

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Infotehnoloogia teaduskond

Tarkvarateaduse instituut

Kalmer Päts 142741

**KINEMAATIKA OTSESE ÜLESANDE,
PÖÖRDÜLESANDE JA KÄELABA
SINGULAARSUSE LAHENDUS
TÖÖSTUSROBOT FANUC ARCMATE 120IB
NÄITEL**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Ermo Täks

PhD

Kaasjuhendaja: Alexander Gadalov

MEng

Tallinn 2017

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Kalmer Päts

22.05.2017

Annotatsioon

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli lihtsustada keevitusrobotite kasutuselevõttu väiksepartiiilistes või ühekordsetes tootmisprotsessides. Uurimisküsimuseks oli: kuidas lahendada tööstusrobot Fanuc ArcMate 120iB käelaba singulaarsuse probleem. Uurimisküsimus tuleneb tööstusrobotite juhtimise paindlikkuse suurendamise väljakutsest, kuna tänapäeval robotitega kaasa antud tarkvara võimaldab robotkätt liigutada, vaid mööda sirgjoont. Tootmises on enamasti vaja järgida aga keevitusjoont, mis ei ole sirgjooneline ning asub kolmemõõtmelisel pinnal. Uurimisküsimuse lahendamiseks tuli välja selgitada roboti Fanuc ArcMate 120iB liikumise eripärad ning leida moodus, kuidas liigutada robotkäega ühendatud keevituspead, mööda etteantud kõverjoont.

Töö tähtsaimaks tulemuseks on Fanuc robotite programmeerimiskeeles KAREL loodud programmikood, mis suudab läbida roboti manipulaatori käelaba singulaarsuse punkti, sealjuures tööorgani lõpppunkti asukohta trajektoorilt kõrvale viimata.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 19 leheküljel, 6 peatükki, 2 joonist, 11 tabelit.

Abstract

Forward Kinematics, Inverse Kinematics and Wrist singularity solution on the Basis of Industrial Robot Fanuc ArcMate 120iB

The aim of the bachelor thesis was to simplify the introduction of welding robots in production processes. The research question was to find a wrist singularity solution to industrial robot Fanuc ArcMata 120iB. The research question derives from the need to make industrial robots movements more flexible than they are when coming out of the factory.

First, the forward kinematics of given industrial robot was solved using Denavit-Hartenberg parameters and homogeneous transformation matrices. The inverse kinematics was solved using different matrices and vector algebra and already solved forward kinematics. Lastly, focused on solving the robot manipulators wrist singularity problem using all the above.

One of the biggest problems with working with six axis spherical industrial robots is when robots manipulator reaches singularity point. Even tough there are three possible singularity types, the one that occurs the most often is the robot's manipulators wrist singularity. This happens when robots joint four lines up with joint six, resulting usually in joint four trying to spin instantaneously 180 degrees or tool head moving out of trajectory.

The most important result of the work is fully working program written in Fanuc programming language KAREL, which can pass wrist singularity point without moving the robots end effort off the trajectory or spin the manipulators link four 180 degrees.

The thesis is in Estonian and contains 19 pages of text, 6 chapters, 2 figures, 11 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

X; Y; Z

Koordinaatteljestike suunad

W; P; R

Tööorgani kirjeldus Euleri nurkades

J1; J2; J3; J4; J5; J6

Tööstusroboti vastavate lülide pöördenurgad

Sisukord

1 Sissejuhatus	9
2 Tööstusrobotid	11
2.1 Tööstusrobotite liigitus	11
2.2 Robotite ehitus	12
2.3 Tööstusrobotite kinemaatika.....	14
2.3.1 Kinemaatika otsene ülesanne	15
2.3.2 Kinemaatika pöördülesanne	16
2.4 Tööorgani liikumine	17
2.5 Robotite programmeerimine.....	17
2.6 Singulaarsus.....	18
2.7 Tööstusrobot Fanuc ArcMate 120iB andmed.....	18
3 Kinemaatika otsese ülesande lahendus.....	20
4 Kinemaatika pöördülesande lahendus	23
4.1 Nurk J1	23
4.2 Nurk J2	23
4.3 Nurk J3	24
4.4 Nurk J4	25
4.5 Nurk J5	25
4.6 Nurk J6	25
5 Käelaba singulaarsuse lahendus	27
6 Kokkuvõte	28
Kasutatud kirjandus	29
Lisa 1 – Lähtekood	31

Jooniste loetelu

Joonis 1. Tööstusrobot Fanuc ArcMate 120iB lülide asetus	14
Joonis 2. Kolmnurk lülide 2, 3 ja 5 keskpunktide vahel	24

Tabelite loetelu

Tabel 1. Fanuc ArcMate 120iB tehnilised andmed	19
Tabel 2. Fanuc ArcMate 120iB Denavit-Hartenbergi parameetrid	20
Tabel 3. Esimese lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A1	20
Tabel 4. Teise lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A2.....	21
Tabel 5. Kolmanda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A3.....	21
Tabel 6. Neljanda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A4	21
Tabel 7. Viienda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A5.....	21
Tabel 8. Kuuenda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A6.....	21
Tabel 9. Kuuenda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks taustsüsteemi suhtes ..	22
Tabel 10. Tööorgani homogeenne transformatsiooni maatriks	22
Tabel 11. Tööorgani homogeenne transformatsiooni maatriks taustsüsteemi suhtes	22

1 Sissejuhatus

Tööstuses on olemasolevaid roboteid väga keeruline kasutusse võtta, sest nende korrektne rakendamine nõuab laialdasi teadmisi matemaatikast ja robotikast. Tänapäeval, neid teadmisi ettevõtluses väga ei leidu, mistõttu paljud robotid leiavad vähe või üldse mitte rakendust. Robot on hea korduvate ülesannete lahendamiseks, aga see nõuab suuremahulist ja seeriaviisilist tootmist, mida Eesti rasketööstuse ettevõtted ei ole oma turusituatsioonis veel välja võidelnud.

