



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**Domantas Rubliauskas**

**DVIRANKIO ROBOTO SINCHRONIZUOTO JUDESIO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. dr. Vytenis Sinkevičius

**PANEVĖŽYS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**DVIRANKIO ROBOTO SINCHRONIZUOTO JUDESIO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

**Vadovas**

Prof. dr. Vytenis Sinkevičius

**Recenzentas**

**Projektą atliko**

Domantas Rubliauskas

**PANEVĖŽYS, 2017**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

**Domantas Rubliauskas**

(Studento vardas, pavardė)

**Valdymo technologijos 621H66001**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Dvirankio roboto sinchronizuoto judesio tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽNINGUMO DEKLARACIJA**

20 17 m. gegužės 30 d.  
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Domanto Rubliausko**, baigiamasis projektas tema „Dvirankio roboto sinchronizuoto judesio tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)



Rubliauskas, Domantas. Dvirankio roboto sinchronizuoto judesio tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Vytenis Sinkevičius; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Mokslo kryptis ir sritis: Valdymo technologijos 621H66001

Reikšminiai žodžiai: *dvirankis robotas, paslaugų robotas, sinchronizuotas judesys.*

Panevėžys, 2017. 52 p.

## SANTRAUKA

Magistro baigiamajame darbe tiriama dviejų roboto rankų sistema, kuri gali būti integruota ant mobilios roboto platformos bazės. Ši kombinuota sistema sudaro paslaugų robotą, skirtą padėti žmonėms turintiems negalią atlikti paprasčiausias užduotis, tokias kaip: objektų perkėlimas iš vienos vietos į kitą.

Mokslinės literatūros analizėje išanalizuotos įvairios dvirankių robotų sistemos, naudojamos pramonės ir mokslinių tyrimų srityse. Susipažinta su dvirankių robotų judesio valdymo specifika.

Teorinėje dalyje sudarytas analizuojamo dvirankio roboto matematinis modelis. Roboto rankų judėjimui aprašyti panaudoti tiesioginės bei atvirkštinės kinematikos uždaviniai.

Projektinėje dalyje sukurtas algoritmas sinchronizuotam dvirankio roboto judesio valdymui realizuoti virtualioje aplinkoje. Tam panaudotas programinis paketas „MATLAB“. Atlikta simuliacija, kurios metu bandyta dvejomis roboto rankomis valdyti objekto perkėlimą iš vieno taško į kitą.

Darbo pabaigoje pateiktos išvados, naudotos literatūros sąrašas, priedai.

Rubliauskas, Domantas. *Research of Synchronized Motion of Two-Hand Robot*. Master thesis in Master of Engineering Sciences / supervisor assoc. prof. Vytenis Sinkevičius. Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Control Technologies, 621H66001

Key words: *two-hand robot, service robot, synchronized motion*.

Panevėžys, 2017 52 p.

## SUMMARY

In this master project two-arm robot system is investigated. This system can be integrated on a mobile platform base. By using this combination mobile service robot can be made. It can be used to help people with disabilities to fulfill simple tasks such as moving objects from one place to another and much more.

The first part of research investigates various two-hand robot systems that are used in industry sector or for research purposes today. Also introduction to two-hand robot motion control specifics was made.

In second part mathematical model for two-arm robot system was created. Robot arm movement was analyzed by solving various direct and inverse kinematics problems for this specific type of dual-arm robot.

In the third part of research algorithm for synchronized motion of two-hand robot in virtual environment was created. This helped to make simulations in „*MATLAB*“ and analyze possibilities for moving objects from one place to another.

# TURINYS

<b>IVADAS</b> .....	<b>8</b>
<b>1. LITERATŪROS ANALIZĖ</b> .....	<b>9</b>
1.1. Stacionarių dvirankių robotų sistemų apžvalga.....	9
1.2. Mobilių dvirankių robotų sistemų apžvalga .....	12
1.3. Robotų rankų valdymas .....	16
1.4. Skyriaus išvados .....	19
<b>2. TEORINĖ DALIS</b> .....	<b>20</b>
2.1. Dvirankio roboto matematinio modelio sudarymas .....	20
2.2. Modifikuota D-H transformacija .....	23
2.3. Posvyrio alfa ( $\alpha$ ) transformacija.....	25
2.4. Perstūmos (a) transformacija .....	25
2.5. Perstūmos (d) transformacija.....	26
2.6. Posūkio kampo ( $\theta$ ) transformacija .....	26
2.7. Apibendrinta D-H transformacija.....	27
2.8. Atvirkštinio uždavinio sprendimas.....	30
2.9. Skyriaus išvados .....	34
<b>3. TIRIAMOJI DALIS</b> .....	<b>35</b>
3.1. Atvirkštinio uždavinio sprendimas 3 judrumo laipsnių roboto rankai .....	35
3.2. Sinchronizuoto judesio valdymo algoritmai.....	41
3.3. Dviejų roboto rankų modeliavimas virtualioje aplinkoje .....	43
3.4. Skyriaus išvados .....	44
<b>IŠVADOS</b> .....	<b>45</b>
<b>LITERATŪROS SĄRAŠAS</b> .....	<b>46</b>
<b>PRIEDAI</b> .....	<b>48</b>

## IVADAS

Šiuolaikinėje robotikoje įvairių objektų perkėlimas bei manipuliavimas jais tampa vis labiau analizuojama sritimi. Greitai vystantis kompiuterinėms ir robotų technologijoms jų pritaikymo bei panaudojimo galimybės ženkliai didėja. Todėl nuo seno nusistovėję standartai, kad robotai gali būti naudojami tik pramonės srityse sparčiai nyksta. Tai lemia išaugusi socialinių bei paslaugų robotų paklausa.

Priklausomai nuo norimo atlikti veiksmo sudėtingumo siekiant manipuluoti skirtingų dydžių objektus, galima naudoti robotus turinčius vieną ranką arba dvi rankas. Maži objektai gali būti manipuluojami viena ranka, tačiau stambių detalių perkėlimui reikalingi du manipulatoriai. Jų tarpusavio sąveika, norint perkelti daiktą erdvėje gali būti išspręsti keliais skirtingais būdais. Objektas gali būti suspaudžiamas iš išorės, imituojant žmogaus rankos judesį arba pakeliamas iš apačios. Tai praplečia galimybes roboto rankomis manipuluoti stambių gabaritų objektus. Taip pat svarbu įvertinti keliamų objektų svorį, nes nedideli paslaugų robotai turi ribotas galimybes, kai yra kalbama apie sunkių objektų manipuliavimą. Tokiomis savybėmis dažniausiai pasižymi stacionarūs pramoniniai robotai.

Dviejų roboto rankų sinchronizuotas valdymas erdvėje yra sudėtingas procesas, nes šiai dienai nėra konkrečios technologijos gebančios manipulatoriams nurodyti tarpusavyje susietą judesį. Todėl norint tinkamai išanalizuoti dvirankių manipuliatorių judėjimą erdvėje bei išspręsti galimas valdymo problemas pirmiausia yra svarbu sudaryti kiek įmanoma tikslesnius jų modelius.

**Tyrimo objektas** – dviejų roboto rankų sistema.

**Darbo tikslas** – sudaryti dvirankio manipulatoriaus valdomo judesio matematinį modelį ir ištirti valdymo galimybes reikalingam judesiui realizuoti.

### **Darbo uždaviniai**

1. Išanalizuoti dvirankių robotų sistemų pavyzdžius, jų panaudojimą bei pritaikymo galimybes.
2. Išanalizuoti dvirankių robotų valdymo metodus, pernešant skirtingus objektus.
3. Dviejų roboto rankų kinematikos uždavinių analizė.
4. Išspręsti atvirkštinį uždavinį tiriamoms 3 judrumo laipsnių roboto rankoms.
5. Sudaryti dvirankio roboto sinchronizuoto judesio valdymo algoritmą.
6. Ištirti dvirankio roboto sinchronizuoto judesio valdymo galimybes pernešant objektą iš vieno taško į kitą.

**Tyrimo metodai** – Mokslinės literatūros analizė, modelių sudarymas bei tyrimas.



# 1. LITERATŪROS ANALIZĖ

## 1.1. Stacionarių dvirankių robotų sistemų apžvalga

Dviejų manipuliatorių bendras darbas gali būti organizuojamas, tiek su pramoniniais tiek su mobiliais robotais. Stacionarūs pramoniniai robotai buvo kuriami ir pritaikomi masinei gamybai, siekiant optimizuoti gaminamos produkcijos darbo laiką bei pagerinti darbo kokybę, pašalinant žmogiškojo faktoriaus klaidos tikimybę. Pramoninių robotų rankos projektuojamos taip, kad kiek įmanoma tiksliau atkartotų žmogaus rankos judesius, todėl jie turi ir panašius į žmogaus rankas mazgus: petį, alkūnę, riešą ir griebtuvus atitinkančius žmogaus plaštakas. Dauguma pramonėje naudojamų roboto rankų sistemų yra vienaarankės skirtos konkrečiam veiksmui atlikti. Tačiau atsiranda vis daugiau dvirankių robotų. Vienas iš tokių yra „Motoman Robotics“ sukurtas dvirankis stacionarus robotas (1 pav.), kuris ne tik puikiai gali atkartoti žmogaus rankos judesius, bet kai kuriais aspektais gali juos net ir pranokti [1].



1 pav. Dvirankis MOTOMAN pramoninis robotas

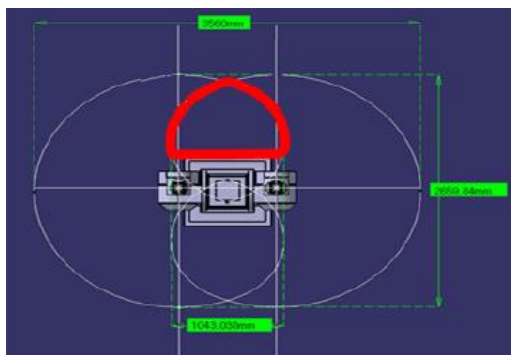
Siekiant optimizuoti gamybos procesus, kuriama vis daugiau unikalėsių bei pažangesnių dvirankių robotų. Vienas iš tokių yra pramoninis 6 judrumo laipsnių dvirankio roboto prototipas turintis papildomai integruotą 2 judrumo laipsnių liemenį 2 paveikslėlis.



2 pav. Dvirankio pramoninio roboto prototipas

Kairė ir dešinė roboto rankos vienu metu gali būti naudojamos ruošiniams perkelti. Taip pat abi šio roboto rankos gali dirbti atskirai atlikdamos skirtingas užduotis. Toks robotas labai tikslus ir geba pakelti didelio svorio objektus.

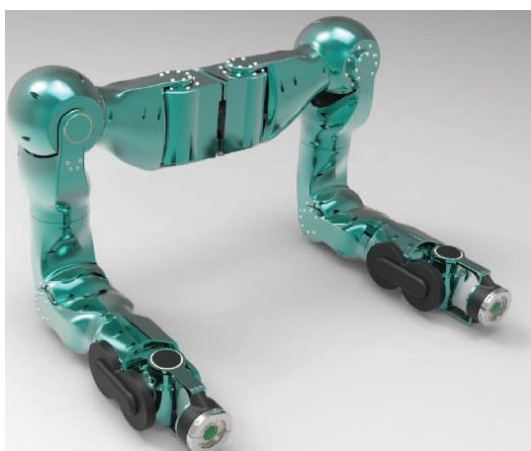
Taip pat tokio roboto, turinčio papildomą dviejų judrumo laipsnių liemenį pagrindinis privalumas yra tas, kad jis turi didesnę darbo lauką. Tokia savybė šiam robotui suteikia galimybę aptarnauti kelias gamybos linijas. Raudona spalva pažymėtas kartu dirbančių dviejų rankų darbo laukas. Roboto darbo lauko schema pateikta (3 pav.).



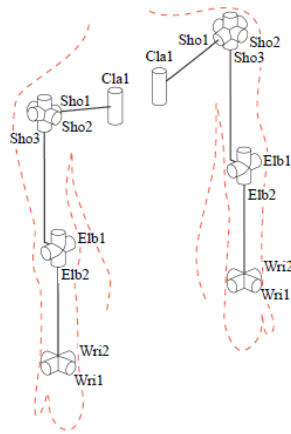
3 pav. Dvirankio roboto darbo laukas

Nors dviejų roboto rankų sistema pranašesnė nei tradicinės vienos rankos sistemos, tačiau atsiranda žymiai daugiau iššūkių norint išmokyti tokį robotą judėti. Kiekviena ranka ir liemuo turi būti mokoma individualiai. Taip pat užduotis tampa dar sudėtingesnė, kai norima gauti sinchronizuotą kairės ir dešinės rankos judesį [2].

Kitas dvirankio roboto prototipas unikalus tuo, kad jis gali būti pritaikytas tiek stacionarioms tiek mobilioms platformoms (4 pav.). Tai yra 8 judrumo laipsnių sistema, kurios kinematinė struktūra sukurta taip, kad kiek įmanoma labiau būtų artimesnė žmogaus rankų struktūrai (5 pav.). Toks dvirankis robotas geba pakelti iki 11 kilogramų svorį.



4 pav. Dvirankio roboto sistema „KIT“

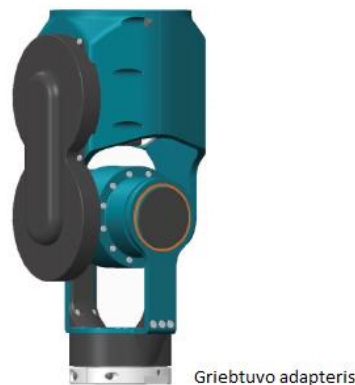


5 pav. „KIT“ roboto kinematinis modelis

Dvirankio roboto „KIT“ sistemą sudaro dvi identiškios rankos. Kiekviena iš jų turi po 8 judrumo laipsnius, dar kitaip 8-DOF. Šio roboto pečiai sudaryti iš sferinių jungčių *Sho1-3*, kurios sujungtos bendrame vidiniame mazge. Alkūnė sudaryta iš dviejų susikertančių sąnarių *Elb1-2*. *Elb2* alkūnės sąnarys sujungtas su riešo jungtimis *Wri2* ir *Wri1*, kurios sukuria dar vieną sferinę jungtį.

Tokia dvirankio roboto sistema gali būti pritaikyta įvairioms užduotims, tokioms kaip daiktų pakėlimas nuo žemės arba nuo aukštos lentynos, tačiau jos darbo laukas fiksuotas, nes rankos ilgis apribotas iki 1 000 mm, siekiant nenutolti nuo tikros žmogaus rankos struktūros [3].

Dar vienas privalumas, kuriuo pasižymi toks robotas, yra universalus riešo mazgas (6 pav.), suteikiantis galimybę integruoti skirtingų tipų galinius vykdymo įtaisus – griebtuvus.

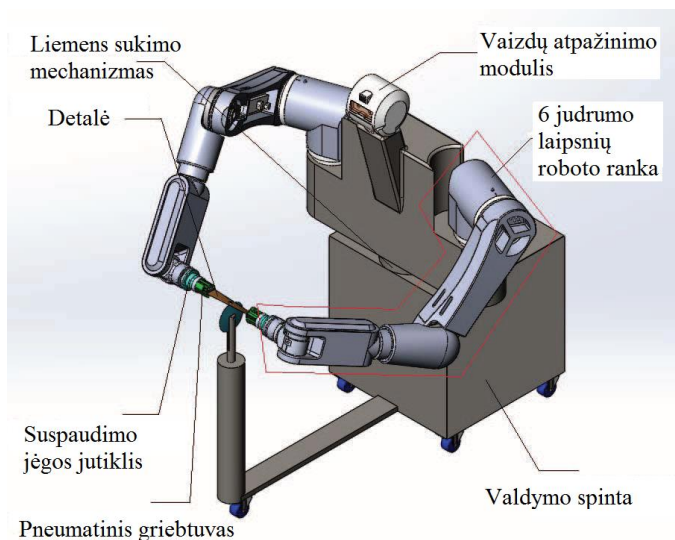


6 pav. „KIT“ roboto griebtuvo adapteris

Šis adapteris suteikia galimybę, ne tik lengvai pakeisti susidėvėjusi mazgą, tačiau leidžia vartotojui būti lankstesniam. Priklausomai nuo užduoties galima išsirinkti reikiamo tipo griebtuvą. Papildomos optimizacijos ženkliai palengvina roboto darbą. Jei atsiranda poreikis pakelti didelio gabarito detalę, nereikia keisti pačios roboto platformos, užtenka pakeisti griebtuvą į tokį, kuris geriausiai tinka šiam darbui. Taip sutaupoma laiko ir lėšų.

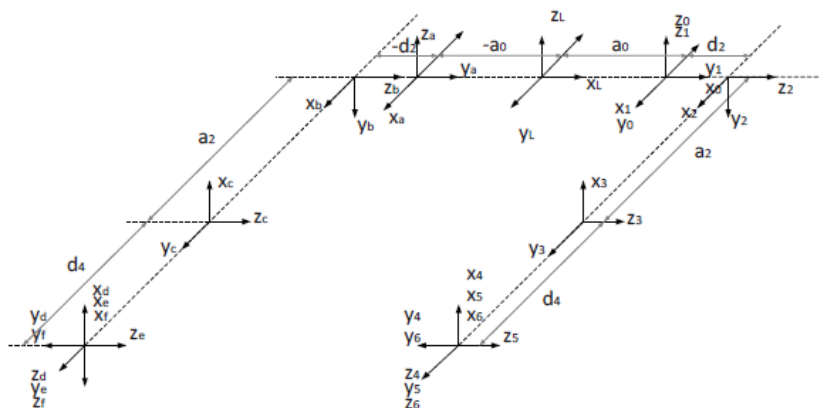
## 1.2. Mobilųjų dvirankių robotų sistemų apžvalga

Pramonės sektoriuje egzistuoja ne tik stacionarūs didelių gabaritų dvirankiai robotai. Vis dažniau galima sutikti mobiliųjų pramoninių robotų sistemų. Vienas iš tokių pavyzdžių yra dvirankio šlifavimo roboto prototipas (7 pav.).



