



Dāvis Meike

**INDUSTRIĀLIE ROBOTI
AUTOMATIZĒTĀS
RAŽOŠANAS IEKĀRTĀS**

Rīgas Tehniskā universitāte
Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Dāvis MEIKE

**INDUSTRIĀLIE ROBOTI AUTOMATIZĒTĀS
RAŽOŠANAS IEKĀRTĀS**

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Dāvis Meike. Industriālie roboti automatizētās ražošanas iekārtās.
RTU Izdevniecība, 2023, 224 lpp.

Šī grāmata sniedz ievadu industriālās robotikas nozarē. Tajā aptverti gan šīs jomas teorētiskie, gan praktiskie aspekti. Grāmatā aplūkots robotu lietojums lielās un mazās ražošanas iekārtās. Tā ļaus iedziļināties robotu tehniskajā uzbūvē un pārliecināties par to darbību. Grāmata paredzēta robotikas studentiem, taču tajā sniegtās vadlīnijas robotu drošai integrācijai sarežģītākās sistēmās būs noderīgas arī nozares speciālistiem.

Zinātniskais redaktors: profesors *Dr. habil. sc. ing.* Leonīds Ribickis, Rīgas Tehniskā universitāte

Literārā redaktore: Inga Gulbe
Datortāls: Dāvis Meike
Vāka dizains: Paula Lore
Vāka attēls: Jenson/Shutterstock.com

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2023
© Dāvis Meike, 2023

ISBN 978-9934-22-952-7 (print)
ISBN 978-9934-22-938-1 (pdf)

Priekšvārds

Industriālā robotika būtiski atšķiras no robotiem mājsaimniecībās un zinātniskās fantastikas. Kā atsevišķa nozare tā attīstījās 20. gadsimta 80. gados, kad strauji pieauga ražošanas automatizācija, izmantojot universāli lietojamus industriālos robotus. Agrīnās prognozes ilustrēja rūpnīcas bez cilvēkiem un bezrūpīgas mājsaimniecības ar robotiem – palīgiem jau ap tūkstošgades miju. Šodien šādas prognozes var šķist visai naivas, jo cilvēka darbības ir daudz universālākas un robotizētas iekārtas un iekārtas joprojām ir sarežģītas.

Taču industriālo robotu skaits katru desmitgadi ir audzis nepārtraukti, un eksponenciāls pieaugums novērojams tieši pēdējos gados. Robotu lietošana vienkāršojas ar katru jaunu robotu paaudzi, jo tiek uzlabota robotu mehānika, parādās arvien modernāka programmatūra, iekļaujot arī mākslīgā intelekta risinājumus, tiek ieviesti un precizēti starptautiski standarti, kā arī samazinās robotu sistēmu relatīvās izmaksas.

Šī grāmata sniedz ievadu industriālās robotikas nozarē – gan teorijas aspektos, gan praktiskajā lietošanā. Tā paredzēta robotikas studentiem, kā arī nozares speciālistiem zināšanu atsvaidzināšanai. Pirmajā nodaļā izklāstīta lietotā terminoloģija, definīcijas, ilustrēts robotu lietojums un būtiskākie to tipi. Otrā nodaļa sniedz ieskatu mūsdienīga industriālā robota sistēmas tehniskajā uzbūvē. Trešā nodaļa ar piemēriem aptver izplatītākās matemātiskās modelēšanas metodes robotu manipulatoriem. Ceturtajā nodaļā analizētas kustību vadības metodes. Savukārt pēdējā nodaļā apskatīti drošas robotizētas ražošanas iekārtas plānošanas paņēmieni saskaņā ar spēkā esošajiem starptautiskajiem standartiem.

SATURS

| | |
|--|-----------|
| 1. Ievads industriālajā robotikā | 7 |
| 1.1. Industriālais robots | 7 |
| 1.1.1. Definīcijas | 8 |
| 1.1.2. Klasifikācija | 9 |
| 1.1.3. Robotu izveides vēsture | 17 |
| 1.1.4. Tirgus un nozares apskats | 24 |
| 1.2. Robotu lietojuma piemēri | 31 |
| 1.2.1. Metālapstrāde un industriālā ražošana | 32 |
| 1.2.2. Vispārējā industrija | 40 |
| 2. Robotu sistēmas | 44 |
| 2.1. Mehāniskā uzbūve un apzīmējumi | 44 |
| 2.1.1. Kinemātiskā ķēde | 44 |
| 2.1.2. Apzīmējumi un shematiskā uzbūve | 46 |
| 2.1.3. Kinemātikas veidi | 47 |
| 2.1.4. Manipulatora koordinātu sistēmas un rotācijas | 51 |
| 2.1.5. Koordinātu sistēmas industriālajā robotikā | 54 |
| 2.2. Piedziņa robotu sistēmās | 56 |
| 2.2.1. Elektriskā mašīna | 57 |
| 2.2.2. Elektrisko mašīnu vadība | 61 |
| 2.2.3. Pozīcijas mērsistēmas | 66 |
| 2.2.4. Pārvaldes sistēma | 72 |
| 2.3. Vadības sistēmas uzbūve | 76 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 2.3.1. | Vadības sistēmas komponenti | 77 |
| 2.3.2. | Programmas ievades metodes | 79 |
| 2.3.3. | Galvenās drošības funkcijas | 82 |
| 2.4. | Nākotnes attīstības tendences | 85 |
| 3. | Manipulatoru matemātiskā modelēšana | 90 |
| 3.1. | Koordinātu sistēmas transformācija | 90 |
| 3.1.1. | Rotācija | 91 |
| 3.1.2. | Pilna rotācija un Eilera leņķi | 92 |
| 3.1.3. | Taisnvirziena kustība un pilna transformācija . | 96 |
| 3.2. | Tiešā kinemātika | 98 |
| 3.2.1. | Analītisks aprēķins 2D robotam | 98 |
| 3.2.2. | Denavita-Hartenberga konvencija | 99 |
| 3.2.3. | Aprēķinu piemērs <i>SCARA</i> robotam | 104 |
| 3.2.4. | Aprēķinu piemērs sešu asu robotam | 107 |
| 3.2.5. | Instrumenta virziens un koordinātas | 112 |
| 3.3. | Inversā kinemātika | 114 |
| 3.3.1. | Ģeometriskais aprēķins plaknē | 115 |
| 3.3.2. | Inversās kinemātikas aprēķins telpā | 118 |
| 3.4. | Kustību kinemātika | 119 |
| 3.4.1. | Analītisks aprēķins 2D robotam | 122 |
| 3.4.2. | Aprēķinu piemērs <i>SCARA</i> robotam | 123 |
| 3.4.3. | Aprēķinu piemērs sešu asu robotam | 127 |
| 4. | Robotu vadība | 130 |
| 4.1. | Kustību plānošana | 130 |
| 4.1.1. | Kustību plānošanas problēmu klasifikācija . . . | 130 |
| 4.1.2. | Programmas uzbūve un izpildes kontrole | 133 |
| 4.1.3. | Interpolācija | 137 |
| 4.2. | Kustību tipi | 139 |
| 4.2.1. | No punkta uz punktu | 139 |
| 4.2.2. | Taisnvirziena kustība | 140 |
| 4.2.3. | Kustība pa riņķa līniju vai loku | 141 |

| | | |
|-------------------|--|------------|
| 4.2.4. | Laidenā punktu pāreja | 143 |
| 4.2.5. | <i>SPLINE</i> funkcija | 143 |
| 4.3. | Kustību profilu aprēķina metodes | 146 |
| 4.3.1. | Minimālā laika kustību profils | 148 |
| 4.3.2. | Trapeces tipa profils | 149 |
| 4.3.3. | Vairāku asu sinhronizācija | 152 |
| 4.3.4. | Profila aprēķins ceļa kustībām | 155 |
| 4.4. | Seriālo manipulatoru specifiskas problēmas | 156 |
| 4.4.1. | Nenoteikti stāvokļi un singularitāte | 156 |
| 4.4.2. | Precizitātes indikatori | 161 |
| 4.4.3. | Kalibrēšana | 165 |
| 5. | Robotizētas ražošanas iekārtas plānošana | 171 |
| 5.1. | Robotu integrācija ražošanas procesā | 171 |
| 5.1.1. | Automatizācijas piramīda | 171 |
| 5.1.2. | Robotu sistēmas plānošana un uzstādīšana | 173 |
| 5.1.3. | Digitālā modelēšana un simulācija | 179 |
| 5.1.4. | Cilvēka un robota sadarbība | 182 |
| 5.2. | Automatizētas iekārtas drošums | 184 |
| 5.2.1. | Drošības standarti un to iedalījums | 185 |
| 5.2.2. | Iekārtas apdraudējuma riska novērtēšana | 188 |
| 5.2.3. | Funkcionālā drošība | 191 |
| 5.2.4. | Industriālo robotu drošības prasības | 199 |
| Pielikumi | | 207 |
| 1. | pielikums. Saīsinājumi | 207 |
| 2. | pielikums. Matemātiskais pieraksts | 209 |
| 3. | pielikums. Matricu operācijas | 210 |
| 4. | pielikums. Vektoru algebra | 214 |
| Literatūra | | 219 |

1. | IEVADS INDUSTRIĀLAJĀ ROBOTIKĀ

Robots ir mehāniska ierīce vienveidīga un monotona darba veikšanai. Par industriālo robotu sauc universālu, programmējamu darba iekārtu, kas paredzēta industriālajai ražošanai un sastāv no elektromehāniska manipulatora un tā vadības sistēmas jeb kontrollera. Kad iekārta vienreiz ir ieprogrammēta, tā paredzēto darbu var darīt patstāvīgi ilgu laiku.

Kā cilvēce ir nonākusi līdz industriālo robotu plašai lietošanai, kā tos iedala un kādās apakšnozarēs robotus lieto mūsdienās, ir izklāstīts 1.1. nodaļā. Specifiski industriālo robotu lietojumu veidi apskatīti 1.2. nodaļā, sniedzot tehnoloģiju piemērus no ražošanas uzņēmumiem.

1.1. Industriālais robots

Pastāv dažādas industriālā robota un to saistīto terminu definīcijas. Šajā grāmatā lietotie termini un to pieņemtie skaidrojumi doti 1.1.1. nodaļā. Robotu klasifikācija aplūkota 1.1.2. nodaļā. Automatizācijai, kas veicinājusi industriālo robotu izgudrošanu, ir sena priekšvēsture. 1.1.3. nodaļā apskatīti būtiskākie seno un jaunāko laiku vēstures pagrieziena punkti. Šodien pastāv vairāki industriālo robotu ražotāji un ir pieejami dažādu veidu un izmēru roboti. Industriālā robotika kā tirgus nozare analizēta 1.1.4. nodaļā.

1.1.1. Definīcijas

Industriālie roboti reti ir lietderīgi vieni paši. Gandrīz vienmēr tie aprīkoti ar papildaprīkojumu, un tie ir iekļauti kādā lielākā sistēmā. Industriālajā robotikā lietoto terminu skaidrojumi sniegti 1.1. tabulā, kas papildināti pēc *ISO 10218-1* [1].

1.1. tabula. Industriālās robotikas terminu skaidrojums

| | |
|---|--|
| Industriālais robots | Automātiski vadāms, daudzfunkcionāls manipulators ar trim vai vairāk asīm, programmējams, kas var būt fiksēts vai mobils lietošanai industriālā automatizācijā. |
| Manipulators, robota manipulators | Fiziska daļa no robota, kas mijiedarbojas ar apkārtējo vidi jeb robota kustīgā daļa, kas veic mehānisku darbu. |
| Industriālā robota sistēma | Robota sistēma sastāv no industriālā robota, instrumenta, citām mašīnām un perifērijas iekārtām, papildu asīm, kas palīdz robotam veikt darba uzdevumu. |
| Automatizēta darbstacija, robotizēta darbstacija | Automatizēta darbvietā ar vienu vai vairākām robotu sistēmām, darbgaldū, mašīnām un instrumentiem. |
| Industriālo robotu šūna | Viena vai vairākas robotu sistēmas un mašīnas, kas atrodas vienā drošības zonā. |
| Industriālo robotu līnija | Vairākas robotu šūnas, kas atrodas kopējā drošības zonā vai saistītās drošības zonās. |
| Robotizēta ražošanas iekārta | Industriālo robotu un citu mašīnu grupa, kas strādā vienotā koordinētā veidā ar saķēdētu materiālu plūsmu, vienotu vadības sistēmu, lai veiktu ražošanas uzdevumu. |

Pēc Starptautiskās standartizācijas organizācijas (*ISO*) industriālais robots ir definēts kā automātiski vadāms, programmējams multifunkcionāls manipulators ar trim vai vairāk asīm, kas var būt fiksēts punktā vai mobils lietošanai industriālajā automatizācijā [2]. Būtiski ir arī noskaidrot, kas pēc *ISO* definīcijas nav robots. Robots nav programmatūras algoritmi, mākslīgais intelekts, *RPA* sistēmas (angļu val. *robot process automation*), balss komandu asistenti, autonomie auto un

viedā sadzīves elektrotehnika. Par **manipulatoru** sauc robota mehānisko, kustīgo daļu, ko robotikas kontekstā nereti lieto kā industriālā robota sinonīmu.

Starptautiskajos standartos plaši lietots termins **mašīna**. Pēc Eiropas Parlamenta direktīvas *2006/42/EG* mašīna ir vispārīgi definēta kā īpaša lietojuma nolūkā savienoto detaļu vai sastāvdaļu kopums, no kurām vismaz viena kustas, kas aprīkots ar tādu piedziņas sistēmu, kurā netiek tieši lietots cilvēka vai dzīvnieka spēks [3]. Tātad mašīna ir vispārīgāks termins, un visi 1.1. tabulā uzskaitītie jēdzieni no industriālā robota līdz robotizētai ražošanas iekārtai ir mašīnas, taču ne visas mašīnas ir saistītas ar robotiem. Par mašīnām var apzīmēt ar enerģiju darbināmus mehāniskus darbgaldus (frēzes, šujmašīnas, u. c.) un transportlīdzekļus (piemēram, automobiļus).

1.1.2. Klasifikācija

Industriālos robotus var analizēt un iedalīt pēc dažādiem kritērijiem. Vispārīgi robotus raksturo:

- tā spēja pašam kustēties un kustināt citus objektus;
- tā sastāvdaļas – rokas, locītavas, izpildmehānismi, lai pārvietotu citus objektus;
- ja robots ir mobils, tam ir riteņi, kājas sauszemei, spārni/propelleri gaisa kuģiem vai dzenskrūve kustībai ūdenī;
- vadības sistēma jeb kontrolleris;
- sensori.

Balstoties uz robotu spējām un iezīmēm, tos var iedalīt dažādās kategorijās. Robota spējas būtiski var palielināt sensoru kopums, no kuriem daži sensori ir teju katrā robota uzbūvē, bet daži ir lietojumam specifiski sensori. Industriālajā robotikā visbiežāk sastopamo sensoru saraksts sastāv no:

- pozīcijas devējiem – locītavu pozīciju noteikšanai, mobilajiem robotiem – globālās pozicionēšanas sensoriem (*GPS*);
- sensoriem taustes, pieskāriena un spēka momenta mērīšanai;
- ierīces distances mērīšanai;

- digitālā redzes un dzirdes – krāsu, formu un kustību noteikšanai;
- temperatūras vai mitruma sensoriem vides noteikšanai;
- strāvas un sprieguma sensoriem.

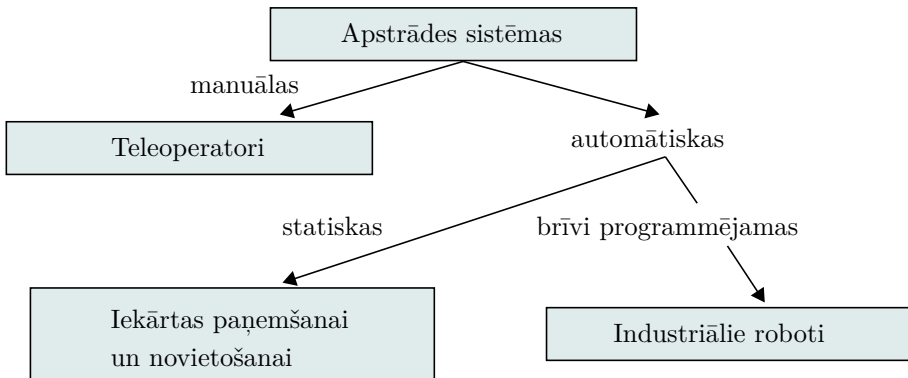
Turpmāk sniegts ieskats izvēlētajās robotu iedalījuma kategorijās. Saraksts nepretendē uz pilnību, kategorizēšana robotiem iespējama arī tehniski daudz detalizētākā līmenī, piemēram, viena ražotāja produktu ietvaros, viena robota tipa ietvaros vai tamlīdzīgi.

► Iedalījums pēc autonomijas

Vispārīgi apstrādes sistēmas var iedalīt **manuālās** jeb ar roku vadāmās un **automātiskās** apstrādes sistēmās, kā parādīts 1.1. attēlā. Ar manuāli vadāmām sistēmām saprot teleoperatorus, kuru uzbūve vizuāli nereti līdzinās industriāla robota rokai, taču tā vadības sistēma nav piemērota automātisku darbu veikšanai. Teleoperatorus nereti definīcijai neatbilstoši sauc arī par **attālināti vadāmiem robotiem**, kur jau nosaukumā ietverts, ka iekārta tiek vadīta attālināti. Piemēri iekļauj mobilas ierīces bīstamu objektu meklēšanai attālināti, radioaktīvu vielu pārvietošanu, lielparātņu lidaparātu tīrīšanu. Automātiski vadītas ierīces var dalīt pēc to fleksibilitātes – cik tās ir brīvi programmējamas. Iekārtu, kas tikai spēj pārvietot detaļas no vienas montāžas līnijas uz otru, nevar uzskatīt par robotu. Roboti atšķiras ar savu universālumu – tos var izmantot gan detaļu pārvietošanai, gan detaļu apstrādei, tikai mainot instrumentu.

► Iedalījums pēc robotu paaudzes





Pēc to **spēju kopuma** robotus var iedalīt četrās paaudzēs (skat. 1.2. tab.). Pirmie roboti visbiežāk bija mehāniskas ierīces, nereti ar hidraulisko piedziņu, kuras spēja veikt vienkāršas kustības no punkta uz punktu. Tika izmantoti tikai visnepieciešamākie sensori, lai noteiktu precīzu asu pozīciju. Otrās robotu paaudzes laikā 70. gados parādījās speciālas robotu programmēšanas valodas, kuras izmanto arī mūsdienās. Manipulatori tika aprīkoti ar darba uzdevumam nepieciešamajiem sensoriem, tomēr robotu patstāvība bija zema. Industriālos robotus no 80. gadu vidus līdz šodienai pieskaita pie trešās paaudzes



1.1. attēls. Apstrādes sistēmas.

robotiem. Tajos, salīdzinot ar iepriekšējo paaudzi, programmēta tiek nevis visa iekārta, bet konkrēts darba uzdevums. Nepārtraukti ir augusi procesoru jauda, regulāri uzlabota mehānika, un ir sasniegta ļoti augsta autonomija. Cilvēkam līdzīgu inteligences līmeni roboti sasniegs ceturtajā paaudzē, kas no šodienas ražotāju perspektīvas ir ļoti vizionārs mērķis. Taču vairāki komercuzņēmumi ir izstrādājuši pēc mehāniskās uzbūves humanoīda tipa robotus, kurus varētu izmantot industriālajā ražošanā.

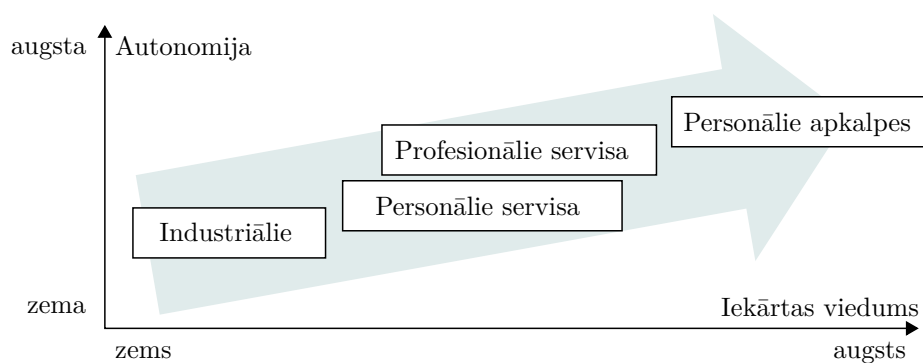
1.2. tabula. Robotu paaudzes

| | | | |
|---|---|---|--|
|  |  |  |  |
| 1. paaudze | 2. paaudze | 3. paaudze | 4. paaudze |
| programmējami | adaptīvi | autonomi | humanoīdi |
| 1960–1975 | 1976–1982 | kopš 1983 | nākotne |

► Iedalījums pēc autonomijas pakāpes

Robotus var iedalīt pēc to **autonomijas** un iekārtas **vieduma** jeb **inteligences pakāpes**, kas abi ir saistīti lielumi kā redzams 1.2. attē-

lā. Parasti lielāka autonomija novērojama viedākiem un sarežģītākiem robotiem. Pašreizējās paaudzes industriālajiem robotiem parasti jau iepriekš ir zināma uzdevumu izpildes gaita. Ražojamais objekts tiek pozicionēts noteiktā stāvoklī, noteiktā darba telpā un ar zināmu darbārīku. Automātiska, bet mazāk autonoma ir programmu izpilde, taču arī tā izveidota iepriekš un ir zināma. Tātad atsevišķa robota autonomija ir zema, kaut arī automatizācijas līmenis ražošanas iekārtā var būt augsts.



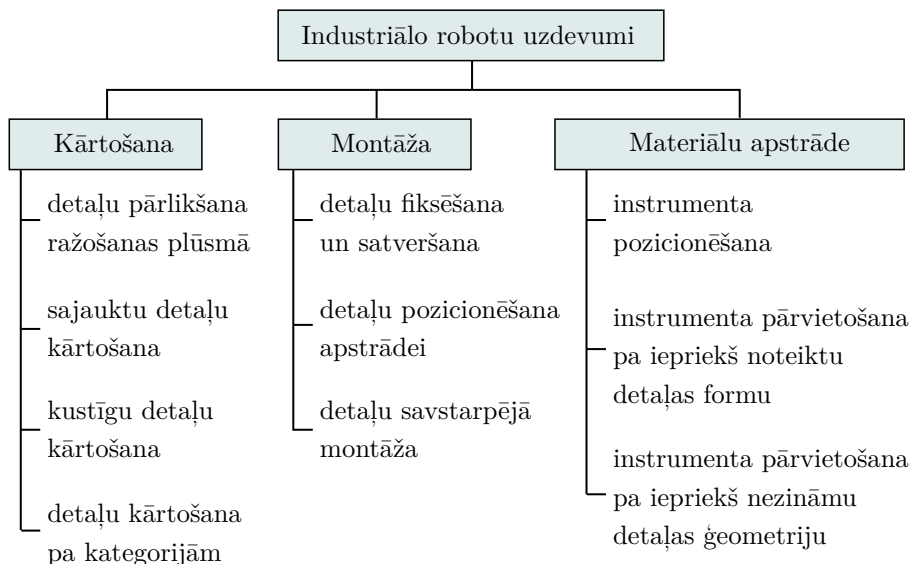
1.2. attēls. Robotu autonomija atkarībā no iekārtas vieduma.