Bakalaureusetöö eesmärgiks on seetõttu lihtsustada keevitusrobotite kasutuselevõttu väiksepartiiilistes või ühekordsetes tootmisprotsessides. Uurimisküsimuseks on: kuidas lahendada tööstusrobot Fanuc ArcMate 120iB käelaba singulaarsuse probleem. Uurimisküsimus tuleneb tööstusrobotite juhtimise paindlikkuse suurendamise väljakutsest, kuna tänapäeval robotitega kaasa antud tarkvara võimaldab robotkäät liigutada, vaid mööda sirgjoont ehk mööda X, Y ja Z telgi. Tootmises on enamasti vaja järgida aga keevitusjoont, mis ei ole sirgjooneline ning asub kolmemõõtmelisel pinnal. Uurimisküsimuse lahendamiseks tuleb välja selgitada roboti Fanuc ArcMate 120iB liikumise eripärad ning leida moodus, kuidas liigutada robotkäega ühendatud keevituspead, mööda etteantud kõverjoont. Selleks on töö autor valinud kolmemõõtmelise pinna ja sellel asetseva ringjoone. Uurimisküsimusele vastuse leidmiseks tuleb lahendada ülesandeid, mida nimetatakse kinemaatika otseseks ülesandeks ja pöördülesandeks. Kinemaatika otsese ülesande lahenduses tugineb töö autor eelkõige Denavit-Hartenbergi parameetritele ja homogeensetele transformatsiooni maatriksitele. Pöördülesande lahenduses kasutab töö autor erinevaid vektor ja maatriks algebra arvutusi ning käelaba singulaarsuse lahenduses kõike eelnevat.

Töö autori poole pöördui käesoleva uurimisküsimusega ja eesmärgiga töötada välja robot, mis suudaks tööorganit liigutada mööda suvalist etteantud trajektoori, firmast ASG Robotics OÜ. ASG Robotics OÜ on Narvas tegutsev rahvusvaheline firma, mis pakub automatiseeritud terviklahendusi autotööstuse valdkonnas, laevaehituses ja torutööstuses. Töö tähtsaimaks tulemuseks on Fanuc robotite programmeerimiskeeles KAREL loodud

programmikood, mis suudab läbida roboti manipulaatori käelaba singulaarsuse punkti, sealjuures tööorgani lõpppunkti asukohta trajektoorilt kõrvale viimata.

2 Tööstusrobotid

Robotiks loetakse igasugust süsteemi, mis suudab autonoomselt teostada kindaid tegevusi [1, p. 6]. Tänapäeva robot arendati välja Joseph Engelbergi ja George Devoe poolt. Nende töö tulemusena hakati tootma esimesi tööstusroboteid. Esialgu müüdi neid enamjaolt General Motors-ile, aga robotid ei saanud tööstuse peamiseks osaks enne kui neid hakati kasutama Jaapani autotööstuses [2, p. 10].

Algselt olid tööstusrobotid välja arendatud selleks, et hõlbustada tööstusprotsesse ja asendada inimesi töödes ja olukordades, mis on inimesele ohtlikud, üksluised, füüsiliselt rasked ja liiga keerulised. Tänapäeval motiveerivad robotite arendust lisaväärtused. Isegi ainult tehnilisest vaatenurgast, näiteks tootlikkuse tõstmiseks ja kvaliteedi parandamiseks [1, pp. 3-4]. Tüüpiline tööstusrobot on paigalseisev masin, poltidega kinnitatud kas maha, lakke või seina peale ning suudab asju üles tõsta ning neid liigutada [2, p. 3].

2.1 Tööstusrobotite liigitus

Roboteid võib leida tootmistööstuses, sõjanduses, kosmose uuringutel, transpordis, meditsiinis jne. Tüüpilised tööstusrobotid teevad töid, mis on keerulised, ohtlikud ja inimese jaoks igavad. Need tõstavad raskeid asju, värvivad, käitlevad kemikaale, keevitavad ja osalevad kokkupanemisoperatsioonides. Lisaks, suudavad need teostada antud ülesandeid tunnistundi ja päevast päeva sama täpsusega. Robotid ei väsi ära ning ei tee väsimusest tingitud vigu ning tänu sellele on need ideaalsed täitma korduvaid ülesandeid. Põhiliselt liigitatakse tööstusroboteid mehaanilise struktuuri järgi:

- Cartesiuse robot ehk Gantry robot: kasutatakse asjade tõstmiseks ja liigutamiseks, kokkupanemisoperatsioonides, tööriistade käitlemiseks ja kaarkeevitamiseks. See on robot millel on kolm kulgliikumise manipulaatorit ja mille teljed langevad kokku ristkoordinaadistikuga;
- Silindriline robot: kasutatakse kokkupanemise operatsioonides, tööriistade käsitlemisel, keevitamisel ja survevalu masinate käsitlemisel. See on robot mille teljed moodustavad silindrilise koordinaadi süsteemi;

- Sfääriline robot: kasutatakse tööriistade käsitlemisel, erinevatel keevitustöödel ja survevalu teostamisel. See on robot, mille teljed moodustavad polaarkoordinaadi süsteemi;
- SCARA robot ehk selektiivne kuulekas artikuleeritud roboti käsi. Kasutatakse esemete tõstmiseks ja liigutamiseks, tihendusaine paigaldamiseks, kokkupanemisoperatsioonides ja tööriistade käsitlemisel. See on robot millel on kaks paralleelset pöördliikuvat lüli, et tagada nõuetele vastavus tasapinnal;
- Liigestatud robot: kasutatakse kokkupanemisoperatsioonides, survevalu teostamisel, erinevatel keevitustöödel ja värvimisel. See on robot millel on vähemalt kolm pöördliikuvat lüli;
- Paralleelrobot: üks kasutusala on lennusiimulaatorite mobiilses platvormis. See on robot, mille käed on samaaegselt kulg- ja pöördliikumislülid [3].

