima ning vähima X-, Y- ja Z-koordinaadi vahe, et ilmestada, millises ulatuses võivad tulemused manuaalse kalibratsiooni puhul kõikuda.

Tabel 1 TCP&Z kalibratsioonimeetodi tulemused

TCP _X , mm	TCP _Y , mm	TCP _Z , mm	TCP _{RX}	TCP _{RY}	TCP _{RZ}	max error, mm	ajakulu, s
118.815	-8.530	12.172	-0.271°	88.959°	0°	0.115	585
Suurim varieeruvus, mm							
0.131	0.110	0.168					

TCP&Z meetodi kalibratsioonitulemuste erinevus keskmisest tulemusest (roheline nulljoon) on esitletud teljepõhiselt ka järgneval graafikul (vt Joonis 12).



Joonis 12 Manuaalse kalibratsiooni mõõtetulemuste varieerumine

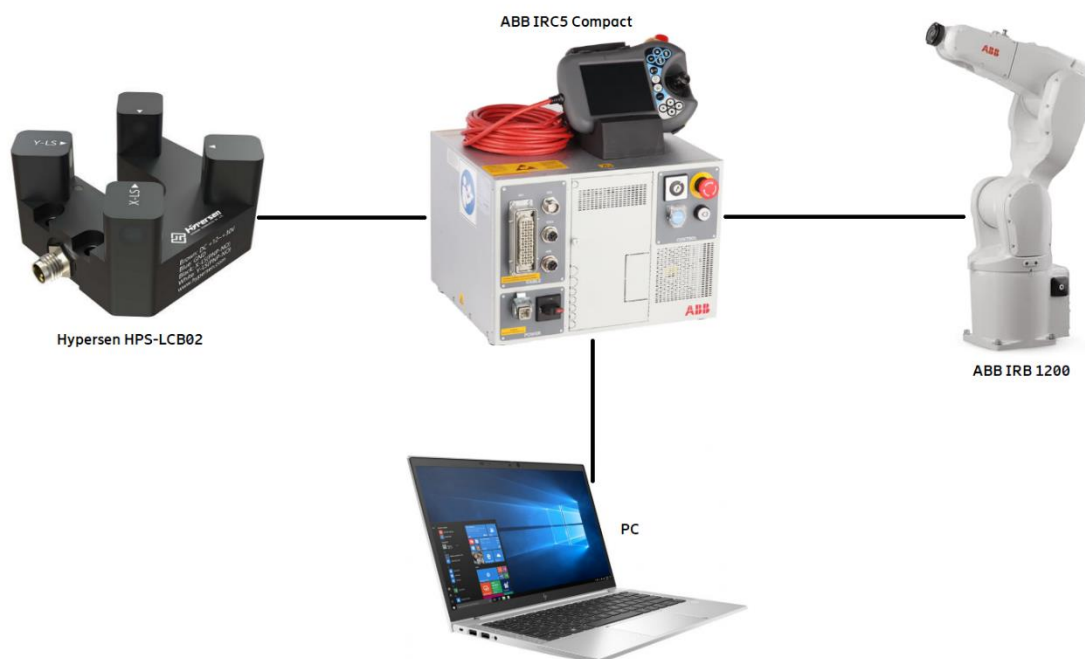
Mõõtesoorituste tulemused illustreerivad, millises ulatuses võivad manuaalselt kalibreeritud TCP koordinaadid kõikuda. X-koordinaadid varieerusid vahemikus 118,765 mm kuni 118,896 mm ehk suurima ja vähima tulemuse vahe oli 0,131 mm. Y-koordinaadid varieerusid vahemikus -8,583 mm kuni -8,473 mm ning suurima ja vähima tulemuse vahe oli 0,11 mm. Suurim amplituud 0,168 mm esines Z-koordinaatide hulgas, mis varieerusid vahemikus 12,094 mm kuni 12,262 mm. X-koordinaatide puhul oli maksimaalne erinevus keskmisest mõõtetulemusest 0,081 mm, Y-koordinaatide puhul 0,057 mm ning suurim erinevus keskmisest tulemusest – 0,09 mm – esines taas Z-koordinaatide hulgas. Mõõtehälbed varieerusid vahemikus -0,078 mm kuni 0,09 mm ehk hälvete amplituud oli 0,168 mm. Rakenduseladel, kus tööstusrobotilt nõutakse ülesannete sooritamisel ülimat täpsust (nt robotpunktsioon), võib sellises ulatuses TCP väärtuste kõikumine põhjustada vigu tööülesannete sooritamisel või töökvaliteedi langust. Kuigi mõõtmised viidi läbi hästi valgustatud vibratsiooni- ja müravabas keskkonnas, rakendades pea ideaalselt koonusja tipuga instrumente, on mõõtehälbed siiski suured ning kalibratsioonitulemuste korratavus madal.

Nagu eelnevalt mainitud, korraldatakse ABB robotite puhul hea tavana tööriista manuaalset kalibratsiooni seni, kuni *max error* väärtus ehk mõõtepositsioonide omavaheline maksimaalne varieeruvus jääb alla või on võrdne 0,1 mm. 30 mõõtetulemuse hulgas oli vaid 7 sellist tulemust, mille puhul *max error* oli väiksem kui 0,1 mm. Kui antud mõõtmised oleks läbi viidud reaalses situatsioonis (näiteks tootmisliinil), oleksid 77% kalibreerimiskatsetest nõudnud ebapiisava täpsuse tõttu vähemalt üht kordusmõõtmist.