Ja industriālos robotus galvenokārt izmanto ražošanā, tad **servisa robotus** lieto publiskajā telpā citiem, ar ražošanu nesaistītiem uzdevumiem. Servisa robotu programmu izpilde balstās uz multifunkcionālu sensoru datu apstrādi, to komandas nereti ir vispārīgas un plūstošas, kā arī programmēšana balstās uz vides un situācijas modeļa izveidi, kas būtiski palielina autonomijas pakāpi. Servisa robotus mēdz iedalīt **profesionālajos servisa robotos** un **personālajos servisa robotos**. Pie personālajiem servisa robotiem pieder tīrīšanas vai dārza roboti, kādi sastopami arvien lielākā skaitā mājāsaimniecībā.

Profesionālie servisa roboti pēc uzdevuma būtības ir līdzīgi, taču būtiski atšķiras to noslodze un darba telpa. Piemēram, profesionālo tīrīšanas robotu var izmantot publisko vai rūpniecības telpu tīrīšanai vai pat speciālu iekārtu, piemēram, saules paneļu tīrīšanai. Citi lietojuma piemēri iekļauj piegādes robotus, dezinfekcijas robotus, sociālos

robotus un automatizētos restorānus. Pēc statistikas datiem profesionālo servisa robotu apjoms ir strauji augošs, un tirgus lielāko daļu ieņem loģistikas un tīrīšanas roboti [4]. Servisa robotu autonomija ir atkarīga no darba uzdevuma, taču visos gadījumos iespējams kontakts ar cilvēku. Tādēļ servisa roboti ir aprīkoti ar sensoriem un drošības funkcijām, kādas nav nepieciešamas izolētiem robotiem.

Personālie apkalpes roboti sasniedz visaugstāko autonomijas un arī attīstības pakāpi. Personālajam apkalpes robotam darba uzdevums var ļoti atšķirties gan laikā, gan atkarībā no situācijas, tādēļ tiem jābūt augstai spējai interpretēt apkārtējo vidi un modelēt situāciju reālā laikā. Personālo robotu piemērs var būt klientu apkalpošana publiskās vietās, atbildot uz jautājumiem balss formā, interpretējot vispārīgas balss pavēles un uzdevumus.



1.3. attēls. Industriālo robotu darba uzdevumi.

► Iedalījums pēc darba uzdevuma

Mūsdienu industriālo robotu uzdevumu klāsts ražošanā visbiežāk ietver **kārtošanas**, **montāžas** vai materiālu **apstrādes** uzdevumus,

kā shematiski parādīts 1.3. attēlā. Detaļu vai produktu kārtošana nepieciešama ražošanas līnijas plūsmā, visbiežāk tā ir sajauktu produktu sakārtošana iepakojšanai vai tālākai apstrādei. Kārtošanas robots objektu satveršanai ir aprīkots ar vakuumsūkni vai speciālu satvērējierīci. Montāžas uzdevums bieži nozīmē detaļu fiksēšanu tās apstrādes laikā, kā arī pārlikšanu no vienas iekārtas citā (angļu val. *pick-and-place*). Montāžas robotu instruments ir individuāli pielāgots apstrādājamai detaļai, lai nodrošinātu ciešu un drošu satvērienu. Ja robots izmanto apstrādes instrumentu, kas montēts uz paša manipulatora, tad var teikt, ka robots **tiešā** veidā piedalās produkta apstrādē. Pretējā gadījumā robots darba veikšanā piedalās **netieši**. Apstrādes instruments ir dažāda veida mehāniskās (piemēram, urbšana) vai termiskās apstrādes iekārta (piemēram, metināšana). Robota darba uzdevums ir pozicionēt instrumentu telpā, vai arī pārvietot to pa noteiktu ceļu gar detaļu.

► Iedalījums pēc nozares

Industriālos robotus visbiežāk izmanto metālapstrādē un autoindustrijā, elektronikas ražošanā, loģistikā un pārtikas rūpniecībā. Vienus un tos pašus darba uzdevumus var veikt dažādās nozarēs. Piemēram, pārlikšanas jeb *pick-and-place* operācijas pēc būtības ir vienādas kā ražošanā, kur kādā procesa solī detaļa jānodod tālākai apstrādei, tā arī loģistikā, kur no konveijera gatavā produkcija jāsaliek uz paletes. Pārlikšanai izmanto universālus robotus, kas nav būtiski jāpielāgo darba videi. Taču bieži roboti būtiski atšķiras gan pēc lieluma, gan uzbūves tipa. Elektronikas ražošanā tipiski ir maza izmēra manipulatori, taču ar augstāku ātrumu un precizitāti, nekā tas novērojams lielas celjspējas palešu kārtošanas robotiem.

Ja robots ir daļa no ražošanas iekārtas, var analizēt šīs iekārtas autonomiju pēc 1.3. tabulā norādītajiem kritērijiem, kas ietver spēju mācīties un interpretēt situāciju, komunikācijas un kustību spējas.

Īpašs robotu veids ir **robotizēta asistentu sistēma**, ko parasti izmantoto ražošanā. Tā ir adaptīva, ar cilvēku sadarboties spējīga iekārta, kas ļauj efektīvi un ekonomiski sadalīt darbu starp cilvēku un

1.3. tabula. Augsti autonomas ražošanas sistēmas spējas

| | |
|--|--|
| <p style="text-align: center;">Intuitīva komunikācija starp cilvēku un mašīnu</p> <ul style="list-style-type: none"> - Laba komunikācija starp cilvēku un mašīnu arī sarežģītās situācijās. - Vairāku maņu izmantošana – valoda, haptika, redze jeb attēls. | <p style="text-align: center;">Situācijas analīze un interpretācija</p> <ul style="list-style-type: none"> - Apkārtnes uztveršana ar sensoru palīdzību. - Uzdevuma interpretācija attiecīgā kontekstā. |
| <p style="text-align: center;">Spēja mācīties un adaptivitāte</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zināšanu pārnese no cilvēka uz mašīnu. - Spēja patstāvīgi mācīties. | <p style="text-align: center;">Kustību plānošana un koordinācija</p> <ul style="list-style-type: none"> - Darba dalīšana atsevišķās kustībās. - Kustību plānošana, koordinācija, pielāgošanās mainīgai apkārtnei, situācijai. |

robotu daļēji kopīgā darba telpā. Robots daļēji strādā autonomi, taču noteiktas funkcijas attālināti vada operators.

► **Iedalījums pēc kinemātikas veida**

Robotu tipus var iedalīt pēc to mehāniskās uzbūves. Šajā iedalījumā eksistē divas grupas – seriālo un paralēlo kinemātisko ķēžu uzbūve. Katrā no tām ir vairāki apakštipi jeb manipulatora mehāniskās uzbūves veidi. Detalizēti šie tipi aplūkoti 2.1.3. nodaļā. Šajā grāmatā nav apskatīti eksotiski robotu uzbūves veidi, kādus lieto humanoīdos, čūskveida, lidojošos, peldošos u. c. robotos, kam nav būtiskas lomas industriālajā ražošanā.

► **Iedalījums pēc sadarbības spējas**

Robotu šūnas jeb vairāku industriālo robotu kopu var iedalīt arī pēc to spējas sadarboties. Šādus robotus sauc par **kooperatīvajiem robotiem**, un pārskats par tiem dots 1.4. tabulā. **Loģiskā sadarbība** šodien ir gandrīz jebkurā modernā ražošanas iekārtā, kas nozīmē, ka robots ir integrēts kopējā informācijas apmaiņā ar citiem robotiem vai vadības sistēmu un īsteno uzdevumus atkarībā no citu iekārtu stāvokļa un citiem robotiem. Piemēram, metināšanas robots sāks metināšanu

tikai tad, ja detaļa ir fiksēta. Detaļa tiek atbrīvota no fiksēšanas iekārtas tikai tad, kad metināšana ir pabeigta. Cits robots šo detaļu drīkst paņemt un pārlikt nākamajā iekārtā tikai tad, ja gan metināšana ir pabeigta, gan fiksēšanas iekārta to atļauj.

Ģeometriskā sadarbība ir novērojama tad, ja detaļas fiksēšana noris nevis speciālā darbgaldā, bet cita robota satvērējierīcē. Kamēr viens robots detaļu fiksē, kāds cits vai vairāki citi roboti to apstrādā. Šādā veidā iespējams paātrināt ražošanu, jo apstrādes laikā detaļa var būt arī kustībā. Pastāv priekšrocība, jo nav nepieciešama speciāla fiksēšanas iekārta (tikai attiecīga satvērējierīce robotam). Visiem iesaistītajiem robotiem ir precīzi jāzina citu robotu atrašanās pozīcija, un to kustībām jābūt sinhronizētām. Īpašs ģeometriskās sadarbības veids ir **smaguma dalīšana**, ja divi vai vairāk roboti sadarbojas nolūkā celt detaļu, kuras svars pārsniedz katra atsevišķā robota celtspēju. Piemēram, auto ražošanā tā iespējams pacelt visas automašīnas korpusu, ko nevar izdarīt viens robots.

1.4. tabula. Robotu sadarbības veidi

| | | | | |
|---|---|---|---|--|
|  |  |  |  |  |
| Loģiskā sadarbība | Ģeometriskā sadarbība | Smaguma dalīšana | Enerģijas apmaiņa | Cilvēka un robota sadarbība |
| vispārīga ražošanas funkcija | ražošanas laiks, investīciju samazinājums, telpas ietaupījums, fleksibilitāte | investīciju samazinājums, fleksibilitāte | enerģijas patēriņš, pieslēguma jaudas samazinājums | jauns lietojums, fleksibilitāte |

Var notikt robotu sadarbība nolūkā veikt **enerģijas apmaiņu** un celt robotu šūnas energoefektivitāti. Roboti var būt īpaši iestatīti tā, ka viena robota kustības uzsākšana (kustības paātrinājums) sakrīt ar cita robota kustības apstādināšanu (bremzēšanu), tādējādi realizējot

reģeneratīvās enerģijas nodošanu citiem robotiem. Šāds darbības režīms ir iespējams, ja eksistē attiecīga piedziņas sistēma ar spēju reku-perēt un nodot enerģiju elektriskajā tīklā [5]. Uzdevumu sinhronizācija ne vienmēr ir vienkārša un intuitīva, tādēļ attiecīgas paātrināšanās un bremzēšanas fāzes noris nejaušos laika momentos un nekoordinēti.

Īpašs industriālo robotu sadarbības veids ir **sadarbība ar cilvēku** kopējā darba telpā. Tāda tipa roboti ir aprīkoti ar ievērojami vairāk sensoriem – spēka momenta sensoriem uz asīm un haptiskiem sensoriem uz korpusa. Tos sauc arī par **kobotiem** (angļu val. *cobot*), un to īpašās uzbūves dēļ iespējams ievērojami samazināt apdraudējumu cilvēkam sadursmes gadījumā vai pat pilnībā to novērst. Kā lietojuma piemēru var minēt ražošanas mašīnu, kas paredzēta pastāvīgai izejmateriālu uzpildei. Šādu uzdevumu var veikt strādnieks, taču uzbūves dēļ mašīna (piemēram, metāla prese) var būt pārāk bīstama un rada apdraudējumu cilvēkam. Šādā situācijā starp mašīnu un cilvēku materiālu padeves zonā kā vidutāju var uzstādīt robotu. Plašāks ieskats par cilvēka un robota sadarbību sniegts 5.1.4. nodaļā. Par spīti pieaugošajai popularitātei, kobotu loma joprojām ir neliela – tie izmantoti tikai 3 % jaunuzstādīto robotizēto ražošanas iekārtu [4].

1.1.3. Robotu izveides vēsture

Tehnoloģijas un aspekti, kas veicinājuši robotikas attīstību, meklējami ražošanas automatizācijas pirmsākumos. Automatizācija ir aizsākusies ar mehāniskām ierīcēm kultūrā un zinātnē. Automātisku ierīču un kustīgu statuju pazīmes meklējamas senajā Ēģiptē un Grieķijā pat vairākus gadsimtus pirms mūsu ēras. Eiropā automatizācijas attīstība galvenokārt turpinājusies Francijā, Šveicē un Vācijā, kur izgatavotas mašīnas tekstila ražošanai. Kultūrā un zinātnē Eiropā radīti vairāki automātiski muzikālie *androīdi*, savukārt ASV tapušas tā saucamās *pianolas*.

Robotu priekšteči mūsdienu izpratnē radīti 20. gadsimta 60. gados – daudzas automātiski darbināmi manipulatori, sākotnēji ar pneimatis, drīz pēc tam arī ar elektrisko piedziņu. 80. gados būtiski uzlabojās

robotu vadības ierīces, bet 90. gados notika programmēšanas metožu un valodu attīstība. Turpmāk hronoloģiskā secībā minēti ievērojamākie pagrieziena punkti automatizācijas priekšvēsturē un mūsdienu robotikas vēstures attīstībā.

► Priekšvēsture

- 1738** Franču inženieris un izgudrotājs Žaks de Vokansons (*Jacques de Vaucanson*) uzbūvē automātisku flautas spēlētāju – mehānisku lelli cilvēka augumā. Izgudrotājs pazīstams arī ar robotizētas mehāniskas pīles izstrādi, kas sastāvēja no vairāk nekā 400 kustīgām detaļām.
- 1774** Šveices pulksteņmeistars Pjērs Žakē Drozs (*Pierre Jaquet Droz*) uzbūvē trīs androīdus – zīmētāju, rakstītāju un muzikantu. Androīdi ir aptuveni 70 cm augsti, un tiem ir kustīgas galvas, rokas un acis. Katra figūra varēja attiecīgi zīmēt, rakstīt vai spēlēt nelielas ērģeles. To programmas tika glabātas mehāniskos diskos ar izciļņiem. Figūras kļuva tik slavenas, ka vairāk nekā gadsimtu tās par maksu varēja apskatīt ceļojošā izstādē.
- 1805** Franču izgudrotājs Žozefs Marī Žakārs (*Joseph Marie Jacquard*) izstrādā automātisku aušanas mašīnu. Ar to bija iespējams aust jebkādas sarežģītības paraugus, kuru dati glabājās maināmās perfokartēs. Pēc sākotnējas amatnieku apvienību pretestības automātiskās aušanas mašīnas iegūst plašu popularitāti un iezīmē automatizācijas pirmsākumu tekstila industrijā.
- 1810** Vācu mūzikas instrumentu meistars Fridrihs Kaufmans (*Friedrich Kaufmann*) uzbūvē trompetes spēlētāju androīda formā ar uzvelkamu atsperes mehānismu.



a) Aušanas mašīna ar tekstila paraugiem kartona kartotēkās [6].



b) Perfokartes tika izmantotas kā mašīnas atmiņa [7].

1.4. attēls. Žakāra aušanas mašīna (19. gadsimta sākums).

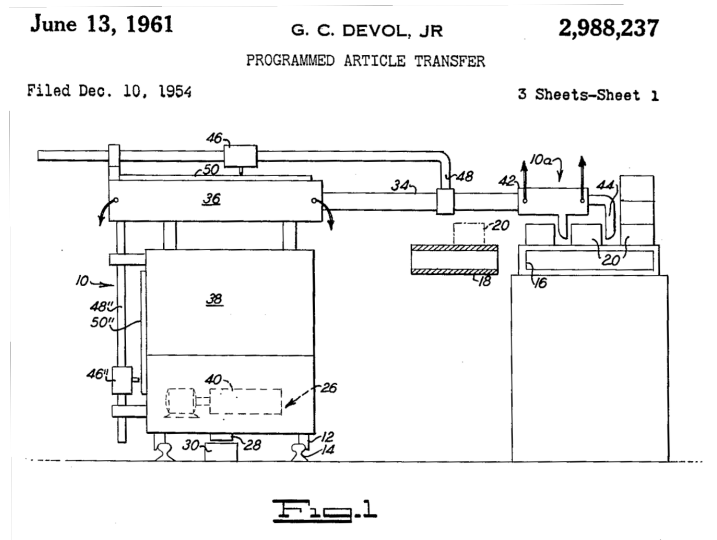
- 1854** ASV izgudrotājs Valters Hants (*Walter Hunt*) uzbūvē un patentē automātisku zīda vērpšanas mašīnu, kas ļauj būtiski samazināt roku darbu. Ar šī izgudrotāja vārdu saistīti vairāki desmiti patentu, tai skaitā automātiska ierīce naglu ražošanai, kā arī pazīstamākais – automātiskās pārlādēšanas šautene.
- 1892** Sevarda Babbits (*Seward Babbitt*) ASV patentē mehānisku manipulatora roku ar satvērējmehānismu, ar ko izņemt karstus lietņus no krāsnīm. Tas nav robots, taču to var uzskatīt par mūsdienu robota manipulatora priekšteci.
- 1895** Izstrādātas pirmās pianolas – aparatūra automātiskai klavieru spēlēšanai bez pianista, kuras nākamajos gados veiksmīgi ražo ASV uzņēmumi *M. Welte and Sons*, *Aeolian Company*, *Ampico* u. c. Notis tika uzglabātas perforētā papīra rullī. Pirmās pianolas bija atsevišķas iekārtas, kuras novietoja pianista vietā klavieru priekšā, taču vēlāk tehniku integrēja pašās klavierēs.

► Modernās robotikas attīstība

Mūsdienu robotu vēsture lielā mērā saistīta ar izgudrotāju Džordžu Devolu (*George Devol*) un viņa izstrādāto *Unimate* robotu, ko vispārīgi atzīst par pirmo un vecāko industriālo robotu.

- 1941** Čehu rakstnieks un tulks Karel Čapeks (*Karel Čapek*) pirmoreiz ievieš vārdu *robots* drāmā ar nosaukumu *R.U.R. (Rossumovi Universální Roboti)*. Vārds ir atvasināts no čehu valodas vārda *robot*, kas tulkojumā nozīmē "piespiedu darbs".
- 1942** Krievu-amerikāņu rakstnieks Aizeks Azimovs (*Isaac Asimov*) zinātniskās fantastikas stāstā *Runaround* nosaka trīs robotu likumus, kas vēlāk kļūst plaši pazīstami.
- 1946** ASV izgudrotājs Džordžs Devols (*George Devol*) iesniedz patentu ierīcei, kas spēj saglabāt informāciju magnētiskajā lentē. To ir iespējams atskaņot, lai iegūtu elektriskus signālus un vadītu kādu mašīnu.
- 1949** ASV inženieris Reimonds Gercs (*Raymond C. Goertz*) piesaka patentu Nr. *US2632574A* par attālināti ar roku vadāmu mehānisku manipulatoru [8].
- 1951** Izstrādāts ar roku vadāms manipulators – teleoperators darbam ar radioaktīviem materiāliem. Tā izgudrotāji Reimonds Gercs un Donalds Jukers (*Donald F. Uecker*) piesaka patentu Nr. *US2679940A*, kas apraksta elektriski vadāmu manipulatoru pāri pēc *master-slave* principa [9].
- 1954** Džordžs Devols iesniedz ASV Patentu birojā patentu Nr. *US2988237A* [10], kas apraksta automātiski vadāmu mašīnu un tās vadības sistēmu, kas lietojama materiālu apstrādē (skat. 1.5. att.).
- 1956** Uzņēmējs Džozefs Frederiks Engelbergers (*Joseph Frederick Engelberger*) kopā ar Džordžu Devolu ASV pilsētā Denberijā nodibina pirmo robotikas uzņēmumu *Unimation*.

Vācu uzņēmums *KUKA* uzbūvē pirmo automātisko metināšanas ierīci sadzīves elektrotehnikas ražošanai un arī autoratžotājam *Volkswagen*.



1.5. attēls. Džordža Devola patents (1961. gads) [10].

1960 Džordžs Devols izstrādā pirmo industriālo robotu *Unimate* ar hidraulikas piedziņu, kas tiek vadīts pēc ciparu programmējamas vadības sistēmas principiem (skat. 1.6. (a) att.).

1961 Tiek piešķirts patents Nr. *US2988237A* un uzņēmumā *General Motors* (Ņūdžersija, ASV) pieņem ekspluatācijā pirmo industriālo robotu *Unimate*.

Unimate 1900 kļūst par pirmo sērijveidā ražoto industriālo robotu, kas tiek saražots vairākos simtos eksemplāru un tiek lietots metāllietuvēs.

1966 Uzņēmums *Nokia* Somijā licencē *Unimate* ražošanu Eiropas tirgum.

1969 Uzņēmums *Kawasaki Heavy Industries* Japānā licencē *Unimate* ražošanu Āzijas tirgum.

Unimate tiek uzstādīts kontaktmetināšanai autobūves uzņēmumā *General Motors*, palielinot ražošanas jaudas pat divas reizes.

Stenfordas universitātē Viktors Šeinmans (*Victor Scheinman*) izstrādātā robotu *Stanford Arm*, kas sastāv no divām rotācijas locītavām: taisnvirziena un sfērisko locītavu. Robots iegūst plašu popularitāti akadēmiskajā vidē (skat. 1.6. (c) att.).

- 1973** *KUKA* izstrādā sešu asu robotu *FAMULUS* ar elektrisko piedziņu un sāk tā ražošanu autoindustrijai.
- 1974** Japānas uzņēmums *FANUC* izstrādā savu pirmo robotu.
- 1979** *Unimation* prezentē robotu *PUMA* (angļu val. *programmable universal machine for assembly*). Tam ir elektriskā piedziņa.
- 1993** Izstrādāta augsta līmeņa programmēšanas valoda *IRL* (angļu val. *industrial robot language*), kas paredzēta kā visaptverošs standarts visiem turpmākajiem robotu tipiem, taču tas nekad neiegūva plašu popularitāti robotu ražotāju vidū.
- 2003** *KUKA* izstrādā *Robocoaster* – izmantojot industriālo robotu, tiek izveidota komerciāla atrakcija – izklaides karuselis cilvēkiem.
- 2005** Dānijā dibināts uzņēmums *Universal Robots*, kas vēlāk pazīstams kā viens no vadošajiem kobotu ražotājiem (skat. 1.1.2. nodaļu).
- 2022** Industriālo robotu tirgus pārsniedz 517 tūkst. vienību gadā.

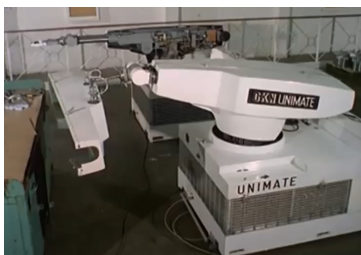
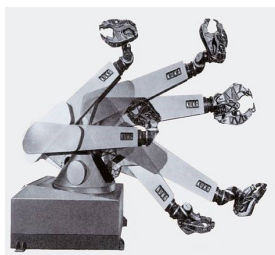
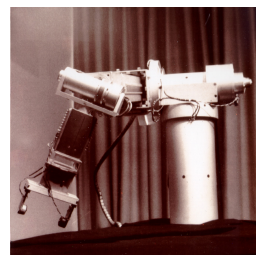
Robotu vadības sistēmu attīstību var iedalīt četrās paaudzēs (skat. 1.9. tabulu). Kaut arī 20. gadsimta 70. gados manipulatoriem galvenokārt jau bija elektriskā piedziņa, to kustība joprojām bija ļoti nevienmērīga, asa un lēcienveida, kas saistīts ar ierobežoto asu sinhronizāciju (skat. 4.2.1. nodaļu) un kustības interpolāciju (skat. 4.1.3. nodaļu). Interpolācijas solis samazinājās nākamajās paaudzēs, padarot kustības aprēķinu intensīvāku un kustību laidenāku. 80. gados vienkāršas *no-punkta-uz-punktu* kustības papildināja taisnvirziena un riņķveida kus-

1.9. tabula. Industriālo robotu vadības kontrolleru attīstība

| 1. paaudze | 2. paaudze | 3. paaudze | 4. paaudze |
|---|---|--|---|
| 1972 | 1982 | 1992 | 1995 |
| <ul style="list-style-type: none"> • saglabā datus • nosacījuma gaidīšana • <i>PTP</i> komanda • lēcienveida kustības • programmēšana ar tastatūru | <ul style="list-style-type: none"> • 6–12 asis • savienojums ar datoru • takts 24–64 ms • līnijas un riņķa kustības interpolācija | <ul style="list-style-type: none"> • līdz 32 asīm • augsta līmeņa programmēšanas valodas • takts 10 ms • programmēšana ar datoru | <ul style="list-style-type: none"> • robota kontrole ar datorvadību (<i>Windows</i>) • piedziņas sistēma bez transformatora |

tības (skat. 4.2. nodaļu). Datortehnikas ar universālām operētājsistēmām kā *Microsoft Windows* izmantošana robotu kontrolleros sākās 90. gados (piemēram, *KUKA KR C1*). 90. gadu vidū manipulatora vadība un programmēšana pilnībā ir pārgājusi no programmējamo loģisko kontrolleru (*PLC*) izmantošanas uz datorvadību, kurā tiek lietotas augsta līmeņa programmēšanas metodes. Paaudžu attīstības gaitā būtiski samazinājās spēka elektronikas izmēri, līdz ar to arī vadības skapja lielums, kas ļauj taupīt vērtīgo vietu ražošanas līnijās.