7 pav. Dvirankio šlifavimo roboto prototipas

Šiai sistemai pasirinkta dvirankio roboto konfigūracija, nes jos paskirtis yra detalių sveriančių iki 40 kg, apdirbimas. Naudojant vieną ranką neužtikrinamas pakankamas standumas, kad būtų galima taisyklingai ir tiksliai apdirbti ruošinius. Roboto kinematinis modelis pateiktas (8 pav.).



8 pav. Šlifavimo roboto kinematinis modelis

Šlifavimo roboto prototipas įdomus tuo, kad jo struktūra primena žmogaus rankas. Kiekviena ranka turi po šešis judumo laipsnius. Abiejų rankų galuose integruoti pneumatiniai griebtuvai, turintys suspaudimo jėgos jutiklius, kurie realiu laiku gali perduoti informaciją, kokia jėga detalė spaudžiama šlifavimo proceso metu. Taip pat robotas turi integruotą kamerą, su reguliuojamu posvyrio kampu, skirtą stebėti apdirbimo procesą [4].

Tokia sistema turi keletą esminių trūkumų. Pirmiausia, dėl savo konstrukcijos ypatumų ir didelių gabaritų toks robotas gali būti naudojamas tik pramonėje. Taip pat ši sistema nėra savaeigė. Roboto bazėje integruoti ratukai, skirti platformą nustumti į atitinkamą darbo zoną. Tai nėra optimalu, kai norima sukurti visiškai automatizuotą gamybos liniją.

Kitas paslaugų roboto prototipas pritaikytas lauko sąlygoms [5]. Tokia sistema gali būti valdoma tik nuotoliniu būdu (9 pav.). Roboto važiuoklė pritaikyta dirbti bekelės sąlygomis. Kadangi robotas turi pakankamai didelę bazę, ant jo važiuoklės gali būti tvirtinami įvairūs vykdymo įtaisai. Šiuo atveju integruota dviejų rankų sistema, kuri nėra autonomiška. Tai reiškia, kad rankos valdomos nuotoliniu būdu kaip du atskiri manipulatoriai. Tam naudojamas specialus įtaisas su integruotais jutikliais, kurį operatorius turi apsivilkti (10 pav.). Tokia sistema gali būti pritaikyta naudoti žemės ūkyje arba aplinkosaugoje, kai robotas autonomiškai juda į jam skirtą vietą. Pasiekus tikslą operatorius nuotoliniu būdu gali manipuluoti reikiama objektais, valdydamas abi rankas kaip savo.



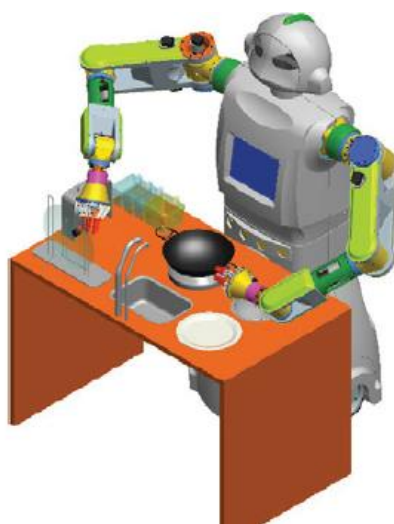
9 pav. Dvirankis robotas skirtas objektų rinkimui

Tokioje sistemoje galima išvelgti ir keletą esminių trūkumų. Dėl fiziologinių reiškinių tokio roboto valdymas tampa pakankamai sudėtingas pačiam operatoriui, jis gali greitai pavargti. Todėl toks procesas negali būti vykdomas be pertrūkių. Taip pat nėra grįžtamojo ryšio tarp operatoriaus ir roboto. Vizualiai kameromis operatoriui sunku nustatyti objekto svorį, jo paviršiaus ypatybes arba to objekto paėmimo jėgą.



10 pav. Operatorius su integruotu nuotolinio valdymo įtaisais

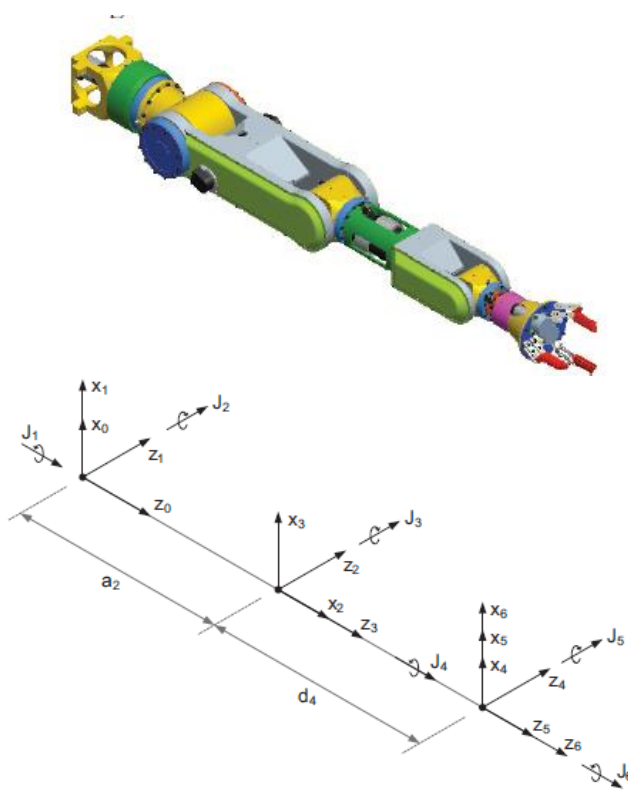
Dar vienas mobilus dvirankis paslaugų robotas pritaikytas padėti žmonėms buityje [6]. Šio roboto paskirtis maisto ruošimas (11 pav.). Šį procesą robotas gali atlikti autonomiškai, arba esant reikalui būti naudojamas kaip robotas pagalbininkas. Šis roboto prototipas turi integruotą vaizdų atpažinimo sistemą, kuri leidžia laisvai orientuotis aplinkoje ir esant reikalui atlikti kitus namų ruošos darbus.



11 pav. Dvirankis robotas pagalbininkas

Robotas pagalbininkas sudarytas iš kūno (bazės), kurio viduje integruota visa valdymo įranga. Ši sistema, susidedanti iš kūno ir rankų, pritvirtinta prie mobilios platformos. Galvos mazgas turi 2 judrumo laipsnius. Tai palengvina orientavimąsi. Robotas turi integruotą 48V bateriją. Bendras darbo laikas gali siekti iki 2 valandų.

Kiekviena ranka turi po 6 judrumo laispsnius (12 pav.). Rankai valdyti naudojami 48VDC varikliai. Maksimalus vienos rankos kėlimo svoris iki 2 kilogramų. Griebtuvo mazguose integruoti suspaudimo jėgos jutikliai.



12 pav. Kinematinė vienos roboto rankos struktūra

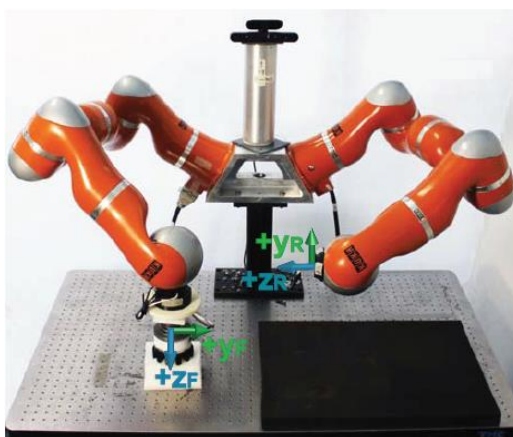
Mobilūs dvirankiai robotai (13 pav.) gali būti naudingi pernešant stambių gabaritų objektus. Čia reikia suderinti objekto laikymo ir roboto judesius, prisiderinant prie žmogaus judesių [7]. Tokių unikalių paslaugų robotų paskirtis – padėti žmogui atsikelti, atsigulti, atsisėsti arba tiesiog padėti eiti.



13 pav. Mobilus robotas pagalbininkas

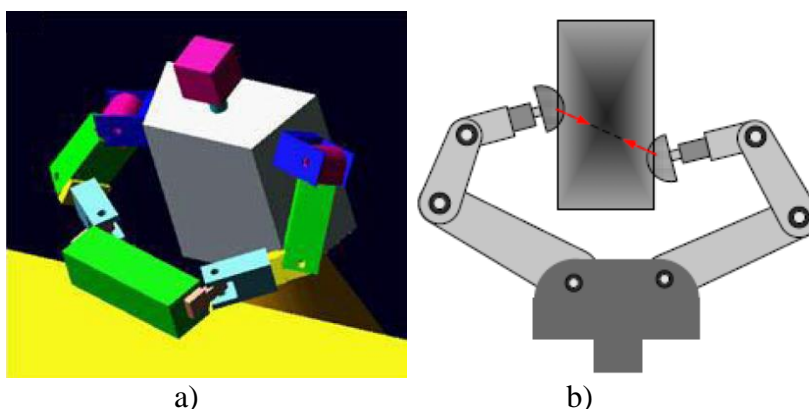
### 1.3. Robotų rankų valdymas

Bet kokį roboto rankų judesį erdvėje galima aprašyti matematiškai ir sukurti programą, kuri tą judesį realizuotų. Tačiau galimi ir kiti būdai, kai operatorius nurodo roboto rankos griebtuvo judėjimo ar sukimosi kryptį. Reikiamose vietose nuskaitomos koordinatės ir sugeneruojama programa, kuria valdomas robotas. Toks poveikio įtaisas, valdantis dvi rankas, pateiktas (14 pav.). Čia pavaizduota mechatroninė sistema [8], turinti kiekvienos sąnaros posūkio kampo jutiklius, gali judėti erdvėje ir sukintis aplink tris ašis. Jutiklių posūkio kampai transliuojami į roboto posūkio kampus. Toks poveikio įtaisas yra tikslus, tačiau atitinkamai didėja ir roboto gabaritai.



14 pav. 6 judrumo laipsnių dvirankis manipulatorius

Įvairūs objektai gali būti manipuluojami skirtingai. Tai priklauso nuo objektų dydžių ir formų. Smulkių objektų perkėlimui pakanka vienos rankos, tačiau stambių daiktų manipuliavimui vienos rankos gali nepakakti. Užduotis tampa sudėtingesnė. Tokioms užduotims atlikti geriausia yra naudoti dviejų rankų sistemą. Čia galimi keli variantai. Objektas gali būti perkeliamas jį suspaudžiant iš išorės (15 pav.).



15 pav. a, b – objekto pakėlimas jį suspaudžiant iš išorės [9]



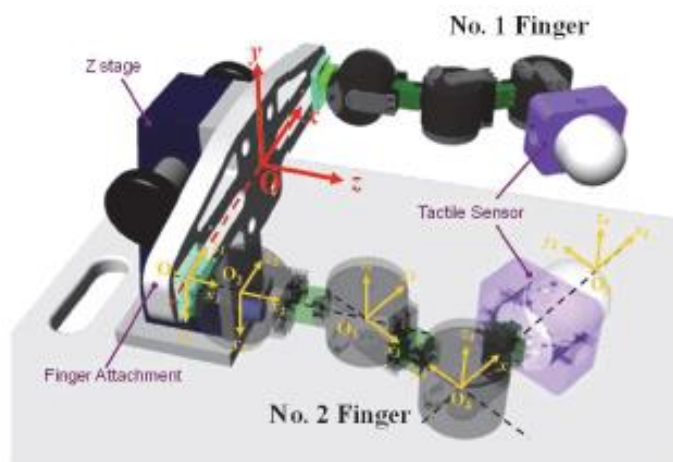
Priklausomai nuo savo savybių, ne visi objektai gali būti paimami iš šono juos apglėbiant. Todėl antras variantas – pakėlimas paimant objektą iš apačios (16 pav.).



16 pav. Objekto perkėlimas jį paimant iš apačios [10]

Dviejų roboto rankų sinchronizuotas judesio valdymas yra sudėtingas procesas. Susiduriama su keliomis esminėmis problemomis analizuojant tokių sistemų valdymą. Nėra konkrečios technologijos, kuri padėtų nurodyti tarpusavyje susietą judesį. Roboto rankos gali būti valdomos įvairiais poveikio įtaisais, tačiau atsiranda nemažai problemų, kai norima gauti tikslų grįžtamąjį ryšį tarp roboto rankomis manipuluojamo objekto ir operatoriaus.

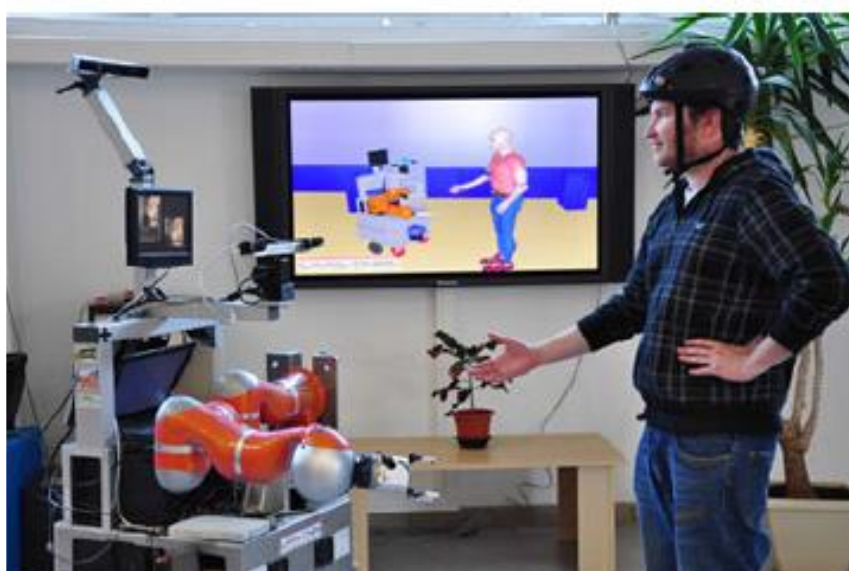
Objektui pakelti neužtenka panaudoti iš anksto numatyto ir sugeneruoto abiejų rankų bei griebtuvų judesio. Kiekvienas griebtuvas privalo turėti integruotus prisilietimo (taktilinius) jutiklius (17 pav.), kurių paskirtis identifikuoti, ar griebtuvas sėkmingai paėmė objektą bei nustatyti, kokia jėga objektas suspaustas [11]. Tai padeda išvengti perspaudimo arba nepakankamo prispaudimo tikimybės atliekant užduotį. Taip pat kiekvienos sąnaros vykdymo įtaisai (pavaros) turi turėti sukimo momento jutiklius, kuriais kiekviena sąnara pasukama atitinkama jėga bei sukimo momentu išvengiant sistemos inertiškumo bei galimų nuokrypių.



17 pav. Dvirankis robotas su integruotais taktiliniais jutikliais

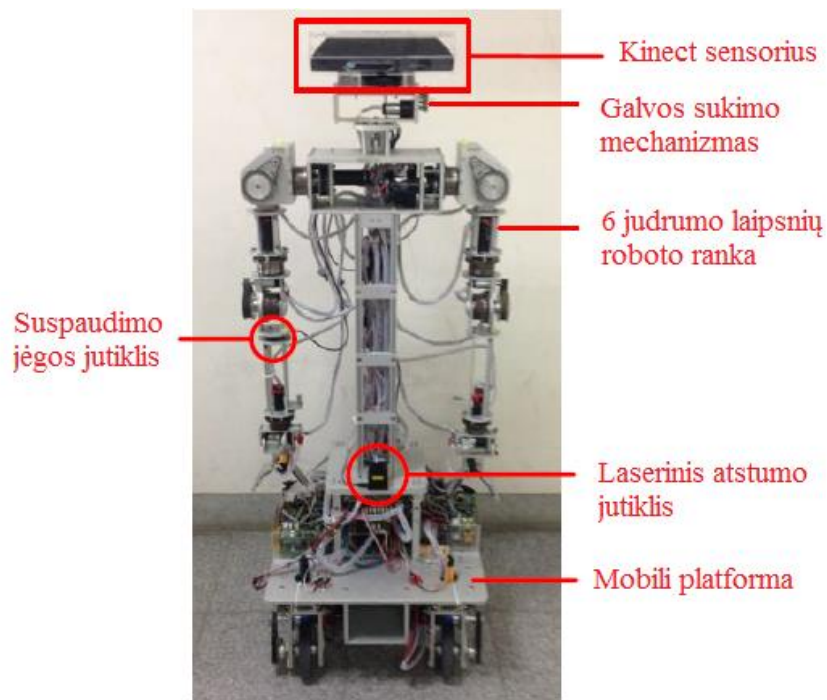
Analizuojant roboto rankų valdymą pastebėta, kad integruoti mechaniniai poveikio įtaisai dažniausiai turi kokių nors apribojimų. Tai tampa aktualu, kai bandoma sukurti mažus mobilius paslaugų robotus. Tokiose sistemose darbinė erdvė, jutiklių išdėstymas ir konfigūracija labai svarbu, todėl ieškoma alternatyvų. Vis dažniau galima susidurti su kompiuterinių regos sistemų pritaikymu robotikoje. Robotų valdymas tampa paprastesnis ir atsiranda daugiau panaudojimo galimybių.

Valdymas gali būti atliktas atkartojant operatoriaus judesius (18 pav.), kai erdvėje priešais robotą su integruotu vaizdo atpažinimo įtaisu rodoma, ką robotas turi atlikti. Kompiuterinė regos sistema užfiksuoja judesius. Specialia programine įranga pagalba sukuriama reikiamos valdymo komandos robotui. Tokios sistemos dažniausiai būna unikalios ir skirtos konkrečiai analizuojamai roboto platformai valdyti. Pateiktame pavyzdyje parodyta, kaip žaidimų platformos plėtinys 3D Kinect pritaikytas prototipinei dvirankio roboto sistemai valdyti.



18 pav. Valdymas panaudojant 3D Kinect sistemą [12]

Kitas būdas naudojant vaizdų atpažinimą gali būti pritaikytas valdyti sistemą be operatoriaus pagalbos. Dvirankio roboto sistema integruota ant mobilios platformos bazės (19 pav.) Toks prototipas visiškai autonominis. Lazerinis atstumo jutiklis naudojamas žemėlapiui kurti ir judėjimo trajektorijai generuoti, o 3D Kinect modulis – objektams atpažinti ir jiems manipuluoti.