Kalibratsiooni sooritamiseks kulus keskmiselt 585 sekundit ehk 9,75 minutit, mille sisse mahtusid eelmaintud protseduurid. Kuna mõõtesooritused viidi läbi suurepärase tingimustega laborikeskkonnas, võib eeldada, et tootmisliinil tööriista kalibreerides võivad ajakulu veelgi süvendada müra, vibratsioon, ebasobivad valgus- ja ruumitingimused jt segavad faktorid. Ühtlasi oli kalibreeritava tööriista vardakujuline geomeetria TCP&Z meetodi jaoks väga sobiv ning kalibratsiooniprotsessi lihtsustas asjaolu, et X-telje positiivse suuna määramine polnud antud juhul vajalik. Keerulisema geomeetriaga tööriista kalibreerimine või kalibratsiooni sooritamine kitsamates oludes nõuaks suure tõenäosusega rohkem aega. Samuti võiks eeldada, et kalibratsioonile kuluv aeg ning mõõtehälvete ulatus on pöördvõrdelises seoses (mida suurem ajakulu, seda väiksemad mõõtevead), kuid katsetulemuste analüüsimisel sellist seost ei ilmnenud.

3.2 Ristlaseriga kalibratsioonimeetodi käik, tulemused ja analüüs

Mõõtesüsteem antud meetodil kalibratsiooni sooritamiseks koosneb eelmainitud Hypersen HPS-LCB02 ristlaserist, ABB IRC5 Compact tööstusrobotist, ABB IRC5 Compact kontrolleri ning sülearvutist (vt Joonis 13). Laseranduri kaks ristuvat laserkiirt on digitaalsete sisenditena (diXBeam ja diYBeam) ühendatud kontrolleri DSQC 652 I/O-moodulisse ning suhtlus toimub üle DeviceNet protokollu rakendades *Change-Of-State* ühendust, mis tagab roboti võimalikult lühikese reaktsioonaja, kuna monitooritava signaali väärtuse muutumisele reageeritakse kohe.



Joonis 13 Mõõtesüsteem automatiseeritud kalibratsiooni sooritamiseks

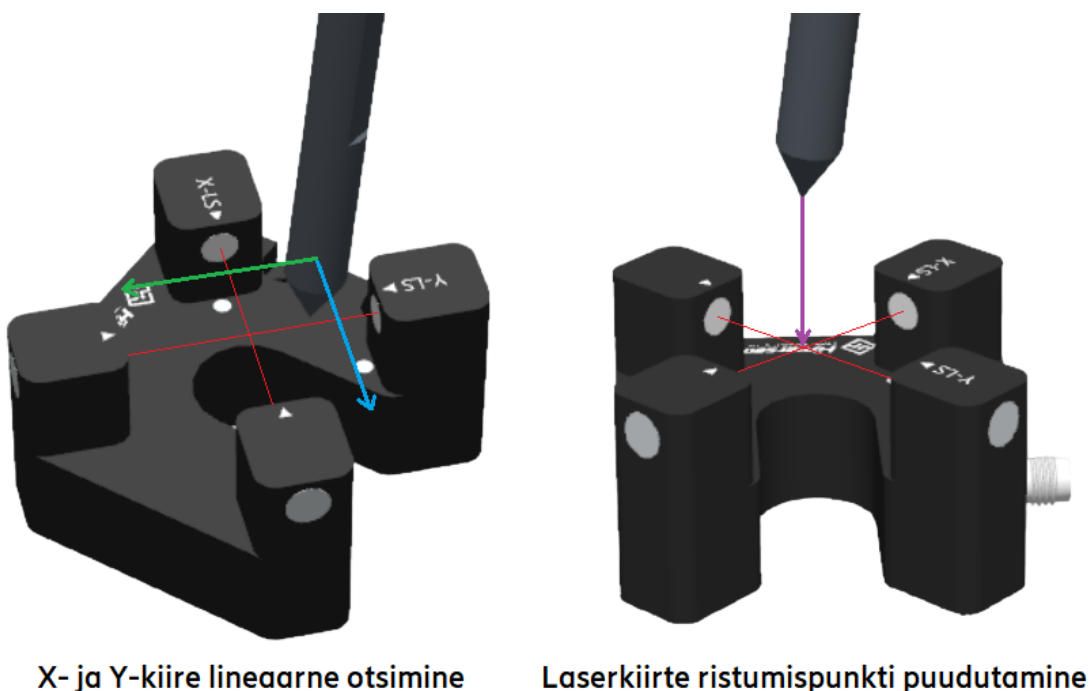
Ristlaseriga tööriista kalibreerimiseks oli esmalt tarvis koostada RAPID programm, mis

1. salvestaks roboti liikumist peatamata sisendite käivitumise korral kohe tööriista positsioonid ning kasutaks neid andmeid TCP arvutamiseks;
2. oleks piisavalt loetav ja abstraktne, et hõlbustada vajadusel mõõtetasandite või -punktide lisamist;
3. annaks FlexPendant kaudu operaatorile juhiseid ning tagasisidet kalibratsiooni tulemuse kohta.

Loodud programm koosneb mõõte- ning kalkuleeritud positsioonide definitsioonidest, X- ja Y-laserkiire otsimisest, laserkiirte ristumispunkti puudutamisest eri asendites ning arvutuslikust osast (vt Lisa 3. RAPID programm tööorgani kalibreerimiseks lasermõõtemetodiga). Programm jälgendab

orientiiri kasutusega manuaalse kalibratsiooni programmi, kuid füüsiline orientiir on asendatud laseranduri laserkiirte ristumispunktiga.

Ristumispunkti asukoht tuvastatakse neljas erineva liigeskonfiguratsiooniga mõõteasendis ($pAngle_1 - pAngle_4$). Robot liigub koos tööriistaga ohutust startpositsioonist ($pApproach$) esimesse eeldefineeritud mõõteasendisse. Esmalt tuvastatakse RAPID raamatukogu funktsiooniga SearchL tööriista trajektoori lõikumine X-kiirega nii paremalt kui vasakult poolt (vt Joonis 14). SearchL salvestab monitooritava sisendi ($diXBeam$) käivitumise korral lõikepunktid koheselt vastavasse massiivi ($pBeamSearch\{4\}$). Analoogsel moel tuvastatakse ka Y-kiirega lõikumine, mispuhul on jälgitavaks sisendiks $diYBeam$ (vt Joonis 14). Seejärel arvutatakse lõikepunktidest lähtudes kahe laserkiire ristumispunkti ($pCross$) väärtus: X-koordinaadi leidmiseks keskmistatakse eelmainitud massiivi esimese ja teise elemendi X-väärtused, Y-koordinaadi leidmiseks keskmistatakse kolmanda ja neljanda elemendi Y-väärtused, Z-koordinaadi leidmiseks keskmistatakse massiivi esimese ja teise elemendi Z-väärtused. Leitud positsiooni kasutatakse orientiiri ($pOrient$) asukoha uuendamiseks. Selleks, et robot ei kaotaks vahepealsete liikumiste käigus oma eeldefineeritud orientatsiooni, salvestatakse ka aktiivse mõõtepositsiooni orientatsioon $pOrient$ muutujasse.