2.2 Robotite ehitus

Roboti disainimise kõige olulisem osa on defineerida selle tulevased tööülesanded. Selleks, et võimalikult hea robot saaks ehitatud, tuleb erinevad tööülesanded defineerida ülimalt täpsusega. Ükski robot ei tööta hästi, kui ta tehtavate ülesannete hulk on väga lai. Tänu sellele tuleks robot kavandada täpselt selle paindlikkusega, mida on vaja, et teostada ettekirjutatud ülesandeid. Kõik disainimist puudutavad otsused peaksid lähtuma ülesannete valikust [4, p. 29].

Tööstusroboti osadeks loetakse:

- Mehaanilist süsteemi ehk manipulaatorit, mille ülesandeks on sooritada etteantud liigutusi ja/või keskkonnaga suhtlemine;
- Sensoreid (sisemisi kui väliseid), mis asuvad mehaanilise süsteemi sees või väljas ja mille ülesandeks on hankida informatsiooni roboti oleku ja robotit ümbritseva ala kohta;
- Juhtseade, mis annab edasi sensoritelt saadud info süsteemide üldiseks reguleerimiseks ning robotile antud ülesannete käivitamise ja täitmise käsu;
- Jõuallikas, mis tagab vajaliku energia koguse ja kuju, mis on sobilik roboti osade töötamiseks;
- Arvutiseadmed, mis on vajalikud juhtseadme töövõime suurendamiseks ja tehisintellekti võimaldamiseks.

See kõik annab robotile kolm põhilist samaaegset võimekust: mehaaniline liikumine, andmete väljatöötamine ja ümberprogrammeeritavus [1, pp. 3-4].

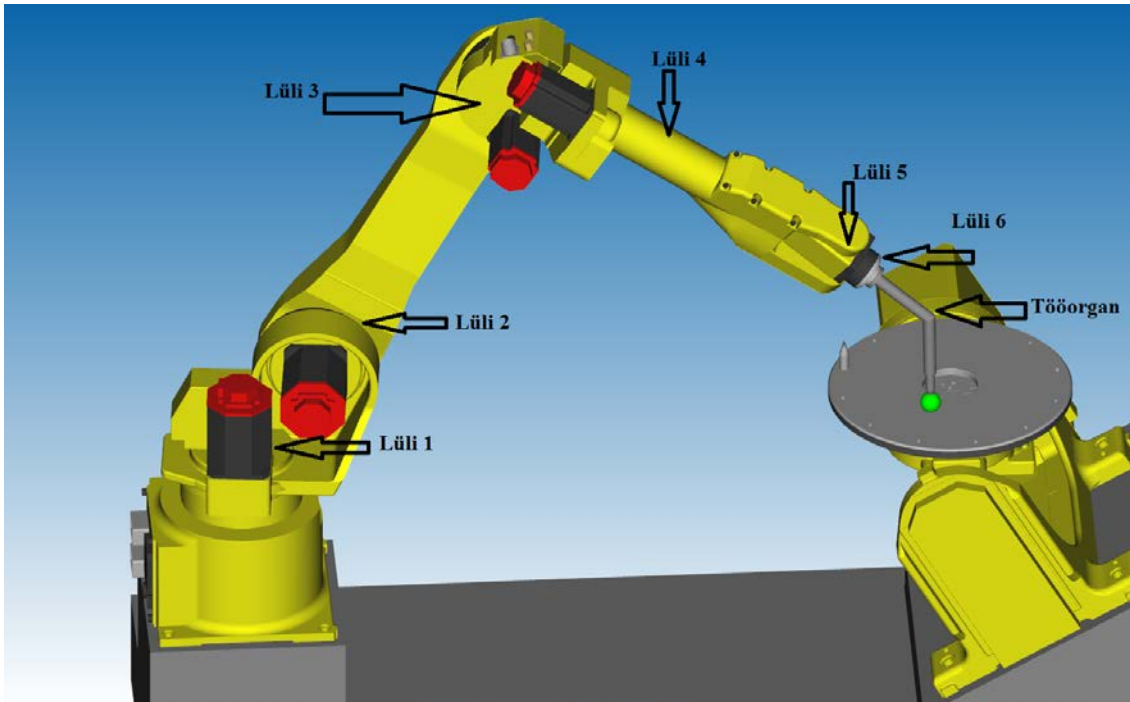
Et robot saaks teostada inimese käele sarnaseid tegevusi koosneb roboti manipulaator kolmest osast: teisaldusmehhanismist ehk käsivarrest, suunistusmehhanismist ehk käelabast ning tööorganist [1, p. 5].

Kuigi kõikide robotite struktuur on mingil määral elastne, siis mõned on palju elastsemad kui teised. Üldiselt jagatakse robotid kahte gruppi: jäigad ja elastsed. Jäigad struktuurid on need, millel nii kinemaatiline lahendus kui juhtimise eeskiri näevad ette, et kõik lülid on jäigad. Enamik tööstusroboteid on jäiga struktuuriga. Jäikade struktuuridega manipulaatorite juhtimine eeldab, et ei esine mingisugust struktuurilist deformatsiooni [4, pp. 32-33].