19 pav. Dvirankio roboto sistema su integruota vaizdo atpažinimo funkcija [13]

Apžvalga rodo, kad šiuo metu vykdoma nemažai tyrimų, susijusių su dvirankių robotų panaudojimu pramonės, mokslo ir kitose srityse. Dvirankių robotų kombinavimas su mobiliomis platformomis išplečia galimybes, tiriant socialinius bei paslaugų robotus. Tokios sistemos tampa vis patrauklesnės privačiam sektoriui, siekiant pagerinti žmogaus gyvenimo kokybę. Žinoma, svarbu įvertinti tai, kad dauguma šių sistemų yra bandomojoje stadijoje, todėl ši sritis tinkama tolimesniam plėtojimui ir tyrimams.

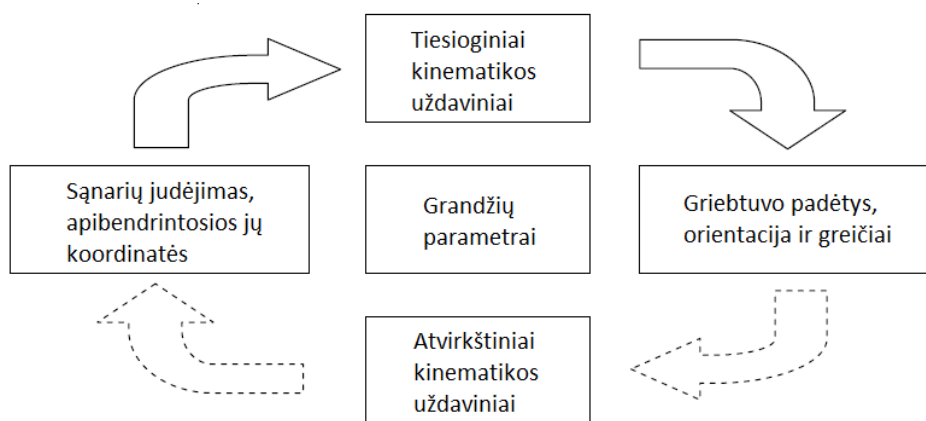
#### 1.4. Skyriaus išvados

1. Dvirankių robotų sistemos vis dažniau naudojamos pramonės sektoriuje bei įvairiems moksliniams tyrimams.
2. Mobilūs dvirankiai robotai yra žymiai pranašesni už stacionarius dvirankius robotus, nes jie yra lankstesni ir geba atlikti daugiau užduočių skirtingose vietose.
3. Dvirankiai robotai yra pažangios mašinos, kurių valdymui reikalingi sudėtingi algoritmai bei integruoti valdymo ir vykdymo įtaisai, padedantys kontroliuoti norimą judesį.
4. Dvirankiais robotais galima manipuluoti įvairių dydžių bei formų objektus.
5. Valdymo sudėtingumas perkeliant skirtingų dydžių bei fizinių savybių objektus priklauso nuo pasirinktos roboto rankų konfigūracijos ir naudojamos įrangos.

## 2. TEORINĖ DALIS

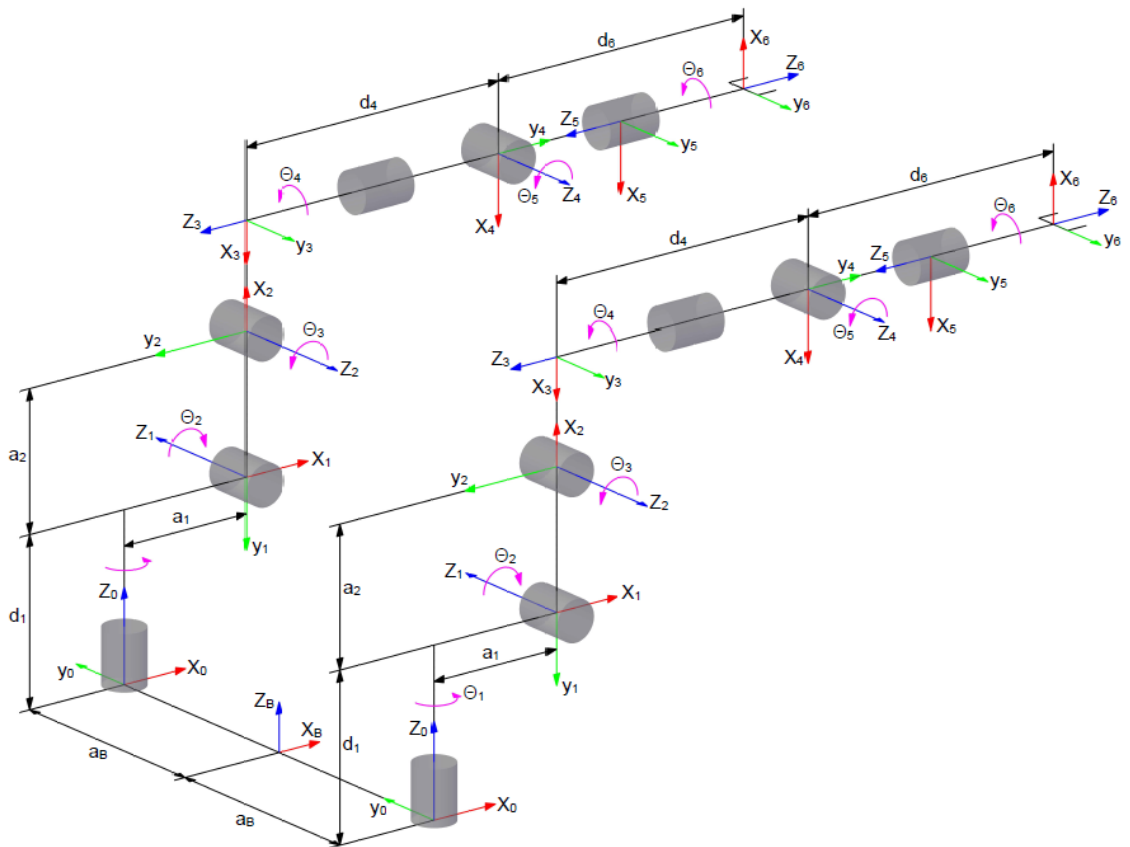
### 2.1. Dvirankio roboto matematinio modelio sudarymas

Norint sukurti sėkmingai veikiančią dviejų roboto rankų sistemą iš pradžių rekomenduojama atlikti tokios sistemos simuliacijas virtualioje aplinkoje. Todėl labai svarbu atlikti kruopščią sistemos analizę. Vienas pirmųjų etapų yra roboto rankų kinematikos tyrimas, kurio esmė suprasti tarpusavio ryšį tarp skirtingų judančių grandžių. Kitaip tariant, matematiškai aprašomas kiekvienos grandies judėjimas. Kinematikos analizė gali būti išskirta į du etapus: tiesioginė ir atvirkštinė. Tiesioginės kinematikos uždavinio tikslas surasti manipulatoriaus išėjimo grandies arba griebtuvo padėtį absoliučios koordinačių sistemos atžvilgiu žinant apibendrintąsias roboto rankų grandžių koordinates. Sprendžiant atvirkštinį kinematikos uždavinį randamos manipulatoriaus grandžių apibendrintosios koordinatės žinant išėjimo grandies – griebtuvo padėtį. Paveikslėlyje (20 pav.) pateikta roboto rankų kinematinės grandinės blokinė schema [14]. Šioje blokinėje schemoje vaizduojamas ryšys tarp tiesioginio ir atvirkštinio uždavinio sprendimo siekiant tinkamai sumodeliuoti roboto rankų judėjimą.



20 pav. Roboto rankų kinematikos blokinė schema

Teorinėje dalyje analizuojama paslaugų roboto rankų sistema sudaryta iš dviejų atskirai valdomų rankų. Kiekviena ranka turi po šešis judrumo laipsnius (6-DOF). Rankų konfigūracija pasirinkta taip, kad visi judesiai būtų sukamieji. Tokia sistema turi keletą esminių privalumų. Ją galima integruoti ant mobilios platformos bazės. Tokiu atveju gaunamas mobilus dvirankis robotas. Pasirinkus tinkamą roboto rankų konfigūraciją galima gauti pakankamai lankstų ir universalų robotą gebantį atlikti kelis skirtingus veiksmus: atidaryti duris, pakelti daiktus nuo žemės ir padėti juos ant stalo. Dvirankio roboto kinematinė schema pateikta (21 pav.).



21 pav. Dvirankio roboto kinematinė schema

Roboto rankos sujungtos B taške (bazė), šio taško koordinacių sistema  $X_B Y_B Z_B$ . Abi rankos vienodos, tačiau kiekviena jungtis gali būti valdoma atskirai. Pirmosios jungties sukimosi ašis sutampa su  $X_0 Y_0 Z_0$  koordinacių sistemos  $Z_0$  ašimi ir perstumta atstumu  $d_1$  ašies  $Z_0$  kryptimi.  $X_0 Y_0 Z_0$  koordinacių sistema gali pasisukti kampu  $\theta_1$  aplink  $Z_0$  ašį.

Antrosios jungties sukimosi ašis sutapdinta su  $X_1 Y_1 Z_1$  koordinacių sistemos ašimi  $Z_1$  ir pasukta kampu  $\alpha_1$ . Jungtis  $a_1$  nukreipta  $X_1$  ašies kryptimi.  $X_1 Y_1 Z_1$  koordinacių sistema gali pasisukti kampu  $\theta_2$  aplink  $Z_1$  ašį.

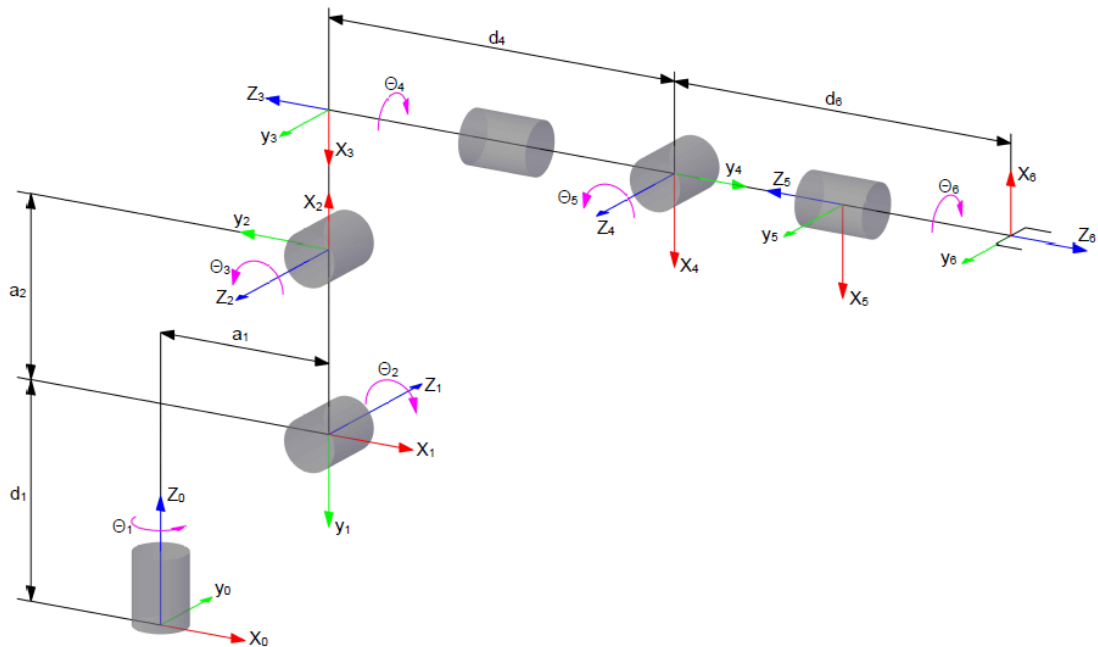
Trečiosios jungties sukimosi ašis sutapdinta su  $X_2 Y_2 Z_2$  koordinacių sistemos ašimi  $Z_2$ . Jungtis  $a_2$ , sutapdinta su ašimi  $X_2$ . Kartu  $X_2 Y_2 Z_2$  koordinacių sistema gali pasisukti kampu  $\theta_3$  aplink  $Z_2$  ašį.

Ketvirtosios jungties sukimosi ašis sutapdinta su  $X_3 Y_3 Z_3$  koordinacių sistemos ašimi  $Z_3$ . Jungtis  $a_3$ , sutapdinta su ašimi  $Z_3$ . Kartu  $X_3 Y_3 Z_3$  koordinacių sistema gali pasisukti kampu  $\theta_4$  aplink  $Z_3$  ašį.

Penktosios jungties sukimosi ašis sutapdinta su  $X_4 Y_4 Z_4$  koordinacių sistemos ašimi  $Z_4$  ir perstumta atstumu  $d_4$  ašies  $Y_4$  kryptimi. Kartu  $X_4 Y_4 Z_4$  koordinacių sistema gali pasisukti kampu  $\theta_5$  aplink  $Z_4$  ašį.

Šeštosios jungties sukimosi ašis sutapdinta su  $X_5Y_5Z_5$  koordinačių sistemos ašimi  $Z_5$ . Kartu  $X_5Y_5Z_5$  koordinačių sistema galima pasisukti kampu  $\Theta_6$  aplink  $Z_5$  ašį. Griebtuvo centrinis taškas sutapdintas su  $X_6Y_6Z_6$  koordinačių sistemos centru ir yra perstumtas atstumu  $d_6$  ašies  $Z_6$  kryptimi.

Abi rankos struktūriškai yra vienodos, todėl galima sudaryti apibendrintą matematinį modelį, kuris leis spręsti tiesioginį kinematikos uždavinį (22 pav.).



22 pav. Vienos roboto rankos kinematinė schema

Atvirai kinematinėi grandinei analizuoti galima panaudoti Denavit ir Hartenberg (D-H) transformacijas, kurios gali būti pritaikytos bet kokio ilgio atviroms kinematinėms grandims tirti. Norint naudoti šį transformacijos metodą reikia vadovautis keliomis bendromis taisyklėmis aprašančiomis atvirą kinematinę grandinę.

Kiekviena jungtis ir jos padėtis priklauso nuo keturių tarpusavyje nepriklausančių parametru: sąnaros posūkio kampo  $\Theta$ , posvyrio kampo  $\alpha$ , perstūmos  $d$ , bei jungties ilgio  $a$  [15].

Tik vienas iš šių parametru gali būti naudojamas kaip jungties kintamasis.

D-H metodo tikslas: suformuoti transformacijos matricą, kai koordinačių sistema perkeliama iš  $j-1$  sąnaros į  $j$  sąnarą. Tam yra svarbu atlikti papildomus žingsnius, kurie garantuos, kad kiekviena roboto rankos jungtis judės savo vienintelę koordinačių sistema.

- Nustatoma bazinė roboto rankos koordinačių sistema įvertinant tai, kad bazės  $Z_0$  ašis yra pirmosios jungties sukimosi ašis. Svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad nagrinėjama dviejų roboto rankų sistema, kurių pradžios negali sutapti. Tai reikia iš anksto įvertinti ir tai galima padaryti dvejopai. Pirmiausia galima atlikti papildomą bazės taško koordinačių transformaciją, arba naudoti modifikuotą D-H transformacijos metodą, kuris leidžia pasirinkti bazinę koordinačių sistemą ne tik pirmosios jungties sukimosi ašyje;

- visoms roboto rankų sąnarų sukimosi ašims  $j$  reikia priskirti  $Z_{j-1}$  ašis, kiekvienam  $j=2, \dots, n$ ,  $n$  – visų jungčių kiekis;
- priskyrus visų  $n$  jungčių  $Z$  ašis roboto grandims, galima nustatyti  $X_j$  ašis kiekvienai  $j=1, \dots, n$ , sąnariai.  $X_j$  ašis yra bendras normalinis vektorius tarp  $X_j$  ir  $Z_j$  ašių, kuris privalo kirsti  $Z_{j-1}$  ir  $Z_j$  ašis. Toks bendras statmuo yra trumpiausias atstumas tarp  $Z_{j-1}$  ir  $Z_j$  ašių. Jo ilgis žymimas indeksu  $a_j$ . Kadangi nagrinėjama sistema sudaryta tik iš sukamųjų judesiu šis dydis bus ne kintamasis, o konstanta;
- suradus visas  $X_j$  ašis galima vykdyti tolimesnius veiksmus: 1 – sujungimo posūkio kampas  $\Theta_j$  nustatomas kaip sąnaros  $j$  posūkio kampas aplink  $Z_{j-1}$  ašį. Teigiama sukimosi kryptis yra nuo  $X_{j-1}$  į  $X_j$ , kai žiūrima teigiamos  $Z_{j-1}$  ašies kryptimi. 2 – grandžių sujungimų perstūma  $d_j$  yra atstumas  $Z_{j-1}$  ašyje, kai pereinama nuo  $X_{j-1}$  iki  $X_j$  ašies pradžios. 3 – jungties posvyrio kampas  $\alpha_j$  yra posūkio kampas aplink  $X_j$  ašį keliaujant iš pirmos sąnaros ašies  $Z_{j-1}$  į antros sąnaros  $Z_j$  ašį. 4 – jungties ilgis  $a_j$  yra atstumas ašyje  $X_j$ , nuo  $Z_{j-1}$  iki  $Z_j$ .