Joonis 14 Liikumised SearchL funktsiooniga

Järgnevalt liigub robot tööriista orientatsiooni säilitades ristumispunkti kohale ning seejärel lineaarselt mööda orientiiri Z-telge alla (vt Joonis 14). SearchL funktsiooniga tuvastatakse positsioon, kus tööriista koonusjas tipp puudutab laserkiirte ristumispunkti ning see salvestatakse mõõtepunktide massiivi ($pMeasurements\{5\}$). Antud protsess on automatiseeritud versioon

kalibratsiooniinstrumentide manuaalsest kontakti viimisest. Robot liigub tööriistaga järgmisesse mõõteasendisse ning kogu protsess kordub, kuni pMeasurements{5} massiiv on andmetega täidetud.

Järgmise sammuna tõlgitakse RAPID raamatukogu funktsiooniga CalcJointT massiivi sisestatud *robtarget*-tüüpi mõõtepunktid ümber *jointtarget*-tüüpi punktideks. Antud *jointtarget*'id on sisendiks MToolTCPCalib ning MToolRotCalib funktsioonidele, millega leitakse kalibreeritava tööorgani TCP, orientatsioon ning suurim mõõtehälve (*max error*). Kalibratsiooni tulemus kuvatakse operaatorile FlexPendant'i dialoogiboksis ning nõusoleku andmisel kasutatakse leitud väärtusi aktiivse *tooldata* uuendamiseks ning kalibratsiooni protsess lõpeb.

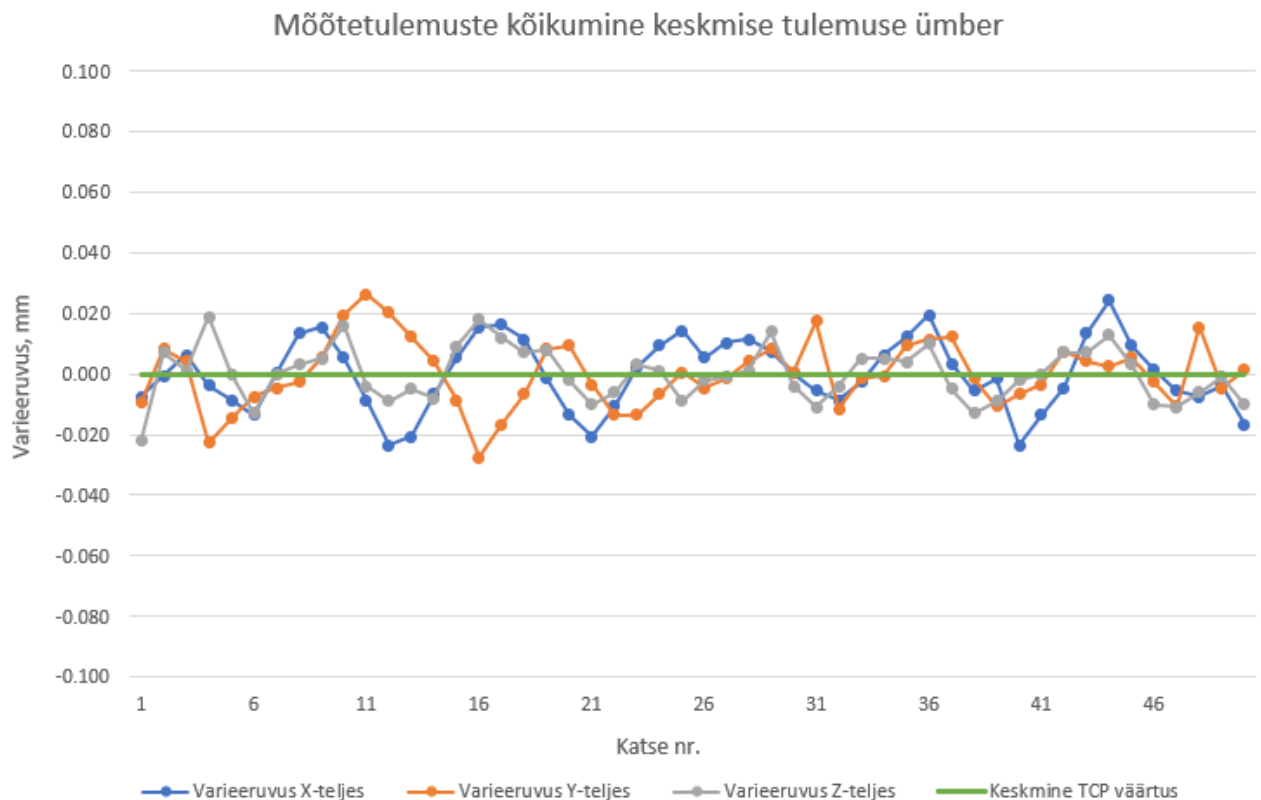
Kalibratsioonikatsete sooritamiseks fikseeriti laserandur robotjaamas ohtusse ning ligipääsetavasse asukohta. Flantsi külge paigaldatud tööriist püsis manuaalsete kalibratsioonisoorituste ning lasermõõtmiste vahelisel perioodil puutumatuna, et mitte tekitada tehisklikke erinevusi mõlema meetodi mõõtetulemustes. Tööriista TCP kalibreerimist lasermeetodil korraldati 50 korda. Anduri mõõtealas sooritati liigutusi kiirusega 30 mm/s, et tagada roboti õigeaegne reageerimine sisendite käivitumisele ning vältida kokkupõrkeid tööriista ja anduri vahel. Mõõtealast väljaspoole jäävad liigutused (roboti ümberorienteerumine) sooritati kiirusega 50-100 mm/s. Kalibratsiooniks kuluvat aega mõõdeti alates startpositsiooni (pApproach) saavutamisest kuni FlexPendantil uue TCP kuvamiseni. Mõõdetava ajahulga sisse mahtus laserkiirte ristumispunkti tuvastamine neljas erinevas asendis, ristumispunkti puudutamine neljas erinevas asendis, roboti vahepealsed ümberorienteerumised, ning automaatne arvutuste sooritamine.