Pēc robotu autonomijas pakāpes, kā kategorizēts 1.2. attēlā, visi līdz šim apskatītie roboti atbilst pirmajai paaudzei. Pirmajam industriālajam robotam *Unimate* bija visas nepieciešamās pamatfunkcijas,

a) *Unimate* bija pirmais sērijveida industriālais robots.b) Pirmais *KUKA* robots *FAMULUS* [11].c) *Stanford Arm* ir labi pazīstams akadēmiskajā vidē [12].

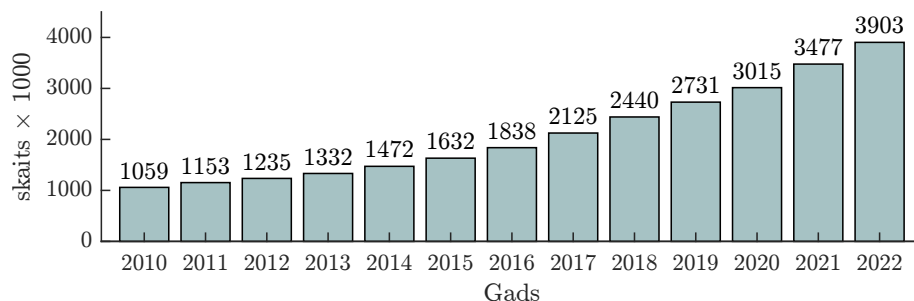
1.6. attēls. Pirmie manipulatori.

lai to lietotu ražošanā. Tas sastāvēja no lielas kastes kā pamatnes, kam piestiprināta robota roka ar kopējo svaru virs 1300 kg (skat. 1.6. (a) att.). Pirmais prototips tika vadīts ar vakuumdiodēm jeb elektronu lampām, kas vēlāk tika aizstātas ar tranzistoriem. Vairums izejmateriālu robota *Unimate* ražošanai tika izstrādāti pašā uzņēmumā *Unimation*.

Pirmais robota *Unimate* komerciālais lietojums uzņēmumā *General Motors* bija detaļu pārvietošana, kam sekoja lietojums metināšanā. Autoražotājs ar robotikas palīdzību palielināja ražošanas ātrumu vairāk nekā divas reizes, vienlaicīgi padarot *General Motors* par modernāko autoražotāju 70. gadu beigās [13]. Šajā desmitgadē *Unimate* revolucionāri un neatgriezeniski mainīja auto ražošanas industriju, kļūstot par vienu no lielākajiem 20. gadsimta izgudrojumiem.

1.1.4. Tirgus un nozares apskats

Globālais industriālo robotu tirgus apjoms ir aptuveni 50 miljrd. USD pēc 2020. gada statistikas datiem [14], ieskaitot gan robotu tirdzniecību, gan saistītos pakalpojumus un tehnoloģijas. Kopš 2010. gada kopējais strādājošu industriālo robotu skaits ir gandrīz četrcāršojies, skaitam pieaugot no aptuveni 1 milj. līdz nepilniem 4 milj. 2022. gadā. Diagramma 1.7. attēlā ilustrē eksponenciālu pieaugumu šajā periodā. Tipiski robota darba dzīves ilgums ir vismaz 12 gadu.



1.7. attēls. Ražošanā darbojošos industriālo robotu skaits [15], [16], [17].

Tālāk sniegts ieskats būtiskākajos industriālo robotu tirgus statistikas datos, lai radītu priekšstatu par robotikas neseno attīstību pa-

saules reģionos un lietojuma nozarēs. Jaunākos un aktuālos datus var iegūt Starptautiskās Robotikas federācijas interneta vietnē (angļu val. *IFR – International Federation of Robotics*), kas šeit vairākkārt citēta.

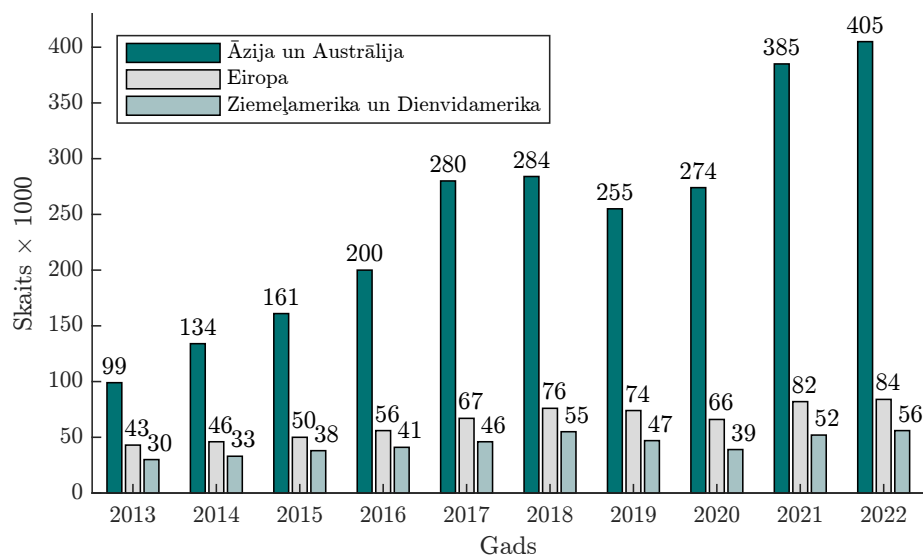
► Jaunu robotu uzstādīšana

Pēdējā desmitgadē vidējais jaunu industriālo robotu pieaugums ir vairāk nekā 10 % – vislielākais tas ir elektronikas industrijā, metālapstrādē un autobūvē. 2022. gadā tika uzstādīti 526 tūkst. jaunu industriālo robotu, bet 2013. gadā – ap 173 tūkst. vienību. Savukārt vēl 2003. gadā tika uzstādīts tikai 100 tūkst. vienību, kas nozīmē, ka tirgus apjoms nepilnu divdesmit gadu laikā ir piekāšojies [18]. 2022. gadā uzstādīts rekordliels robotu skaits, pārspējot visus iepriekšējo gada datus. Ik gadu jaunu uzstādīto robotu skaits stipri korelē ar ekonomikas aktivitāti – vājas pasaules ekonomikas gados (piemēram, 2009. gadā – pasaules finanšu krīzes gadā) uzņēmumi atliek investīcijas un jaunus robotus uzstāda mazāk. 1.8. attēlā redzams jaunuzstādīto robotu skaits pasaules reģionos kopš 2013. gada [14]. Redzams, ka Āzijas un Austrālijas reģiona tirgus ir audzis ievērojami straujāk nekā pārējie reģioni – 2022. gadā tas veido vairāk kā trīs ceturtdaļas no kopējā industriālo robotu tirgus.

► Robotu lielvalstis

Visvairāk jaunu robotu uzstādīts Ķīnā, kas ar 71 % industriālo robotu tirgus daļu būtiski pārsniedz gan Eiropas, gan Ziemeļamerikas un Dienvidamerikas tirgus kopā. 1.9. (a) attēlā minētas piecas lielākās valstis – robotu pasūtītājas, kuras kopā veido 79 % no pasaules industriālo robotu tirgus. Augsti automatizētas valstis, kurās jau ir daudz uzstādīto robotu, saglabā līderpozīcijas un konstantu tirgus apjomu. Ķīnas, Singapūras un Malaizijas tirgus apjomi pēdējo 10 gadu laikā auguši ļoti strauji. Lielas apjoma svārstības novērojamas Japānas un Dienvidkorejas tirgos.

Robotu pasūtījumu ziņā piecas lielākās Eiropas valstis un reģioni uzskaitītas 1.9. (b) attēlā, no kurām pirmo vietu ieņem Vācija. Gan Vācijā, gan citās Eiropas valstīs robotus galvenokārt lieto autobūves

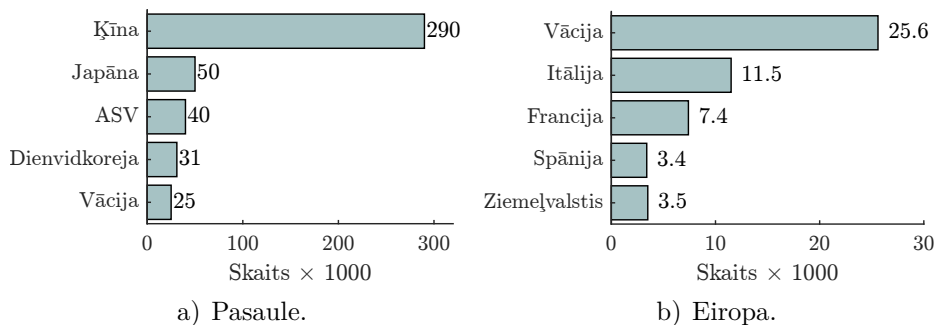


1.8. attēls. Jaunu uzstādīto industriālo robotu skaits [16], [17].

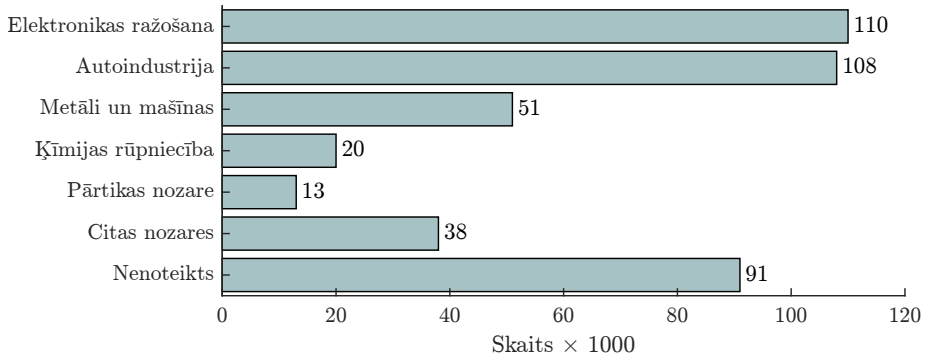
industrijā. Liels pieaugums kopš 2010. gada vērojams četru valstu grupā – Ungārijā, Polijā, Čehijā un Slovākijā (t. s. Višegradas valstīs), kuras izceļas ar īpaši strauju robotu pieaugumu. Tas lielā mērā saistīts ar šo valstu pieaugošo lomu auto ražošanā.

► Nozares un lietojums

Pārskats par nozarēm, kurās pasaulē visvairāk izmanto industriālos robotus, sniegts 1.10. attēlā. Vēsturiski autobūves industrija bijusi vislielākā industriālo robotu patērētāja, taču 2020. gadā pirmo reizi



1.9. attēls. Jaunu robotu instalācijas pa valstīm 2022. gadā [17].

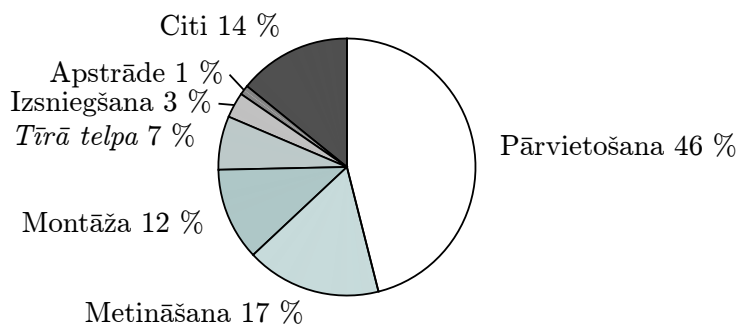


1.10. attēls. Industriālo robotu sadalījums pa nozarēm, kurās tie uzstādīti (vidēji gadā no 2018. gada līdz 2022. gadam) [14], [16], [17].

to apsteigusi elektronikas industrija. Elektronikas ražošanas vajadzībām 2022. gadā uzstādīts 157. tūkst. vienību, kamēr autoindustrijā tie bija tikai 136 tūkst. [16]. Elektronikas industrija ietver sadzīves elektropreču, datortehnikas, telekomunikāciju, video un izklaides ierīču ražošanu. Gan elektronikas, gan auto ražošana ir stipri atkarīgas no pasaules ekonomikas, kas atspoguļojas uzņēmumu investīcijās ražotnēs. Tas redzams lielās cikliskās tirgus svārstībās, kas ik gadu sasniedz pat $\pm 25\%$. Jaunu robotu instalāciju skaits elektronikas industrijā no 2016. gada līdz 2022. gadam ir audzis vidēji par 10% gadā, ietverot arī kritumus. Savukārt autoindustrijā šajā laika posmā tirgus audzis par 2% , taču ietverot būtisku kritumu 2020. gadā.

Iedalījums pēc vispārēja lietojuma veida atklāj, ka detaļu **pārvietošana, montāža** un materiālu **metināšana** un **lodēšana** ir visbiežāk sastopamie robotu uzdevumi. 1.11. attēls sniedz ieskatu par robotu sadalījumu pēc to lietojuma [4]. Vairāk par lietojuma piemēriem metālapstrādē var uzzināt 1.2. nodaļā.

Detaļu pārvietošana (angļu val. *handling*), kam izmantots gandrīz katrs otrais robots (46%), iekļauj visus veidus, kur robotam ražošanas procesā ir tikai asistenta loma un kur tas pārvieto detaļas starp apstrādes stacijām jeb darbgaldiem. Ar *tīro telpu* (angļu val. *cleanroom*) apzīmē aplikācijas, kuras visbiežāk sastopamas elektronikas detaļu montāžā un medicīnā, kur robota darba telpai ir ļoti stin-



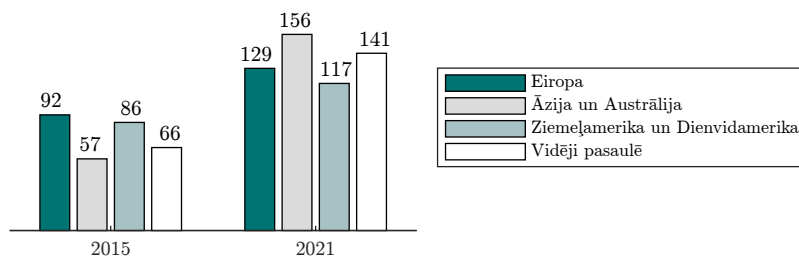
1.11. attēls. Uzstādīto industriālo robotu sadalījums pēc to lietojuma (vidēji gadā no 2020. gada līdz 2022. gadam) [19].

gras prasības attiecībā uz gaisa piesārņojumu, putekļu un mitruma daudzumu. Kategorijā *izsniegšana* ir roboti, kuri pilda šķidrumus, izsniedz mazus priekšmetus (farmācijā), pilda dažāda veida konteinerus vai strādā preču loģistikā. Daļai robotu (14 %) lietojums nav zināms.

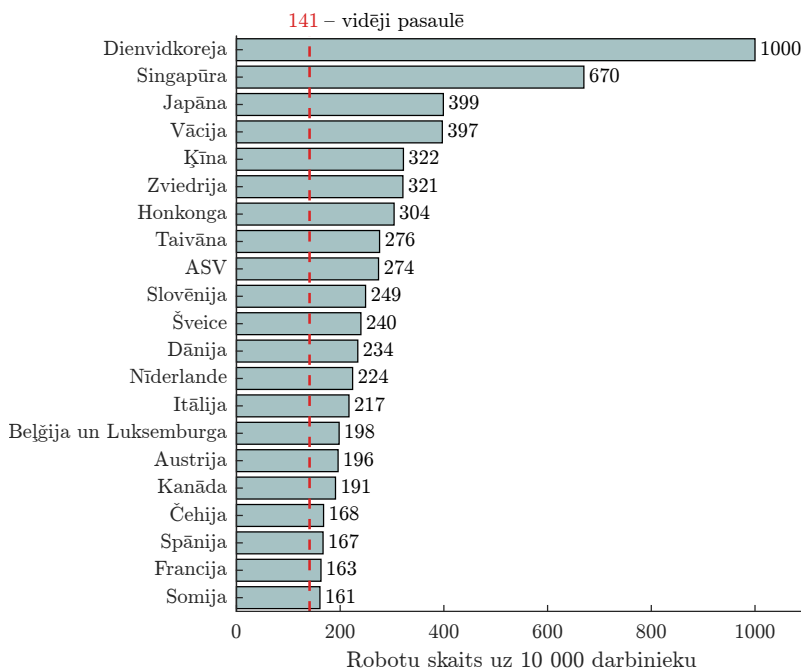
► Robotu blīvums

Industriālo robotu absolūtais skaits reģionā vai nozarē ir maz izsa-košs, ja nav zināmi precīzi dati ne par lietojuma veidu, ne darba tirgus apjomu. Lai uzsvērtu reģionu vai nozaru atšķirības, izmanto **robotu blīvuma** jēdzienu jeb industriālo robotu skaitu uz 10 000 strādājošo nozarē/reģionā:

$$\text{robotu blīvums} = \frac{\text{uzstādīto robotu skaits}}{\text{darbinieku skaits}} \cdot 10\,000.$$



1.12. attēls. Robotu skaits uz 10 000 strādājošo rūpniecībā pa reģioniem [18], [16].



1.13. attēls. Robotu skaits uz 10 000 strādājošo rūpniecībā 2021. gadā [20].

Parasti izšķir trīs rādītājus: (1) robotu blīvums kopējā rūpniecībā, (2) transportbūvē un metālapstrādē un (3) vispārējā industrijā.

Eiropā 2021. gadā vidējais robotu blīvums rūpniecībā bija 129 roboti uz 10 000 strādājošo, kas ir pieaugums par 40 % kopš 2015. gada. Āzijas reģionā rūpniecības automatizācijas pakāpe ir augusi visstraujāk – tā ir gandrīz trīskāršojusies, sasniedzot 156 robotus uz 10 000 strādājošajiem, tādējādi apsteidzot gan Eiropu, gan Ameriku (skat. 1.12. att.). Lielā Āzijas tirgus īpatsvara dēļ, arī vidēji pasaulē tikai sešos gados robotu blīvums ir dubultojies.

Dienvidkoreja ir valsts ar visaugstāko robotu blīvumu uz strādājošo skaitu rūpniecībā, kur vairums robotu izmantoto pusvadītāju, elektronikas un auto ražošanā. Ķīnas robotu blīvums ir audzis visstraujāk – no tikai 49 uz 322 vienībām no 2015. gada līdz 2021. gadam. [20]. Tādējādi Ķīna sarakstā pakāpjas no 25. uz 5. vietu pasaulē pēc robotu blīvuma (skat. 1.13. att.). Singapūra robotu blīvuma ziņā ieņem 2. vietu pasaulē gan augsti attīstītās rūpniecības, gan salīdzinoši nelielā

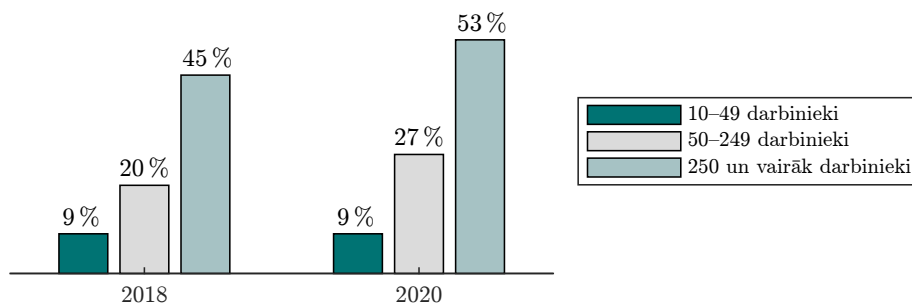
iedzīvotāju skaita dēļ. Japāna ieņem 3. vietu pasaulē un vienlaicīgi ir viena no lielākajām robotu sistēmu piegādātājām (visā pasaulē ir izplatīti uzņēmumu *Fanuc*, *Yaskawa*, *Kawasaki* roboti). Vācijā ir augstākais robotu blīvums Eiropā, sasniedzot 397. Valstī atrodas 38 % no visiem Eiropā strādājošajiem robotiem.

► Roboti un nodarbinātība

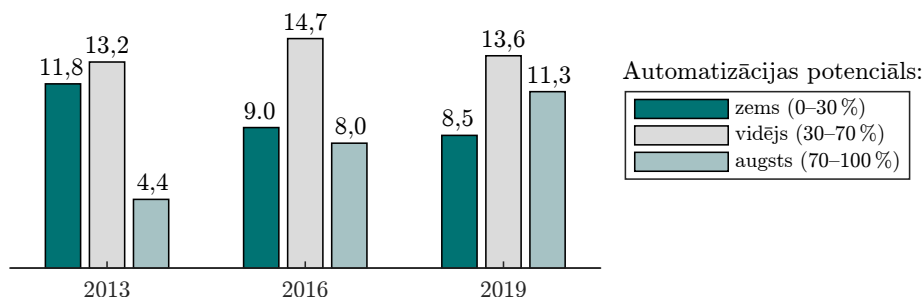
Kādos uzņēmumos izmanto darba automatizāciju? No aptaujas un analīzes datiem par Vācijas darba tirgu izriet, ka visbiežāk tie ir lieli uzņēmumi – katrs otrais lielais uzņēmums rūpniecības nozarē izmanto automatizētas mašīnas [21]. Jāpiebilst, ka automatizācijas jēdziens šeit aptver visas profesiju grupas un nozares un ar robotizētiem procesiem apzīmē arī vispārīgu automatizāciju, programmatūru, industriālos un servisa robotus. Vācijā 2020. gadā bija vairāk nekā 230 tūkst. aktīvu industriālo robotu, bet ik gadu tiek uzstādīts vairāk nekā 20 tūkst. jaunu, tādējādi tā uzskatāma par vienu no visvairāk automatizētajām valstīm Eiropā [14].

Interesanti, ka arī starp mazajiem uzņēmumiem, kuru darbinieku skaits nepārsniedz 49, gandrīz katrs desmitais rūpniecībā izmanto automatizētas mašīnas. Saglabājas sakarība – jo lielāks ir uzņēmums pēc darbinieku skaita, jo vairāk tas tiecas izmantot automatizāciju. Tendence ir augoša, it īpaši vidējos un lielos uzņēmumos.

Viens no jautājumiem, kas nodarbina pētniekus, ir – vai roboti izstumj cilvēkus no viņu darbvietām? Iespējamību, ka roboti (tai skaitā industriālie) var pārņemt uzdevumus, ko šobrīd dara cilvēki, labi ilustrē 1.15. attēls. Šeit apkopoti Vācijas darba tirgus pētījumu rezultāti par 2013.–2019. gadu: augsts automatizācijas potenciāls pastāv aptuveni katrai trešajai darbvietai jeb 11 milj. no 33 milj. sociāli apdrošinātām darbvietām [21]. Pirmajā mirklī šādu datu interpretāciju var uztvert kā sociāli negatīvu, jo *roboti taču samazina darbvietu skaitu*. Tomēr ietekme uz tautsaimniecību parasti ir pozitīva – roboti palielina darba produktivitāti un veicina izaugsmi, savukārt izaugsmei parasti nepieciešamas papildu darbvietas. 1.15. attēlā redzams arī, ka tendence ir



1.14. attēls. Uzņēmumu daļa, kuros izmanto robotizētus procesus un automatizāciju (Vācija) [21].