Iga Roboti mehaaniline osa ehk lüli, välja arvatud tööorgan, kus toimub liikumine on vabadusaste ehk kuue lüliga robotil on kuus vabadusastet. Vabadusastmete järjestus ja nende liikumise tüüp annab robotile kuju. Teoreetiliselt võib olla palju erineva välimusega kuue lüliga roboteid aga praktilisest vaatepunktist jäävad pea kõik robotid ainult paari erinevasse konfiguratsiooni kategooriasse [5, pp. 134-135].

Kuigi kuus vabadusastet on miinimum, et viimane lüli ulatuks igasse töötsooni suvalisse punkti, siis enamik lihtsamaid või eelnevalt planeeritud ülesandeid saab sooritada ka alla kuue vabadusastmega robot. Näiteks annab robotilt eemaldada mõni liikumistelg või ülesanne ei vaja nii täpset asukoha kirjeldust. [4, pp. 30-31].

Käsivarre lülide arv ja kinemaatilise ahela struktuur määravad manipulaatori üldise ehituse ja välisilme. Mida rohkem on käsivarrel lülisid, seda parem on tema manööverdatavus, kuid seda keerulisemaks kujuneb manipulaatori konstruktsioon. Seepärast piirduakse manipulaatorite puhul minimaalselt vajalike lülide arvuga, milleks on enamikul juhtudel 3 käsivarrelüli. Käelaba on kompaktne ja tema lülide liikumisulatus on palju väiksem käsivarre omast ning ta mõjutab roboti ehitust ja välisilmet vähem kui käsivars [6, p. 41]. Tööstusrobot Fanuc Arcmate 120iB lülide asetus on välja toodud joonisel 1.



Joonis 1. Tööstusrobot Fanuc ArcMate 120iB lülide asetus

2.3 Tööstusrobotite kinemaatika

Kinemaatika on niinimetatud liikuva geomeetria teadus. See on ainult positsiooni liikumise, orientatsiooni ja nende aja tuletise geomeetrilise kirjeldus. Robotikas kasutatakse manipulaatorite ja nende ülesannete kinemaatilist kirjeldust, et üles seada dünaamika ja juhtimise põhivõrrandid [7, p. 31].

Liikumiseks nimetatakse siin keha asendi muutumist ruumis teiste kehade suhtes aja vältel. Uurides kehade ning nende punktide liikumist, jäetakse arvestamata täielikult jõud, mis need liikumised põhjustab ehk uuritakse tulemust, ning põhjus jäetakse välja. Kinemaatikas uuritakse üksikute punktide ning jäikade kehade ehk tervikute liikumist. Keha deformeerumist, mille puhul keha punktide vahelised kaugused muutuvad, kinemaatikas ei vaadelda. Vaadeldakse kehi absoluutselt jäikadena. Kinemaatikas puuduvad aksioomid, ta rajaneb geomeetria aksioomidele [8, p. 199].

Kuna tööstusroboti lülid loetakse jäikadeks kehadeks, siis jäikade kehade omadustel on keskne roll tööstusrobotite kinemaatikas. Nii vektorite kui maatriks algebrad kasutatakse, et välja arendada süstemaatiline ja üldine lähenemine, kirjeldamaks ja kujutamaks roboti lülide paigutust globaalse taustsüsteemi G suhtes. Kuna roboti lülide teljed võivad olla

pööratud üksteise suhtes, siis et leida nende suhtelised asetused taustsüsteemi G suhtes, pannaks neile külge koordinaadistike raamistikud $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$. [7, p. 31].

Mehaanikas eeldatakse, et aeg t on pidev ja ühtlaselt muutuv suurus, mis ei sõltu üheski ruumpunktis, ega üheski taustsüsteemis keha liikumisest. Ehk mehaanika seisukohalt on aeg universaalne, pidevalt kulgev kõikides taustsüsteemides, olles seejuures skalaarne suurus. [8, p. 199].

Tööstusroboti üldine ülesanne on liigutada tööorganit töösooni ühest punktist ja orientatsioonist teise. Ülesande keerukuse määrab manipulaatori kinemaatiline struktuur. Manipulaatori lülide arv määrab ära kui mitut sõltumatut ja kontrollitavat telge on vaja liigutada keha ruumis [4, p. 44].

2.3.1 Kinemaatika otsene ülesanne

Kinemaatika otsene ülesanne koosneb roboti tööorgani positsiooni ja orientatsiooni arvutamisest kui kõik lülide muutujad on teada. [9, p. 118].

Ülesanne on koostada muutumist, mis kujutaks iga telje asukohta relatiivselt eelmisele teljele. Ehk tuleb koostada funktsioon iga lüli neljast parameetrist. Igal robotil koosneb see funktsioon ühest parameetrist, ülejäänud kolm on paika pandud roboti ehituses. [10, p. 74].

Need neli parameetrit on:

- α_i on nurk $i-1$ Z telje ja i Z telje vahel mõõdetuna mööda $i-1$ X telge kasutades parema käe reeglit.
- a_i on $i-1$ Z telje ja i Z telje vaheline kaugus millimeetrites mööda $i-1$ X telge.
- d_i on $i-1$ X telje ja i X telje vaheline kaugus millimeetrites mööda i Z telge. d_i on konstant kui on tegemist pöördliikuva lüliga ja muutuja kui on tegemist kulgliikuva lüliga.
- θ_i on nurk $i-1$ X telje ja i X telje vahe mõõdetuna mööda i Z telge kasutades parema käe reeglit. θ_i on konstant kui on tegemist kulgliikuva lüliga ja muutuja kui on tegemist pöördliikuva lüliga [11, p. 46].