## 2.2. Modifikuota D-H transformacija

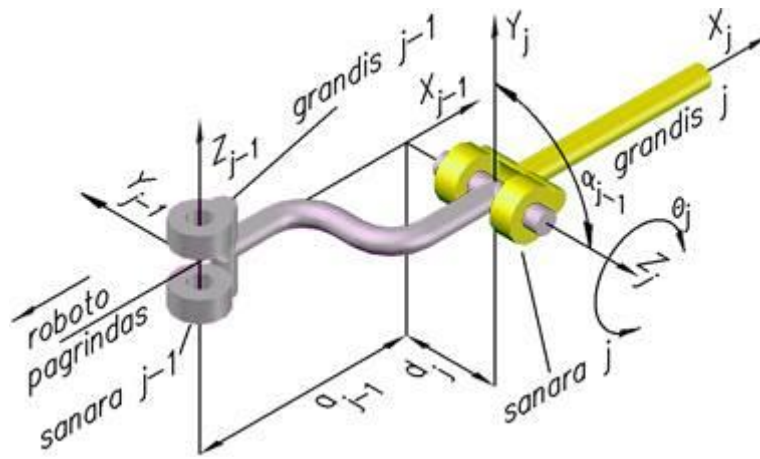
Naudojant modifikuotą D-H transformaciją galima pasirinkti bazinę koordinačių sistemą ne tik pirmosios sąnaros  $Z$  sukimosi ašyje. Tai yra privalumas, kai tiriama dviejų manipuliatorių kinematika. Abi roboto rankos sumontuotos ant tos pačios bazės todėl jų darbinis laukas yra toje pačioje bazinėje koordinačių sistemoje.

Tam, kad būtų galima sudaryti modifikuotas D-H transformacijos matricas pirmiausiai reikia atlikti vienos pasirinktos grandies analizę (23 pav.). Po to randami kitų jungčių parametrai ir sudaroma matrica.

Naudojant tiesiaiegius ir sukamuosius judesius galima atlikti transformaciją iš  $j-1$  koordinačių sistemos į  $j$  koordinačių sistemą. Šie judesiai aprašomi formule:

$${}^{j-1}_j A(a_{j-1}, \alpha_{j-1}, \Theta_j, d_j) = R_X(\alpha_{j-1}) \cdot T_X(a_{j-1}) \cdot R_Z(\Theta_j) \cdot T_Z(d_j), \quad (1)$$

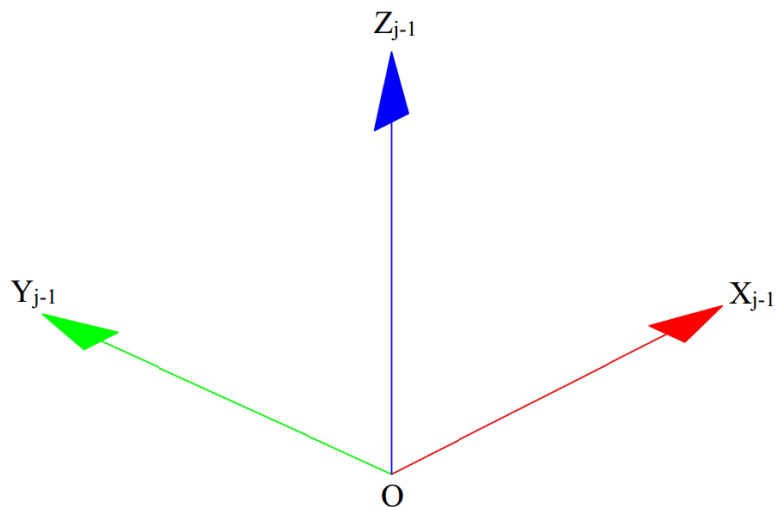
čia:  $R_X(\alpha_{j-1})$  – sukimo kampu  $\alpha_{j-1}$  transformacija aplink  $X$  ašį;  $T_X(a_{j-1})$  – linijinė perstūmos transformacija  $a_{j-1}$  atstumu  $X$  kryptimi;  $R_Z(\Theta_j)$  – sukimo kampu  $\Theta_j$  transformacija aplink  $Z$  ašį;  $T_Z(d_j)$  – linijinė perstūmos transformacija  $d_j$  atstumu  $Z$  kryptimi;  $A$  – transformacijos matrica iš  $j-1$  koordinačių sistemos į  $j$  koordinačių sistemą.



23 pav. Atvira kinematinė grandinė modifikuotai D-H transformacijai

Transformacijų atlikimo eiliškumas užrašytas 1 lygtyje. Pirmiausiai reikia atlikti pasukimą  $\alpha$  kampu aplink  $X$  ašį, tada perstumti  $a$  atstumu  $X$  kryptimi, po to pasukti kampu  $\theta$  aplink  $Z$  ašį ir pabaigoje perstumti atstumu  $d$  ašies  $Z$  kryptimi.

Koordinatų pervedimui iš  $j-1$  į  $j$  koordinatų sistemą sudarysime atskiras transformacijos matricas. Atliekant D-H transformacijas viena iš sąlygų yra naudoti dešininę koordinatų sistemą  $X_{j-1}Y_{j-1}Z_{j-1}$  (24 pav.).



24 pav. Naudojama dešininė koordinatų sistema  $X_{j-1}Y_{j-1}Z_{j-1}$

Transformacijas pereinant iš  $j-1$  koordinatų sistemos į  $j$  koordinatų sistemą galima suskirstyti keturiais pagrindiniais etapais:

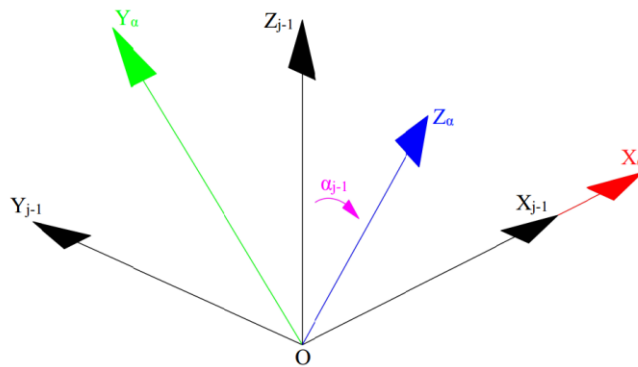
- koordinatų sistemos posūkis kampu  $\alpha_{j-1}$  aplink  $OX_{j-1}$  ašį;
- koordinatų sistemos perstūma  $a_{j-1}$  atstumu pasuktos  $OX_{j-1}$  ašies kryptimi;
- koordinatų sistemos posūkis kampu  $\theta_j$  aplink  $OZ_j$  ašį;
- pasuktos koordinatų sistemos perstūma  $d_j$  atstumu lygiagrečiai su  $OZ_j$  ašies kryptimi.



### 2.3. Posvyrio alfa ( $\alpha$ ) transformacija

Koordinatų sistemos  $X_{j-1}Y_{j-1}Z_{j-1}$  posūkis kampu  $\alpha$  aplink pasuktą  $OX_{j-1}$  ašį (25 pav.). Transformavimo matrica iš  $X_{j-1}Y_{j-1}Z_{j-1}$  į  $X_\alpha Y_\alpha Z_\alpha$  koordinatų sistemą:

$$R_X(\alpha_{j-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{j-1} & -\sin \alpha_{j-1} & 0 \\ 0 & \sin \alpha_{j-1} & \cos \alpha_{j-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

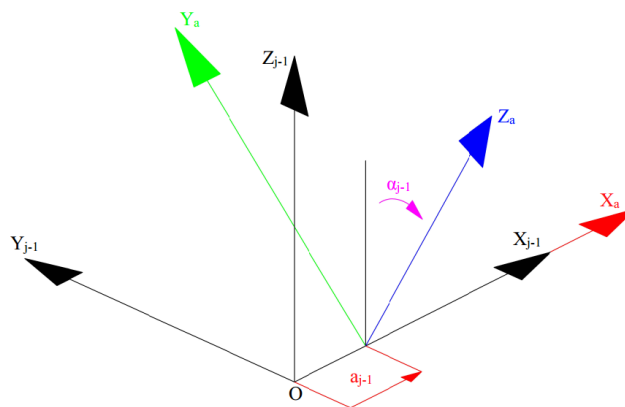


25 pav. Koordinatų sistemos pasukimas kampu  $\alpha$  aplink  $OX_{j-1}$  ašį

### 2.4. Perstūmos (a) transformacija

Koordinatų sistemos  $X_\alpha Y_\alpha Z_\alpha$  perstūma  $a_{j-1}$  atstumu pasuktos  $OX_{j-1}$  ašies kryptimi (26 pav.). Sukuriama naują koordinatų sistemą  $X_a Y_a Z_a$ . Perstūmos transformavimo matrica:

$$T_X(a_{j-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{j-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

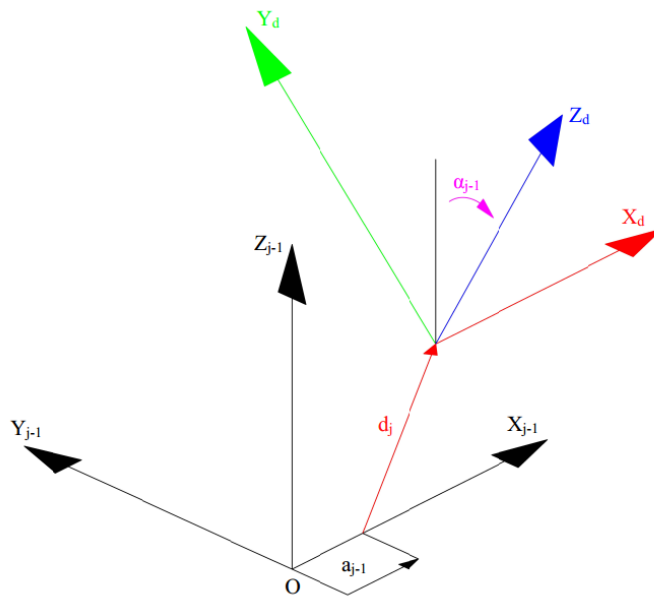


26 pav. Koordinatų sistemos perstūma  $a$  atstumu

## 2.5. Perstūmos (d) transformacija

Koordinatių sistemas  $X_a Y_a Z_a$  perstūma  $d$  atstumu lygiagrečiai su  $OZ_a$  ašies kryptimi (27 pav.). Sukuriama  $X_d Y_d Z_d$  koordinatių sistema. Perstūmos transformavimo matrica:

$$\mathbf{T}_Z(d_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$



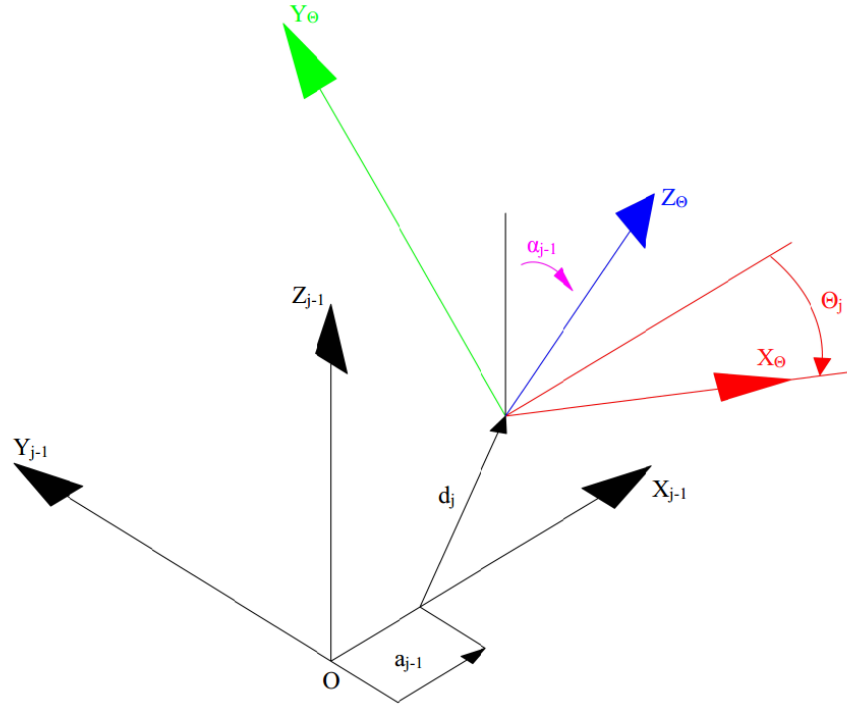
27 pav. Perstūma atstumu  $d$  ašies  $OZ_d$  kryptimi

Perstūma  $d$  gali būti vertinama dvejais būdais. Kai roboto sąnarioje naudojami sukamieji judesiai, tada  $d$  yra užrašomas kaip parametras. Jei sąnarioje naudojamas linijinis judesys, tai  $d$  tampa kintamuoju ir nurodo linijinio poslinkio dydį. Roboto rankų valdymui bus naudojamos realios pavaros, kurios gali turėti minimalią bei maksimalią perstūmos reikšmę. Analizuojamoje dviejų roboto rankų sistemoje kintamasis  $d$  bus parametras. Pavaros bus įtaisytos taip, kad visi judesiai vyks tik  $Z$  ašies kryptimi.

## 2.6. Posūkio kampo ( $\theta$ ) transformacija

Koordinatių sistema  $X_d Y_d Z_d$ , pasukta kampu  $\theta$  aplink  $OZ_d$  ašį, sukuria naują koordinatių sistemą  $X_{\theta} Y_{\theta} Z_{\theta}$  (28 pav.). Svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad realioje roboto rankoje posūkio kampas visuomet turi ribines reikšmes. Transformavimo matrica iš  $X_d Y_d Z_d$  į  $X_{\theta} Y_{\theta} Z_{\theta}$  koordinatių sistemą ir tuo pačiu į  $X_j Y_j Z_j$ :

$$R_Z(\Theta_j) = \begin{bmatrix} \cos \Theta_j & -\sin \Theta_j & 0 & 0 \\ \sin \Theta_j & \cos \Theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$



28 pav. Koordinačių sistema  $X_d Y_d Z_d$  pasukimas kampu  $\Theta_j$  aplink  $OZ_d$  ašį

Gavus visas transformacijos matricas, galima pereiti prie apibendrintosios D-H transformacijos.

## 2.7. Apibendrinta D-H transformacija

Apibendrinus gautas transformacijas D-H transformacija gali būti aprašyta taip:

$$A(\alpha, a, d, \Theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

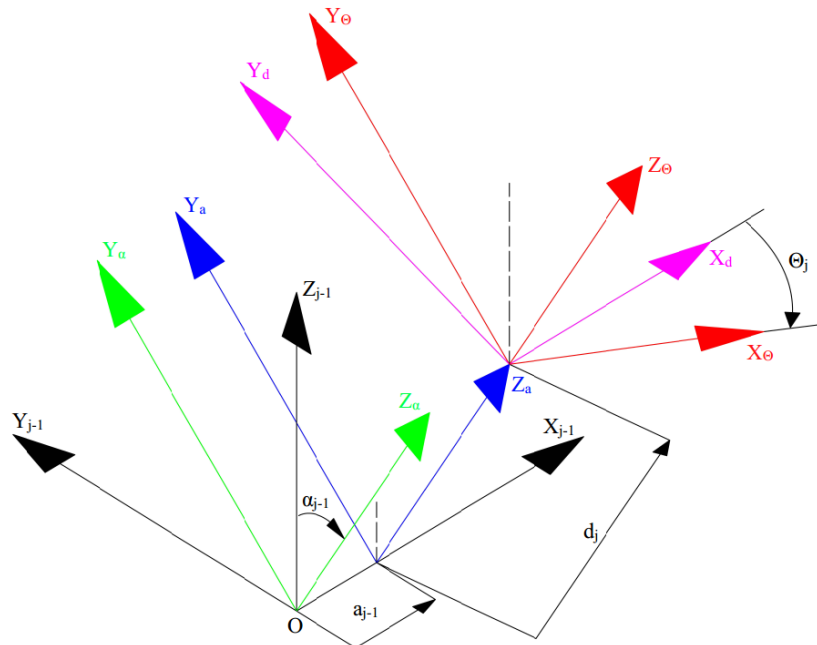
Sudauginus šias matricas (6) yra gaunama kvadratinė transformacijos matrica:

$$A(\alpha, a, d, \Theta) = \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 & a \\ \cos \alpha \cdot \sin \Theta & \cos \alpha \cdot \cos \Theta & -\sin \alpha & -d \cdot \sin \alpha \\ \sin \alpha \cdot \sin \Theta & \sin \alpha \cdot \cos \Theta & \cos \alpha & d \cdot \sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Matricą (7), įvertinus indeksus, naudotus (1-5) lygtyse, galima užrašyti taip:

$${}^{j-1}_j \mathbf{A}(a_{j-1}, \alpha_{j-1}, \Theta_j, d_j) = \begin{bmatrix} \cos \Theta_j & -\sin \Theta_j & 0 & a_{j-1} \\ \cos \alpha_{j-1} \cdot \sin \Theta_j & \cos \alpha_{j-1} \cdot \cos \Theta_j & -\sin \alpha_{j-1} & -d_j \cdot \sin \alpha_{j-1} \\ \sin \alpha_{j-1} \cdot \sin \Theta_j & \sin \alpha_{j-1} \cdot \cos \Theta_j & \cos \alpha_{j-1} & d_j \cdot \sin \alpha_{j-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Bendras transformuotų koordinačių sistemų vaizdas pateiktas 29 paveiksle.



29 pav. Nuoseklus koordinačių transformavimas vienoje jungtyje

Taip pat svarbu įvertinti kitus parametrus pateiktus 1 lentelėje. Jeigu sąnaroje yra atliekamas tiesiaiegis judesys, tada perstūma  $d$  yra kintamasis dydis, o kampas  $\Theta$  yra konstanta.