1.15. attēls. Darbvieta sadalījums pēc teorētiski iespējamās šo darbvieta automatizācijas – aizvietošanas ar robotizētu sistēmu (tai skaitā programmatūras robotiem), Vācijas darba tirgus [21].

augoša – arvien pieaug tā daļa profesiju, kuru darbs tiek uzskatīts par lielā mērā aizstājamu ar automatizāciju un robotiem.



1.2. Robotu lietojuma piemēri

Tālāk apskatīti visbiežāk sastopamie industriālo robotu lietojuma piemēri. Visvienkāršākā robota sistēma vienmēr sastāv no manipulatora un tai piederošās tehnoloģijas. Turpmāk aplūkota metālapstrāde ar piemēriem no autoindustrijas, kurā sastopamas ļoti daudz dažādas ražošanas tehnoloģijas. Netiks analizēti servisa un apkalpes robotu lietojuma, kā arī mobilo robotu veidi, jo tie retāk saistīti ar industriālo ražošanu.

1.2.1. Metālapstrāde un industriālā ražošana

Industriālo manipulatoru lietojumam robeža ir tikai plānošanas inženiera izdoma. Vairums manipulatoru ir universāli lietojami. Atsevišķu uzdevumu veikšanai manipulators var būt arī speciāli pielāgots, tādēļ tos var iedalīt **speciālos** un **universāli lietojamos** robotu manipulatoros.

1.10. tabula. Iedalījums pēc manipulatora universāluma

| | |
|--|---|
|  |  |
| <p style="text-align: center;">Universāli manipulatori</p> <p>Piemēroti standarta darba apstākļiem, pieejama plaša izvēle gan celjspējas, gan darba telpas lieluma ziņā. Plaši izmantojami daudz līdzīgām standarta darbībām.</p> | <p style="text-align: center;">Specifiski manipulatori</p> <p>Piemēroti noteiktiem darba veidiem, nereti piedāvāti kopā ar visu ražošanas šūnu kā sistēma, speciāla programmatūra un nestandarta mehānika. Vidējs vai zems manipulatoru skaits, parasti lielākas kopējās izmaksas.</p> |

1.10. tabulā pa labi ilustrētais speciālais robots (*ABB IRB Flex Painter* [22]) ir piemērots detaļu lakošanai. Tam ir integrēta procesa sistēma krāsas aizvadīšanai uz komplektā ietilpstošo darba instrumentu. Speciālajiem un universālajiem robotiem vienāda parasti ir pamata piedziņas sistēma un kustību vadības sistēma. Speciālo robotu vadības sistēmu papildina ar pielāgotu programmatūru.

Manipulatora tipu izvēlas atbilstoši darba uzdevumam. 1.11. tabulā apkopoti un salīdzināti specifisko manipulatoru veidi pēc to lietojuma. Bīstamās darba telpās, kurās nepieciešama īpaša aizsardzība no karstuma vai gāzēm, manipulatora korpusa aizsardzībai izmanto speciālu pārvalku. Nereti zem aizsargkārtas izmantots standarta robots. Specifisku robotu par tādu nereti padara tikai tā programmatūra,

1.11. tabula. Specifiski manipulatoru veidi un to lietojums

**Metālliešana**

- karstumizolācija
- augsta celtspēja
- nereti izmantots standarta robots ar speciālu aprīkojumu

**Kārtošana un paletēšana**

- liela darba telpa
- liels ātrums
- konstrukcija ar īpašu spēka plecu
- mazs pamatnes laukums
- maz brīvību pakāpju (līdz 5)

**Lakošana**

- cieša integrācija ar lakošanas ierīci
- izolācija pret krāsas nosēdumiem
- zema celtspēja
- iestatīts ar modelēšanas palīdzību

**Lokmetināšana**

- savienojumi metināšanas aprīkojumam
- integrēti sensori kvalitātes kontrolei
- zema celtspēja
- iestatīti ar modelēšanas metodēm

**Mērīšana un kvalitātes kontrole**

- ļoti augsta precizitāte
- integrēti sensori, attēlu apstrāde
- daudz locītavu (brīvības pakāpes)

**Laboratorijas ekipējums**

- zemas izmaksas
- vienkāršota programmēšana
- lietojami uz rakstāmgalda
- maz locītavu (4–6)
- zema celtspēja

un ražotājs to piedāvā tikai komplektā. Uzskatāmības labad tabulas apakšā parādīts laboratorijas tipa robots, kādu izmantotu mācību nolūkos un pētniecībā. Kaut arī šāda manipulatora izmaksas ir ievērojami zemākas, tas reti atbilst ražošanā svarīgiem parametriem: darba ātrumam, celbspējai, darba telpai, precizitātei un paša aizsardzībai darba vidē.

1.16.–1.20. attēlā uzskaitītas dažādas apstrādes metodes, kurās izmanto universālus robotus. Pirmā grupa 1.16. attēlā ietver metāl-apstrādi, kur izmantota liela daļa no visiem industriālajiem robotiem. **Kontaktmetināšana** ir viena no senākajām un joprojām visbiežāk izmantotajām industriālo robotu lietojuma formām. Metināšanai izmanto divus vara elektrodus, kuri ar spēku saspiež divas vai vairāk metāla virsmas. Pietiekami lielai strāvai plūstot caur elektrodiem un metināmajām detaļām, kontaktpunktā tiek sasniegta metāla kušanas temperatūra. Metina gan dzelzs, gan alumīnija detaļas, taču, tā kā alumīnija elektriskā pretestība ir zemāka kā dzelzij, tad nepieciešama lielāka strāva, lai materiālam atdotu enerģiju, kas sakarsētu materiālu līdz kušanas punktam.

MIG jeb **lokmetināšanā** (angļu val. *metal insert gas*) izmanto metināšanas materiālu – stiepli, kas darbojas kā elektrods un vienlaicīgi metināšanas vietas pildījums. Metināšanas laikā stiepli padod attālināts motorizēts mehānisms. Starp metināmo detaļu un stiepli rodas elektriskas loks, izkausējot gan stiepli, gan metināmo vietu. Kā aizsarggāzi izmanto argonu (agrāk arī hēliju), kas aizsargā metināšanas šuvi no atmosfēras iedarbības. *MAG* (angļu val. *metal active gas*) metināšana ir līdzīga, taču kā aizsarggāzi izmanto argona un ogļskābās gāzes sajaukumu. Rokas vadībā metināšanas metode ir pusautomātiska, jo stieples un gāzes padeve ir saskaņota ar strāvas padevi, bet instrumenta kustību kontrolē cilvēks. Robotizētā iekārtā arī instrumenta kustība ir automatizēta, tādējādi pilnībā automatizējot *MIG* metināšanu.

Lokmetināšanai radniecīgs veids ir **kniežu** vai **skrūvju vienpusēja metināšana** uz metāla virsmas. Šajā gadījumā stieples vieta



a) MIG/MAG metāla inertā vai gāzes metināšana.



b) Kontaktmetināšana.



c) Skrūvju vienpusēja metināšana.



d) Lāzermetināšana.

1.16. attēls. Termiskā metālapstrāde.

izmanto kniedi vai skrūvi, caur kuru un attiecīgo ražošanas detaļu plūst līdzstrāve, uzkaršējot abas pretējās virsmas, un, veidojot elektrisko loku, izkausē materiālu. Arī šeit izmanto aizsarggāzi. Metode bieži sastopama kombinācijā ar industriālajiem robotiem. Metodes priekšrocība ir nepieciešamā pieeja detaļai tikai no vienas puses, kā arī tās ātrums – metināšanas laiks uz vienu kniedi nepārsniedz sekundes desmitdaļu.

Lāzermetināšanā izmanto spēcīgu lāzera staru, kas līdz kušanas temperatūrai uzkaršē materiālus, tādējādi tos sakausējot. Lāzera stars tiek ģenerēts attālināti apmēram 20–30 cm no detaļas. Instrumentam nav tieša mehāniska kontakta ar detaļu, tādēļ metināmās detaļas ir cieši jānosprīgo fiksēšanas iekārtā. Metināšanas materiāliem jābūt cieši saspīestiem ar fiksēšanas iekārtu, jo to nedara metināšanas instruments. Lāzermetināšanas priekšrocības ir liels ātrums, nepieciešamā piekļuve tikai no vienas puses, pielāgojamība gan plāniem, gan bieziem materiāliem, kā arī iespēja veikt praktiski jebkādas formas metināšanas šuves – gan dziļumā, gan garumā. Ar lāzeru iespējams metināt arī varu, kuram ir zema elektriskā pretestība, kā dēļ to ir sarežģīti paveikt ar citām metodēm. Ja lāzermetināšanai izmanto papildu stiepli, kas aizpilda metināšanas šuvi, to sauc par **lāzerlodēšanu**. Ar šo meto-



a) Kniedēšana.



b) Metāla locīšana.



c) Skrūvēšana.



d) Naglošana.

1.17. attēls. Mehāniskā metālapstrāde.

di iespējams iegūt ļoti augstas precizitātes metināšanas šuves, kurām nav nepieciešama pēcapstrāde. Lāzermetināšana ir salīdzinoši dārga metode, kur tehnoloģijas izmaksas būtiski pārsniedz robota izmaksas.

1.17. attēlā parādītas visbiežāk izmantotās mehāniskās materiālu savienošanas metodes. Šīs metodes dēvē par mehāniskām, jo materiāli netiek sakarsēti līdz kušanas temperatūrai. Turklāt savienojami arī materiāli, kuri vispār nekūst, vai arī savienoti tiek divi dažādi materiāli. Papildu stiprībai un izolācijai mehāniskās savienošanas metodes bieži kombinē ar līmēšanu – starp savienojamām detaļām vispirms uzklāj līmes līniju un tad tās stiprina ar kniedēm vai naglām.

Kniedēšana ir savienošanas metode, kur savienojamās materiālu plāksnes vispirms saspiež, tad caur pirmo materiālu izspiež kniedi, kura fiksējas otrajā materiālā, tādējādi saturot abas plāksnes kopā. Kniedēšanu izmanto dažādu komponentu ražošanā gan autobūvē, gan aviobūvniecībā, gan arī sadzīves tehnikas iekārtās [23]. Ir pieejamas dažādas kniedēšanas iekārtas – no rokas vadāmām līdz dažāda lieluma robotizētām sistēmām.

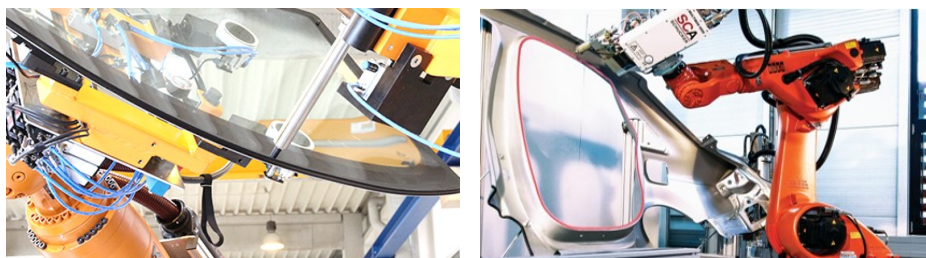
Metāla lokšņu malu **locīšanu** izmanto ar nolūku padarīt detaļas apmales mazāk raupjas vai noapaļotas. To izmanto produktos vai to detaļās, ar kurām cilvēkam ir tiešs kontakts. Tās ir dažādas metāla

sadzīves iekārtas, transportlīdzekļu vērtnes (piemēram, durvis vai motora pārsegs). Pa lokāmo detaļas apmali atkārtoti stumj masīvu rulli, tādējādi lokot metāla loksni līdz vēlamajam leņķim, kas nereti ir tuvu 180° . Metodi bieži izmanto tikai kopā ar robotiem, kuru uzdevums programmēts ar modelēšanas palīdzību, jo detaļas bieži ir neregulāras formas.

Robotizēta skrūvēšana maz atšķiras no mājsaimniecībā izmantojamā akumulatora skrūvgrieža. Robotu sistēmā skrūves padod pneimatiski no attālinātas iekārtas. Skrūvēšanas robots pirms katras operācijas skrūves var paņemt arī no kādas noteiktas pozīcijas. Pats skrūvēšanas process programmējams salīdzinoši vienkārši, un tas iespējams arī bez modelēšanas datorprogrammām. Mazus un vidēja izmēra skrūvēšanas robotus izmanto elektronikas un sadzīves tehnikas rūpniecībā, lielus – autobūvē un aviobūvē. Ja skrūvēšanas roboti ir aprīkoti ar attiecīgu drošības tehniku, tos izmanto kopējā darba telpā ar cilvēkiem (skat. 5.1.4. nodaļu).

Robotizēta naglošana ir salīdzinoši jauna materiālu savienošanas metode, kurā naglo divas vai vairākas detaļas. Priekšrocība ir vienpusēja piekļuve detaļai un arī liels ātrums. Atšķirībā no skrūvēšanas, savienojuma punktā nav nepieciešama ne vītne, ne pats urbums. Trūkums ir tas, ka savienojamie materiāli tiek nedaudz deformēti un detaļu neredzamajā daļā paliek naglas gals. Ar šo metodi iespējams savienot divus dažādus materiālus un veikt hibrīdsavienojumus, piemēram, savienot oglekļa šķiedru un metālus.

Robotizētas **līmēšanas** iekārtas visbiežāk sastopamas divos veidos: stacionārā un robota vadītā līmēšanā. Abos gadījumos mērķis ir savienot detaļas, kas nereti tiek stiprinātas ar kādu papildu mehānisko metodi. 1.18. (a) attēlā parādīts līmēšanas process, kurā līmpistole ir nekustīgi montēta, bet industriālais robots ar satvērējierīci vada detaļu gar līmpistoli. Gan kustības ātrums, gan līmes daudzums tiek precīzi saskaņots. Pretējs process ar identisku rezultātu ir kustīga līmpistole gar statiski fiksētu detaļu, kā ilustrēts 1.18. (b) attēlā. Retāk sastopamas ražošanas iekārtas, kurās gan detaļa, gan instruments ir stiprināti



a) Stacionārā līmēšana [24].

b) Līmēšana ar kustīgu līmpistoli [25].

1.18. attēls. Manipulatoru lietojums līmēšanā.

pie robotiem un līmēšanas laikā atrodas kustībā.

Robotizētas sistēmas izmanto ar virsmas apstrādi saistītos procesos. Auto korpusa metināšanas šuves noblīvē ar ķīmisku pārklājumu, lai metinājuma porās neiekļūtu mitrums, kas var izraisīt koroziju. 1.19. (a) attēlā redzams blīvēšanas process, kas tehnoloģiski ir līdzīgs līmēšanai, taču materiāls uzklāts vienpusēji un tiek atstāts uz salīdzinoši ilgāku laiku, lai sacietētu. Auto ražošanā šodien šis process vienmēr ir automatizēts. Īpatnēji, ka bieži tas notiek uz kustīgas ražošanas konveijera līnijas, bet robota manipulators atrodas ārpus paša konveijera. Darba uzdevumam robota un konveijera kustība ir ģeometriski sinhronizēta.

Lakošanas robotu lietojums aptver plašu produktu spektru – tos izmanto mēbeļu, sadzīves tehnikas, ēkas detaļu un transportlīdzekļu ražošanā. **Robotizēta krāsošana un lakošana** ir piemērota vienādu produktu ražošanai lielā apjomā. Šim mērķim izmanto speciāla tipa



a) Pēcapstrāde, blīvēšana.

b) Lakošana.

c) Pulēšana.

1.19. attēls. Manipulatoru lietojums pēcapstrādē un virsmas apstrādē.



a) Detaļu pārvietošana.



b) Auto paneļa montāža.



c) Auto vējstikla montāža.



d) Elektroauto baterijas montāža.

1.20. attēls. Manipulatoru lietojums montāžas uzdevumos.

robotus, kuri ir ietērpti aizsargtērpos un strādā slēgtās telpās (skat. 1.19. (b) att.). Robota lakošanas instruments ir industriālā krāsas pistole. Industriālajā lakošanā izmanto elektrostatiku, lai samazinātu lakas zudumus un tā labāk nosēstos uz krāsojamā produkta.

1.19. (c) attēlā redzama robota izmantošana **pulēšanā**. Tā gan retāk novērojama praksē, taču vēlreiz ilustrē standarta robota universālās lietojuma iespējas.

Robotu lietojums dažāda veida **pārvietošanas un montāžas** darbos autoindustrijā ilustrēts 1.20. attēlā. Šī funkcionalitāte ir aktuāla arī citu industriju ražošanas procesos. Manipulators, kas aprīkots ar satvērēju, var veikt gan pārvietošanas, gan montāžas uzdevumus. Montāžā ar pārvietošanas operācijām roboti piedalās produkta tapšanā. Savukārt loģistikā līdzīgas pārvietošanas operācijas palīdz preču kārtošanā vai pakošanā. Satvērējiekārta ir aprīkota ar pneimatiskiem vai servopiedziņas pirkstu pāriem. Lai stabili satvertu detaļu, bieži ir nepieciešami vairāki šādi pirkstu pāri. Cita izmantotā tehnoloģija detaļām ar gludām virsmām (piemēram, stiklam) ir vakuuma piesūcekņu sistēma, kas tiek vadīta attālināti (skat. 1.20. (c) att.). Ļoti sarežģīta produkta gadījumā robota instruments ir hibrīda iekārta, kas sastāv gan no satvērējierīces, gan no citiem automatizētiem instrumentiem,

lai vienā darba solī detaļu gan pārvietotu, gan nostiprinātu vai savienotu. Šāda ierīce ir individuāli konstruēta tikai attiecīgajam produktam. 1.20. (b) attēlā ilustrēta auto priekšējā paneļa ievietošana un montāža auto korpusā, savukārt 1.20. (d) attēlā ilustrēta baterijas montāža.

1.2.2. Vispārējā industrija

Robotikā lieto terminu **vispārējā industrija** (angļu val. *general industries*), ar ko apzīmē visu, kas nav transportbūve un metalurģija. Robotu manipulatoru lietojums arī šeit ir daudzveidīgs un plašs – no pārvietošanas un kārtošanas uzdevumiem līdz nelielu priekšmetu vai pārtikas ražošanai. Visbiežāk sastopamās nozares ir loģistika, apstrādes un pārtikas rūpniecība.



a) Paletēšana.



b) Robots palešu pārceļšanai.



c) Gaļas apstrāde.



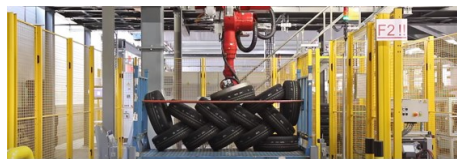
d) Dzērienu mucu satveršana.

1.21. attēls. Manipulatoru lietojums pārtikas nozarē.

Pārtikas nozarē ir viena no visefektīvākajām loģistikas ķēdēm, produktu salīdzinoši īso derīguma termiņu dēļ. Šī nozare ir arī viena no visstingrāk regulētajiem tirgiem ar augstām darba higiēnas prasībām. Tas veicina procesu automatizāciju, tai skaitā lietojot robotu manipulatorus. Pārtikas ražošanai parasti izmanto speciālas mašīnas, bet gatavās



a) Koka frēzēšana [26].



b) Riepu kārtošana [27].



c) Elektronikas ražošana [28].



d) PCB montāža [29].

1.22. attēls. Manipulatoru lietojums montāžas uzdevumos.

un iepakotās pārtikas loģistikā lieto konveijeru sistēmas un atsevišķos gadījumos arī universālus robotus, kādi sastopami jau apskatītajā metālapstrādē. Uzņēmējs un izgudrotājs Henrijs Fords (*Henry Ford*) idejas ražošanas līnijai guva tieši lopkautuvē Čikāgā. Kaut arī šodien gaļas apstrāde ir ļoti modernizēta, joprojām dominē roku darbs. Tomēr lielos gaļas apstrādes cehos ir sastopami roboti gaļas griešanai. Šāda veida robotu lietojumā izmanto sensorus un attēlu apstrādi optimālam griezumam: izejvielu satver un fiksē, attēlu apstrādes un vadības sistēma mēra griezuma optimālo leņķi/attālumu, robots sāk pašu griešanas procesu, ko kontrolē ar spēka momenta sensoriem (skat. 1.21. (c) att.).

Dzērienu ražošana ir augsti automatizēts process, kurā atsevišķos posmos izmanto arī robotus. 1.21. (d) attēlā ilustrēts robots ar satvērējierīci dzērienu mucu satveršanai no līnijas un kārtošanai uz paletes. Lai noteiktu mucu pozīciju, izmanto lāzera skeneri.

Pastāv tādi lietojumi, kur ar universālu robotu aizstāj koka frēzēšanas darbgaldus jeb *CNC* (angļu val. *computerized numerical control*) iekārtu. 1.22. (a) attēlā parādīts universāls robots ar frēzi, kas montēta kā instruments, ļaujot izgriezt skulptūras no koka [26]. Priekšrocība ir spēja veidot neregulāras formas objektus plašā 3D telpā. Plānošana noris tikai ar *CAR* datorprogrammu (angļu val. *computer aided*

robotics) palīdzību. Tiesa gan, šāda tipa lietojums nav plaši izplatīts.

Eksistē robotizētas mašīnas, kas automatizēti spēj kārtot automašīnu riepas (skat. 1.22. (b) att.). Šāds uzdevums nav vienkāršs, jo produkta mīkstās struktūras dēļ nepieciešama speciāla satvērējierīce. Kārtojot riepas vairākās rindās, robota sistēmai jāspēj plānot katras riepas atsevišķa vieta un pozīcija. Tam savukārt nepieciešami īpaši sensori vai attēlu apstrādes sistēma.

Ļoti daudz robotu izmanto elektronikas industrijā, montējot komponentus uz elektronikas platēm, vai kārtojot tos (piemēram, taustiņus tastatūrā, pakojot baterijas u. c.). 1.22. (c) attēlā redzami piecasu tipa roboti (*SCARA*), kas novietoti ap montāžas līniju. Elektronikas industrijā bieži izmanto robotus arī ar paralēlo kinemātiku (skat. 2.1.3. nodaļu), kas ļauj sasniegt ļoti lielu darba ātrumu un precizitāti, taču mazākā, ierobežotā telpā.

Zināšanu paškontrolē

1. Skaidrot termina *industriālais robots* nozīmi!
2. Ar ko atšķiras industriālais robots un teleoperators?
3. Nosaukt četrus robotu sadarbības veidus! Kādas ir to priekšrocības un trūkumi?
4. Kurās valstīs un kad ir izstrādāti pirmie mūsdienīgie industriālie roboti?
5. Kad un kur tika uzstādīti pirmie *Unimate* roboti?
6. Kurās pasaules valstīs uzstāda visvairāk industriālo robotu? Kurās Eiropas valstīs uzstāda visvairāk industriālo robotu?
7. Kādās ražošanas nozarēs izmanto industriālos robotus? Kādam lietojumam?
8. Ko apzīmē ar *robotu blīvumu* un kā tas raksturo valsti un nozari?
9. Nosaukt un raksturot visizplatītākos industriālo robotu lietojuma veidus metālapstrādē!

2. | ROBOTU SISTĒMAS

Pēc *ISO 10218-1* industriālā robota sistēma sastāv no industriālā robota, instrumenta, citām mašīnām un perifērijas iekārtām, papildu asīm, kas palīdz robotam veikt darba uzdevumu [2]. Šajā nodaļā ir apskatīti būtiskākie komponenti, kas tiek izmantoti robotu sistēmās, sniegts ieskats robotu shematiskajos apzīmējumos un terminoloģijā.