Kõige populaarsem viis kirjeldamiseks roboti iga lüli orientatsiooni ja relatiivset positsiooni on Denavit-Hartenbergi parameetrite põhjal koostatud homogensed

transformatsiooni maatriksid [7, pp. 19-21]. Need koosnevad 4×4 transformatsiooni maatriksist, mille aluseks on neli põhilist transformatsiooni.

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,\alpha_i} Rot_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_i \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_i & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Kus

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix}$$

On pööramise maatriks, mis näitab A_i orientatsiooni B_{i-1} suhtes, ja vektor

$$T = \begin{bmatrix} a_i \cos\theta_i \\ a_i \sin\theta_i \\ d_i \end{bmatrix}$$

On asukoha vektor [12, pp. 76-77].

Euleri nurkade puhul on Fanuc kokkuleppe järgi robotite telgede pööramise järjestus ZYX. Kuna tööorgani kohta käiv informatsioon on antud Euleri nurkades siis arvutatakse transformatsiooni maatriks järgnevalt:

$$R = \begin{bmatrix} \cos R \cos P & \cos R \sin P \sin W - \sin R \cos W & \cos R \sin P \cos W + \sin R \sin W \\ \sin R \cos P & \sin R \sin P \sin W + \cos R \cos W & \sin R \sin P \cos W - \cos R \sin W \\ -\sin P & \cos P \sin W & \cos P \cos W \end{bmatrix}$$

ja

$$T = \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix},$$

kus W , P ja R on tööorgani kirjeldus Euleri nurkades ja X_t Y_t Z_t on tööorgani asukoha vektori koordinaadid [13].

2.3.2 Kinemaatika pöördülesanne

Kui kinemaatika otsese ülesande lahendamisel arvutatakse manipulaatori tööorgani asendivektor ja suunistusnurgad lülide mõõtmete ja vaheliste nurkade kaudu, siis

pöördülesande lahendamisel on probleem keerulisem ja ühest lähendust alati ei ole [10, p. 101]. Kinemaatika pöördülesande lahendamisel keskendutakse tööstusroboti lülide muutujate leidmisele, mis annavad soovitud tööorgani positsiooni [9, p. 117].

Pöördülesanne pole alati üheselt lahenduv, kuna roboti liigendkäel on ühte ja samasse punkti jõudmiseks kaks võimalikku asendit, ning see raskendab pöördülesande lahendamist. Kõikide võimalike pooside arv sõltub manipulaatori ehitusest. Ülesanne on üheselt lahenduv vaid siis, kui manipulaatoril on etteantud kindel poos. Seepärast tuleb enne pöördülesande lahendamata hakkamist valida manipulaatori poos ning tööorgani pideva liikumise ajal pole poosi muuta võimalik [6, p. 32].

2.4 Tööorgani liikumine

Manipulaatori tööorgani liikumise planeerimisel võivad ette tulla mitmesugused liikumispiirangud. Näiteks trajektoori etteantud algpunktide ja lõpp-punktide ning trajektoori kuju korral võib tekkida olukord, mil trajektoor väljub manipulaatori töösoonist ehk niisugust trajektoori realiseerida pole võimalik. Samuti võib ette tulla olukord, kus tõkete olemasolul või muul põhjusel tuleb lõpp-punkti jõudmiseks vahetada manipulaatori poosi. Sellisel juhul ei saa trajektoori realiseerida, sest pideva liikumise ajal pole poosi vahetada võimalik [14, p. 87].

Sarnaselt inimese käele, saad roboti manipulaatori tegevusi jagada kolmeks: esemete haaramine, liigutamine ja lahti laskmine. Järelikult saab roboti manipulatsioon olla tõhus ja õnnestunud kui kõik eelmainitud tegevused on asjakohaselt arvesse võetud [1, p. 29].

2.5 Robotite programmeerimine

Robotite võime, korduvalt läbida etteantud teekonda, on nende kasulikkuse edu valem [2, p. 109]. Roboti liigutamine toimub programmi abil, mis sisaldab rida käsked roboti jaoks. Programmi on võimalik koostada kas online või offline programmeerimise läbi [1, p. 34].

Online programmeerimine koosneb roboti liigutuste tuvastamist ja salvestamisest samal ajal kui robot tegutseb. Online programmeerimist on võimalik teostada kahel moel: läbi õpetamispuldi või kasutades väiksema manipulaatori mudelit. Tavaliselt annab läbi juhtpuldi online programmeerimine parema võimaluse roboti juhendamiseks ja lisaks

annab parema liikumisomaduste tuvastamise tänu pikemale õpetamispuldi juhtmele [1, pp. 34-35].

Roboti offline programmeerimine koosneb juhiste väljatöötamisest roboti programmeerimiskeeles. Lisaks roboti offline programmeerimise ajal võib robot samal ajal töötada. Tavaliselt saab tööstusrobotite juhtseadme mikroprotsessoritel kasutada kindlat operatsioonisüsteemi riistvara, nii et programmeeritut saab rakendada ainult sama süsteemi riistvara peal. Kuid offline programmeerimine võimaldab kontrollida programmi teostatavust käskude jada seisukohast ja leida vigu programmi süntaksi osas. Lisaks on võimalik raalprojekteerimise ja raaltootmise abiga kontrollida ja optimeerida programmi töötamist ning efektiivsust [1, pp. 34-35].