1 lentelė

D-H transformacijos parametrai ir kintamieji

Pavadinimas	Žymėjimas	Apibrėžimas	Paiškinimas
Jungties ilgis	$a_{j-1}$	Atstumas tarp $Z_{j-1}$ ir $Z_j$ ašių išilgai $X_j$ ašiai	konstanta
Jungties posvyris	$\alpha_{j-1}$	Kampas tarp $Z_{j-1}$ ir $Z_j$ ašių, sukant aplink $X_j$ ašį	konstanta
Sąnaros kampas	$\Theta_j$	Posūkio kampas sukant aplink $Z_j$ ašį	Sąnaros posūkio kintamasis
Jungties perstūma	$d_j$	Atstumas nuo $j-1$ koordinačių sistemos pradžios iki $X_j$ ašies, $Z_j$ ašies kryptimi	Tiesiaiegio sąnaros judesio kintamasis
Sąnaros tipas	$\sigma_j$	$\sigma=0$ sąnaros sukimui, $\sigma=1$ sąnaros tiesiaiegiam judesiui	konstanta

Turint atviros kinematinės grandinės roboto rankos struktūrą sudarytą iš  $n$  sąnarų skaičiaus yra gaunama bendra transformacijos matricos išraiška:

$${}^0_nT = {}^0_1A \cdot {}^1_2A \cdot \dots \cdot {}^{n-2}_{n-1}A \cdot {}^{n-1}_nA = \prod_{j=1, n}^j {}^{j-1}_jA . \quad (9)$$

Tiesioginio transformavimo matrica gali būti panaudota koordinačių iš  $X_0Y_0Z_0$  koordinačių sistemos transformuoti į paskutinės grandies  $X_nY_nZ_n$  koordinačių sistemą:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0_nT \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} . \quad (10)$$

Kiekvienai nagrinėjamai robotų sistemai galima sudaryti D-H transformacijos parametrų lentelę, kurios bendra išraiška pateikta 2 lentelėje.

2 lentelė

D-H transformacijos parametrų lentelė

Grandis $j$	$\alpha_{j-1}$	$a_{j-1}$	$d_j$	$\Theta_j$
1	$\alpha_1$	$a_0$	$d_1$	$\Theta_0$
2	$\alpha_1$	$a_1$	$d_2$	$\Theta_1$
3	$\alpha_2$	$a_2$	$d_3$	$\Theta_2$
...	...	...	...	...
n	$\alpha_{n-1}$	$a_{n-1}$	$d_n$	$\Theta_4$

Tiesioginio uždavinio sprendimo tikslas yra surasti roboto griebtuvo darbinio taško koordinatės  $X_0Y_0Z_0$  roboto koordinačių sistemoje, žinant kad sąnarose grandys pasisuka atitinkamu kampu  $\Theta$  arba jos persislenka tam tikru atstumu  $d$ . Todėl reikia transformuoti paskutinės grandies darbinio taško koordinatės į bazines ar pirmosios grandies koordinatės. Ši transformacija parodyta formulėje:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = ({}^0_nT)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} . \quad (11)$$

Norint plačiau ir aiškiau suprasti roboto valdymo specifiką reikia išanalizuoti atvirkštinio uždavinio sprendimo metodus. Gauti sprendiniai nurodo, kaip susukti sąnarose grandis kampu  $\Theta$ , kad roboto darbinis taškas atsidurtų reikiamoje vietoje.

## 2.8. Atvirkštinio uždavinio sprendimas

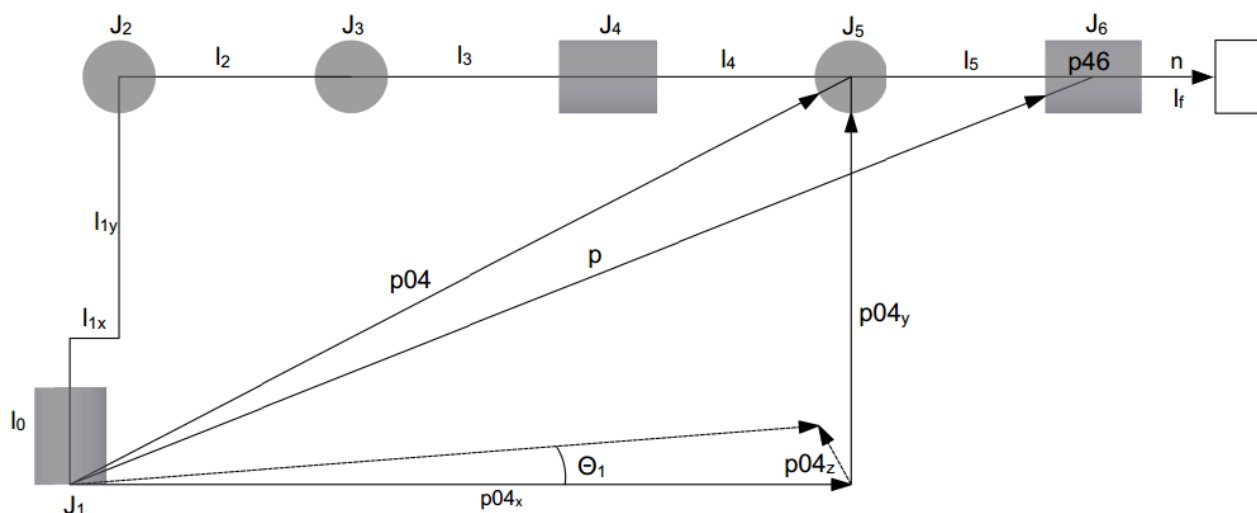
Atvirkštinį kinematikos uždavinį galima spręsti dvejopai: naudojant analitinį arba skaitmeninį metodus. Pirmuoju būdu kintamieji randami analitiškai įvertinant turimus grandžių parametrus. Antruoju metodu grandžių parametrai gaunami remiantis skaitmeniniais metodais. Šiame darbe naudojamas analitinis metodas.

Analitinis metodas gali būti sprendžiamas geometriniu arba algebriniu būdu. Tačiau geometrinis sprendinys dažniausiai naudojamas paprastos konfigūracijos manipuliatorių kinematikoje, kai reikia rasti vienos ar dviejų grandžių sprendinius. Manipulatoriams turintiems tris ar daugiau laisvės laipsnių geometrinis sprendinys yra sudėtingas, tačiau išsprendžiamas.

Sprendžiant atvirkštinį uždavinį galima gauti kelis skirtingus sprendinius. Todėl matematinės išraiškos ne visada gali sutapti su realiais fizineis sprendimais. Svarbu atlikti kai kuriuos supaprastinamus tam, kad analitinis metodas būtų paprastesnis.

Analizuojama dviejų roboto rankų sistema turi po 6 judrumo laipsnius kiekvienai rankai. Pirmos trys grandys skirtos roboto rankų orientacijai erdvėje. Likusios 3 grandys – griebtuvo orientacijai. Svarbu išsiaiškinti analizuojamos rankos visu grandžių susisukimo kampus. Modelio sudarymui ir sinchronizuoto judesio valdymo analizei bus naudojamos pirmos trys grandys.

Tam, kad galėtumėme apskaičiuoti roboto rankos posūkio kampus  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_5$ , reikia sudaryti supaprastintas kinematinės schemas atvirkštiniui uždaviniui spręsti. Kampu  $\theta_1$  radimui naudojame (30 pav.) pateiktą schemą.  $J_1$ - $J_6$  roboto rankos sąnarus.



30 pav. Supaprastinta vienos rankos kinematinė schema posūkio kampo  $\theta_1$  radimui

Sukimosi kampas  $\theta_1$  apskaičiuojamas sąnarus taško  $J_5$  projekciją atvaizduojant pirmosios grandies  $J_0$  koordinačių  $x$ - $z$  plokštumoje. Svarbu įvertinti tai, kad  $J_1, J_4$  ir  $J_6$  sąnarus neturi įtakos sekančio mazgo orientacijai. Tai palengvina uždavinio sprendimą. Taip pat  $J_6$  sąnarus padėtis turi

įtakos tik tvirtinamo griebtuvo orientacijai, tačiau neįtakoja griebtuvo pozicijos. Kampu  $\Theta_1$  radimui reikalingas pozicijos vektorius  $p_{04}$ , kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\vec{p}_{04} = \vec{p} - \vec{p}_{46} = \vec{p} - (l_5 + l_f) \cdot \vec{n}. \quad (12)$$

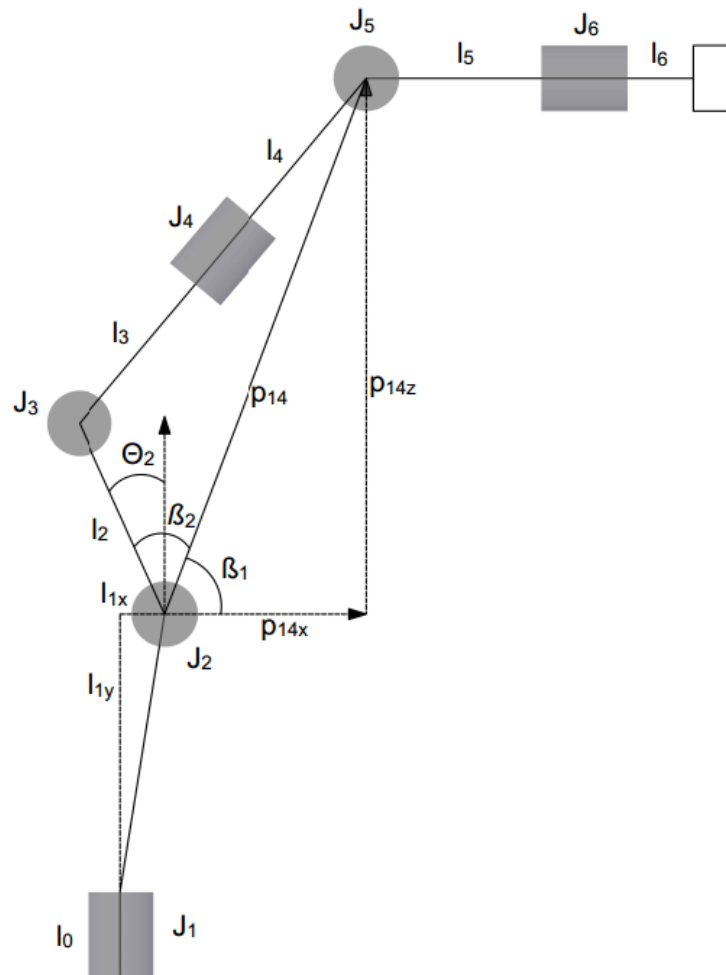
čia:  $n$  – dydis išsireiškiamas iš sąnaros  $J_6$  rotacijos matricos  $T_6$  trečiojo stulpelio  $z$  koordinatės.

Sukimosi kampo  $\Theta_1$  išraiška:

$$\Theta_1 = \arctan2(-p_{04,z}, p_{04,x}). \quad (13)$$

čia:  $\arctan2$  – funkcija turinti dvi skirtingas  $x, y$  teigiamas reikšmes.

Kampą  $\Theta_2$  galima apskaičiuoti žinant kampą  $\beta_1$  ir  $\beta_2$ , kuriuos galima išsireikšti per vektorių  $p_{14}$  (31 pav.).



31 pav. Supaprastinta vienos rankos kinematinė schema sukimosi kampo  $\Theta_2$  radimui

Kampu  $\beta_1$  radimui, reikia atlikti vektorių  $p_{14}$  transformaciją iš pirmosios sąnaros  $J_1$  koordinatinių ašies į antrosios sąnaros  $J_2$  koordinatinių ašį:

$${}^0T_1 = {}^0A_1(\alpha_0, a_0, \Theta_1, d_1) = \begin{pmatrix} {}^0R_1 & \bar{p} \\ \bar{0}^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Gauname transformuoto vektoriaus į  $J_1$  sąnaros koordinačių ašį išraišką:

$$\vec{p}_{14}^{(1)} = ({}^0R_1)^{-1} \cdot \vec{p}_{14}. \quad (15)$$

Dabar galima išsireikšti kampus  $\beta_1$  ir  $\beta_2$ . Kampe  $\beta_1$  išraiška:

$$\beta_1 = \arctan(p_{14,x}^{(1)}, p_{14,z}^{(1)}). \quad (16)$$

Kampe  $\beta_2$  išraiška:

$$\beta_2 = \arccos\left(\frac{l_2^2 + |\vec{p}_{14}|^2 - (l_3 + l_4)^2}{2 \cdot l_2 \cdot |\vec{p}_{14}|}\right). \quad (17)$$

Suradus  $\beta_1$  ir  $\beta_2$  galima rasti posūkio kampą  $\Theta_2$

$$\Theta_2 = -(\beta_1 + \beta_2). \quad (18)$$

Posūkio kampas  $\Theta_3$  randamas išsireiškiant visus nežinomuosius: tiesiausią atstumą  $p_{14}$  tarp sąnaros  $J_2$  ir  $J_5$ , bei kampą  $\varphi$  (Phi) (32 pav.). Tai galima atlikti, įvertinus kelis supaprastinamus, kurie įtakoja  $J_4$  grandies orientaciją.

Pirmiausia randamas vektorius  $p_{14}$ :

$$\vec{p}_{14} = \vec{p}_{04} - \vec{p}_{01}. \quad (19)$$

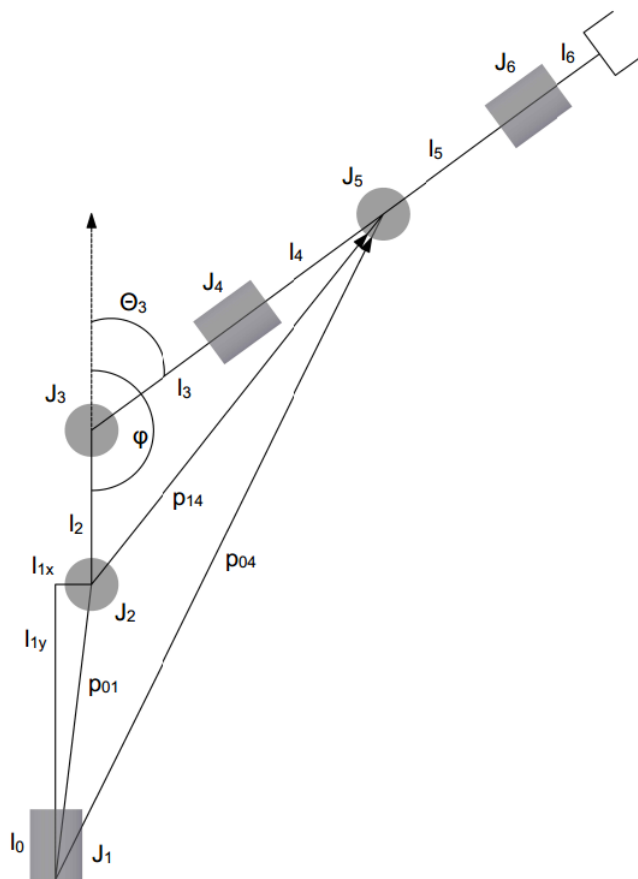
Kampas  $\varphi$  apskaičiuojamas naudojantis kosinusų teorema:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{l_2^2 + (l_3 + l_4)^2 - |\vec{p}_{14}|^2}{2 \cdot l_2 \cdot (l_3 + l_4)}\right). \quad (20)$$

Turint visus nežinomuosius apskaičiuojamas posūkio kampas  $\Theta_3$ :

$$\Theta_3 = \pi - \varphi. \quad (21)$$





32 pav. Supaprastinta vienos rankos kinematinė schema posūkio kampo  $\Theta_3$  radimui  
Kampas  $\Theta_5$  randamas vektorių  $z_4$  ir  $n$  skaliarinės sandaugos pagalba (pav 33.).

$$\vec{z}_4 \cdot \vec{n} = |\vec{z}_4| \cdot |\vec{n}| \cdot \cos(\Theta_5). \quad (22)$$

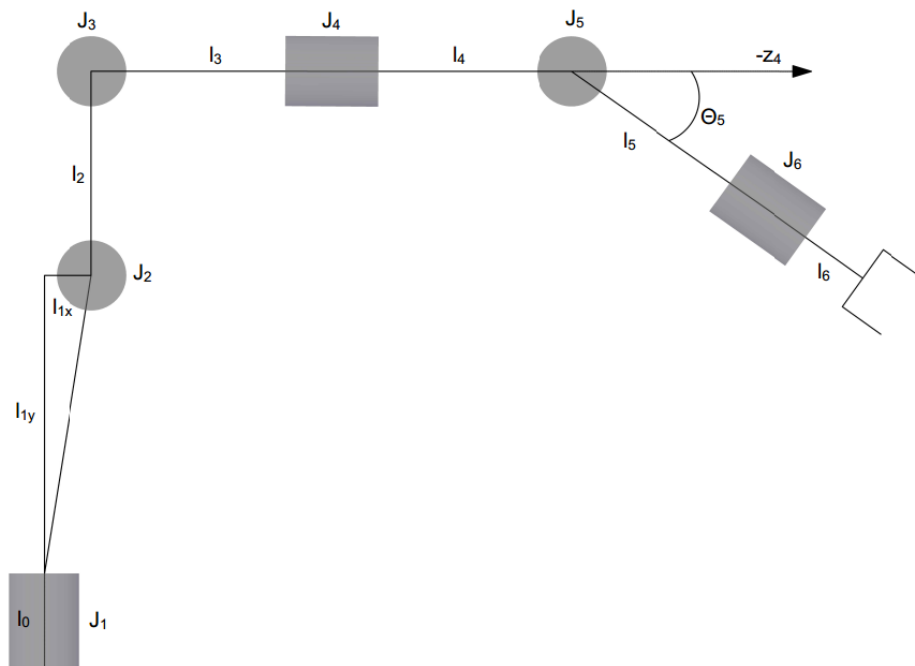
Žinoma kad: dviejų vektorių skaliarinė sandauga yra skaičius, lygus tų vektorių ilgių sandaugai, padaugintai iš kampo tarp vektorių kosinuso.

$$a \cdot b = a \cdot b \cdot \cos \Theta. \quad (23)$$

Vektoriaus  $z_4$  padėtis gaunama iš ketvirtosios sąnaros transformacijos matricos kampų. Svarbu įvertinti tai, kad kampas  $\Theta_4$  neįtakoja  $z_4$  padėties. Todėl galima teigti, kad šiuo atveju  $\Theta_4$  yra lygus 0. Iš čia gaunama  $J_4$  sąnaros transformacijos matrica [16]:

$${}^0T_4 = {}^0A_1(\alpha_0, a_0, \Theta_1, d_1) \cdot {}^1A_2(\alpha_1, a_1, \Theta_2, d_2) \cdot {}^2A_3(\alpha_2, a_2, \Theta_3, d_4) \cdot {}^3A_4(\alpha_3, a_3, \Theta_4, d_4). \quad (24)$$

Kadangi posūkio kampai  $\Theta_4$  ir  $\Theta_6$  įtakoja tik griebtuvo orientaciją. Darome prielaidą, kad jie neturi įtakos dviejų rankų sinchronizuoto judesio tyrimui. Tolimesnėje eigoje griebtuvo tipas bei jo galima įtaka valdymo galimybėms nebus vertinama.