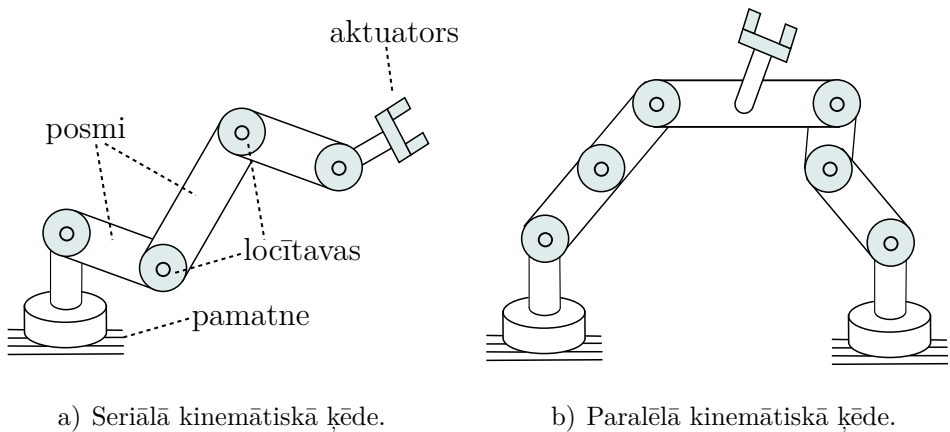
2.1. Mehāniskā uzbūve un apzīmējumi

Turpmāk skaidroti robotu manipulatoru kinemātisko ķēžu pamati – kinemātiskās ķēdes būtība, apzīmējumi un biežāk sastopamie veidi (skat. 2.1.1.–2.1.3. nodaļu). Koordinātu sistēmas robotikā skaidrotas 2.1.5. nodaļā, bet kustību rotācija – 2.1.4. nodaļā.

2.1.1. Kinemātiskā ķēde

Par robotu kinemātiku sauc mācību par kustību neatkarīgi no pieliktajiem spēkiem, kas to izraisa. Industriālā robota mehānisko struktūru var modelēt kā vairāku cietu ķermeņu savienojumu, no kura katrs ķermenis veic neatkarīgu relatīvu kustību attiecībā pret iepriekšējo. Šos atsevišķos ķermeņus sauc arī par **posmiem** jeb **locekļiem**, un tie savstarpēji ir savienoti noteiktos punktos **asīm** jeb **locītavām**. Robota ass ļauj veikt **rotācijas** vai **taisnvirziena** jeb **lineāru** kustību starp diviem blakus posmiem. Attiecīgi **rotācijas asi** apzīmē ar R , bet **lineāro asi** – ar P . Robotu manipulatoru tipu apzīmē pēc tā kinemātiskās ķēdes salikuma, piemēram, RRP apzīmē manipulatoru

ar divām rotācijas un vienu lineāru asi tieši šādā asu secībā. Posmu kopumu sauc par manipulatora **kinemātisko ķēdi**. Tehniski industriālo robotu var aprakstīt kā multifunkcionālu iekārtu, kura sastāv no vairākiem cietiem ķermeņiem, kas savienoti ar rotācijas vai lineārajām asīm, veidojot vienotu kinemātisko ķēdi.



2.1. attēls. Vienkāršotas kinemātiskās ķēdes ar aktuatoru.

Kinemātiskās ķēdes iedala seriālās un paralēlās kinemātiskajās ķēdēs. **Seriālo jeb atvērto kinemātisko ķēžu** pirmajam un pēdējam posmam vienmēr ir tikai viens blakus posms, taču pārējiem posmiem vienmēr ir divi blakus posmi (skat. 2.1. (a) att.). Seriālajā kinemātikā katra locītava ir aprīkota ar savu piedziņu. Taču ass piedziņas elektriskā mašīna ne vienmēr tiek kustināta līdz ar manipulatora posma kustību, jo caur pārvades sistēmu tā var atrasties arī citā posmā.

Par **paralēlo kinemātisko ķēdi** sauc ķermeņu savienojumus, kuri veido **noslēgtu** sistēmu, piemēram, pirmais un pēdējais posms pievienots nekustīgai pamatnei (skat. 2.1. (b) att.). Paralēlās kinemātiskās ķēdes uzbūvē iespējamas arī pasīvas locītavas, t. i., locītavas kurām nav savas piedziņas. Visbiežāk locītavas ar piedziņu montētas pie pamatnes un netiek kustinātas. Pateicoties slēgtajai kinemātikas ķēdei, locītava nodrošina lielāku stingrību un precizitāti. Manipulatora darba instruments jeb **aktuators** tiek montēts seriālās kinemātikas pēdējā

posmā, taču paralēlajā kinemātikā tas ir kāds no vidusposmiem, ko izmanto kā platformu. Robotiem ar paralēlās kinemātikas uzbūvi darba telpa parasti ir mazāka, salīdzinot ar seriālo, taču tiem ir lielāka celtspēja.

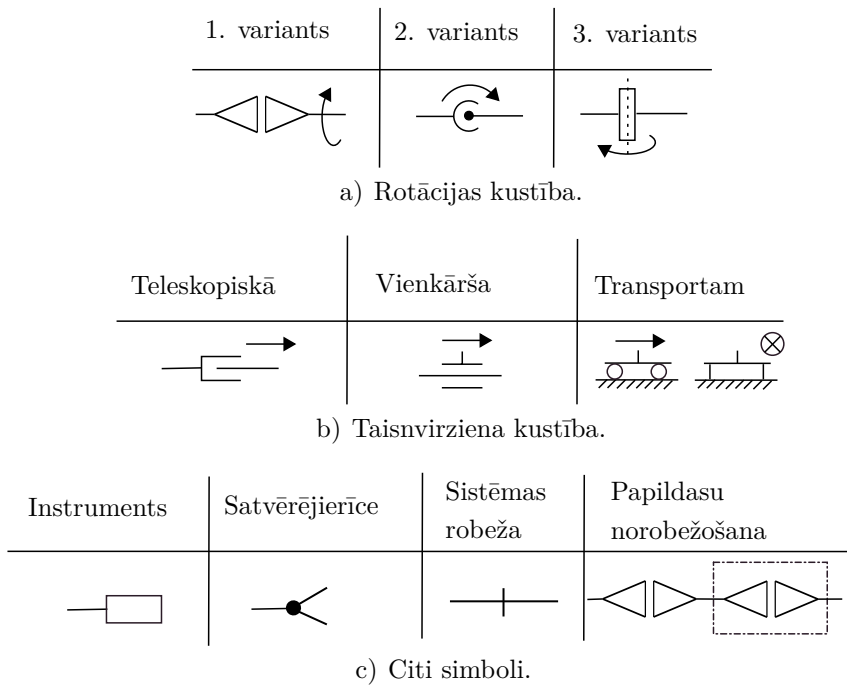
Atsevišķos ķermeņus, kas veido kinemātisko ķēdi, numurē, sākot ar pamatni jeb bāzi, kurai piešķir numuru 0. Pirmais posms ir 1, otrais posms ir 2 utt. Par **manipulatoru** jeb **robotu roku** sauc visu seriālo kinemātisko ķēdi. Pēdējos trīs posmus parasti velta robotu rokas **delnai**, kas galvenokārt nepieciešama instrumenta virziena noteikšanai (skat. 2.1.4. nodaļu). Nereti izšķir arī **rumpi** vai **vidukli** (1. posms) un **plecu** (2. posms). Robotu **kinemātiskais modelis** apraksta sakarību starp robotu ģeometriju un tā posmu kustībām. Robotu kustību dinamika ir mācība par spēkiem, kas izraisa robotu locītavu kustību.

2.1.2. Apzīmējumi un shematiskā uzbūve

Manipulatora kinemātisko ķēdi apzīmē, izmantojot standartizētu simbolu kolekciju, lai viennozīmīgi ilustrētu tā individuālo uzbūvi. 2.2. attēlā doti simboli pēc *VDI 2860* [30]. Gan taisnvirziena, gan rotācijas kustībām var norādīt asu virzienu, taču tas nav obligāti.

Rotācijas kustību atkarībā no uzskatāmības var ilustrēt trīs veidos. 2.3. (a) attēlā manipulators ir *RPR* tipa, kuram pirmā un pēdējā ass apzīmē rotāciju, kas ilustrēta divos dažādos veidos. Ja manipulators montēts uz mobilas platformas, to apzīmē ar **transporta simboliku** (skat. 2.2. (b) att. un 2.3. (b) att.). Shēmā var norādīt arī sistēmas robežu, piemēram, atdalot galvenās robotu rumpja asis no delnas asīm, apzīmējot tās ar punktēti svītrotu līniju. Vienkāršs robots ar trim rotācijas asīm, kuram instruments montēts aiz trešās ass, parādīts 2.3. (c) attēlā.

Taisnvirziena kustībām izšķir **vienkāršas** un **teleskopiskās** lineārās asis. Teleskopiskā parasti ir cilindriskā hidrauliskā ass, kas kustības laikā iekļaujas savā korpusā. Tās kopējais garums ir mainīgs. Kustība tiek realizēta ar zobsiksnas, ķēdes vai zobratu sistēmu. Viens posms veic relatīvu taisnvirziena kustību pa vai gar otru posmu.



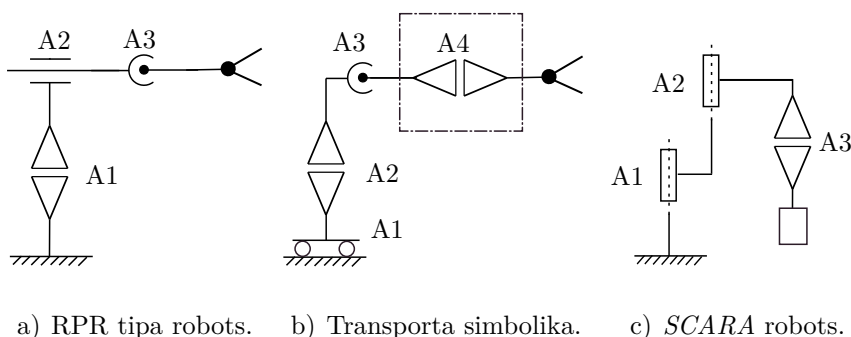
2.2. attēls. Apzīmējumu simboli.

Ar **brīvības pakāpi** f apzīmē maksimālo neatkarīgu kustību skaitu, kuras ķermenis var veikt attiecībā pret izvēlētu atskaites sistēmu. Kopā ar trīs rotācijas un trīs taisnvirziena kustībām ķermenim ir iespējamās $f_{max} = 6$ brīvības pakāpes. Ar kinemātiskās ķēdes brīvības pakāpi F apzīmē manipulatora neatkarīgu asu skaitu – rotācijas vai taisnvirziena kustības asis. Tātad, iespējams, $f \leq F$ jeb robota manipulatoram var būt vairāk asu nekā brīvības pakāpju, bet ne otrādi.

2.1.3. Kinemātikas veidi

Turpmāk apskatīti visbiežāk sastopamie kinemātikas veidi, gan pēc seriālās, gan paralēlās kinemātiskās ķēdes uzbūves.

SCARA robota nosaukums ir akronīms no angļu valodas nosaukuma *Selective Compliance Articulated Robot Arm*. Tam ir vismaz divas paralēlas rotācijas un viena lineārā ass (skat. 2.4. (a)–(c) att.). **SCARA** robots var sasniegt punktus plašā darba telpā, taču ar iero-



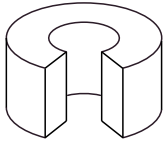
2.3. attēls. Dažādu manipulatoru shematiski piemēri.

bežotu instrumenta virzienu jeb orientāciju. Ja *SCARA* robotam ir trešā rotācijas ass, ar to parasti var mainīt instrumenta virzienu ap šo asi, kas ir paralēla lineārajai asij. *SCARA* roboti izceļas ar ļoti lielu ātrumu, un tos izmanto kopā ar darbgaldu montāžas uzdevumiem, elektronikas rūpniecībā, detaļu kārtošanā.

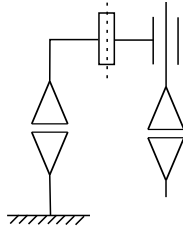
Portālrobotu sauc arī par **Dekarta** robotu vai **kartēzisko manipulatoru**. Tas sastāv no trim lineārām asīm X, Y, Z , kas savstarpēji montētas perpendikulāri. Parasti portālrobotu izmanto pārceļšanas (*pick-and-place*) darbiem, un tā celjspēja ir salīdzinoši liela. Tiem ir vienkārša, stabila uzbūve un vienkāršs matemātiskais modelis (skat. 2.4. (d)–(f) att.). Kaut arī telpa portālrobotiem ir ļoti liela, tā vienmēr ir mazāka par paša robota izmēriem – portālroboti nevar aizsniegt ārpus tās robežām. Portālrobotus izmanto 3D printeros, *CNC* darbgaldos, kā arī loģistikas telpās lielu kravu pārceļšanai.

Sfēriskajam manipulatoram ir divas perpendikulārās rotācijas asis un viena taisnvirziena kustības ass. Robots var aizsniegt punktus sfērā. 2.4. (g)–(i) attēlā sniegts vienkāršots sfēriskā robota modelis. Tam var būt papilddasis instrumenta virziena maiņai. Mūsdienās šāda tipa robotus gandrīz pilnībā aizstāj ar sešu rotācijas asu manipulatoriem, jo lineārā ass ir salīdzinoši lēna, kā arī trajektorijas aprēķiniem ir jāizmanto nestandarta matemātiskais modelis.

Sešu asu manipulators ir visizplatītākais manipulatora modelis,



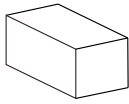
a) Darba telpa.



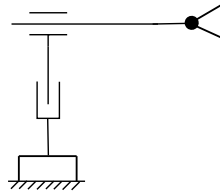
b) Shēma.



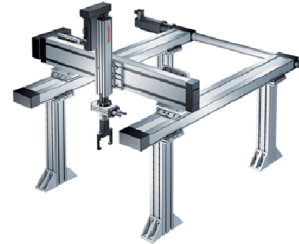
c) Attēls.



d) Darba telpa.



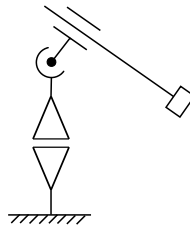
e) Shēma.



f) Attēls.



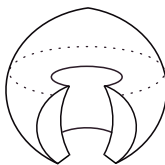
g) Darba telpa.



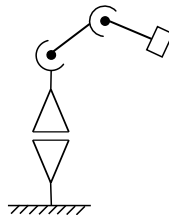
h) Shēma.



i) Attēls.



j) Darba telpa.



k) Shēma.

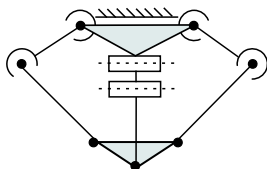


l) Attēls.

2.4. attēls. Seriālās kinemātikas roboti ar vienkāršotām shēmām, (a)–(c) – SCARA, (d)–(f) – portālrobots, (g)–(i) – sfēriskais, (j)–(l) – artikulēts sešu asu manipulators.



a) Darba telpa.



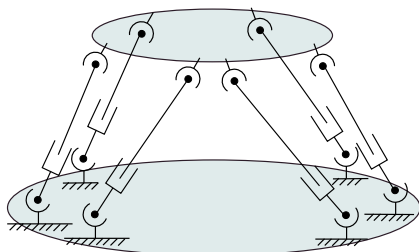
b) Shēma.



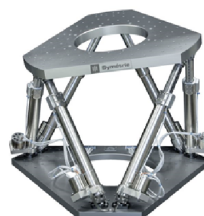
c) Attēls.



d) Darba telpa.



e) Shēma.



f) Attēls.

2.5. attēls. Paralēlās kinemātikas, (a)–(c) – delta robots, (d)–(f) – paralēlais robots.

jo ir universāli lietojams visdažādākajiem uzdevumiem. Manipulatora pirmās trīs asis parasti nosaka instrumenta pozīciju telpā, bet pēdējās trīs – tā virzienu. Tam ir plaša darba telpa, kurā gandrīz jebkuru punktu var sasniegt ar jebkuru instrumenta virzienu. 2.4. (j)–(l) attēlā parādīts vienkāršots modelis ar pirmajām trim asīm.

Paralēlās kinemātikas kategorijai pieder paralēlais manipulators un delta robots.

Delta manipulators ir konstruēts no trim pleciem, kuri piesaistīti rotācijas asīm pie pamatnes, kā ilustrēts 2.5. (a)–(c) attēlā. Katrā plecā bez piedziņas ass ir arī pasīvās ass – papildu vidējā rotācijas

ass un lodveida locītava pie instrumenta platformas. Delta robots spēj kustināt instrumentu x , y un z virzienā, taču tā spējas mainīt virzienu ir ļoti ierobežotas. Parasti pamatne ir montēta augšpusē un darba telpa ir zem robota. Šādi robots ir labi piemērots lietu kārtošanai uz ražošanas līnijas (*pick-and-place*). Tā kā visa piedziņas sistēma atrodas pamatnē, kustīgās daļas veido no ļoti viegliem materiāliem ar zemu inerci, kas ļauj sasniegt lielu darbības ātrumu.

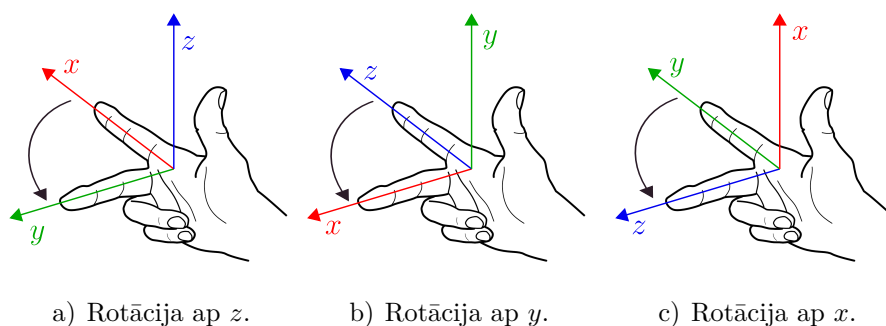
Paralēlais manipulators, kas saukts arī par Stevarda platformu un heksapodu, ir ilustrēts 2.5. (d)–(f) attēlā. Tas ir viens no sarežģītākajiem robota tipiem ar paralēlo kinemātiku. Parasti šiem robotiem ir gan aktīvās, gan pasīvās locītavas, un to uzbūve iekļauj kustīgu platformu, uz kuras var montēt darba instrumentu. Vairākas asu piedziņas sistēmas ir piestiprinātas pie nekustīgas pamatnes, kas ļauj izmantot lielākas un jaudīgākas elektriskās mašīnas, tādā veidā īstenojot robotu ar lielu celjspēju. Paralēlais manipulators atšķirībā no Delta robota spēj mainīt arī instrumenta virzienu. Tipiski paralēlos manipulatorus izmanto dažāda veida auto vai lidmašīnas simulatoros un augstas precizitātes apstrādes metālrūpniecībā, kur nepieciešams smags darba instruments.

Citi robotu veidi iekļauj **cilindrisko manipulatoru**, kas pēc uzbūves līdzinās *SCARA* un sfēriskā tipa manipulatoram. **Iekaramā tipa** robots pēc darba telpas līdzinās portālrobotam, taču tā darba instruments tiek pārvietots nospriegotās trosēs, un to vada elektriskās mašīnas, kas montētas ārējā korpusā vai rāmī. Eksistē arī jaukta tipa uzbūves, kur paralēlo kinemātiku papildina seriālā kinemātika. Būtības tā ir divu robotu savienošana.

2.1.4. Manipulatora koordinātu sistēmas un rotācijas

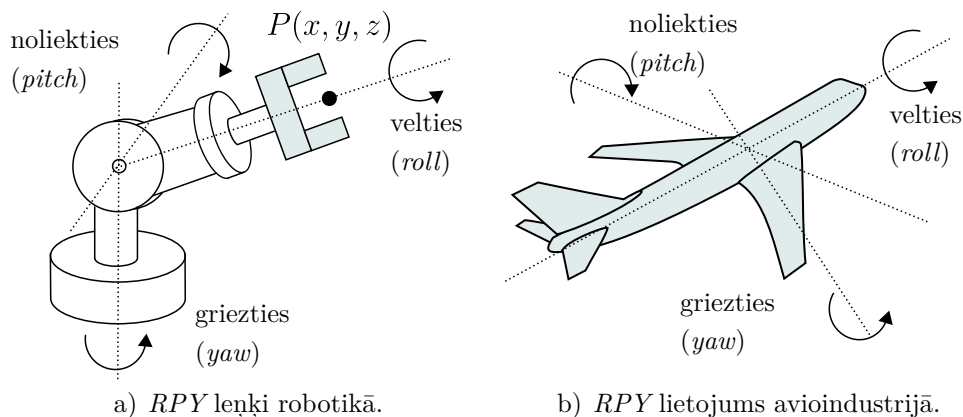
Katram kinemātiskās ķēdes posmam piesaista savu koordinātu sistēmu. No šīs koordinātu sistēmas izvēlas vienu asi, ap kuru notiek ķermeņa rotācija vai taisnvirziena kustība.

Pēc *ISO 9787* [31] par pozitīvu rotācijas virzienu ap asi nosaka rotāciju pretēji pulksteņa rādītāja virzienam, ja uz šo asi skatās no augšas.



2.6. attēls. Labās rokas likums koordinātu sistēmās.

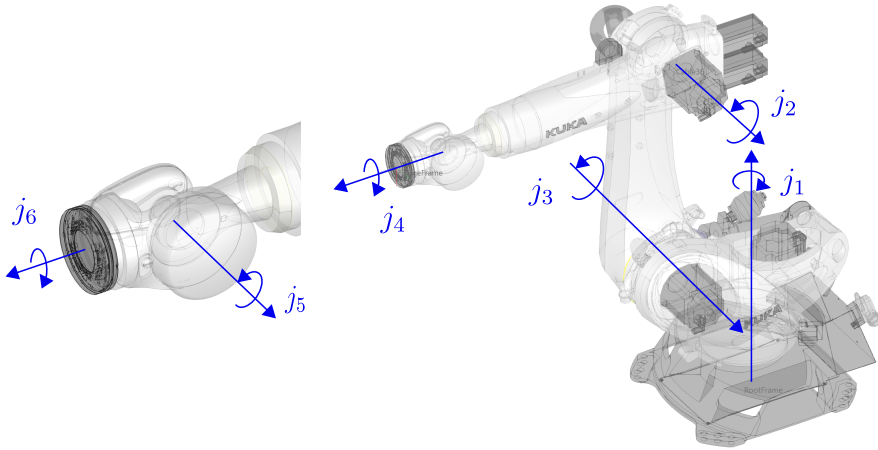
Piemēram, rotācijā ap z asi x ass tuvojas sākotnējai y asij. Īpašība saglabājas arī rotācijā ap pārējām asīm. Definīcija atbilst **labās rokas likumam**, kas ilustrēts 2.6. attēlā. Variantā (a) īkšķis norāda z ass virzienā, rādītājpirksts – x ass virzienā, bet vidējais pirksts – y ass virzienā. Pozitīvā rotācijā ap z jeb īkšķi rādītājpirksts tuvojas vidējam pirkstam. Varianti (b) un (c) ir atvasināti, taču saglabā tās pašas īpašības.

2.7. attēls. Manipulatora rotācijas asis pēc *RPY* konvencijas.