50 mõõtetulemuse põhjal leitud keskmine TCP väärtus on esitletud allolevas tabelis (vt Tabel 2), kusjuures esitletud väärtused on defineeritud roboti flantsi suhtes. Tabelis on esitatud ka suurima ning vähima X-, Y- ja Z-koordinaadi vahe, et ilmestada, millises ulatuses võivad tulemused automaatse kalibratsiooni puhul kõikuda.

Tabel 2 Lasermõõtemetodi tulemused

TCP _X , mm	TCP _Y , mm	TCP _Z , mm	TCP _{RX}	TCP _{RY}	TCP _{RZ}	max error, mm	ajakulu, s
118.846	-8.467	12.128	-0.269°	88.958°	0°	0.079	39
Suurim varieeruvus, mm							
0.048	0.054	0.041					

Lasermõõtemetodil leitud kalibratsioonitulemuste erinevus keskmisest tulemusest (roheline nulljoon) on esitletud teljepõhiselt ka alloleval graafikul (vt Joonis 15), kasutades manuaalse kalibratsiooni graafikuga sama skaalat, et illustreerida erinevust mõlema meetodiga leitud koordinaatide varieervuse ulatuses. X-koordinaadid varieerusid vahemikus 118,822 mm kuni 118,87 mm ehk suurima ja vähima tulemuse vahe oli 0,048 mm. Y-koordinaadid varieerusid vahemikus -8,495 mm kuni -8,441 mm ning suurima ja vähima tulemuse vahe oli 0,054 mm. Erinevalt manuaalse kalibratsiooni mõõtetulemustest esines Z-koordinaatide hulgas kõige väiksem amplituud suurusega 0,041 mm, mispuhul koordinaadid varieerusid vahemikus 12,106 mm kuni 12,147 mm. X-koordinaatide puhul oli maksimaalne erinevus keskmisest mõõtetulemusest 0,024 mm, Z-koordinaatide puhul 0,019 mm ning suurim erinevus keskmisest tulemusest – 0,026 mm – esines Y-koordinaatide hulgas. Mõõtehälbed varieerusid vahemikus -0,028 mm kuni 0,026 mm ehk hälvete amplituud oli 0,054 mm.



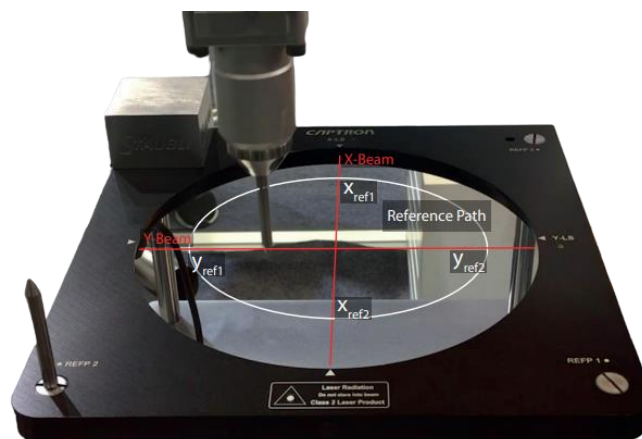
Joonis 15 Automatiseeritud kalibratsiooni mõõtetulemuste varieerumine

Manuaalmeetodi tulemustega võrreldes on laserkalibratsiooni koordinaatide omavaheline varieeruvus kolm korda väiksem, erinevus keskmisest mõõtetulemusest 3,5 korda väiksem ning mõõtehälvete amplituud samuti kolm korda väiksem. Seega on lasermõõtemetodi tulemuste korratavus TCP&Z meetodiga võrreldes oluliselt parem. Küll aga sooritati laserkalibratsiooni katsed suhteliselt müravabas keskkonnas, kus ainsaks vibratsiooniallikaks oli roboti enda liikumine.

Laseranduri rakendamine tootmisliinil mürarikkas keskkonnas võib anda teistsugused tulemused. Kõigi 50 kalibratsioonikatse puhul jäi *max error* väärtus alla 0,1 mm, mistõttu poleks operaator reaalses kalibratsioonisituatsioonis (nt tootmisliinil) kordusmõõtmisi sooritama pidanud. Antud tõsiasi kujutab endast olulist ajavõitu.

Kalibratsiooni sooritamiseks kulus keskmiselt 39 sekundit, mille sisse mahtusid eelmainitud protseduurid. Antud moel laseranduriga tööriista kalibreerimine toimub umbes 15 korda kiiremini kui manuaalne kalibreerimine. Kuna mõõteprotsessiks kuluvat aega mõjutavate faktorite hulk on väike, võib eeldada, et tootmisliinil kulub sarnaselt laborikeskkonnale lasermõõtemetodil tööriista kalibreerimiseks sarnane ajahulk.