33 pav. Supaprastinta vienos rankos kinematinė schema posūkio kampo  $\theta_5$  radimui

## 2.9. Skyriaus išvados

1. Sudarytas 6 judrumo laipsnius (6-DOF) turinčio dvirankio manipulatoriaus matematinis modelis robotų rankų kinematikos teorinei daliai analizuoti.
2. Pasirinkta lanksti roboto rankų konfiguracija. Kiekvieną sąnara turi sukamąjį judesį.
3. Išanalizuotas D-H transformacijos metodas supaprastintam tiesioginės kinematikos uždavinio sprendiniui gauti.
4. Išanalizuotos vienos pasirinktos grandies transformacijos  $j-1$  į  $j$  koordinačių sistemą.
5. Išanalizuota D-H transformacijos parametrų lentelė, pagal roboto rankų matematinį modelį įvertinta, kurie dydžiai yra kintamieji, o kurie konstantos.
6. Atlikta atvirkštinio kinematikos uždavinio analizė 6 judrumo laipsnių roboto rankai. Gautos grandžių susisukimo kampų išraiškos  $\theta$ .

### 3. TIRIAMOJI DALIS

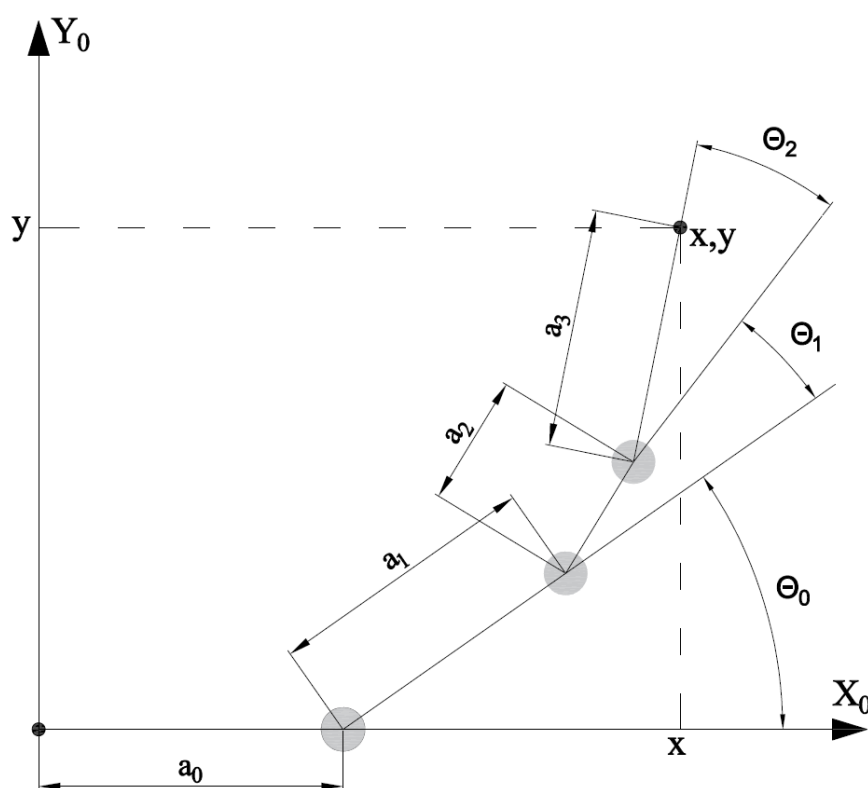
#### 3.1. Atvirkštinio uždavinio sprendimas 3 judrumo laipsnių roboto rankai

Tiriant dviejų roboto rankų sinchronizuotą judesį erdvėje pirmiesiems bandymams nėra būtina analizuoti sistemos turinčios 6 judrumo laipsnius kiekvienai rankai. Pakanka ištirti grandžių atsakingų už rankų orientaciją valdymo galimybes. Atlikus šias užduotis ir gavus teigiamą rezultatą, tolimesniuose etapuose galima nagrinėti griebtuvo mazgų integraciją ir jų įtaka rankų valdymui, atliekant skirtingas užduotis. Tyrimo objektu pasirinktas modelis, kurį sudaro 3 judrumo laipsnius turinčios rankos. Sąnarų judesiai pasirinkti sukamieji. Pirminis modelis sudaromas roboto rankoms, kurios juda 2 plokštumomis  $x$  ir  $y$ . Tai palengvina sinchronizuoto judesio galimybių tyrimą, ir leidžia susikonsoliduoti į dviejų roboto rankų judesio analizę.

Kinematinei roboto rankų analizei galimi analitiniai arba skaitmeniniai sprendimo būdai. Pasirenkamas paprastesnis analitinis metodas.

Nusistatomi eksperimentinio modelio abiejų rankų grandžių ilgiai:  $a_0=140\text{mm}$ ;  $a_1=125\text{mm}$ ;  $a_2=60\text{mm}$ ;  $a_3=110\text{mm}$ . Trečiojoje grandyje įvertinamas griebtuvo sąnaros atstumas.

Sudaroma supaprastinta kinematinė schema (34 pav.), posūkio kampų  $\Theta$  radimui.



34 pav. Supaprastinta vienos rankos kinematinė schema

Sudarome transformacijos matricą griebtuvo galinio taško radimui:

$${}^0_4\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{A} \cdot {}^1_2\mathbf{A} \cdot {}^2_3\mathbf{A} \cdot {}^3_4\mathbf{A} = \prod_{j=1,4}^j {}^{j-1}_j\mathbf{A}. \quad (25)$$

Dėl formulių supaprastinimo reikia atlikti žymėjimų korekciją:

$$\left. \begin{aligned} s\Theta &= \sin(\Theta), \\ c\Theta &= \cos(\Theta). \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Gaunama pilna transformavimo matricos išraiška nuo pradžios taško iki galinio griebtuvo taško:

$${}^0_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & 0 & E_{13} \\ E_{21} & E_{22} & 0 & E_{23} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Gautos transformacijos matricos paskutiniojo stulpelio trys viršutiniai nariai nurodo kinematinės grandies koordinates  $x, y, z$ . Šiuo atveju gaunamos  $x$  ir  $y$  koordinatės  $E_{13}$  ir  $E_{23}$ .

$$\left. \begin{aligned} E_{13} &= a_0 + a_1 \cdot c\Theta_0 + a_2 \cdot [c\Theta_0 \cdot c\Theta_1 - s\Theta_0 \cdot s\Theta_1] + \\ &+ a_3 \cdot \{c\Theta_2 \cdot [c\Theta_0 \cdot c\Theta_1 - s\Theta_0 \cdot s\Theta_1] - s\Theta_2 \cdot [c\Theta_0 \cdot s\Theta_1 + c\Theta_1 \cdot s\Theta_0]\} \\ E_{23} &= a_1 \cdot s\Theta_0 + a_2 \cdot [c\Theta_0 \cdot s\Theta_1 + c\Theta_1 \cdot s\Theta_0] + \\ &+ a_3 \cdot \{c\Theta_2 \cdot [c\Theta_0 \cdot s\Theta_1 + c\Theta_1 \cdot s\Theta_0] + s\Theta_2 \cdot [c\Theta_0 \cdot c\Theta_1 - s\Theta_0 \cdot s\Theta_1]\} \end{aligned} \right\}. \quad (28)$$

Naudojantis trigonometrinėmis kampų sudėties ir atimties formulėmis

$$\left. \begin{aligned} \sin(x+y) &= \sin(x) \cdot \cos(y) + \cos(x) \cdot \sin(y), \\ \cos(x+y) &= \cos(x) \cdot \cos(y) - \sin(x) \cdot \sin(y), \\ \sin(x-y) &= \sin(x) \cdot \cos(y) - \cos(x) \cdot \sin(y), \\ \cos(x-y) &= \cos(x) \cdot \cos(y) + \sin(x) \cdot \sin(y). \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Gaunamos koordinačių išraiškos:

$$\left. \begin{aligned} E_{13} &= a_0 + a_1 \cdot \cos \Theta_0 + a_2 \cdot \cos(\Theta_0 + \Theta_1) + a_3 \cdot \cos(\Theta_0 + \Theta_1 + \Theta_2), \\ E_{23} &= a_1 \cdot \sin \Theta_0 + a_2 \cdot \sin(\Theta_0 + \Theta_1) + a_3 \cdot \sin(\Theta_0 + \Theta_1 + \Theta_2). \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Kadangi analizuojamas rankų judėjimas  $x$  ir  $y$  plokštumos, gaunama tokia išraiška:

$$\left. \begin{aligned} x &= a_0 + a_1 \cdot \cos \Theta_0 + a_2 \cdot \cos(\Theta_0 + \Theta_1) + a_3 \cdot \cos(\Theta_0 + \Theta_1 + \Theta_2), \\ y &= a_1 \cdot \sin \Theta_0 + a_2 \cdot \sin(\Theta_0 + \Theta_1) + a_3 \cdot \sin(\Theta_0 + \Theta_1 + \Theta_2). \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Atvirkštinio kinematikos uždavinio esmė gauti funkcijas, kuriomis būtų galima aprašyti roboto rankų posūkio kampų  $\Theta$  priklausomybes nuo galinio griebtuvo taško koordinačių:

$$\left. \begin{aligned} \theta_0 &= f_0(x, y), \\ \theta_1 &= f_1(x, y), \\ \theta_2 &= f_2(x, y). \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Tokiu atveju uždavinio supaprastinimui reikia įvertinti kad:

$$\theta_{12} = \theta_1 = \theta_2. \quad (33)$$

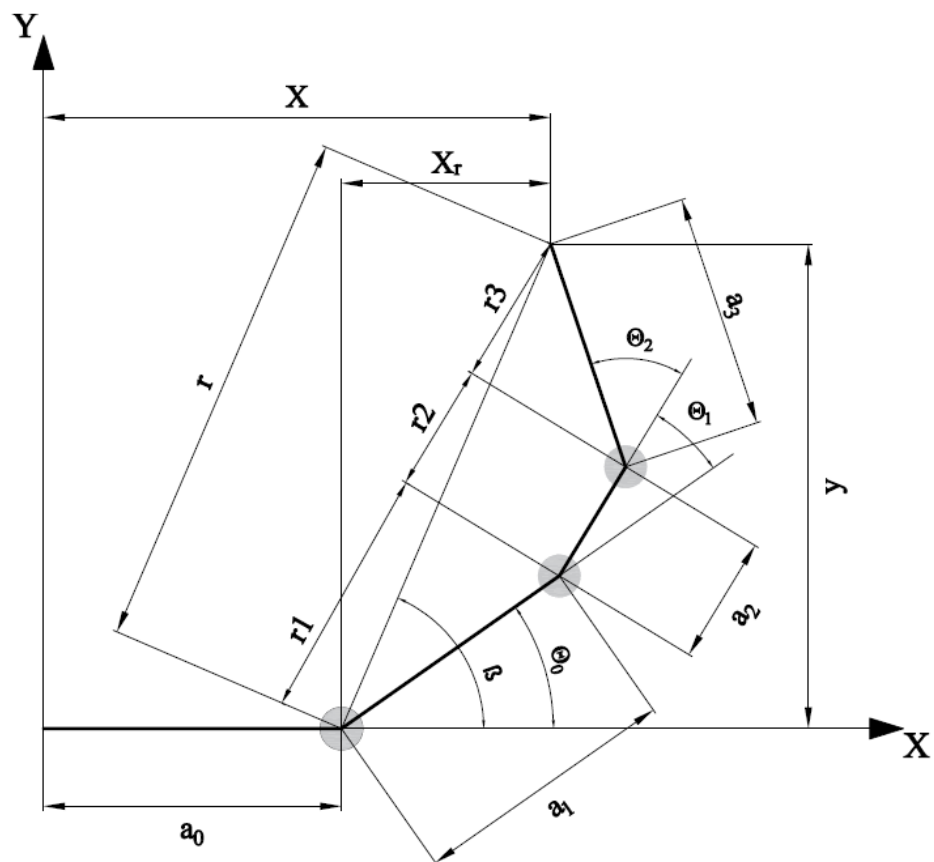
Tada:

$$\left. \begin{aligned} x &= a_0 + a_1 \cdot \cos \theta_0 + a_2 \cdot \cos(\theta_0 + \theta_1) + a_3 \cdot \cos(\theta_0 + 2 \cdot \theta_1), \\ y &= a_1 \cdot \sin \theta_0 + a_2 \cdot \sin(\theta_0 + \theta_1) + a_3 \cdot \sin(\theta_0 + 2 \cdot \theta_1). \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Gaunama dviejų posūkio kampų išraiška:

$$\left. \begin{aligned} \theta_0 &= f_0(x, y), \\ \theta_{12} &= f_1(x, y). \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Norint išsireikšti funkcijas posūkio kampų radimui, reikia rasti vektoriaus  $r$  ilgį bei jo posvyrio kampą  $\beta$ . Šie dydžiai randami iš žinomų  $x, y$  galo taško koordinatų ir detalizuotos kinematinės schemos (35 pav.).



35 pav. Detalizuota kinematinė schema

Uždavinio palengvinimui koordinacių sistemos pradžios taškas perkeliamas atstumu  $a_0$ . Tokiu atveju:

$$\left. \begin{aligned} x_a &= x - a_0 \\ r &= \sqrt{(x - a_0)^2 + y^2} = \sqrt{x_a^2 + y^2} \\ \beta &= \arctg\left(\frac{y}{x_a}\right) \end{aligned} \right\}. \quad (36)$$

Lygčių sistemos (34) abi puses pakeliame kvadratu:

$$\left. \begin{aligned} x_a^2 &= (a_1 \cdot c(\Theta_0))^2 + (a_2 \cdot c(\Theta_0 + \Theta_{12}))^2 + (a_3 \cdot c(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}))^2 + \\ &+ 2a_1 \cdot a_2 \cdot c(\Theta_0) \cdot c(\Theta_0 + \Theta_{12}) + 2a_1 \cdot a_3 \cdot c(\Theta_0) \cdot c(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}) + \\ &+ 2a_2 \cdot a_3 \cdot c(\Theta_0 + \Theta_{12}) \cdot c(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}) \\ y^2 &= (a_1 \cdot s(\Theta_0))^2 + (a_2 \cdot s(\Theta_0 + \Theta_{12}))^2 + (a_3 \cdot s(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}))^2 + \\ &+ 2a_1 \cdot a_2 \cdot s(\Theta_0) \cdot s(\Theta_0 + \Theta_{12}) + 2a_1 \cdot a_3 \cdot s(\Theta_0) \cdot s(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}) + \\ &+ 2a_2 \cdot a_3 \cdot s(\Theta_0 + \Theta_{12}) \cdot s(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}) \end{aligned} \right\}. \quad (37)$$

Susumuojami lygčių sistemos (35) abiejų pusių nariai.

$$\left. \begin{aligned} (a_1 \cdot c(\Theta_0))^2 + (a_1 \cdot s(\Theta_0))^2 &= a_1^2 \\ (a_2 \cdot c(\Theta_0 + \Theta_{12}))^2 + (a_2 \cdot s(\Theta_0 + \Theta_{12}))^2 &= a_2^2 \\ (a_3 \cdot c(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}))^2 + (a_3 \cdot s(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}))^2 &= a_3^2 \\ 2a_1 \cdot a_2 \cdot [c(\Theta_0) \cdot c(\Theta_0 + \Theta_{12}) + s(\Theta_0) \cdot s(\Theta_0 + \Theta_{12})] &= 2a_1 \cdot a_2 \cdot c(\Theta_{12}) \\ 2a_1 \cdot a_3 \cdot c(\Theta_0) \cdot c(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}) + 2a_1 \cdot a_3 \cdot s(\Theta_0) \cdot s(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}) &= 2a_1 \cdot a_3 \cdot (2 \cdot \Theta_{12}) \\ 2a_2 \cdot a_3 \cdot c(\Theta_0 + \Theta_{12}) \cdot c(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}) + 2a_2 \cdot a_3 \cdot s(\Theta_0 + \Theta_{12}) \cdot s(\Theta_0 + 2 \cdot \Theta_{12}) &= 2a_2 \cdot a_3 \cdot (\Theta_{12}) \end{aligned} \right\}. \quad (38)$$

Vektoriaus ilgio  $r$  kvadratinė išraiška:

$$x_a^2 + y^2 = a_0^2 + a_1^2 + a_2^2 + 2a_0 \cdot a_1 \cdot c(\Theta_{12}) + 2a_0 \cdot a_2 \cdot c(2 \cdot \Theta_{12}) + 2a_1 \cdot a_2 \cdot c(\Theta_{12}). \quad (39)$$

Kadangi

$$\cos(2 \cdot A) = 2 \cdot \cos^2(A) - 1. \quad (40)$$

gaunama išraiška:

$$x_a^2 + y^2 = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + 2a_1 \cdot a_2 \cdot c(\Theta_{12}) + 2a_1 \cdot a_3 \cdot [2 \cdot c^2(\Theta_{12}) - 1] + 2a_2 \cdot a_3 \cdot c(\Theta_{12}). \quad (41)$$

Įvedame formulės trumpinį:

$$B = \cos(\Theta_{12}). \quad (42)$$

Įvertinus (40) ir (41) lygtis gaunama išraiška:

$$x_a^2 + y^2 = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + 2a_1 \cdot a_2 \cdot B + 2a_1 \cdot a_3 \cdot 2 \cdot B^2 - 2a_1 \cdot a_3 + 2a_2 \cdot a_3 \cdot B. \quad (43)$$

Gaunama lygtis įvedus gautą išraišką iš (42) formulės:

$$4a_1 \cdot a_3 \cdot B^2 + 2 \cdot (a_1 \cdot a_2 + a_2 \cdot a_3) \cdot B + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 - (2a_1 \cdot a_3 + x_a^2 + y^2) = 0. \quad (44)$$

Kvadratinės lygties kintamasis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0. \quad (45)$$

Šaknys apskaičiuojamos pagal formulę:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}. \quad (46)$$