Pastāv vairākas konvencijas, pēc kurām noteikt koordinātu sistēmas rotāciju. Visizplatītākās ir **Eilera** un **RPY** konvencijas (angļu val. *roll-pitch-yaw*), kuras detalizēti skaidrotas 3.1.1. nodaļā. Pēc

RPY metodes rotācijas noris ap nekustīgām pasaules koordinātu sistēmas asīm. Savukārt pēc *Eilera* konvencijas, ko izmanto arī aviobūvē, kuģubūvē un autobūvē, lai aprēķinātu mašīnas kustības virzienu, katra jauna rotācija notiek ap jaunajām koordinātu sistēmas asīm. Šī metode definēta arī standartā *ISO 8855*, un to plaši lieto robotikā [32]. Šeit būtiska ir asu rotācijas secība, jo tā maina rezultātu.

2.7. (a) attēlā redzama ir tipiska manipulatora delnas uzbūve ar trim asīm, lai darba instrumenta galapunktu rotētu, noliektu vai pagrieztu uz sāniem (apveltū). Analogijai var pieņemt lidmašīnas modeli (skat. 2.7. (b) att.). Robota delnas parasti sastāv no trim ortogonālām rotācijas asīm, lai brīvi iestatītu instrumenta virzienu. Ja instrumenta nav, par manipulatora galapunktu pieņem pēdējā posma galapunktu. Ja ir montēts darba instruments jeb aktuators (piemēram, satvērējierīce), ņemot vērā instrumenta ģeometriju, par manipulatora galapunktu uzskata instrumenta darba punktu, ko telpā apzīmē ar $P(x, y, z)$.



2.8. attēls. *KUKA Quantec* robota asis un to griešanās virzieni.

Rotācijas var apzīmēt ar burtiem A, B un C. Piemēram, ražotāja *KUKA* robotiem (kā 2.8. attēlā) ar A apzīmē rotāciju ap z , B – ap y un C – ap x asi, taču citu robotu ražotājiem apzīmējumi var būt citādi.

Katram robota modelim tā vadības sistēmā ražotājs nosaka lietotājam redzamos locītavas pozitīvos rotācijas virzienus. 2.8. attēlā

ilustrēts sešu asu robots, kuram numurētas visas asis no 1 līdz 6. Robota rotācijas vai taisnvirziena kustības asis apzīmē ar j_i , kur i ir ass numurs, asis numurējot ar $1 \dots n$ augošā secībā un veseliem skaitļiem. Nereti to apzīmē arī ar A (angļu val. *axis*), taču turpmāk lietots apzīmējums j_i . Robota modelim attēlā norādīti pozitīvie asu griešanās virzieni saskaņā ar tā vadības sistēmu. Ar mainīgo q_i apzīmē rotācijas vērtību, bet ar mainīgo d_i – taisnvirziena distances vērtību.

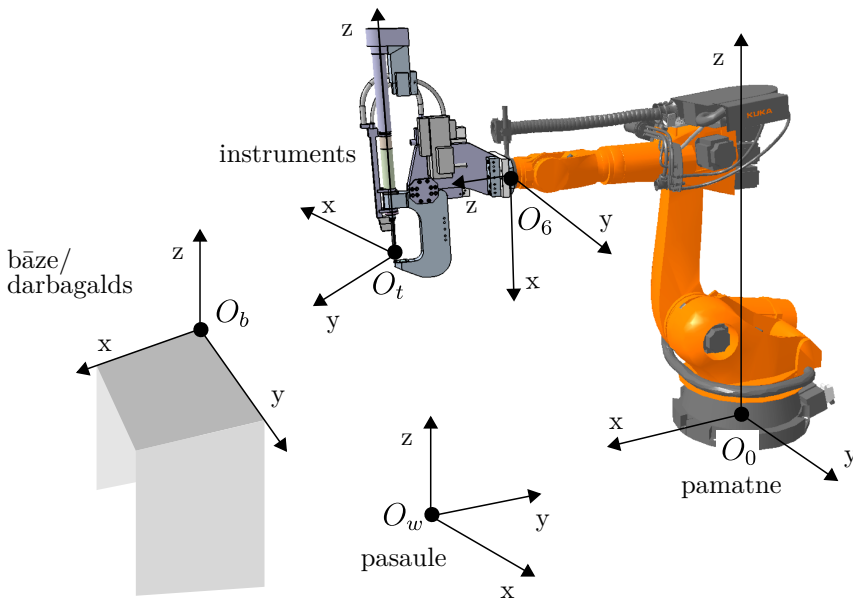
Atkarībā no robota tipa jeb tā kinemātiskās ķēdes delna sastāv no vienas līdz trim asīm. Piemēram, *SCARA* tipa robotiem mēdz būt tikai viena rotācijas kustība darba instrumentam, bet sešu asu manipulatoram tipiski ir visas trīs brīvības pakāpes.

2.1.5. Koordinātu sistēmas industriālajā robotikā

Lai noteiktu darba uzdevumu, tipiska robota sistēma izmanto vairākas koordinātu sistēmas, kuras jāpazīst arī operatoram. Robota **pamatnes koordinātu sistēma** parasti nav maināma un atrodas vienā līmenī ar virsmu, piemēram, grīdu, kur piestiprināts manipulators. Nereti pamatnes koordinātu sistēmas sākumpunkts O_0 vienlaicīgi ir arī kinemātiskās ķēdes 0-tā posma koordinātu sistēmas sākumpunkts.

Robota **instrumenta koordinātu sistēma** norāda, kur atrodas darba instrumenta galapunkts. Tipiskākie robotu instrumentu piemēri minēti 1.2. nodaļā. Instrumenta koordinātu sistēmas sākumpunktu O_t uzdod pēdējā kinemātiskā posma koordinātu sistēmā. Punktu O_t apzīmē ar *TCP*, kas ir saīsinājums no angļu valodas *tool center point* jeb instrumenta spice. Būtiski ir noteikt arī šīs koordinātu sistēmas virzienu, kas atbilst instrumenta darbības virzienam. Lai darba uzdevumu paveiktu kvalitatīvi, ir svarīgi zināt un iestatīt šīs koordinātas precīzi. Novirzes no reāliem instrumenta datiem iestatījumos noved pie neprecīzas kustības un nekvalitatīvas uzdevuma izpildes. Lielākas kļūdas var novest pat pie sadursmēm ar citiem objektiem telpā. Darba instrumenta datus var iegūt trīs veidos: no instrumenta ražotāja kā konstrukcijas *CAD* datnes (angļu val. *computer aided design*), fiziski izmērot vai arī noteikt ar robota vadības sistēmas speciālām funkcijām.

2.9. attēlā uzskatāmi ilustrētas visas koordinātu sistēmas. Robota **pasaules koordinātu sistēma** norāda, kur telpā atrodas pats robots. Ja ražošanas telpā ir vairāki roboti, kuri strādā pie viena darba uzdevuma (piemēram, apstrādes robots un satvērējrobots), tad katram dara zināmu, cik tālu un kādā leņķī tas atrodas no noteikta telpas nulles punkta O_w . Ja izmanto tikai vienu robotu un tā darbgaldu, pasaules koordinātu sistēmu var neiestatīt, un tās sākumpunkts var sakrist ar pamatnes koordinātu sistēmas sākumpunktu.



2.9. attēls. Koordinātu sistēmas industriālajā robotikā.

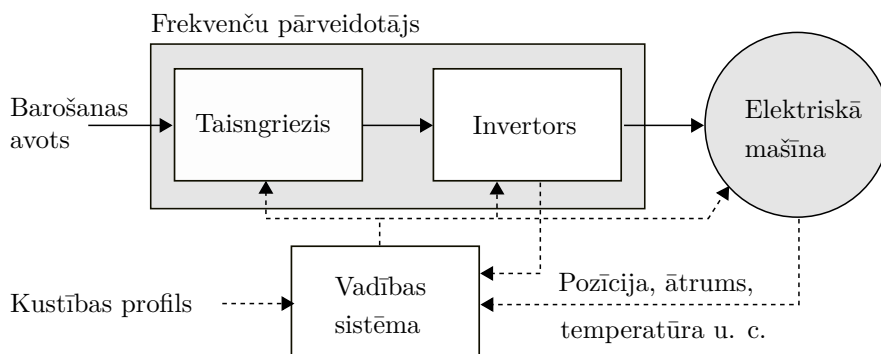
Bāzes jeb darbgalda koordinātu sistēma norāda, kur telpā atrodas apstrādājamais objekts. Piemēram, metāla detaļai ir jāveic vairāki urbumi dažādās vietās neregulāros leņķos. Detaļa ir fiksēta uz speciāla darbgalda tikai vienā veidā. Ir tikai vienreiz jānosaka punktu O_b uz darbgalda kā bāzes koordinātu sistēmas sākumpunkts, kā arī šīs koordinātu sistēmas virziens. Pēc tam visas urbuma vietas var izteikt bāzes koordinātu sistēmā. Ja mainās darba instruments, atjaunojot instrumenta datus, var apstrādāt to pašu objektu arī ar citu instrumentu, kam *TCP* atšķiras. Ja darbgalds tiek nobīdīts telpā, nosaka

tikai darbgalda jauno pozīciju, bet ne atsevišķās urbuma koordinātas. Bāzes koordinātu sistēmu O_b norāda attiecībā pret O_0 jeb robota montāžas pamatni.

Papildu koordinātu sistēmas nereti izmanto katram atsevišķam uzdevumam, mobilajai platformai vai kamerai, ja tādas izmanto. Parasti katra tipa industriālajiem robotiem var noteikt vairākas koordinātu sistēmas un darba izpildes laikā tās mainīt.

2.2. Piedziņa robotu sistēmās

Visizplatītākais piedziņas veids robotikā ir elektriskā piedziņa. Hidrauliskā piedziņa šodien sastopama tikai speciālos risinājumos. Pasaulē gandrīz visi sērijveida industriālie roboti ir aprīkoti ar elektriskajām mašīnām. Fluīdu (hidrauliska) piedziņa parasti ir robotiem līdz trīs asīm. Piedziņas sistēma lielā mērā nosaka robota kvalitatīvos rādītājus un veido lielu izmaksu daļu. Mūsdienās galvenokārt izmanto elektriskās sinhronās bezkontakta mašīnas, kam ir raksturīgs liels jaudas blīvums. Piedziņas sistēmu kopumā veido elektriskā mašīna, pārvades mehānisms, frekvenču pārveidotāji, kas darbojas no kāda barošanas avota, pozīcijas mēriekārtas un vadības sistēma.



2.10. attēls. Elektriskās piedziņas vadības sistēmas blokhēma.

2.10. attēlā dota vienkāršota elektriskās piedziņas sistēmas blokhēma, kurā redzams taisngriezis, invertors, elektriskā mašīna un vadības

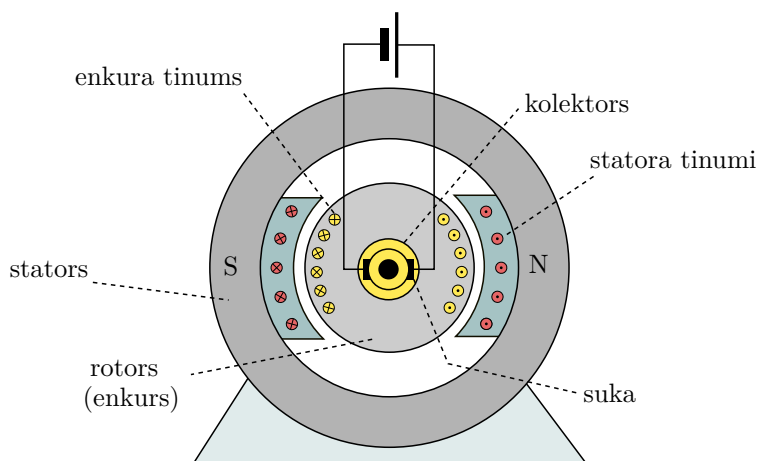
sistēma. Ar nepārtrauktu līniju attēlota jaudas plūsma, ar raustītu līniju redzami vadības signāli jeb sensoru atgriezeniskā saite no elektriskās mašīnas un invertora. Robotikā ir būtiski ar augstu precizitāti regulēt dažādus parametrus. Sensoru informācija parasti iekļauj vārpstas pozīciju, ātrumu, temperatūru, fāzes strāvu, līdzstrāvas posma spriegumu un strāvu, kā arī vārpstas mehānisko bremžu stāvokli. Nākamajās apakšnodaļās apskatīti industriālajā robotikā būtisko elektrisko mašīnu tipi, vadības principi, devēju funkcija un pārvades sistēmas.

2.2.1. Elektriskā mašīna

Elektriskā mašīna ir sastopama gandrīz ikvienā robotizētā iekārtā. Robotikas pirmsākumos bija izplatītas **līdzstrāvas mašīnas**, jo tās bija vienkārši regulēt. Līdzstrāvas mašīna var darboties gan kā dzinējs, pārvēršot līdzstrāvu mehāniskajā enerģijā, gan kā ģenerators, no mehāniskas rotācijas ražojot elektrisko enerģiju. Tā sastāv no diviem vai vairāk enkura tinumiem uz rotora, kas novietoti magnētiskajā laukā. Ārējo magnētisko lauku ierosina ar patstāvīgajiem magnētiem vai ārēju ierosmes tinumu. Strāvu uz rotora tinumiem pārvada ar kolektora palīdzību, kas sastāv no mehāniskām sukām un gredzena. Ja caur enkura tinumiem plūst strāva, magnētiskais lauks tajos ierosina spēku pēc Fleminga labās rokas likuma. Rotoram griežoties, sukas uz kolektora pārslēdzas uz nākamo tinumu, nemainot līdzstrāvas virzienu tinumos, tādējādi radot nepārtrauktu spēku un nodrošinot patstāvīgu griešanās kustību, kā parādīts 2.11. attēlā.

Ātrumu regulē, mainot enkura spriegumu vai ierosmes strāvas stiprumu, vai ārējā magnētiskā lauka stiprumu. Strāva ir proporcionāla pieliktajai slodzei jeb griešanās momentam. Kā līdzstrāvas mašīnu trūkumi ir jāmin **komutācijas** zudumi starp sukām un kolektoru, kas ierobežo maksimālo strāvu. Sukas mehāniski nolietojas, un tām nepieciešama regulāra apkope.

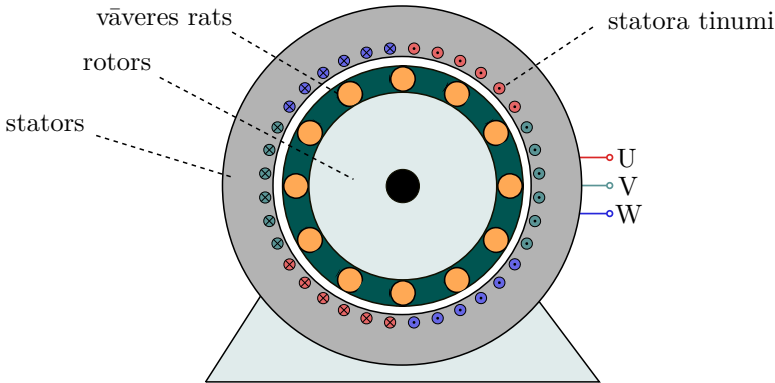
Asinhronās mašīnas ir ieguvušas stabilu vietu rūpniecībā un automatizācijā. Agrāk asinhronās mašīnas lietoja tur, kur nebija jāmaina griešanās ātrums, un tās slēdza pie maiņsprieguma tīkla bez



2.11. attēls. Līdzstrāvas mašīnas uzbūves shēma.

pārveidotājiem. Griešanās ātrums ir atkarīgs no maiņsprieguma frekvences un statora polu pāru skaita. Plašāk izplatoties invertoriem, asinhrono mašīnu ātruma vadāmība ir kļuvusi vienkāršāka. Asinhronā mašīna sastāv no statora tinumiem, kas novietoti 120° leņķī viens pret otru (skat. 2.12. att.). Savas uzbūves dēļ rotoru mēdz saukt par vāveres ratu. Tajā nav tinumu, bet tas sastāv no vienmērīgi izvietotiem metāla stieņiem, kuri galos savienoti ar gredzeniem. Atšķirībā no līdzstrāvas mašīnas asinhrono mašīnu uzbūve ir vienkāršāka, un tās darbina praktiski bez apkopes, jo tām nav mehāniska kolektora, kas nolietojas.

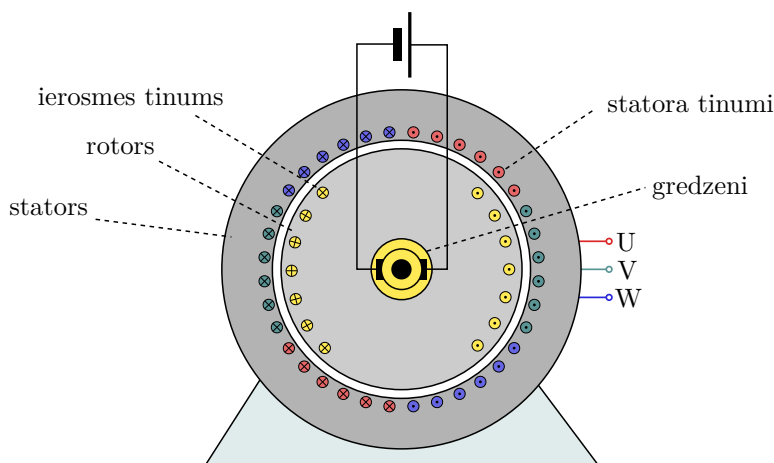
Asinhronās mašīnas rotora ātrums ir nedaudz mazāks (1–8 %) par statora ierosinātā magnētiskā lauka griešanās ātrumu. Magnētiskā lauka un rotora griešanās ātruma attiecību sauc par **slīdi**, un tā ir atkarīga no mašīnas slodzes. Dzinēja režīmā slīde mainās no 0 (rotora ātrums ir vienāds ar magnētiskā lauka griešanās ātrumu un mašīnas moments ir 0) līdz maksimālajai vērtībai, kad mašīna sniedz vislielāko griešanās momentu. Rotora ātrums pie mainīgas slodzes nav stabils, taču nav arī brīvi maināms ar strāvas maiņu. Kaut arī precīzu vadāmību nodrošina ar invertoriem, robotikā asinhronās mašīnas neizmanto.



2.12. attēls. Divpolu asinhronās mašīnas shēma.

Sinhrono mašīnu parasti izmanto kā ģeneratoru. To jauda nereti pārsniedz 1 MW. Sinhronās mašīnas stators veidots līdzīgi kā asinhronajai mašīnai un sastāv no vismaz trim savstarpēji 120° novietotiem tinumiem (skat. 2.13. att.). Taču tās rotors sastāv no ierosmes tinuma, kuram caur slidošiem gredzeniem un sukām pievada līdzstrāvu ierosmei. Sinhronās mašīnas rotors griežas sinhroni statora magnētiskajam laukam, bet ietur nelielu leņķi no rotējošā magnētiskā lauka (kas ir negatīvs ģeneratora režīmā). Pie 50 Hz trīsfāžu maiņsprieguma un polu pāra skaita $p = 1$ rotors veic $n = 3000$ apgriezienu minūtē. Pie polu pāra skaita $p = 2$ apgriezieni ir $n = 1500$. Dzinēja režīmā parasti izmanto invertoru un pozīcijas devēju, kura signālu izvērtē vadības sistēma un attiecīgi pielāgo frekvenci vēlamajai.

Visbiežāk izmantotā piedziņa industriālajā robotikā ir **sinhronā mašīna ar patstāvīgajiem magnētiem** rotorā. Tātad ne ierosmes tinums, ne gredzeni un sukas tā ierosmes enerģijas padevei nav nepieciešami, un sinhronā mašīna var darboties praktiski bez apkopes. Kā magnētus izmanto tādus retus materiālus kā neodīmu, dzelzs un bora ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) savienojumus vai samārija un kobalta (SmCo) savienojumus. Tā kā rotorā neplūst strāva, nerodas arī siltums, un mašīna mazāk jādzesē. Radušos siltuma zudumus statorā novadīt ir vieglāk, jo

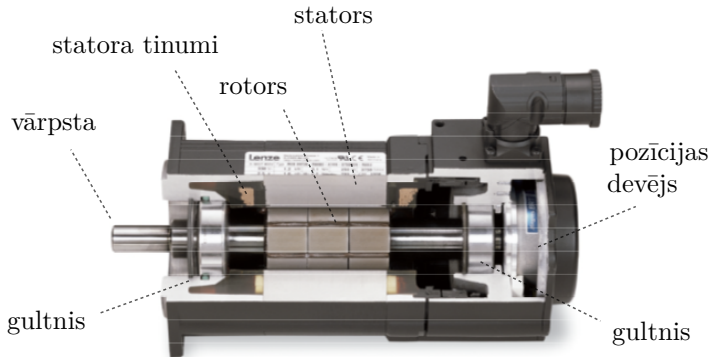


2.13. attēls. Sinhronās elektriskās mašīnas shēma.

tas ir tieši savienots ar ārējo korpusu. Šādas mašīnas sasniedz salīdzinoši lielu jaudas blīvumu, bet parasti magnētu izmaksu dēļ rūpniecībā tās izmanto jaudai līdz 10 kW vai arī iekārtās, kurās nepieciešama augsta precizitāte. Tās uzbūve vienkāršotā veidā sniegta 2.14. attēlā.

Bezkontakta līdzstrāvas mašīnu uzbūve ir apgriezta, salīdzinot ar parastām līdzstrāvas mašīnām. Tās rotorā izmantoti pastāvīgie magnēti, bet stators veidots no tinumiem. Tādējādi bezkontakta līdzstrāvas mašīnas pēc uzbūves ir identiskas sinhronajām mašīnām ar patstāvīgajiem magnētiem. Atšķirīga ir vienīgi pievadītās strāvas forma – līdzstrāvas mašīnai tā ir trapecveida, bet sinhronajai mašīnai – sinusoidāla. Abiem veidiem visbiežāk izmanto invertorus. Par bezkontakta līdzstrāvas mašīnām saka, ka tām ir elektroniska komutācija, jo tā aizstāj mehāniskās sukas un kolektoru.

Servomašīna nav konkrētas elektriskās mašīnas tipa apzīmējums, bet šādi apzīmē elektrisko mašīnu, kas saņem vadības signālus no kontrolera un iekļauj absolūtās pozīcijas devēju, kas nodrošina atgriezenisko saiti ar vadības sistēmu. Tādējādi jebkuru noslēgtu sistēmu var saukt par servomašīnu. Parasti servomašīnās izmanto pastāvīgos magnētus, lai sasniegtu augstus dinamiskos rādītājus, kas mūsdienās



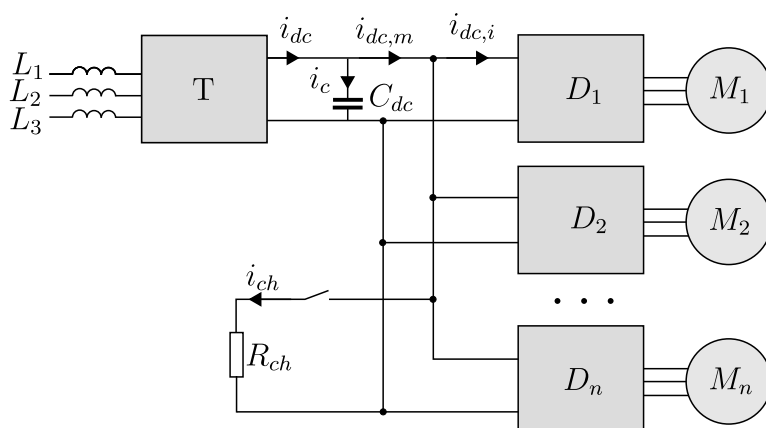
2.14. attēls. Sinhronā elektriskā mašīna ar patstāvīgajiem magnētiem [33].

ir tipiski robotiem ar vienas ass elektriskās mašīnas jaudu virs 0,5 kW. Tām ir laba jaudas un svara attiecība un ļoti augsta precizitāte.