Peamiseks probleemiks antud ristlaseriga tööriista kalibreerimisel on anduri geomeetriast tingitud piirangud ehk anduri nurkades paiknevad sambad seavad piirangud sellele, milliste liigeskonfiguratsioonidega on võimalik anduri mõõtealale ligi pääseda. Kuna laserkiirte ristumispunkt on seadme mõõteala aluspinnast vaid 16 mm kõrgusel (vt Lisa 2. Hypersen HPS-LCB02 parameetrid ja joonised), peaks kalibreeritava tööorganil esinema ülejäänud kehast pikemalt väljaulatuv teravatipuline osa (nt kruvikeeraja või liimidosaaatori ots) või on tarvis tööriista külge fikseerida vardakujuline mõõteinstrument, et hõlbustada ohutult mõõtealasse pääsemist. Kõigi tööriistade puhul sellist võimalust sobiva fikseerimispunkti puudumise tõttu aga ei ole. Tööorganeid, mille aktiivne punkt asub nt haaratsi sõrmede vahel või vaakumhaaratsi keskpunktis, on sellise anduriga keeruline kalibreerida, kuna eksisteerib oht andurit või tööorganit kokkupõrke käigus kahjustada. Antud probleemi on võimalik lahendada teistsuguse seadmevalikuga. Näiteks raamikujulise seadme puhul, kus laserandurid on raami sisse integreeritud, puudub oht mõõteala aluspinnaga kokkupõrgata ning alasse saab sügavamalt siseneda. Ka suuremate kabariitmõõtmetega seade muudaks protsessi mugavamaks ja vähendaks kokkupõrkeriski (vt Joonis 16).



Joonis 16 Raamikujuline ristlaserandur [16]

Ristlaseranduriga robottööriista kalibreerimisel võib probleemiks kujuneda ka robotjaamas ligipääsetava ning ohutu punkti leidmine, kuhu seade fikseerida. Kuna enne kalibratsiooni sooritamist on tarvis robotile õpetada liginemispositsioon (töös kirjeldatud programmis pApproach) ning otsingupositsioonid (töös kirjeldatud programmis pAngle_1 – pAngle_4), mis sõltuvad laseranduri asukohast ruumis, ei ole seadme asukoha muutmine kalibratsioonisoorituste vahelisel ajal mõistlik – vastasel juhul on tarvis mainitud positsioonid robotile uuesti õpetada. Kitsastes robotjaamades on aga keeruline leida sellist fikseerimispunkti, mis oleks ühtaegu ohutu ning erimõõtmeliste tööriistade jaoks ligipääsetav.

KOKKUVÕTE

Tööstuse automatiseerimine on jõudsalt kasvav valdkond, mille üheks oluliseks osaks on tööstus- ja koostöörobotite rakendamine tootmisülesannete täitmisel. Selleks, et robotite poolt tehtud töö oleks kvaliteetne, on oluline tagada nende korrektne kalibratsioon – sealhulgas robottööriistade kalibratsioon. Tööriista ehk TCP kalibreerimise all peetakse silmasööriista aktiivse punkti täpse asukoha määramist roboti flantsi suhtes. TCP kalibreerimiseks on mitmeid erinevaid meetodeid: manuaalsed kontaktmeetodid ning automaatsed mittekontaktmeetodid (näiteks lasermõõtemetodid ning masinnägemist rakendavad meetodid).

Antud lõputöös olid uurimisalusteks meetoditeks ettevõttes rakendatav TCP&Z manuaalmeetod ning potentsiaalne alternatiiv ristlaseriga lasermõõtemetodi näol. Kui mainitud manuaalmeetodi puhul kasutatakse kalibreerimiseks teravatipulisi mõõteinstrumente, mis omavahel eri asendites visuaalse hinnangu põhjal kontakti viiakse, siis lasermõõtemetodi puhul sooritatakse kalibratsioon ristlaserit rakendades. Kalibratsioonimeetodeid võrreldi laborikeskkonnas tööstusroboti flantsi külge fikseeritud teravatipulist mõõtevarrast kalibreerides. Mõlema kalibratsioonimeetodi sooritamiseks kirjutati eraldi robotprogrammid.

Lõputöö eesmärgiks oli uurida, kas hetkel tootmisliinilööriistade kalibreerimiseks kasutatavat TCP&Z meetodit oleks võimalik lasermõõtemetodiga asendada ning kas meetodi asendamine oleks põhjendatud. Mõlema kalibratsioonimeetodi tulemusi analüüsides selgus, et TCP kalibreerimine ristlaseriga toimub manuaalmeetodist 15 korda kiiremini (vastavalt 39 sekundit ja 585 sekundit). Ühtlasi oli lasermõõtemetodi puhul kalibratsioonitulemuste omavaheline varieeruvus 3 korda väiksem kui manuaalmeetodi puhul (vastavalt 0,054 mm ja 0,168 mm) ning varieeruvus keskmise mõõtetulemuse suhtes 3,5 korda väiksem (vastavalt 0,026 mm ja 0,09 mm). Eelmainitu põhjal võib järeldada, et antud robotjaama rakenduse seisukohast on ristlaserit rakendav lasermõõtemetod sobiv alternatiiv manuaalsele TCP&Z meetodile.

Lõputööd on võimalik kasutada juhendmaterjalina TCP&Z meetodi sooritamiseks või lähtepunktina edasistes kalibratsioonimeetodeid või -seadmeid võrdlevates töödes.

SUMMARY

Manual and Automated Tool Calibration

Industrial automation is a rapidly growing field, of which an important part is utilising industrial and collaborative robots to perform production tasks. In order for the work done by robots to be of high quality, it is crucial to ensure their correct calibration which includes calibrating the used tools. Tool calibration aka TCP calibration refers to the precise determination of the tool's active point in relation to the flange. There are several different methods for TCP calibration, including manual contact methods and automatic non-contact methods which utilise either laser measurement systems or machine vision.

In this thesis, the investigated calibration methods were the TCP&Z manual method and a cross-laser measurement method. For the manual method, sharp-tipped measuring instruments are brought into contact with each other in four different positions based on visual assessment. For the laser method, however, only a cross-laser sensor is used. Both methods were used in a laboratory environment to calibrate a small measuring rod attached to the flange of the robot. Separate robot programs were written for both calibration methods.