2.6 Singulaarsus

Kohti, kus roboti manipulaatori käsi ja tööorgan võivad olla lõpmatul arvul eri poosides nimetatakse singulaarsuskohtadeks [6, p. 120]. Kuue lüliga robotitel esineb kolme tüüpi singulaarsusi:

- Käelaba singulaarsus – ilmneb kui roboti neljas ja kuues lüli asuvad ühel sirgjoonel, mis võib põhjustada nende lülide 180 kraadiseid pöördeid.
- Käevarre singulaarsus – ilmneb kui roboti käelaba keskpunkt ühtib manipulaatori esimese lüli keskpunktiga.
- Künarnuki singulaarsus – ilmneb kui roboti käelaba keskpunkt asub samal tasandil kus asuvad lülid 2 ja 3. See näeb välja kui robot tahaks liiga kaugele ulatada, mis põhjustab roboti seiskumise [15].

2.7 Tööstusrobot Fanuc ArcMate 120iB andmed

Fanuc ArcMate 120iB on kuuelüliline sfääriline jäik eelkõige keevitustöödeks mõeldud robot, mis töötab servoajamiga. Roboti tehnilised andmed on välja toodud tabelis 1.

Tabel 1. Fanuc ArcMate 120iB tehnilised andmed

Telgede arv	6
Kandevõime	20kg
Siruulatus	1667mm
Korratavus	0,08mm
Mass	220kg
Paigaldatavus	Põrand, lagi, sein, kalde peal

[16]

3 Kinemaatika otsese ülesande lahendus

Kinemaatika otsese ülesande lahenduse leidmiseks tuleb leida tööorgani asendivektor ja suunistusnurgad kui on antud roboti omavahelised pöördenurgad ja asendivektorid. Antud näites arvutati see, juhul kui roboti manipuluaatori nurkade asetus on järgnev: $J_1=10^\circ$; $J_2=20^\circ$; $J_3=30^\circ$; $J_4=40^\circ$; $J_5=50^\circ$; $J_6=60^\circ$.

Antud tööstusroboti eripäraks on, et θ_2 arvutatakse, kui $90^\circ - J_2$ ja θ_3 arvutatakse kui $J_2 + J_3$.

Roboti etteantud parameetrite põhjal koostati esmalt Denavit-Hartenbergi parameetrid, iga manipulaatori lüli kohta, mis on välja toodud tabelis 2.

Tabel 2. Fanuc ArcMate 120iB Denavit-Hartenbergi parameetrid

	θ	d	a	α
Lüli 1	0.174533	0	150	1.570796
Lüli 2	1.22173	0	770	0
Lüli 3	0.872665	0	100	-1.5708
Lüli 4	0.698132	-740	0	1.570796
Lüli 5	0.872665	0	0	-1.5708
Lüli 6	1.047198	-100	0	3.141593

Seejärel arvutati iga lüli kohta, Denavit-Hartenbergi parameetrite põhjal, homogeensed transformatsiooni maatriksid. Kõikide lülide maatriksid on välja toodud tabelites 3 kuni 8.

Tabel 3. Esimese lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A1

0.984808	0	0.173648	147.7212
0.173648	0	-0.98481	26.04723
0	1	0	0
0	0	0	1

Tabel 4. Teise lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A2

0.34202	-0.93969	0	263.3555
0.939693	0.34202	0	723.5633
0	0	1	0
0	0	0	1

Tabel 5. Kolmanda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A3

0.642788	0	-0.76604	64.27876
0.766044	0	0.642788	76.60444
0	-1	0	0
0	0	0	1

Tabel 6. Neljanda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A4

0.766044	0	0.642788	0
0.642788	0	-0.76604	0
0	1	0	-740
0	0	0	1

Tabel 7. Viienda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A5

0.642788	0	-0.76604	0
0.766044	0	0.642788	0
0	-1	0	0
0	0	0	1

Tabel 8. Kuuenda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks A6

0.5	0.866025	0	0
0.866025	-0.5	0	0
0	0	-1	-100
0	0	0	1

Selleks, et leida viimase lüli homogeenne transformatsiooni maatriks taustsüsteemi suhtes, tuleb kõikide lülide maatriksid omavahel korrutada. Tulemuseks saadud maatriks on välja toodud tabelis 9.

Tabel 9. Kuuenda lüli homogeenne transformatsiooni maatriks taustsüsteemi suhtes

-0.32487	-0.92966	0.173754	1006.333
0.82614	-0.18951	0.530637	227.4437
-0.46038	0.315931	0.829598	1263.126
0	0	0	1

Järgnevalt arvutati välja roboti tööorgani homogeenne transformatsiooni maatriks, mis on välja toodud tabelis 10.

Tabel 10. Tööorgani homogeenne transformatsiooni maatriks

0.60611	-0.09096	0.79016	-158.172
-0.05536	-0.99585	-0.07217	14.448
0.79345	0.00	-0.60864	266.9
0	0	0	1

Lõpuks, et saada tööorgani asendivektor ja suunistusnurgad taustsüsteemi suhtes korrutati kuuenda lüli homogeenne transformatsioonimaatriks tööorgani omaga, mis on välja toodud tabelis 11.

Tabel 11. Tööorgani homogeenne transformatsiooni maatriks taustsüsteemi suhtes

-0.00757	0.955358761	-0.29535	1090.661
0.932261	0.113580937	0.343495	235.6605
0.361708	-0.27274348	-0.8915	1561.93
0	0	0	1

4 Kinemaatika pöördülesande lahendus

Tuleb leida kõikide lülide suhtelised pöördenukad J1, J2, J3, J4, J5, J6. Kõikides järgnevates peatükkides 4.1 kuni 5 kirjeldatud tegevused on realiseeritud programmina Fanuc robotite programmeerimiskeeles KAREL, mis on asub lisa 1.