2.2.2. Elektrisko mašīnu vadība

Katrai atsevišķai elektriskajai mašīnai ir savs **invertors**. Robota visu asu invertorus parasti baro no kopēja **līdzstrāvas posma**. Līdzstrāvas posma ieejā ir trīsfāžu taisngriezis, kas parasti ir vai nu pasīvs diožu tilts, vai pilnībā vadāms tiristoru vai tranzistoru tilts. Līdzstrāvas posmam, ko angļiski dēvē arī par **DC-bus** vai **DC-link**, ir pieslēgts katrs atsevišķais invertors un parasti arī **bremzēšanas rezistors** (angļu val. *braking chopper*). Līdzstrāvas posma spriegums ir mainīgs robežās no 540 V līdz aptuveni 700 V sistēmās, kas pieslēgtas 380 V trīsfāžu maiņsprieguma tīklam (400 V Rietumeiropā). Spriegums krīt, strauji pieaugot invertoru slodzei, un aug, ja elektriskās mašīnas strādā ģeneratora režīmā un rekuperē enerģiju. 2.15. attēlā parādīta vispārīga konceptuālā blokhēma robota piedziņas sistēmai, kas sastāv no n asīm un attiecīgi n elektriskajām mašīnām.

Taisngriezi T un invertorus D_1-D_n kopējā kapacitāte līdzstrāvas posmā veido C_{dc} , kas spriegumu stabilizē. Kopējā kapacitāte veidojas gan no atsevišķo invertoru kondensatoru kapacitāšu summas, gan, iespējams, atsevišķi pieslēgta kondensatora līdzsprieguma posmā. Šī ka-

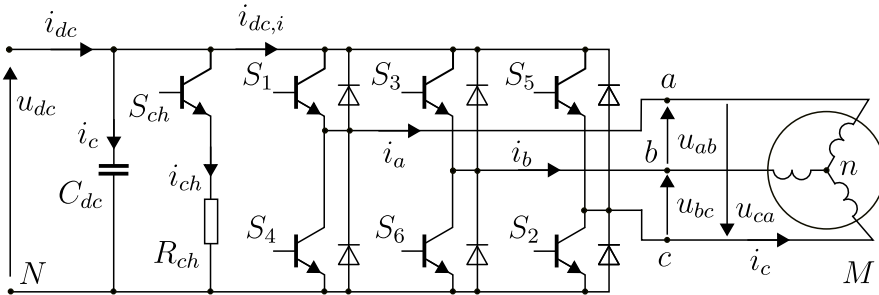


2.15. attēls. Piedziņas sistēmas kopnes blokshēma.

pacitāte kopā var sasniegt vairākus milifaradus. Bremzēšanas rezistors R_{ch} iebūvēts, lai rekuperācijas režīmā slāpētu pieaugošo spriegumu, ja tas tuvojas maksimāli atļautajam. Parasti ierobežojošais faktors ir elektronikas komponentu maksimāli atļautais spriegums, pie kura tiek garantēta komponentu droša ekspluatācija. Modernās sistēmās bremzēšanas rezistors ir paredzēts tikai ārkārtas gadījumiem. Ja izmantots pilnībā vadāms taisngriezis, tad rekuperatīvo enerģiju iespējams novadīt atpakaļ tīklā, nepieļaujot līdzstrāvas posma sprieguma celšanos. Eksistē arī robotu sistēmas, kurās taisngrieža vispār nav, bet katra robota invertorus baro no līdzstrāvas tīkliem [34].

Invertorus var iedalīt trīs kategorijās: **trīsfāžu sprieguma invertors** (*VSI* – angļu val. *voltage source inventor*), **trīsfāžu strāvas invertors** (*CSI* – angļu val. *current source inventor*) un **sprieguma invertors ar impulsa platuma modulāciju** (*PWM-VSI* – angļu val. *voltage source inventor with pulse-width modulation*). Turpmāk (skat. 2.16. att.) apskatīts *VSI* tipa invertors, kādu visbiežāk lieto industriālo robotu piedziņas sistēmās. Kā slēdžus visbiežāk izmanto izolēta aizvara bipolāros tranzistorus (*IGBT* – angļu val. *insulated gate bipolar transistor*), kuriem ir raksturīga laba vadītspēja, augsta pretsprieguma aizsardzība un maza vadības strāva. Invertoros mēdz izmantot arī

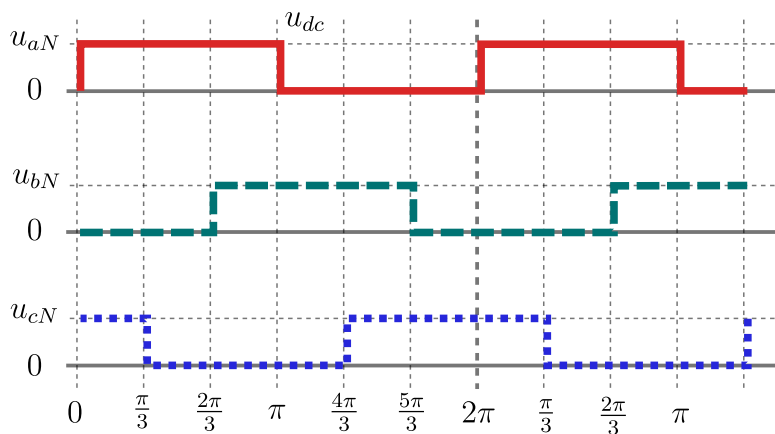
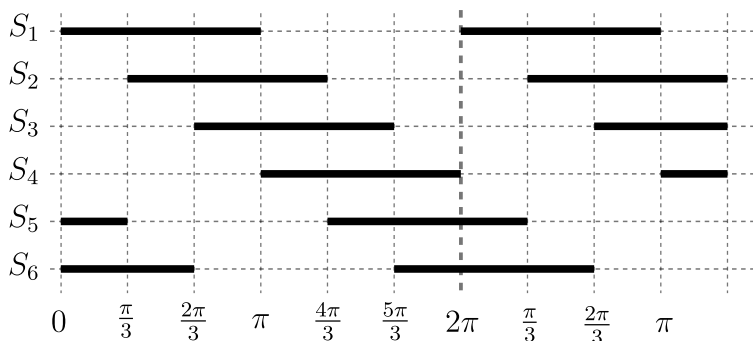
bipolāros tranzistorus vai tiristorus, taču tos nelieto industriālajā robotikā. Visiem tranzistoriem S_1, \dots, S_6 paralēli ir pieslēgtas diodes, lai vienmēr nodrošinātu strāvas atpakaļceļu neatkarīgi no tā, kurš slēdzis ir ieslēgts. Tātad shēmā plūst strāva, ja kaut viens no tranzistoriem ir ieslēgts.



2.16. attēls. IGBT slēdžu VSI tipa invertora vienkāršota shēma.

Slēdžu darbība imitē līdzstrāvas mašīnas mehānisko komutāciju, taču ir precīzi vadāma. Pastāv divi komutācijas slēdžu vadības veidi: **sešu soļu metode** un **impulsa platuma modulācija** (*PWM* – angļu val. *pulse width modulation*). Pastāv arī vairāki veidi, kā modelēt *PWM* signālu: sinusoidāla bāzes signāla *PWM*, histerēzes *PWM*, vektoru *PWM* metodes. Turpmāk detalizēti apskatīts sešu soļu komutācijas algoritms.

2.17. (b) attēlā ilustrēti visu sešu slēdžu stāvokļi. Idealizējot piemēru un ignorējot pārejas procesus, jebkurā momentā vienlaikus ir ieslēgti trīs slēdži. Piemēram, ja slēdži S_1 , S_5 un S_6 ir ieslēgti, tad spriegumi u_{aN} un u_{cN} starp punktiem a un c pret līdzstrāvas posma negatīvo polu N ir vienādi ar u_{dc} . Savukārt u_{bN} ir nulle, jo punkts b ir tieši pieslēgts N . Spriegumu katrā fāzē pret līdzstrāvas posma negatīvo polu ilustrē 2.17. (a) attēls. Nākamajā solī slēdzis S_5 tiek izslēgts, un S_2 tiek ieslēgts, jeb punkts c tiek pārslēgts no līdzstrāvas posma pozitīvā pola uz negatīvo, un maina spriegumu no u_{dc} uz 0. Abi pārējie spriegumi paliek nemainīgi. Tā process atkārtojas, ilustrējot sešus dažādus

a) Spriegums starp fāzi un līdzstrāvas posma negatīvo polu N .

b) Slēdžu stāvokļi.

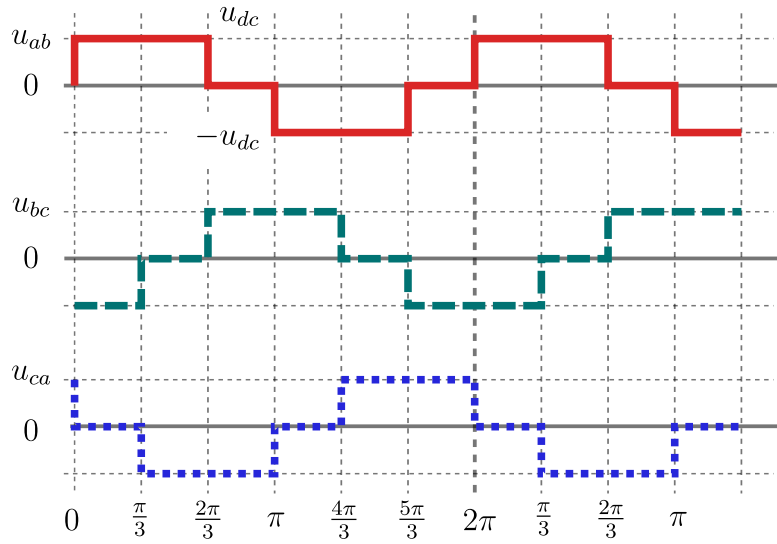
2.17. attēls. Sprieguma avota invertora (VSI) slēdžu stāvokļi un spriegumi.

slēdžu stāvokļus, kas nosedz vienu pilnu periodu. Katra soļa garums ir $\pi/3$ jeb 60° , sešos soļos veidojot 2π jeb pilnu periodu.

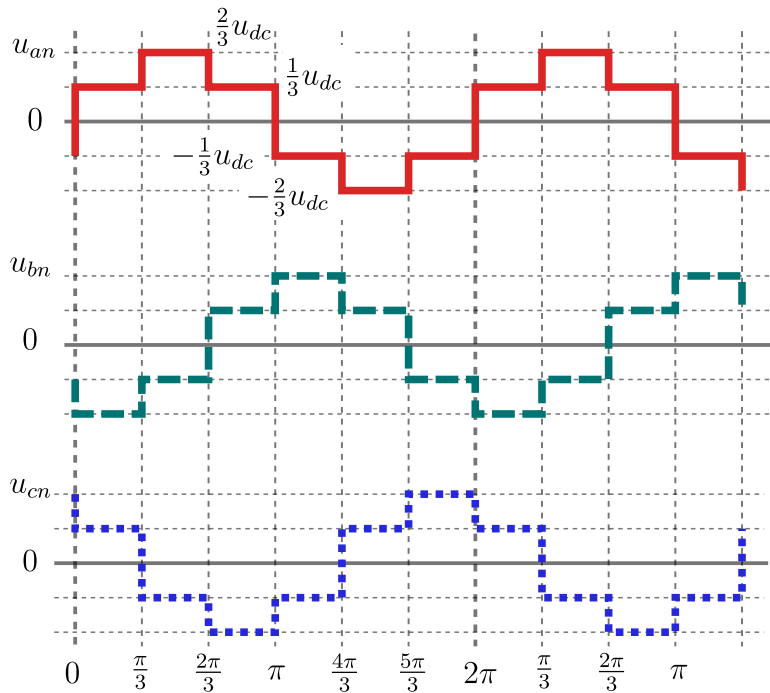
Līniju spriegumus starp jebkuriem diviem punktiem a, b, c aprēķina

$$\begin{aligned} u_{ab} &= u_{aN} - u_{bN} \\ u_{bc} &= u_{bN} - u_{cN} \quad , \\ u_{ca} &= u_{cN} - u_{aN} \end{aligned} \tag{2.2.1}$$

kur u_{aN}, u_{bN} un u_{cN} attiecīgie spriegumi pret līdzstrāvas posma ne-



a) Līniju spriegumi (starp divām invertora fāžu izejām, piemēram, punktiem a un b).



b) Fāžu spriegumi (starp fāzi un elektriskās mašīnas neitrāles punktu n).

2.18. attēls. Sprieguma avota invertora spriegumi uz elektriskās mašīnas tinumiem.

gatīvo polu N . Līniju spriegumi atkarībā no slēdžu stāvokļa ilustrēti 2.18. (a) attēlā.

Fāžu spriegumus starp a, b, c un neitrāli n var aprēķināt pēc

$$\begin{aligned} u_{an} &= \frac{2}{3}u_{aN} - \frac{1}{3}u_{bN} - \frac{1}{3}u_{cN} \\ u_{bn} &= \frac{2}{3}u_{bN} - \frac{1}{3}u_{aN} - \frac{1}{3}u_{cN} \cdot \\ u_{cn} &= \frac{2}{3}u_{cN} - \frac{1}{3}u_{aN} - \frac{1}{3}u_{bN} \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

Fāžu spriegumi ir ilustrēti 2.18. (b) attēlā. Gan fāžu, gan līniju spriegumi ir atkarīgi no līdzstrāvas posma efektīvās sprieguma vērtības U_{dc} . Vispārīgā gadījumā veidojas līnijas sprieguma efektīvā vērtība

$$U_{line} = \frac{\sqrt{6}}{\pi}U_{dc} = 0,78U_{dc} \quad (2.2.3)$$

un fāzes sprieguma efektīvā vērtība

$$U_{phase} = \frac{\sqrt{2}}{\pi}U_{dc} = 0,45U_{dc}, \quad (2.2.4)$$

kur redzams, ka attiecība starp abiem spriegumiem ir $\sqrt{3}$.

Ar elektrisko mašīnu uzbūvi, kā arī citiem, detalizētākiem vadības aprēķiniem var iepazīties literatūras avotā [35].

2.2.3. Pozīcijas mērsistēmas

Robotu sistēmām jāatbilst augstiem mehāniskās precizitātes kritērijiem. Var izmantot vislabākās pieejamās elektriskās mašīnas, taču bez kvalitatīvas atgriezeniskās saites augstus robota precizitātes un atkārtojamības rādītājus nevar sasniegt (skat. 4.4.2. nodaļu). Viens no galvenajiem signālu devējiem ir ass pozīcijas devējs un tās griešanās ātruma devējs. Parasti tiešā veidā nemēra ass pozīciju, bet gan motora vārpstas stāvokli, robota vadības sistēmai to pārrēķinot ass pozīcijā pēc zināma pārvades koeficienta. Mērsistēmai jābūt spējīgai noteikt absolūtu pozīciju arī pie augsta mašīnas apgriezienu skaita. Turpmāk izklāstītas visbiežāk izmantotās pozīciju un ātruma noteikšanas sistē-

mas industriālajiem robotiem – optoelektroniskā un induktīvā mērīšanas metode.

Pozīcijas mērīšana ar **optoelektroniskajiem sensoriem** ir izplatīta vienkāršajā automatizācijā. Šeit izmanto gaismas staru, ko vada caur **impulsa disku**, uz kura izveidots režģis ar gaismas caurlaidīgiem un izolējošiem laukumiem. Izšķir impulsa disku ar gaismas caurlaidi un disku ar gaismas atstarošanu. Impulsa diska neabsorbēto gaismu nolasa ar fotosensoriem, kuri tālāk signālu nodod robota vadības sistēmai. Atkarībā no uzbūves pozīciju var mērīt tikai **inkrementāli** (novērojot kustības maiņu) vai **absolūti** (novērojot gan kustības maiņu, gan absolūto ass vai elektriskās mašīnas vārpstas pozīciju).

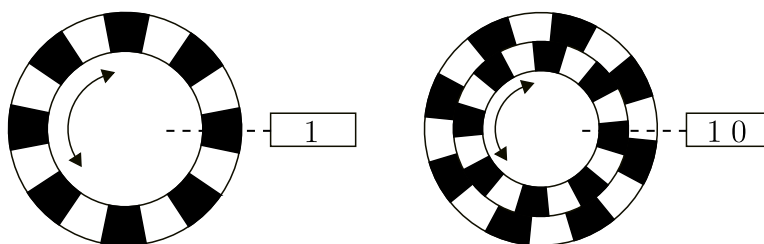
Vienkāršākajā gadījumā optoelektroniskais disks sastāv no regulāriem tumšiem absorbējošiem un gaišiem atstarojošiem laukumiem uz diska perimetra. Disks montēts tieši uz elektriskās mašīnas vārpstas vai robota ass, un uz tā tiek vērsts gaismas stars, kura atstaroto gaismu nolasa ar fotosensoru. Cits optoelektroniskā diska tips ir veidots ar caurspīdīgiem un necaurspīdīgiem laukumiem. Gaismas stars šajā gadījumā iet cauri diskam. Gaismas avots un fotosensori ir vērsti viens pret otru un atrodas pretējās diska pusēs. Atkarībā no diska tipa eksistē vienkāršs inkrementāls disks, inkrementāls disks ar virziena noteikšanu un cikliski absolūtas pozīcijas disks.

Vienkāršiem optoelektroniskiem diskkiem ir viens gredzens ar tumšiem un gaišiem laukumiem, kā ilustrēts 2.19. (a) attēlā. Ar šādu sistēmu iespējams noteikt rotācijas faktu un aprēķināt rotācijas ātrumu. Ilustrētajā piemērā izšķirtspēja ir $360^\circ/16 = 22^\circ$ liels solis, jo tam ir 16 laukumu. Vadības sistēmas uzdevums ir reģistrēt fotosensoru signālus un aprēķināt rotācijas ātrumu pēc signāla maiņas frekvences. Taču 2.19. (a) attēlā redzamajam risinājumam ir viens trūkums – vadības sistēma nevar noteikt, kurā virzienā ass griežas, kas robotikā ir būtiski. Tādēļ izmantojot vismaz **divu gredzenu** sistēmu, kā parādīts 2.19. (b) attēlā, kurā abi gredzeni ir nobīdīti par pusi no viena laukuma platuma, iegūstot divu bitu signālu. Ar to iespējams noteikt arī rotācijas virzienu, saņemot jebkurus divus sekojošus signālus tabulā

virzienā no a uz d

$$\begin{aligned}
 a) & 00 \\
 b) & 01 \\
 c) & 11 \\
 d) & 10 \\
 a) & 00
 \end{aligned}
 \tag{2.2.5}$$

Novērojot signālu $[1\ 0]$ un tam sekojošu signālu $[0\ 0]$, var secināt, ka ass griežas pulksteņrādītāja virzienā. Savukārt, saņemot jebkurus divus sekojošus signālus tabulā virzienā no d uz a , ass griežas pretēji pulksteņrādītāja virzienam. 2.19. (b) attēlā ilustrētajam diskam ir 11° soļa izšķirtspēja, jo tas dod 32 signālus viena apgrieziena laikā ($360^\circ/32 = 11^\circ$).



a) Inkrementāls disks.

b) Inkrementāls disks ar virziena noteikšanu.

2.19. attēls. Optoelektroniskā devēja režģu/disku veidi.

Abos iepriekš analizētajos risinājumos nav iespējams noteikt ass pozīciju sākumstāvoklī. **Cikliski absolūtas diska** uzbūve atšķiras un ietver vairākus bitu līmeņus. Izejas signāls ir unikāls katrai specifiskai ass pozīcijai arī gadījumos, ja visa sistēma iepriekš ir bijusi atslēgta no enerģijas padeves. 2.20. (a) attēlā ilustrēts vienkāršots devēja disks ar trīs bitu signālu. Par ciklisku to sauc, jo ass absolūtu pozīciju var noteikt tikai viena apgrieziena apjomā, taču eksistē arī vairāku apgriezienu režģa varianti. Ar šāda tipa absolūtās pozīcijas devēju iespējams noteikt vārpstas pozīciju, tūlīt pēc iekārtas ieslēgšanas nesinhronizējot

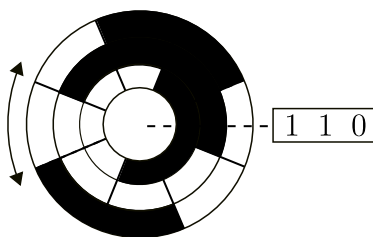
ass pozīciju ar vadības sistēmai uzdoto.

2.20. (a) attēlā ilustrētajam devējam ir trīs bitu (decimālajā sistēmā – astoņu pozīciju) izšķirtspēja jeb $360/8 = 45^\circ$ soļa lielums. Gredzenu skaits atbilst bitu daudzumam signāla izšķirtspējai. Pieejami devēji pat ar 12 vai vairāk bitu izšķirtspēju, kas ļauj noteikt pozīciju līdz $360/65536 = 0,0055^\circ = 0,33$ arcmin lielu loka soli. Devējus izmanto arī caur pārvades sistēmām, pieslēdzot tos tā, lai viens devēja apgrieziena atbilstu kādai noteiktai iekārtas distancei vai darba lielumam. 2.20. (b) attēlā parādīts reāls 10 bitu režģis.

arcmin

arcmin ir loka garuma mērvienība, kas atbilst $1/60$ daļai no grāda. Tā kā apļa garums ir 360° , viena arcmin garums ir $1/21\ 600$ no apļa.

Absolūtas pozīcijas diskiem iespējami dažādi gredzenu kodējuma varianti. 2.21. attēlā parādīti dažādi gredzenu laukumu salikumi, rezultātā katrai pozīcijai nodrošinot unikālu bināro skaitli.



a) 3 bitu.



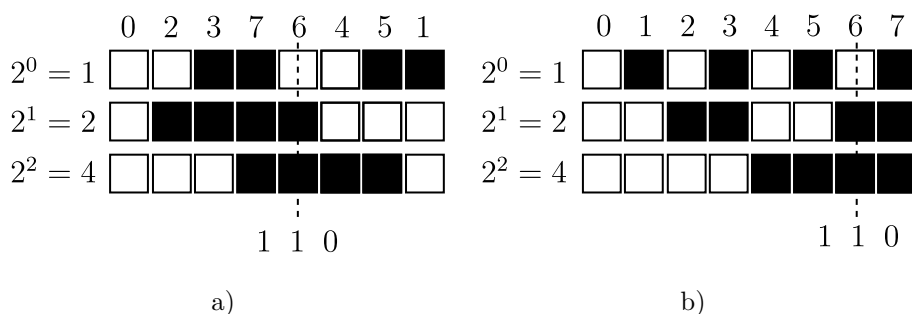
b) 10 bitu.

2.20. attēls. Cikliski inkrementāls absolūtas pozīcijas noteikšanas disks.

2.20. (a) attēlā iekšējie gredzeni apzīmē vecākos bitus un katrs sastāv no diviem segmentiem – vienu tumšu un vienu gaišu, un šie gredzeni savstarpēji ir nobīdīti par 90° . Trešais gredzens sastāv no četriem regulāri izvietotiem segmentiem – diviem gaišiem un diviem tumšiem, katrs aizpildot 90° . Tas atbilst 2.21. (a) attēlā redzamajai

shēmai. Katrs nākamais gredzens sastāv no divreiz lielāka segmentu skaita. Cits laukumu variants parādīts 2.21. (b) attēlā, kur gredzens ar jaunāko bitu aizņem tieši vienu laukumu. Šeit binārais skaitlis pieaug augošā secībā. Uzskatāmi parādītā pozīcija [1 1 0] decimālajā sistēmā aprēķināma pēc summas, kur katru bināro skaitli 0 vai 1 reizina ar 2 attiecīgajā pakāpē $0, 1, \dots, n$:

$$110_b = 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 4 + 2 + 0 = 6. \quad (2.2.6)$$



2.21. attēls. Signāla bitu aprēķins.