The aim of the thesis was to investigate whether the TCP&Z method currently used on the production line for tool calibration could be replaced with a laser measurement method and whether such an alternative would be justified. After analysing the results of both calibration methods, it was found that TCP calibration with a cross-laser is 15 times faster than the manual method (39 seconds and 585 seconds, respectively). In addition, the maximum mutual variation in calibration results was 3 times smaller for the laser method than for the manual method (0.054 mm and 0.168 mm, respectively), and the maximum variation from the average calibration result was 3.5 times smaller (0.026 mm and 0.09 mm, respectively). Based on this data, it can be concluded that the cross-laser calibration method is a suitable alternative to the TCP&Z method for the given robotic cell application.

This thesis can be used as a guide for performing the TCP&Z manual method or as a starting point for further comparative papers on calibration methods or devices.

KASUTATUD MATERJALID

- [1] Allied Market Research, „Industrial Robotics Market Share, Growth, Forecast by 2030“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/industrial-robotics-market> [Kasutatud 06.03.2023].
- [2] ABB, „Technical reference manual“, [Võrgumaterjal]. Available: http://nfs.gongkong.com/u_files/robot/3HAC16580-1_revG_en.pdf [Kasutatud 11.03.2023].
- [3] H. Gu, Q. Li, J. Li, „Quick Robot Cell Calibration for Small Part Assembly“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.airitilibrary.com/Publication/alDetailedMesh?docid=P20150909001-201510-201511020032-201511020032-129-134> [Kasutatud 13.03.2023].
- [4] G. Bergström, „Method for calibration of off-line generated robot program“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/153281.pdf> [Kasutatud 13.03.2023].
- [5] L. Zhang, C. Li, Y. Fan, X. Zhang, J. Zhao, „Physician-Friendly Tool Center Point Calibration Method for Robot-Assisted Puncture Surgery“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7825783/#B16-sensors-21-00366> [Kasutatud 13.03.2023].
- [6] C. Lin, H. Wang, C. Wang, „Automatic Calibration of Tool Center Point for Six Degree of Freedom Robot“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-0825/12/3/107> [Kasutatud 14.03.2023].
- [7] ABB, „BullsEye®7, User's Guide“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://library.e.abb.com/public/0bc1b97ce9e6d7bbc1257b4400528371/505942-102.pdf> [Kasutatud 14.03.2023].
- [8] J. Hallenberg, „Robot Tool Center Point Calibration Using Computer Vision“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:23964/FULLTEXT01.pdf> [Kasutatud 14.03.2023].

- [9] Y. Cai, H. Gu, C. Li, H. Liu, „Easy industrial robot cell coordinates calibration with touch panel“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584516301387> [Kasutatud 14.03.2023].
- [10] A. Nubiola, I. Bonev, „Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584512000816> [Kasutatud 16.03.2023].
- [11] RoboDK, „RoboDK TwinTool“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://robodk.com/doc/en/Robot-Automatic-Calibration-TwinTool.html> [Kasutatud 02.02.2023].
- [12] F. Cheng, „Calibration of Robot Reference Frames for Enhanced Robot Positioning Accuracy“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Calibration-of-Robot-Reference-Frames-for-Enhanced-Cheng/165211e564e1ffe3791498163652e8947700e030> [Kasutatud 16.03.2023].
- [13] A. Ribeiro, A. Sousa, L. Rocha, „Four-point calibration of a robotic manipulator with a laser tracker“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM773> [Kasutatud 16.03.2023].
- [14] AIM Robotics, „Auto TCP Calibration Tool“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://aim-robotics.com/tcp-calibration-tool/> [Kasutatud 17.03.2023].
- [15] Hypersen Technologies, „HPS-LCB02“, [Võrgumaterjal]. Available: <https://en.hypersen.com/product/detail/43.html> [Kasutatud 17.03.2023].
- [16] CAPTRON, „Robot calibration with TCP-measuring instruments from CAPTRON“, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.captron.com/fileadmin/user_upload/CAPTRON_Application_Note_TCP.pdf [Kasutatud 01.05.23].

LISAD

Lisa 1. RAPID programm tööorgani kalibreerimiseks TCP&Z,X meetodiga

Lisa 2. Hypersen HPS-LCB02 parameetrid ja joonised

Lisa 3. RAPID programm tööorgani kalibreerimiseks lasermõõtemetodiga

Lisa 1. RAPID programm tööorgani kalibreerimiseks TCP&Z,X meetodiga

```
MODULE ManualTool
!-----Tools-----
PERS tooldata tTestTool:=[TRUE,[[118.765,-8.53802,12.2617],[0.713493,-0.00168443,0.700659,0.00165416]],1,[0,0,90],[1,0,0,0],0,0,0]];
PERS tooldata tDummy;
!-----Messages-----
CONST msgdata msgMessage1:=[1,0,btnOK,"TCP calibration","", "Measuring the tool with TCP&Z,X","", "Current TCP will be recalculated","",iconInfo,""];
CONST msgdata msgMessage2:=[1,0,btnYesNo,"TCP calibration","", "Have all six positions been taught?","", "", "",iconQuestion,""];
CONST msgdata msgMessage3:=[1,0,btnYesNo,"TCP calibration","", "Confirm recalculation of current TCP","", "", "",iconQuestion,""];
CONST msgdata msgMessage4:=[1,0,btnOK,"TCP calibration","", "Current TCP has been recalculated","", "", "",iconInfo,""];
CONST msgdata msgMessage5:=[1,0,btnOK,"TCP calibration","", "TCP recalculation was cancelled","", "Sending robot to home position","",iconInfo,""];
!-----
PROC CalibrateTool1()
VAR bool bCalibComplete:=FALSE;
VAR string stToolName:="tTestTool";
VAR btnres resButton;
VAR userbutton btnConfirmation:=[ "", "Confirm", "", "Cancel", "" ];
VAR num nMaxError:=0;
VAR num nMeanError:=0;
VAR string stMaxError;
VAR string stMeanError;
!approach position
CONST jointtarget jtSafePos:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
!measuring positions
CONST jointtarget jtPosition1:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST jointtarget jtPosition2:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST jointtarget jtPosition3:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST jointtarget jtPosition4:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST jointtarget jtZPosDir:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST jointtarget jtXPosDir:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
!intermediate positions
CONST jointtarget jtIntPos1:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST jointtarget jtIntPos2:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST jointtarget jtIntPos3:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST jointtarget jtIntPos4:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST jointtarget jtIntPosX:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
!assigning current tooldata to temporary tool
tDummy:=tTestTool;
!-----
```