4.1 Nurk J1

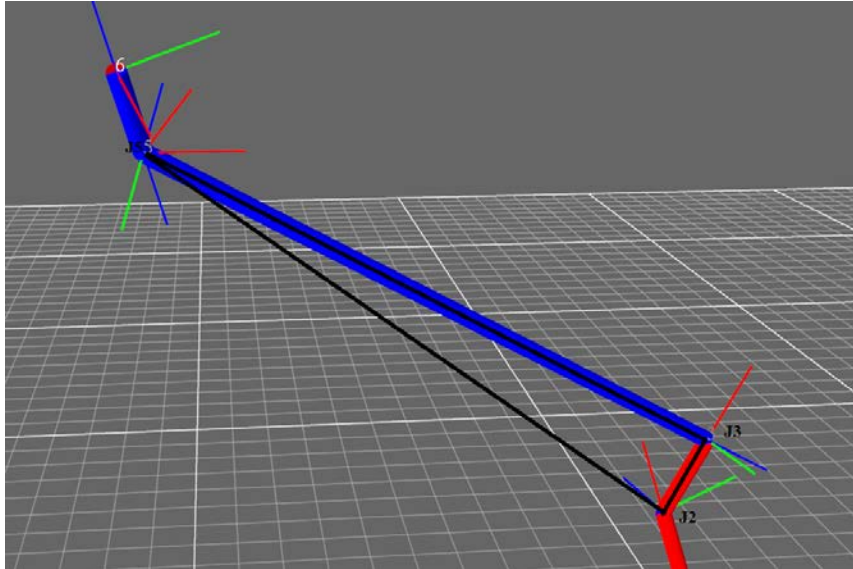
Nurk J1 leidmiseks tehtud sammud:

- Arvutati tööorgani pööramine maatriks
- Kontrolliti, et kõik vektorid pööramise maatriksis on ühikvektorid
- Transponeeriti saadud maatriks
- Arvutati sihtpunkti pööramise maatriks
- Kontrolliti, et kõik vektorid pööramise maatriksis on ühikvektorid
- Arvutati kuuenda lüli Denavit-Hartenbergi parameetrid
- Arvutati viienda lüli keskpunkt
- Kuna link üks kuni viis asuvad kõik ühel tasandil Link 1 kuni 5 on kõik ühel tasandil siis nurk J1 on nurk viienda lüli Y ja X telje vahel
- Arvutati esimese lüli homogeensed parameetrid

4.2 Nurk J2

Nurk J2 leidmiseks tehtud sammud:

- Kõigepealt koostati kolmnurk, mis on kujutatud joonisel 2.



Joonis 2. Kolmnurk lülide 2, 3 ja 5 keskpunktide vahel

- Arvutati kolmnurga külgede pikkused
- Kontrolliti, kas saadud kolmnurk eksisteerib
- Arvutati nurk kolmnurga külgede 23 ja 25 vahel
- Normaliseerime J2-J3 vektori Z teljele
- Leiame normaliseeritud vektori ja XY telje vahelise nurga
- Kuna saadud nurk võib olla nii positiivne kui negatiivne siis $J2 = 90 \pm$ nurga 23 ja 25 vahel- vektori ja XY telje vaheline nurk
- Arvutati teise lüli homogeensed parameetrid

4.3 Nurk J3

Nurk J3 leidmiseks tehtud sammud:

- Arvutati eelmises punktis koostatus kolmnurga nurk külgede 32 ja 35 vahel
- Arvutati nurk kolmanda ja neljanda lüli pikkuste vahel
- Kuna robot arvutab kolmanda nurga kui nurk2 + nurk 3, siis arvutati J3
- $J3 = -(180 - \text{nurk } J3-J2 \text{ ja } J3-J5 \text{ vahel} - \text{nurk kolmanda ja neljanda lüli pikkuste vahel})$
- Arvutati kolmanda lüli homogeensed parameetrid

4.4 Nurk J4

Nurk J4 leidmiseks tehtud sammud:

- Arvutati ühikvektor punktist J6 punkti J5.
- Arvutati kolmanda lüli Z telje ühikvektor.
- Arvutati esimese vektori projektsioon teisele vektorile
- Arvutati kolmanda lüli X telje ühikvektor.
- Arvutati viimase kahe vektori pöörlemissuund
- Kontrolliti, kas saadud vektoril on sama suund mis kolmanda lüli Z telje ühikvektoril
- Nurk $J4=+$ nurk esimese ja teise leitud vektori vahel, nende pöörlemissuund on sama suunaga mis kolmanda lüli X telg ja $J4=-$ nurk esimese ja teise leitud vektori vahel, kui nende pöörlemissuund on vastupidise suunaga mis kolmanda lüli X telg
- Kuna nurk J4 võib olla nii ± 180 kraadi siis valiti kõige lähema tööorgani praegusele positsioonile
- Arvutati neljanda lüli homogeensed parameetrid

4.5 Nurk J5

Nurk J5 leidmiseks tehtud sammud:

- Arvutati ühikvektor punktist J6 punkti J5.
- Arvutati kolmanda lüli Z telje ühikvektor.
- Arvutati nende kahe vektori pöörlemissuund
- Kontrolliti, kas saadud vektoril on sama suund mis neljanda lüli Z teljel
- Arvutati nurk J5
- Nurk $J5=180$ kraadi – nurk esimese ja teise leitud vektori vahel, nende pöörlemissuund on sama suunaga mis neljanda lüli Z telg ja $J5=-180$ kraadi + nurk esimese ja teise leitud vektori vahel, kui nende pöörlemissuund on vastupidise suunaga mis neljanda lüli Z telg
- Arvutati viienda lüli homogeensed parameetrid