Gaunamas kvadratinės lygties (41) sprendinys:

$$B_{1,2} = \frac{-(a_1 \cdot a_2 + a_2 \cdot a_3) \pm \sqrt{(a_1 \cdot a_2 + a_2 \cdot a_3)^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3 \cdot (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 - 2a_1 \cdot a_3 - x_a^2 - y^2)}}{(4a_1 \cdot a_3)}. \quad (47)$$

Supaprastinta (47) lygties išraiška:

$$B_{1,2} = \frac{-a_2 \cdot (a_1 + a_3) \pm \sqrt{a_2^2 \cdot (a_1 + a_3)^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3 \cdot ((a_1 - a_3)^2 + a_2^2 - x_a^2 - y^2)}}{4 \cdot a_1 \cdot a_3}. \quad (48)$$

Modeliuojant roboto rankas naudojantis „MATLAB“ programinės įrangos paketu reikia įvertinti tam tikrus žymėjimus:

$$\left. \begin{aligned} b_{01} &= -a_2 \cdot (a_1 + a_3), \\ b_{02} &= a_2^2 \cdot (a_1 + a_3)^2 = b_0^2, \\ b_{03} &= 4 \cdot a_1 \cdot a_3, \\ b_{04} &= (a_1 - a_3)^2 + a_2^2, \\ B_{1,2} &= \frac{b_{01} \pm \sqrt{b_{02} - b_{03} \cdot (b_{04} - x_a^2 - y^2)}}{b_{03}} \end{aligned} \right\}. \quad (49)$$

Šaknys gaunamos realios tokiu atveju, kai pošaknis nėra neigiamas dydis:

$$\frac{a_2^2 \cdot (a_1 + a_3)^2}{4 \cdot a_1 \cdot a_3} - [(a_1 - a_3)^2 + a_2^2] \geq -(x_a^2 + y^2). \quad (50)$$

Apskaičiavus visas reikiamas šaknis galima rasti  $\Theta_{12}$  kampą:

$$\Theta_{12} = \pm \arccos(B_1) \vee \pm \arccos(B_2). \quad (51)$$

Kampo  $\Theta_0$  radimui sudaroma papildoma kinematinė schema (36 pav.). Trapecija  $a_0a_1a_2a_3$  pasukama kampu  $\Theta_0$  taip, kad atkarpa  $a_1$  sutaptu su koordinatinių sistemos X ašimi. Kadangi yra žinomi  $\Theta_{12}$  posūkio kampai, randamos roboto rankos galinio taško koordinatės  $x_c$  ir  $y_c$ :

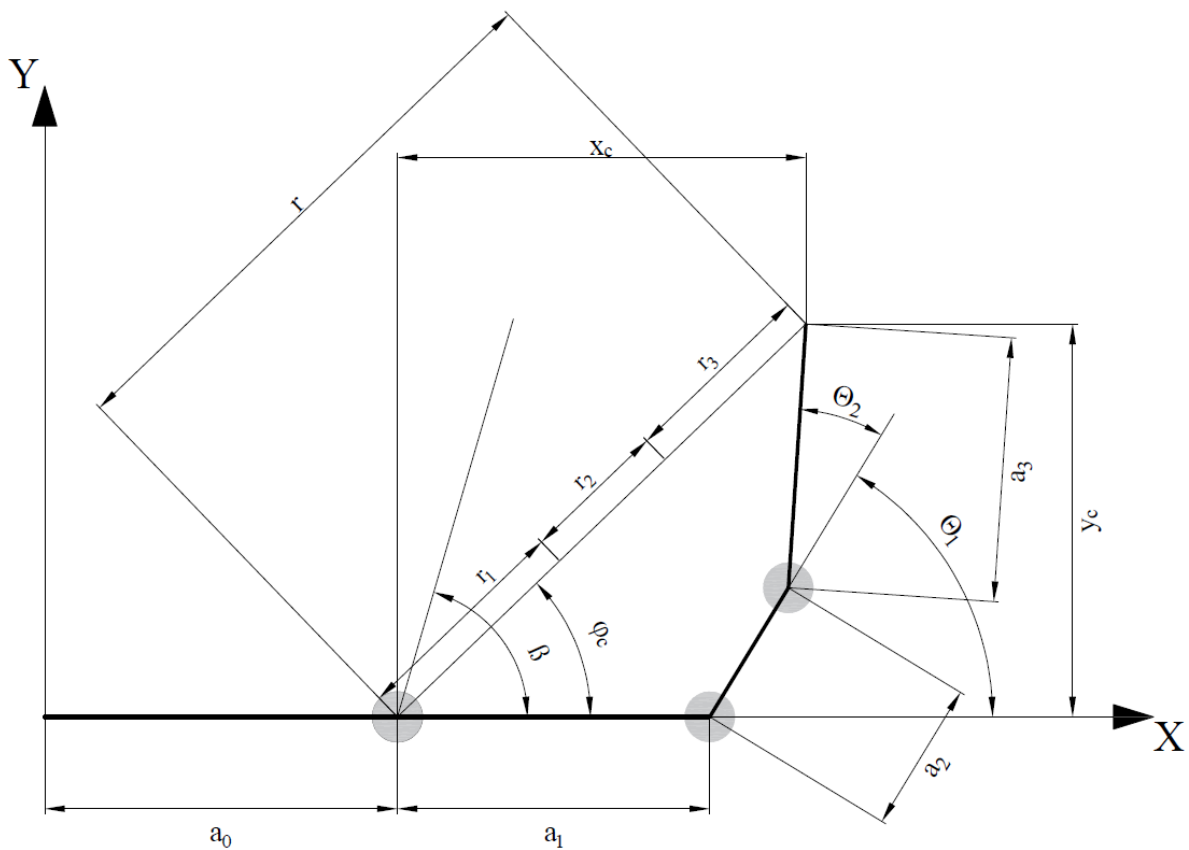
$$\left. \begin{aligned} x_c &= a_1 + a_2 \cdot \cos(\Theta_{12}) + a_3 \cdot \cos(2 \cdot \Theta_{12}) \\ y_c &= a_2 \cdot \sin(\Theta_{12}) + a_3 \cdot \sin(2 \cdot \Theta_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

Gaunama vektoriaus kampo  $r$  išraiška:

$$\varphi_c = \arctg\left(\frac{y_c}{x_c}\right). \quad (53)$$

Turint visus reikiamus dydžius gaunama posūkio kampo  $\Theta_0$  išraiška:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_0 &= \beta - \varphi_c, & \text{kai } \Theta_1 < 0, \\ \Theta_0 &= \pi + \beta - \varphi_c, & \text{kai } \Theta_1 \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (54)$$



36 pav. Pasukta kinematinė schema



### 3.2. Sinchronizuoto judesio valdymo algoritmai

Sudaroma teorinėje dalyje analizuota D-H parametrų lentelė 3 laisvės laipsnių rankų sistemai (3 lentelė), kuri bus naudojama nustatant roboto rankų konfigūraciją ir dydžius. Šie parametrai vėliau bus reikalingi kuriant modelį virtualioje aplinkoje bei sudarant sinchronizuoto judesio valdymo algoritmą.

3 lentelė

D-H parametrų lentelė tiriamai roboto rankų sistemai

Jungtis $j$	Jungties posūkio kampas $\alpha_j$	Atstumas tarp jungčių $a_j$	Jungties perstūma $d_j$	Jungties posūkio kampas $\theta$
0	0	$a_0=140$	0	$\theta_0$
1	0	$a_1=125$	0	$\theta_1$
2	0	$a_2=60$	0	$\theta_2$
3	0	$a_3=110$	0	$\theta_3$

Dvirankių robotų judesio valdymo sudėtingumas gali priklausyti nuo sugriebimo tipo, naudojamos įrangos (griebtuvų) bei manipuluojamų objektų savybių. Objektai gali būti pakeliami ir nešami juos suimant iš šonų dvejuose taškuose. Tokių atvejų roboto rankų galai turi judėti taip, kad atstumas tarp suėmimo taškų nesikeistų. Objektas visą laiką turi būti suspaustas. Svarbu įvertinti tai, kad be papildomos valdymo įrangos – jutiklių, objektą manipuluoti ore dvejomis rankomis yra pakankamai sudėtinga. Vienas iš galimų sprendimų: sugriebimo vietose naudoti suspaudimo jėgos jutiklius.

Perkeliant objektą iš vieno taško į kitą nepriklausomai nuo esamos rankų orientacijos, visada turi būti išlaikomas vienodas atstumas tarp sugriebimo taškų.

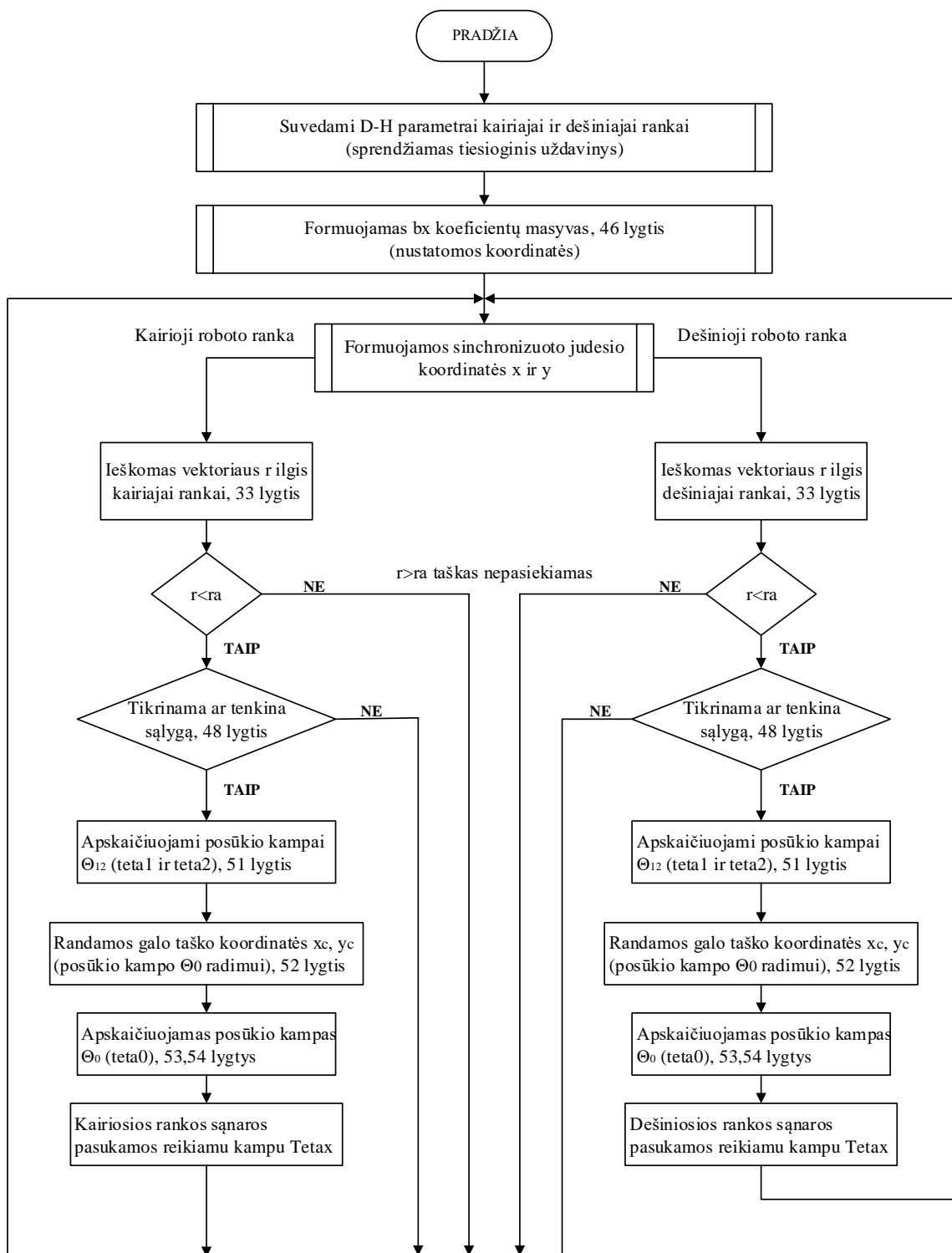
$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}. \quad (55)$$

Dviejų rankų sinchroninis judesys planuojamas taip, kad apskaičiuojama vienos rankos nauja taško koordinatė, pavyzdžiui  $P_1$ , o po to apskaičiuojama kitos rankos koordinatė  $P_2$ , panaudojus atstumo lygtį tarp dviejų taškų (25) ir tiesės lygtį erdvėje:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}. \quad (56)$$

Tokiu atveju gaunamas valdymo būdas, kada pirmoji ranka yra vedančioji (pagrindinė), o antroji seka judėjimą pagal pirmosios rankos galo taško koordinatas ir atitinkamai persiskaičiuoja reikiamus posūkio kampus, kad galėtų atsidurti reikiamoji vietoje.

Sudaromas sinchronizuoto judesio valdymo algoritmas tiriamai roboto rankų sistemai valdyti (37 pav.). Kairioji ranka yra vedančioji, o dešinioji atlieka sekimo funkciją. Taip yra išlaikomas vienodas atstumas tarp abiejų rankų, kai tarp jų yra įstatomas tam tikras objektas, kurį reikia perkelti iš vieno taško erdvėje į kitą. Šis algoritmas yra teorinis, jame nėra vertinama valdymo įtaisų (jutiklių) įtaka sistemos darbui. Taip pat sudaryta dviejų roboto rankų sinchronizuoto judesio valdymo programa pateikta 1 priede.

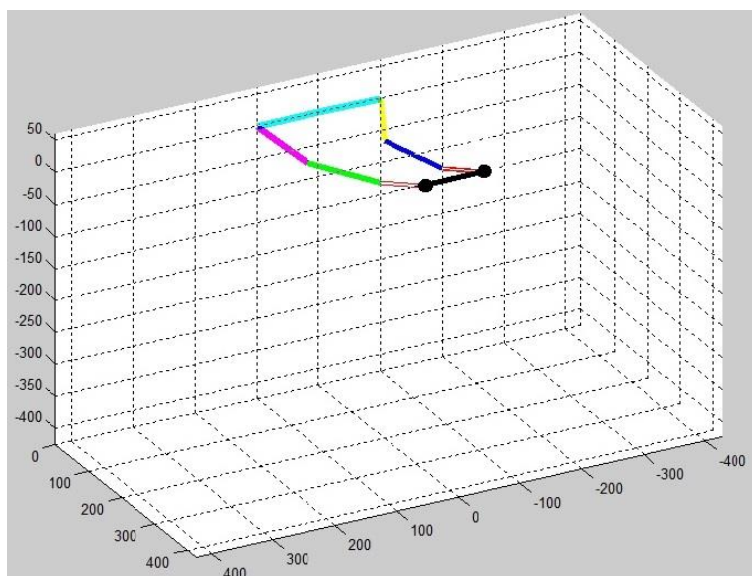


37 pav. Dvirankio roboto sinchronizuoto judesio valdymo algoritmas

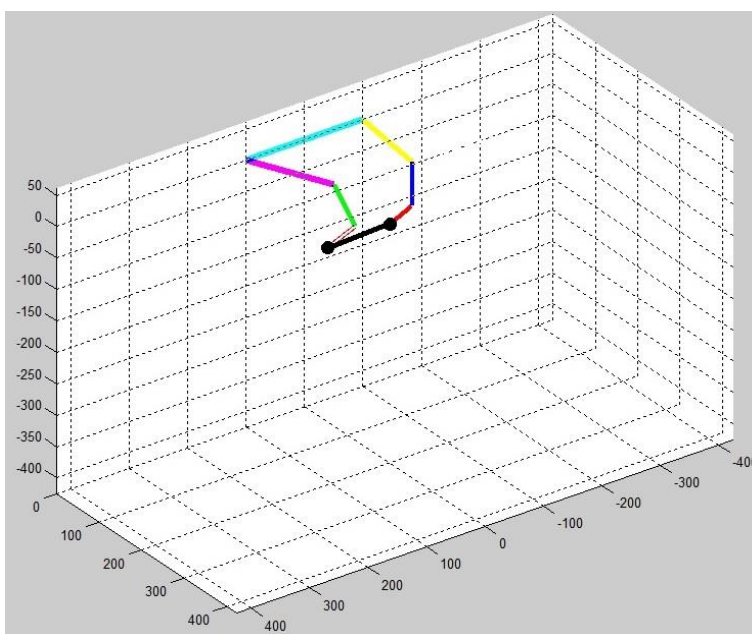
### 3.3. Dviejų roboto rankų modeliavimas virtualioje aplinkoje

Sudarytas supaprastintas dvirankio roboto virtualus modelis, kuriame pritaikius sinchronizuoto rankų judesio algoritmą galima perkelti objektą iš vienos padėties esančios roboto rankų darbinėje zonoje į kitą padėtį. Sinchronizuoto judesio valdymo algoritmas padeda išlaikyti atstumą tarp abiejų roboto rankų galinių taškų, jiems judant plokštumoje ar erdvėje.

Atlikti bandymai siekiant perkelti objektą pritvirtintą roboto rankų galiniuose taškuose iš pasirinkto pradžios taško (38 pav.), į pasirinktą galutinį tašką (39 pav.), išlaikant vienodą atstumą tarp rankų galų, nepriklausomai nuo rankų orientacijos.