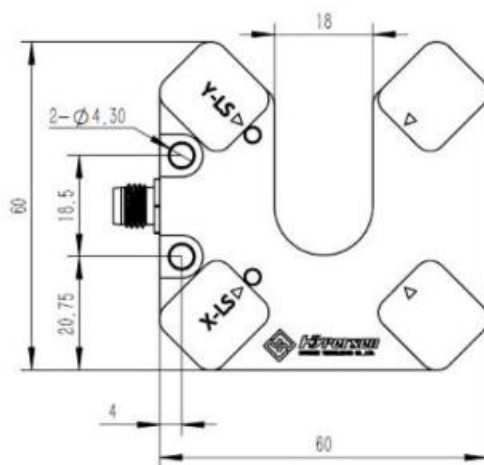
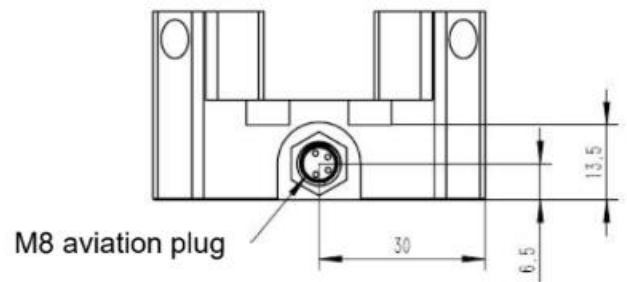
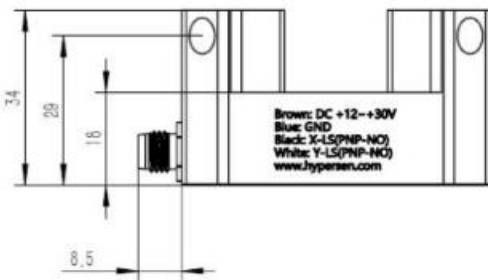
```

!teaching measurement positions starts here
MT_UIMessage msgMessage1\Subheader:=stToolName;
WHILE bCalibComplete=FALSE DO
    !-----teach position 1-----
    MoveAbsJ jtSafePos\NoEOffs,v200,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtIntPos1\NoEOffs,v100,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtPosition1\NoEOffs,v50,fine,tDummy;
    Stop;
    !-----teach X direction-----
    MoveAbsJ jtXPosDir\NoEOffs,v50,fine,tDummy;
    Stop;
    !-----teach Z direction-----
    MoveAbsJ jtPosition1\NoEOffs,v50,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtZPosDir\NoEOffs,v50,fine,tDummy;
    Stop;
    !-----teach position 2-----
    MoveAbsJ jtIntPos1\NoEOffs,v100,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtIntPos2\NoEOffs,v100,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtPosition2\NoEOffs,v50,fine,tDummy;
    Stop;
    !-----teach position 3-----
    MoveAbsJ jtIntPos2\NoEOffs,v100,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtIntPos3\NoEOffs,v100,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtPosition3\NoEOffs,v50,fine,tDummy;
    Stop;
    !-----teach position 4-----
    MoveAbsJ jtIntPos3\NoEOffs,v100,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtIntPos4\NoEOffs,v100,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtPosition4\NoEOffs,v50,fine,tDummy;
    Stop;
    MoveAbsJ jtIntPos4\NoEOffs,v100,fine,tDummy;
    MoveAbsJ jtSafePos\NoEOffs,v200,fine,tDummy;
    !-----
    MT_UIMessage msgMessage2\Subheader:=stToolName\Buttonresult:=resButton;
    IF resButton=resYes bCalibComplete:=TRUE;
ENDWHILE
!teaching measurement positions ends here
!-----
!asking for user confirmation
MT_UIMessage msgMessage3\Subheader:=stToolName\Buttonresult:=resButton\BtnArray:=btnConfirmation;
IF resButton=14 THEN
    !recalculating the TCP based on jointtargets
    MToolTCPCalib jtPosition1,jtPosition2,jtPosition3,jtPosition4,tDummy,nMaxError,nMeanError;
    MToolRotCalib jtPosition1,jtZPosDir\XPos:=jtXPosDir,tDummy;
    stMaxError:="TCP max error: "+ValToStr(nMaxError);
    stMeanError:="TCP mean error: "+ValToStr(nMeanError);
    !assigning new TCP to current tooldata
    tTestTool:=tDummy;
    MT_UIMessage msgMessage4\Subheader:=stToolName\Info:=stMeanError+stMaxError\Buttonresult:=resButton;
ELSEIF resButton=16 THEN
    MT_UIMessage msgMessage5\Subheader:=stToolName\Buttonresult:=resButton;
    MT_MoveJ 999,p999,v500,fine,tTCFlange;
    MT_ClearMessage;
    Stop;
ENDIF
ENDPROC
ENDMODULE

```

Lisa 2. Hypersen HPS-LCB02 parameetrid ja joonised

Toitepinge	12-30 VDC	Eraldusvõime	0.2 mm
Voolutarve	max 30 mA	Korratavus	0.01 mm
Väljundi tüüp	2 × PNP-NO	Kere materjal	must anodeeritud alumiinium
Indikaator	kollane LED	Liides	M8
Töötemperatuur	-20 – 75°C	Mõõdud	60 × 60 × 34 mm
Laseri tüüp	650 nm	Kaitseklass	IP67
Laseri klass	2		
Lülitussagedus	max 2000 Hz		