4.6 Nurk J6

Nurk J6 leidmiseks tehtud sammud:

- Arvutati viienda lüli X telje ühikvektor

- Arvutati kuuenda lüli X telje ühikvektor
- Arvutati nende kahe vektori pöörlemissuund
- Kontrolliti, kas saadud vektoril on sama suund mis viienda lüli Z teljel
- Nurk $J_6=+$ nurk esimese ja teise leitud vektori vahel, nende pöörlemissuund on sama suunaga mis viienda lüli Z telg ja $J_6=-$ nurk esimese ja teise leitud vektori vahel, kui nende pöörlemissuund on vastupidise suunaga mis viienda lüli Z telg

5 Käelaba singulaarsuse lahendus

Selleks, et robot saaks läbida käelaba singulaarsuse punkt, arvutati pöördkinemaatiliseltsihtpunkti jaoks vaja olev roboti manipulaatori konfiguratsioon ning enne neljanda lüli nurga leidmist tehti kontroll kas viienda lüli nurk on alla viie kraadi. Kui on, siis pöörati teist telge ümber tööorgani sihtpunkti, et panna kolmanda ja kuuenda lüli Z telg ühele tasapinnale ning nurga J4 90 kraadi.

6 Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli lihtsustada keevitusrobotite kasutuselevõttu väiksepartiiilistes või ühekordsetes tootmisprotsessides. Uurimisküsimuseks oli: kuidas lahendada tööstusrobot Fanuc ArcMate 120iB käelaba singulaarsuse probleem. Uurimisküsimus tulenes tööstusrobotite juhtimise paindlikkuse suurendamise väljakutsest, kuna tänapäeval robotitega kaasa antud tarkvara võimaldab robotkäät liigutada, vaid mööda sirgjoont ehk mööda X, Y ja Z telgi. Uurimisküsimuse lahendamiseks selgitati välja roboti Fanuc ArcMate 120iB liikumise eripärad ning leiti moodus, kuidas liigutada robotkäega ühendatud keevituspead, mööda etteantud kõverjoont. Uurimisküsimusele vastuse leidmiseks lahendati ülesandeid, mida nimetatakse kinemaatika otseseks ülesandeks ja pöördülesandeks. Kinemaatika otsese ülesande lahenduses tugines töö autor eelkõige Denavit-Hartenbergi parameetritele ja homogeensetele transformatsiooni maatriksitele. Pöördülesande lahenduses kasutas töö autor erinevaid vektor ja maatriks algebra arvutusi ning käelaba singulaarsuse lahenduses kõike eelnevat. Töö tähtsaimaks tulemuseks oli Fanuc robotite programmeerimiskeeles KAREL loodud programmikood, mis suudab läbida roboti manipulaatori käelaba singulaarsuse punkti, sealjuures tööorgani lõpppunkti asukohta trajektoorilt kõrvale viimata.

Bakalaureusetöö eemärk sai täidetud kuna töötati välja programm, mille abil roboti Fanuc ArcMate 120iB tööorgan liigub läbi käelaba singulaarsuse punkti, ilma pikemalt peatumata või pöörast neljandat lüli 180 kraadi. Edasiarendusena saaks uurida, mis on roboti jaoks täpne lülide asend, kust algab käelaba singulaarsus. Kindlasti annaks edasi lahendada ka käsivarre ja küünarnuki singulaarsused.

Kasutatud kirjandus

- [1] M. Ceccarelli, Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulation, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2010.
- [2] L. Heath, Fundamentals of robotics : theory and applications, Virginia: Reston Publishing Company, 1985.
- [3] NASA, „Types of Robots,“ 3 Märts 2003. [Võrgumaterjal]. Available: <https://prime.jsc.nasa.gov/ROV/types.html>. [Kasutatud 9 Mai 2017].
- [4] N. Shimon Y, Toim., Handbook of industrial robotics, New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [5] C. R. Asfahl, Robots and manufacturing automation, New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [6] T. Lehtla, Robotitehnika, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2008.
- [7] R. N. Jazar, Theory of applied robotics : kinematics, dynamics, and control, New York: Springer, 2007.
- [8] K. J. K. Kalju, Mehaanika alused, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2013.
- [9] R. Manseur, Robot modeling and kinematics, Boston: Da Vinci Engineering Press, 2006.
- [10] John J. Craig, Introduction to Robotics : Mechanics and Control, Harlow: Pearson Education Limited, 2014.
- [11] A. Ghosal, Robotics : fundamental concepts and analysis, New Delhi: Oxford University press, 2006.
- [12] W. S. S. H. M. V. Mark, Robot modeling and control, Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- [13] NASA, „Euler angles, quaternarion, and transformation matrices,“ juuli 1977. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770024290.pdf>. [Kasutatud 5 märts 2017].
- [14] M. M. T. R. Tõnu Lehtla, Robotitehnika kutsekoolidele, Tallinn: Innove, 2014.
- [15] A. Owen-Hill, „Why Singularities Can Ruin Your Day,“ Robotiq, 22 February 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://blog.robotiq.com/why-singularities-can-ruin-your-day>. [Kasutatud 2 May 2017].
- [16] RobotWorx, „arcmate-120ib_datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.robots.com/pdfs/robots/arcmate-120ib_datasheet.pdf. [Kasutatud 2 Mai 2017].

[17] M. V. Mark W. Spong, Robot dynamics and control, New York: John Wiley & Sons, 1989.

Lisa 1 – Lähtekood

Realiseeritud programmi lähtekood on saadaval aadressil
<https://gitlab.cs.ttu.ee/Kalmer.Pats/Singularity>