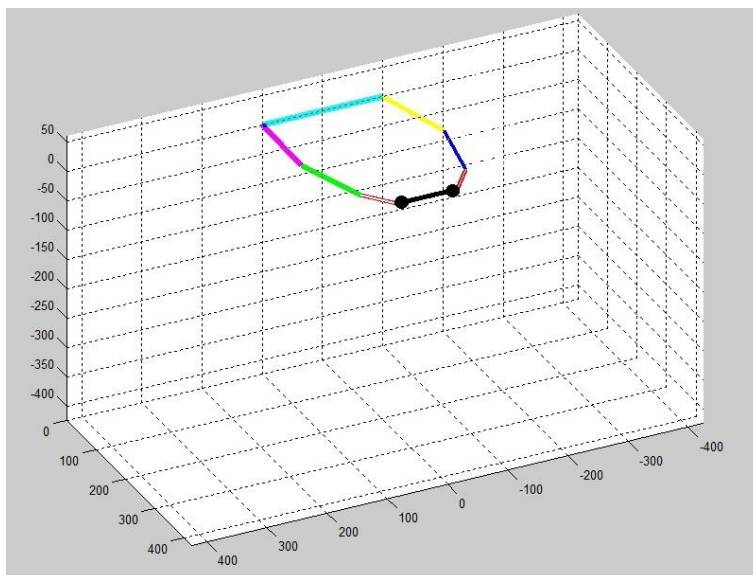


38 pav. Dvirankis robotas, laikantis objektą pradiniam taške



39 pav. Dvirankis robotas, laikantis objektą galutiniame taške

Dvirankio roboto sinchronizuoto judesio valdymo tyrimo metu pastebėta, kad roboto rankų sistemos analizei virtualioje aplinkoje nepakanka teorinių ir analitinių skaičiavimų. Atliekant modeliavimus gali atsirasti fiziškai neįgyvendinami sprendiniai, kurie realiame gyvenime būtų neįmanomi (40 pav.).



40 pav. Dvirankis robotas, neteisingai laikantis objektą

Tokiu atveju tiriant dvirankių robotų sistemas rekomenduojama, įvertinti naudojamą vykdymo bei valdymo įrangą: servo pavaras, jutiklius.

Šiame darbe buvo analizuojamas analitinis dvirankio roboto rankų judesio valdymas. Reikiama įranga šiam judesiui realizuoti bei griebtuvu orientacija, skirtingų objektų perkėlimui įgyvendinti nebuvo tiriama.

### 3.4. Skyriaus išvados

1. Išspręstas atvirkštinis kinematikos uždavinys 3 judrumo laipsnių roboto rankų sinchronizuotam judesiui tirti.
2. Sukurtas sinchronizuoto judesio valdymo algoritmas, leidžiantis nusistatyti roboto rankų grandžių posūkio kampus taip, kad būtų išlaikytas vienodas atstumas tarp galinių abiejų rankų taškų.
3. Sudaryti modeliai tiriant objekto perkėlimo galimybes naudojant dviejų roboto rankų sistemą.

## IŠVADOS

1. Naudojant dviejų roboto rankų sistemas galima atlikti žymiai daugiau užduočių (stambių objektų perkėlimas), kurios vieną ranką turintiems robotams yra per sudėtingos.
2. Lanksti roboto rankų konfigūracija užtikrina sklandų judėjimą, bei padeda manipuluoti objektus sudėtingose aplinkose.
3. Atlikta tiesioginės ir atvirkštinės kinematikos uždavinių analizė 6 judrumo laipsnius turinčiai roboto rankų sistemai parodė, kad tokių robotų modeliavimas yra sudėtingas procesas reikalaujanti nemažai žinių.
4. Šešis judrumo laipsnius turinčioms roboto rankų platformoms nėra taikomi analitiniai sprendimo būdai, todėl norint suprojektuoti tokią sistemą reikia įvirinti visus vykdymo bei valdymo įtaisus bei atlikti sudėtingus skaičiavimus.
5. Išspręstas atvirkštinis kinematikos uždavinys, skirtas roboto rankų grandžių posūkio kampams rasti. Gautos išraiškos panaudotos kuriant programos kodą.
6. Sukurtas sinchronizuoto judesio valdymo algoritmas, leidžiantis formuoti grandžių posūkio kampus taip, kad vektoriaus ilgis tarp rankų galų taškų būtų pastovus.
7. Sukurta programa skirta realizuoti sinchronizuota dviejų rankų judesio valdymą.
8. Atliktos simuliacijos, kuriu metu objektas įtaisytas tarp roboto rankų galinių taškų buvo perkeliamas iš pradžios taško į bet koki kitą pasirinktą tašką roboto darbo zonoje.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Dual arm robot. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2017-01-21. Prieiga per internetą: <<http://www.dualarmrobot.com/index.html>>.
2. Sukhan Lee., Byung-Wook Choi. *Frontiers of Assembly and Manufacturing*. Springer 2009, p. 8 ISBN 978-3-642-14115-7.
3. Samuel Rader, Lukas Kaul. *Design of a High-Performance Humanoid dual Arm System with Inner Shoulder Joints*, 2016. – 523-528 p., ISBN 978-1-5090-4717-8.
4. Feng Cao, Yuan Li, Guifang Zhang. *Novel humanoid dual-arm grinding robot*, 2016. – 32 p., ISBN 978-1 5090-6190-7.
5. Sami Ylönen. *Modularity in Service Robotics*. *Advances in Service Robotics*. In Teh, 2008. ISBN 9789537619022.
6. Jiaxin Zhai, Gen Pan, Weixin Yan. *Dynamic analysis of a dual-arm humanoid cooking robot*, 2015. – 835-836 p., ISBN 978-1-4799-8389-6.
7. Kazuhiro Kosuge. *Field and Service Robotics*. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2006, Vol. 24, 3-12 p.
8. Rodrigo S Jamisola, Petar Kormushev. *Modular relative Jacobian for dual-arms and the wrench transformation matrix*, 2015. – 181 p., ISBN 978-1-4673-7338-8.
9. Christian Smith, *Dual arm manipulation-A survey*. *Robotics and Autonomous Systems*. 2012, Vol. 60, Issue 10, 1341-1344 p.
10. Dvirankis robotukas. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2017-03-30. Prieiga per internetą: <<http://mashable.com/2014/01/27/wowwee-mip-review/#iWU4ImVnOgqQ>>.
11. Masahiro Ohka, Hanafial Bin Yussof. *Object-Handling Tasks Based on Active Tactile and Slippage Sensations*, 2011. ISBN 978-953-307-160-2.
12. Bruno Siciliano. *Advanced Bimanual Manipulation*. Springer 2012, p. 126. ISBN 978-3-642-29040-4.
13. Ching-Jui Wu, Kai-Tai Song. *Walking assist design of a dual-arm robot*, 2014. – 274 p., ISBN 978-1-4799-2837-8.
14. 5 DOF Educational Robot arm. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2017.04.15. Prieiga per internetą: <<https://pdfs.semanticscholar.org/4620/367f3910742c8e3c2ec5228859d03a32c731.pdf>>.
15. *Forward kinematics: The denavit-hartenberg convention*. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2017.04.15. Prieiga per internetą: <<https://www.cs.duke.edu/brd/Teaching/Bio/asmb/current/Papers/chap3-forward-kinematics.pdf>>.

16. 6-DOF Robot Manipulator. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2017.05.05. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=57cd4b20615e274c742de265&assetKey=AS%3A402906919522304%401473071903479>.
17. Sturm J. Approaches to Probabilistic Model Learning for Mobile Manipulation Robots. Springer 2013, p. 82. ISBN 978-3-642-37160-8.
18. 2. Bakšys B., Fedaravičius A. Robotų technika. Technologija, Kaunas, 2004. ISBN 9955-09-802-3.

## **PRIEDAI**



# 1. DVIRANKIO ROBOTO SINCHRONIZUOTO JUDESIO VALDYMO PROGRAMA

```

% Dvirankio roboto sinchronizuoto judesio valdymo modelis
clc; % išvalomas užduočių? langas.
clf; % išvalomas grafikų? langas.
% f = FK(DH,w,symbolic,from,to)- FK tiesiogines kinematikos sprendimo funkcija
% [alpha, a, d, teta].
% kairiosios roboto rankos D-H parametrai (tiesioginio kinematikos
% uždavinio sprendimas
DH_L = [0, 100, 0, pi; % pirma jungtis (roboto bazės taškas)
        0, 140, 0, 0; % antra jungtis
        0, 125, 0, 0; % trečia jungtis
        0, 60, 0, 0; % ketvirta jungtis
        0, 0, 0, pi/2]; % jungtis, papildomai griebtuvo integracijai
% dešinės rankos DH parametrai
DH_R = [0, -100, 0, pi/2; % pirma jungtis (roboto bazės taškas)
        0, 140, 0, 0; % antra jungtis
        0, 125, 0, 0; % trečia jungtis
        0, 60, 0, 0; % ketvirta jungtis
        0, 0, 0, -pi/2]; % jungtis, papildomai griebtuvo integracijai

% Nusistatomi kairiosios ir dešinėsios rankų? grandžių? ilgiai
a0_L=DH_L(1,2);
a1_L=DH_L(2,2);
a2_L=DH_L(3,2);
a3_L=DH_L(4,2);
a4_L=DH_L(5,2);
a0_R=DH_R(1,2);
a1_R=DH_R(2,2);
a2_R=DH_R(3,2);
a3_R=DH_R(4,2);
a4_R=DH_R(5,2);
w = ['r';'r';'r';'r']; % naudojant funkcija r nustatomi grandžių tipai: visi sukamieji
symbolic =0;
xx=0;
yy=0;
plane = [0; 0; 0; 1]; % nurodomos nulinės bazės koordinatės
maxxyz=abs(DH_L(1,2))+DH_L(2,2)+DH_L(3,2)+DH_L(4,2); % randamas maksimalus rankos ilgis
h4 = axes('position', [ .1 0.1 .8 .8]);
axis([-maxxyz maxxyz 0 maxxyz -maxxyz DH_L(4,2)]) % nurodomos X,Y,Z ašių? ribos
axis equal % grafikų ašys vienodo mastelio
view([0,1,1]); % view([1,1,1])
grid on

%----- objektai braižymui bar , hinge arba path .
data = [0 0; 0 1;0 1] ; % galo taškų? koordinatės
data0_L= [0 0 ; 0 1; 0 1] ; % xy centro
data0_R= [0 0 ; 0 1; 0 1] ; % xy centro

% kairės rankos braižymas
bar0_L =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',5, 'color', 'cyan', '
erase', 'xor');
bar1_L =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',5, 'color', 'Magenta
', 'erase', 'xor');
bar2_L =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',4, 'color', 'g', 'era
se', 'xor');
bar3_L =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',3, 'color', 'r', 'era
se', 'xor');

```

```

bar4_L =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',2, 'color', 'r', 'erase', 'xor');
htrail = line(xx,yy, 'marker', '.', 'color', 'white', 'erase', 'none') ;

% dešinas rankos braižymas
bar0_R =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',5, 'color', 'cyan', 'erase', 'xor');
bar1_R =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',4, 'color', 'y', 'erase', 'xor');
bar2_R =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',3, 'color', 'b', 'erase', 'xor');
bar3_R =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',3, 'color', 'r', 'erase', 'xor');
bar4_R =
line('xdata',data(1,:), 'ydata',data(2,:), 'zdata',data(3,:), 'linewidth',1, 'color', 'r', 'erase', 'xor');

% konstantų skaičiavimas
% randamos kairės rankos konstantos
aa0_L=a1_L;
aa1_L=a2_L;
aa2_L=a3_L;
aa3_L=a4_L;
b01_L=-aa1_L*(aa0_L+aa2_L);
b02_L=b01_L^2;
b03_L=4*aa0_L*aa2_L;
b04_L=aa0_L*aa0_L+aa1_L*aa1_L+aa2_L*aa2_L-2*aa0_L*aa2_L;

% randamos dešinės rankos konstantos
aa0_R=a1_R;
aa1_R=a2_R;
aa2_R=a3_R;
aa3_R=a4_R;
b01_R=-aa1_R*(aa0_R+aa2_R);
b02_R=b01_R^2;
b03_R=4*aa0_R*aa2_R;
b04_R=aa0_R*aa0_R+aa1_R*aa1_R+aa2_R*aa2_R-2*aa0_R*aa2_R;

ra = aa0_L+aa1_L+aa2_L;% apskaičiuojamas maksimalus rankos ilgis
% nustatomos ribos linijiniam judėjimui
dx=0.06; % linijinio judesio žingsnis
dy=20;

% sąlyga judesiui X ašies kryptimi
for xx = (-ra+a0_L)/1:dy:(ra+a0_L)/1 % yy=yylim:-dy:0
    xxa_L =xx-a0_L+50;
    xxa_R =xx-a0_R-50;

% sąlyga judesiui y ašies kryptimi
for yy = ra:-dy:0 % xx=-xlim:dy:xlim
    LAIF_L = 0;
    LAIF_R = 0;
    axy_L = xxa_L*xxa_L+yy*yy;
    axy_R = xxa_R*xxa_R+yy*yy;
    r_L = sqrt(axy_L);
    r_R = sqrt(axy_R);
    posa_L= b02_L-b03_L*(b04_L-axy_L);% pošaknis ir jo teigiamumas
    posa_R= b02_R-b03_R*(b04_R-axy_R);% pošaknis ir jo teigiamumas

% kairiosios rankos kampų? skaičiavimas (sprendžiamas atvirkštinis uždavinys)
if posa_L >= 0 && r_L <= ra % ar pasiekia ranka tašką
    B12p_L = (b01_L+sqrt(posa_L))/b03_L;
    tetabp_L = sign(-xxa_L)*acos(B12p_L); %
    if tetabp_L > -pi/2 && tetabp_L < pi/2 %
        tetabm_L = acos(B12p_L);
        fi_L = atan(yy/xxa_L);

```

```

    xg_L = aa0_L+aa1_L*cos(tetabp_L)+aa2_L*cos(2*tetabp_L);
    yg_L = aa1_L*sin(tetabp_L)+aa2_L*sin(2*tetabp_L);
    fig_L = atan(yg_L/xg_L);
% teta kampas kai projekcija pasukta taip, kad a1 sutaptu su X ašimi
    teta00_L = fi_L-fig_L;
    if tetabp_L > 0
        teta00_L = pi+fi_L-fig_L;
    end
    if teta00_L > 0 && teta00_L < pi % pirmo kampo sukimosi ribos
% surasti kampai priskiriami D-H parametrams
        DH_L(1,4) = teta00_L;
        DH_L(2,4) = tetabp_L;
        DH_L(3,4) = tetabp_L;
        DH_L(4,4) = pi/4;
% Skaičiuojamas tiesioginis uždavinys
        to=0;
        for from=1:5
            f = FKmod(DH_L,w,symbolic,from,to);
            tool_L(:,from) = f*plane;
        end
        LAIF_L=1;
    end % Pabaiga, kai teta12 telpa tarp -pi/2 ir pi/2
end % Pabaiga, kai teta yra tarp 0 ir pi
end % Pabaiga, kai pošaknis teigiamas

% dešinės rankos kampu? skaičiavimas (sprendžiamas atvirkštinis uždavinys)
if posa_R >= 0 && r_R <= ra % ar pasiekia ranka taška
    B12p_R = (b01_R+sqrt(posa_R))/b03_R;
    tetabp_R = sign(-xxa_R)*acos(B12p_R); %
    if tetabp_R > -pi/2 && tetabp_R < pi/2 %
        tetabm_R = acos(B12p_R);
        fi_R = atan(yy/xxa_R);
        xg_R = aa0_R+aa1_R*cos(tetabp_R)+aa2_R*cos(2*tetabp_R);
        yg_R = aa1_R*sin(tetabp_R)+aa2_R*sin(2*tetabp_R);
        fig_R = atan(yg_R/xg_R);
% teta kampas kai projekcija pasukta taip, kad a1 sutaptu su X ašimi
        teta00_R = fi_R-fig_R;
        if tetabp_R > 0
            teta00_R = pi+fi_R-fig_R;
        end
        if teta00_R > 0 && teta00_R < pi % pirmo kampo sukimosi ribos
% surasti kampai priskiriami D-H parametrams
            DH_R(1,4) = teta00_R;
            DH_R(2,4) = tetabp_R;
            DH_R(3,4) = tetabp_R;
            DH_R(4,4) = pi/4;
% Skaičiuojamas tiesioginis uždavinys
            to=0;
            for from=1:5
                f = FKmod(DH_R,w,symbolic,from,to);
                tool_R(:,from) = f*plane;
            end
            LAIF_R=1;
        end % Pabaiga, kai teta12 telpa tarp -pi/2 ir pi/2
    end % Pabaiga, kai teta yra tarp 0 ir pi
end % Pabaiga, kai pošaknis teigiamas

% Braižomas modelis, jei tenkinama sąlyga ir abi rankos nepažeidė? ribų?
if LAIF_L == 1 && LAIF_R == 1
    data0_L(1,2)=tool_L(1,1);
    data0_L(2,2)=tool_L(2,1);
    data0_L(3,2)=tool_L(3,1);
    set(bar0_L, 'xdata', data0_L(1,:), 'ydata', data0_L(2,:), 'zdata',
data0_L(3,:));
    set(bar1_L, 'xdata', tool_L(1,1:2), 'ydata', tool_L(2,1:2),'zdata',
tool_L(3,1:2));
    set(bar2_L, 'xdata', tool_L(1,2:3), 'ydata', tool_L(2,2:3),'zdata',
tool_L(3,2:3));
    set(bar3_L, 'xdata', tool_L(1,3:4), 'ydata', tool_L(2,3:4),'zdata',
tool_L(3,3:4));

```

```

        set(bar4_L, 'xdata', tool_L(1,3:5), 'ydata', tool_L(2,3:5), 'zdata',
tool_L (3,3:5));
        set(htrail, 'xdata', xxa_L, 'ydata', yy);

        data0_R(1,2)=tool_R(1,1);
        data0_R(2,2)=tool_R(2,1);
        data0_R(3,2)=tool_R(3,1);
        set(bar0_R, 'xdata', data0_R(1,:), 'ydata', data0_R(2,:), 'zdata',
data0_R(3,:));
        set(bar1_R, 'xdata', tool_R(1,1:2), 'ydata', tool_R(2,1:2), 'zdata',
tool_R (3,1:2));
        set(bar2_R, 'xdata', tool_R(1,2:3), 'ydata', tool_R(2,2:3), 'zdata',
tool_R (3,2:3));
        set(bar3_R, 'xdata', tool_R(1,3:4), 'ydata', tool_R(2,3:4), 'zdata',
tool_R (3,3:4));
        set(bar4_R, 'xdata', tool_R(1,3:5), 'ydata', tool_R(2,3:5), 'zdata',
tool_R (3,3:5));
        drawnow
        pause(0.5)
    end
end
end

```