Lisa 3. RAPID programm tööorgani kalibreerimiseks lasermõõtemeetodiga

```
MODULE AutomatedTool
!-----Tools-----
PERS tooldata tTestTool:=[TRUE,[[118.765,-8.53802,12.2617],[0.713493,-0.00168443,0.700659,0.00165416]],1,[0,0,90],[1,0,0,0],0,0,0]];
PERS tooldata tDummy;
!----Messages----
CONST msgdata msgMessage1:=[1,0,btnOK,"TCP calibration","", "Measuring the tool with laser sensor","", "Current TCP will be recalculated","",iconInfo,""];
CONST msgdata msgMessage2:=[1,0,btnYesNo,"TCP calibration","", "Current TCP has been recalculated", "Keep or discard new value?", "", "", iconQuestion, ""];
CONST msgdata msgMessage3:=[1,0,btnOK,"TCP calibration","", "TCP calibration is complete","", "Sending robot to home position","",iconInfo,""];
CONST msgdata msgMessage4:=[1,0,btnOK,"TCP calibration","", "TCP calibration was cancelled","", "Sending robot to home position","",iconInfo,""];
!----Robtargets----
!beam search positions with different axis configurations
CONST robtarget pApproach:=[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget pAngle_1:=[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget pAngle_2:=[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget pAngle_3:=[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
CONST robtarget pAngle_4:=[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
!----Calculated points----
!beam search points go here
PERS robtarget pBeamSearch{4}:=[[[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],
[[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],
[[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],
[[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]];

!orient for calibration
PERS robtarget pOrient:=[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
!TCP measurement points go here
PERS robtarget pMeasurements{5}:=[[[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],
[[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],
[[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],
[[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]],
[[0,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]]];

!TCP measurement points are jointtargets
PERS jointtarget jtMeasurement_1:=[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
PERS jointtarget jtMeasurement_2:=[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
PERS jointtarget jtMeasurement_3:=[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
PERS jointtarget jtMeasurement_4:=[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
PERS jointtarget jtMeasurement_5:=[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
!-----
```

```

PROC CalibrateTool()
  VAR bool bCalibComplete:=FALSE;
  VAR string stToolName:="tTestTool";
  VAR userbutton btnConfirmation:=["", "Keep", "", "Discard", ""];
  VAR btnres resButton;
  VAR num nAngleNum;
  VAR num nCounter;
  VAR pos pCross;
  VAR num nMeanError;
  VAR num nMaxError;
  VAR string stMaxError;
  VAR robtarget pCalibPos;
  VAR jointtarget jtMeasurement;
  !assigning current tooldata to temporary tool
  tDummy:=tTestTool;
  !-----
  !calibration starts here
  WHILE bCalibComplete=FALSE DO
    MoveJ pApproach,v500,fine,tDummy;
    !defining the measurement points
    FOR nAngleNum FROM 1 TO 4 DO
      GetDataVal "pAngle_" + ValToStr(nAngleNum),pCalibPos;
      nCounter:=1;
      !searching laser beams
      MoveL pCalibPos,v100,fine,tDummy;
      SearchL diXBeam,pBeamSearch{1},Offs(pCalibPos,0,-30,0),v30,tDummy;
      SearchL diXBeam,pBeamSearch{2},pCalibPos,v30,tDummy;
      SearchL diYBeam,pBeamSearch{3},Offs(pCalibPos,30,0,0),v30,tDummy;
      SearchL diYBeam,pBeamSearch{4},pCalibPos,v30,tDummy;
      !calculating beam cross-point
      pCross.x:=(pBeamSearch{1}.trans.x+pBeamSearch{2}.trans.x)/2;
      pCross.y:=(pBeamSearch{3}.trans.y+pBeamSearch{4}.trans.y)/2;
      pCross.z:=(pBeamSearch{1}.trans.z+pBeamSearch{2}.trans.z)/2;
      !updating orient location
      pOrient.trans:=pCross;
      pOrient.rot:=pCalibPos.rot;
      !defining measurement points
      MoveL Offs(pOrient,0,0,30),v100,fine,tDummy;
      SearchL diXBeam,pMeasurements{nCounter},Offs(pOrient,0,0,-2),v30,tDummy;
      MoveL Offs(pOrient,0,0,50),v100,fine,tDummy;
      Incr nAngleNum;
      Incr nCounter;
    ENDFOR
  
```

```

MoveJ pApproach,v500,fine,tDummy;
!adding Z-direction to measurement array
pMeasurements{5}:=Offs(pMeasurements{1},0,0,50);
nCounter:=0;
!transforming measurement points into jointtargets
FOR nCounter FROM 1 TO 5 DO
    GetDataVal "jtMeasurement_"+ValToStr(nCounter),jtMeasurement;
    jtMeasurement:=CalcJointT(pMeasurements{nCounter},tDummy);
    Incr nCounter;
ENDFOR
!recalculating the TCP based on jointtargets
MToolTCPCalib jtMeasurement_1,jtMeasurement_2,jtMeasurement_3,jtMeasurement_4,tDummy,nMaxError,nMeanError;
MToolRotCalib jtMeasurement_1,jtMeasurement_5,tDummy;
stMaxError:="TCP max error: "+ValToStr(nMaxError);
!asking user to confirm new tooldata
MT_UIMessage msgMessage2\Subheader:=stToolName\Info:=stMaxError\Buttonresult:=resButton\BtnArray:=btnConfirmation;
IF resButton=14 THEN
    !assigning new TCP values to current tooldata
    tTestTool:=tDummy;
    MT_UIMessage msgMessage3\Subheader:=stToolName\Buttonresult:=resButton;
    bCalibComplete:=TRUE;
ELSEIF resButton=16 THEN
    !new TCP values are discarded
    MT_UIMessage msgMessage4\Subheader:=stToolName\Buttonresult:=resButton;
    bCalibComplete:=TRUE;
ENDIF
ENDWHILE
MT_MoveJ 999,p999,v500,fine,tTCFlange;
MT_ClearMessage;
Stop;
ENDPROC

ENDMODULE

```