Induktīvais pozīcijas devējs pēc uzbūves ir atšķirīga ierīce, un to lieto vairumam maiņstrāvas mašīnu. Būtībā tā ir analoga ierīce un iztiek bez digitālās elektronikas elektriskās mašīnas tuvumā. Kaut arī teorētiski kā analoga iekārta tā var sniegt neierobežoti augstu izšķirtspēju, parasti tā ir atkarīga no attālināti pievienotā analogi digitālā pārveidotāja. Tādēļ induktīvais devējs ir robustāks un arī lētāks nekā optoelektroniskais. Pateicoties elektronikas attīstībai, iespējams izgatavot ļoti augstas izšķirtspējas induktīvos devējus.

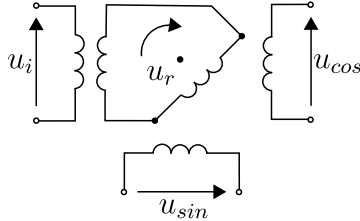
Uz devēja rotora ir montēts tinums, kurā tiek inducēts augstas frekvences (parasti 2–10 kHz) references signāls. 2.22. (a) attēlā sniegta induktīvā devēja uzbūve. Devējam ir divas nekustīgas un savstarpēji 90° leņķī montētas statora spoles – **sinusa un kosinusa spoles**. Vēl viena nekustīga spole nepārtraukti inducē rotorā noteiktas frekvences

signālu u_i , kas kopā darbojas kā rotējošs transformators. Savukārt rotors rotācijas laikā inducē dažādas amplitūdas strāvu sinusa un kosinusa tinumos. Rotoram griežoties, periodiski mainās magnētiskā lauka stiprums un tādējādi arī inducētās strāvas lielums sinusa un kosinusa tinumos. Inducēto spriegumu amplitūdai ir sinusoidāla forma, kas abās spolēs ir nobīdīta par 90° . References signāla amplitūdu var aprēķināt pēc

$$\begin{aligned} u_{sin} &= k u_r \sin \theta \\ u_{cos} &= k u_r \cos \theta, \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

kur k ir transformācijas koeficients no rotora uz sinusa un kosinusa tinumiem. Rotorā leņķi θ var aprēķināt pēc abu tinumu inducētajām spriegumu amplitūdām u_{sin} un u_{cos} :

$$\theta = \arctan \frac{u_{sin}}{u_{cos}}. \quad (2.2.8)$$



a) Uzbūve.



b) Pozīcijas devējs no Tamagawa.

2.22. attēls. Induktīvie pozīcijas devēji.

Induktīvo devēju praktiski neietekmē temperatūras svārstības, mitrums un putekļi, jo tas darbojas ar magnētisko lauku. Nereti devēju pievieno caur mehānisku ātrumu pārvadi, lai noteiktu absolūtu pozīciju arī lineārajām asīm.

2.2.4. Pārvades sistēma

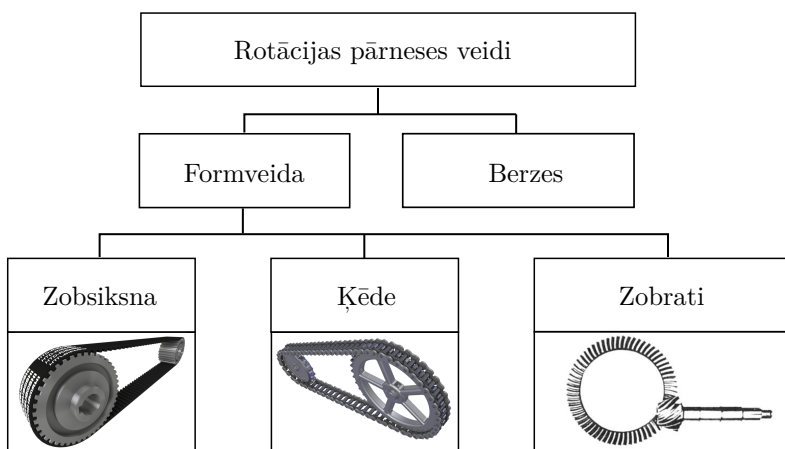
Manipulatora korpusā izmanto dažāda veida pārvades sistēmas rotācijas kustības pārvadei no elektriskās mašīnas vārpstas uz manipulatora asi. Robotikā izmanto pārvades sistēmas ar ļoti augstu pārvades koeficientu, lai sasniegtu nepieciešamo griezes momentu, vienlaikus saglabājot augstu precizitāti. Industriālajam manipulatoram ar celtspeļu virs 150 kg nepieciešamais pārvades koeficients asīm j_1, j_2, j_3 ir no 150 līdz 200, bet to nominālie griezes momenti vienai asij sasniedz 4000 N·m. Paātrināšanās laikā griezes moments var sasniegt divkārtu līdz trīskārtu nominālo vērtību – 10 000 N·m. Tātad, lai robota ass j_1 veiktu vienu apgriezību, elektriskās mašīnas ass veic 200 apgriezienus. Attiecīgi lielāks ir griešanās moments uz manipulatora ass. Asīm j_4, j_5, j_6 pārvades sistēmas koeficients tipiski ir no 50 līdz 100. Nominālais griezes moments šāda robota delnas asīm sasniedz 1500 N·m ar trīskārtu maksimālo vērtību paātrinājuma laikā.

Pārvades sistēmas papildus funkcijas robotikā iekļauj nepieciešamību atsevišķām asīm vadīt kabelus caur ass centru, kuras centrā izveidots attiecīga lieluma atvērums. Kvalitatīvās īpašības iekļauj pozīcijas un atkārtojamības precizitāti vienai asij zem 10 arcsec (skat. arī 4.4.2. nodaļu). Pārvades sistēmai ir būtiska loma precizitātes sasniegšanā. Izejas ass **brīvkustība** pie fiksētas ieejas ass (angļu val. *backlash*) un **histerēzes zudums** (angļu val. *hysteresis loss*) jeb zaudētā kustība (angļu val. *lost motion*) ir pārvades sistēmas kvalitātes aspekti.

Ass brīvkustība veidojas no tukšas telpas starp zobratu atsevišķo zobu virsmām. Histerēze apzīmē materiāla reakciju uz ārēju spēku. Līdzīgi kā magnētismā, lietojot elektrisko lauku, dzelzs magnetizējas ar nelielu laika nobīdi, bet, noņemot elektrisko lauku, tas nelielu laika sprīdi joprojām ir magnētisks. Līdzīgi materiāls reaģē uz ārēju mehānisku spēku, piemēram, griezes momentu, mikroskopiski deformējoties. Griezes momenta iedarbībā uz ieejas ass, zobratu materiāls sākumā deformējas, un kustība uz ārējās ass nenotiek jeb daļa no kustības ir zau-

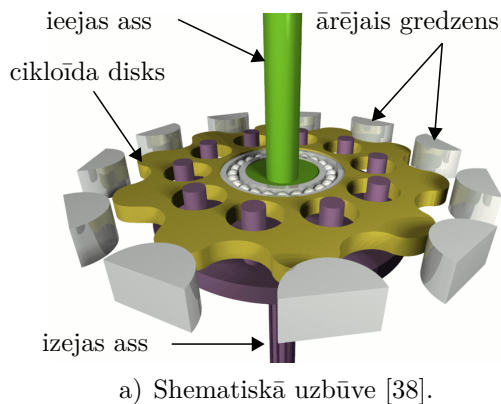
dēta. Bieži mehāniskās iekārtās kustības zudumu materiāla histerēzes dēļ var neņemt vērā, jo mehāniskā brīv kustība ir būtiski lielāka nekā histerēze, taču augstas precizitātes robotikā nereti aprēķinos izmanto abus lielumus.

2.23. attēlā parādīts sadalījums pēc pārvades veidiem. Robotikā biežāk izmanto formveida pārvadi – zobratu, siksnas vai ķēdes tipa mehānismus. Berzes tipa, piemēram, bezzobu, sikсна robotikā bieži nav piemērota iespējamās slīdes dēļ, kas traucē precīzi noteikt ass pozīciju. Rotācijas kustību pārvadei relatīvi lielos attālumos (viena kinemātiskā posma garumā) izmanto zobsiksnu vai ķēdi. To dara, lai smagumu – pašu elektrisko mašīnu – varētu montēt attālināti, pēc iespējas samazinot kopējo ceļamo smagumu. Piemēram, delnas asu j_4 , j_5 , j_6 mašīnas nereti montē kinemātiskās ķēdes otrajā posmā, tādējādi šīs asis tiek slogotas mazāk ar paša masu un kopējo kustību var veikt efektīvāk.



2.23. attēls. Rotācijas pārvades veidu iedalījums [36], [37].

Ķēdei ir vienkārša montāža un apkope, taču tā ir jāeļļo, un tai ir lielāks svars nekā zobsiksnai. Zobsiksna ir klusāka, tā nav jāeļļo, un ar to robots sasniedz ilgāku kalpošanas mūžu, taču tās fiziskās īpašības ir vairāk atkarīgas no temperatūras. Robotikā izmanto abus piedziņas



2.24. attēls. Cikloīda tipa pārvaldes sistēma.

veidus, taču izplatītāka ir zobsiksna pārvalde, kuru izmanto delnas asīm.

Robotikā raksturīgs ir ne tikai augsts pārvaldes koeficients, bet arī augsts **pārvaldes sistēmas blīvums**, kas ir pārvaldes koeficienta un momenta attiecība pret pārvaldes sistēmas masu un izmēriem. Vairumam robota asu pārvaldes sistēma iekļauta kinemātiskās ķēdes kustīgo daļu korpusos, tādēļ gan to svaram, gan izmēram jābūt nelieliem. Šādi risinājumi ir grūti realizējami ar vienkāršiem paralēlajiem zobratiem.

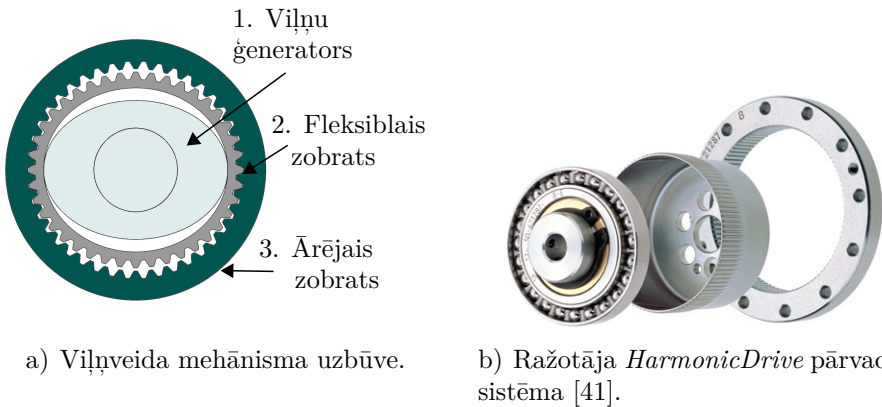
Viens no efektīvākajiem pārvaldes veidiem robotikā ir **cikloīda** sistēma. Tā sastāv no četrām galvenajām daļām. Ieejas ass ar ekscentrisku disku (2.24. (a) att. – zaļā) pārvaldes sistēmā dzen cikloīda disku (2.24. (a) att. – dzeltenais). Cikloīda disks atdalīts no ieejas ass diska ar gultņiem un tiek spiests pret ārējo gredzenu. Atrodoties sazobē ar ārējo gredzenu (2.24. (a) att. – pelēkais) veidojas lēna riņķveida kustība. Cikloīda diskā ir mazāk zobu nekā ārējā gredzenā. Izejas ass (2.24. (a) att. – violeto) savienota ar cikloīda disku, kas to dzen. Visas daļas ir rotējošas, un neviena nav slīdoša, kas nodrošina spēka momenta pārvaldes efektivitāti virs 93 % [40]. Pārvaldes koeficientu var

aprēķināt pēc ārējā un iekšējā diska zobu attiecības:

$$r = \frac{p - l}{l}, \quad (2.2.9)$$

kur p ir ārējā diska zobu skaits, bet l – cikloīda diska zobu skaits. Viens ieejas apgrieziena atbilst $360/l$ grādiem izejas apgriezieniem. Rotācijas virzienu maina uz pretējo. Cikloīda pārvadei ir vienvirziena raksturs – ieejas un izejas ass nevar mainīt vietām.

Praksē ieejas rotāciju pārvada uz trim zobratiem, kā 2.24. (b) attēlā, no kuriem katrs savienots ar cikloīda disku ar savu ekscentrisku asi. Izmanto divus cikloīda diskus, kas novietoti 180° viens pret otru, tādējādi diskam ar ārējo gredzenu ir kontakts gandrīz pilna apļa garumā, nodrošinot lielu spēka momentu, zemu brīv kustību (<1 arcmin), vibrāciju un troksni.



a) Viļņveida mehānisma uzbūve.

b) Ražotāja *HarmonicDrive* pārvades sistēma [41].

2.25. attēls. Harmoniskā pārvades sistēma.

Otrs izplatīts pārvades veids robotikā ir **harmoniskā** jeb **viļņveida** pārvades sistēma (skat. 2.25. att.). Tā sastāv no trim galvenajiem komponentiem. 1. Eliptiskas formas plate kalpo kā viļņu ģenerators, kura atrodas uz centriskas ieejas jeb piedziņas ass. 2. Starp piedziņas asi un eliptisko plati ir speciāls mainīgas formas elastīgs gultnis. Piedziņas asij un eliptiskajam diskam griežoties, rodas viļņveida kustība, kas caur gultni tiek pārvadīta uz otru būtisko sastāvdaļu – iekšējo elastīgo

zobratu. Šis iekšējais zobrats griešanas laikā maina savu formu, pielāgojoties elipses formai. 3. Trešais komponents ir ārējais riņķveida zobrats, kura zobi vērsti uz iekšu un atrodas sazobē ar elastīgo zobratu. Ārējais zobrats ir nekustīgs, stiprināts pie korpusa, un tam parasti ir par vienu vai diviem zobiem vairāk nekā elastīgajam zobratam.

Harmonisko pārvades sistēmu iespējams uzbūvēt vēl kompaktāku un vieglāku nekā cikloīda tipa pārvadi, un to konstrukcija ir vienkāršāka, vienlaikus nodrošinot gandrīz tikpat augstus kvalitatīvos rādītājus. Abas asis – gan piedziņas, gan izejas – iespējams realizēt uz vienas taisnes, kuru turklāt iespējams veidot ar vaļēju centru kabeļu pievadei.

Cits pārvades veids ir **planetārā** pārvades sistēma, kas ir salīdzinoši vienkāršāka nekā abi iepriekšminētie veidi. Planetārā pārvades sistēma sastopama ne tikai robotikā, bet arī sadzīves tehnikā.

2.3. Vadības sistēmas uzbūve

Robota vadības sistēmas uzdevums ir nodrošināt lietotājam iespēju detalizēti uzdot robota kustības, veikt programmas algoritma pārbaudi, izpildīt kustību vadību un ar to saistītos uzdevumus, kā arī nodrošināt drošības funkciju izpildi. Var uzskaitīt vairākus konkrētus vadības sistēmas uzdevumus, ja robota sistēma integrēta automatizētā darbstacijā, šūnā vai līnijā:

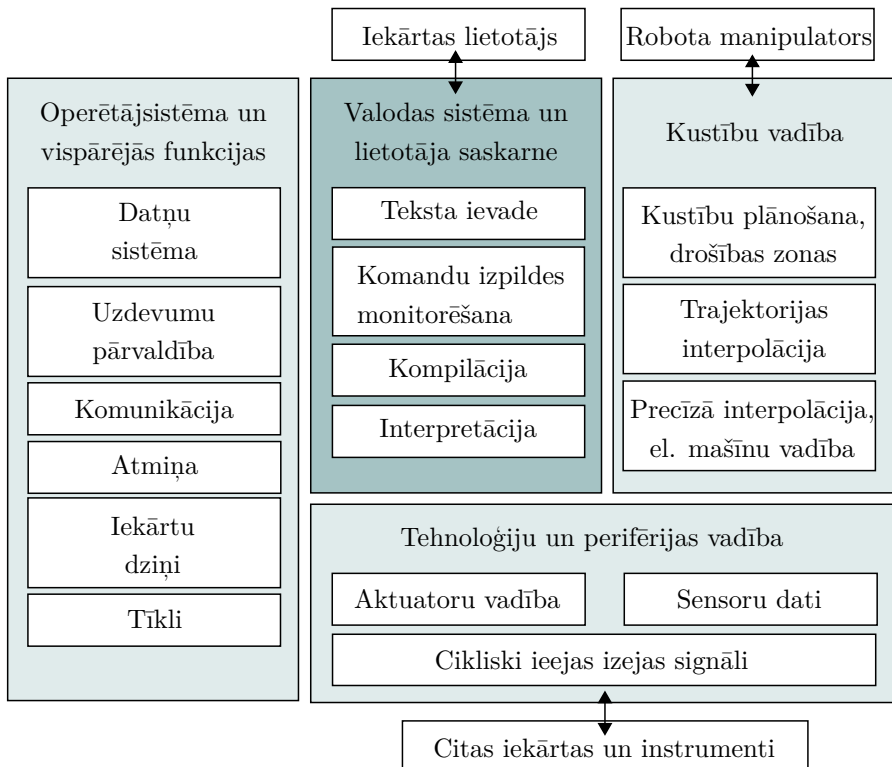
- manipulatora kustību vadība un uzraudzība (asu un mašīnu vadība);
- komunikācija ar augstāku ražošanas šūnas vadības sistēmu, ražošanas procesa informācijas apmaiņai;
- komunikācija ar citiem šūnas komponentiem, piemēram, perifērijas iekārtām;
- sensoru signālu uztvere un apstrāde;
- sistēmas diagnostikas funkcijas – kļūdu uzraudzība un analīze;
- sistēmas drošības pastāvīga uzraudzība (skat. 2.3.3. nodaļu);
- palīdzības sniegšana operatoriem gan robota iestatīšanas un programmēšanas, gan arī ekspluatācijas laikā.

Turpmāk apskatīta vadības sistēmas uzbūve un detalizētāk izklāstītas būtiskākās industriālo robotu drošības funkcijas.

2.3.1. Vadības sistēmas komponenti

Robota vadības sistēma satur nepieciešamos elektronikas komponentus tās uzdevumu izpildei. Par centrālo elementu var saukt datorsistēmu, kas uzbūves ziņā ir tuva personālajam datoram un ir savienota ar elektroniskām datu ievades un izvades iekārtām, lai reālā laika signālu apmaiņu realizētu ar robota sistēmas aktuatoriem un sensoriem.

2.26. attēlā ilustrētas vienkāršotas vadības sistēmas uzdevumu grupas. Lietotājs tiešā veidā visbiežāk saskaras ar programmas ievadi caur pulti vai gatavas programmas izpildes uzraudzība.



2.26. attēls. Vadības datorsistēmas vispārīgā uzbūve.

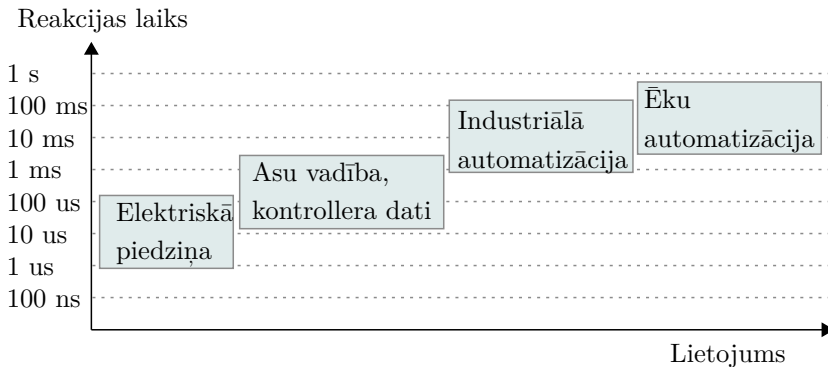
Vadības sistēma mūsdienās sastāv no datora operētājsistēmas, kurā instalēta robotam specifiska programmatūra. Operētājsistēma, tāpat kā personālā datora operētājsistēma, nodrošina informācijas glabāšanu, darba atmiņu, komunikāciju, uzdevumu jeb procesu pārvaldi, kā arī nepieciešamās datnes un papildprogrammas specifiskām tehnoloģijām. Vadības pulsts operētājsistēma ir tiešā veidā pieejama tikai operatoriem ar paaugstinātu pieejas atļauju. Operatoriem, kas iestata tikai robota kustību vadības pamatfunkcijas, pieejama vienkāršota lietotāja saskarne.

Lietotāja saskarne nodrošina lietotājam interaktīvu un vizuālu piekļuvi robota galvenajām vadības funkcijām. Nereti lietotāja saskarne ir atsaistīta no kopējās kontroles sistēmas un ir atsevišķs pārvietojams dators. To mēdz izmantot kā vadības pulti. Pults nav obligāta sistēmas sastāvdaļa, ja industriālais robots iestatīts strādāt autonomi. Lietotāja saskarne nepieciešama programmas un mainīgo ievadei, kā arī izpildes uzraudzībai.

Tā kā industriālajiem robotiem izmanto programmēšanas valodu, nepieciešama ievadīto komandu atbilstības un sintakses pārbaude. Sekmīgas pārbaudes rezultātā komandas tiek nodotas kustību vadības sistēmai, kas atbild par ceļa plānošanu. Ievadītās kustību komandas (piemēram, $X = 45^\circ$) tiek interpretētas un pārrēķinātas vadības komandās piedziņas sistēmai, lai veiktu nepieciešamos apgriezienus katram motoram atsevišķi. Par to ir atbildīgs kustību vadības funkcionālais bloks, kas ieņem vietu dažādos programmatūras slāņos.

Citu tehnoloģiju vadībai jeb perifērijai, piemēram, darba instrumentam vai kustīgam darbaldam, bieži izmanto funkcionāli atsevišķu bloku. Tas ietver ne tikai programmatūru, bet arī elektronikas ietaises, jo tam ir jānodrošina komunikācija jeb signālu apmaiņa ar perifērijas iekārtām reālā laikā. Robota vadības sistēma var ietvert funkcijas, kas pastāvīgi uzrauga instrumenta stāvokli, un parāda to operatoram.

Ātrums jeb reakcijas laiks, ar kādu tiek vadītas vai uzraudzītas dažādas ierīces, var atšķirties pat par faktoru 1000 un vairāk. Piemēram, elektriskās piedziņas invertoros lietotā *PWM* frekvence ir robežās



2.27. attēls. Dažādu sistēmu reakcijas laika salīdzinājums.

no 4 kHz līdz 12 kHz (perioda garums attiecīgi 83–125 ms), bet pozīcijas devējos izmantoto sensoru nolasīšanas frekvenci var mērīt megahercos. Industriālajā automatizācijā reakcijas laiks tīkla sistēmām, tādām kā *Profibus* vai *Profinet*, parasti ir robežās no 10 ms līdz 50 ms. Katra ierīce nereti izmanto citus komunikācijas protokolus, kā *CAN-bus* vai *EtherCAT*, kuros komunikācijas ātrums ir ievērojami lielāks. Pēdējo plaši izmanto robotu piedziņas sistēmā datu apmaiņai starp piedziņas sistēmas komponentiem. Salīdzinājumam ēku automatizācijā, gaismas slēdžu reakcijas laikam jābūt aptuveni $1/10$ sekundes vai mazākam, lai lietotājam rastos iespaids, ka gaisma ieslēdzas teju momentāni.

2.3.2. Programmas ievades metodes

Robota darba uzdevumu uzdod ar programmām, kas parasti tiek saglabātas vienkāršās teksta datnēs. Programmas parasti ir rakstītas robota ražotāja specifiskā valodā vai kādā no plaši izplatītajām programmēšanas valodām (*Java*, *Python* u. c.). Tipiskas pilnīgas programmas saturs ietver šādu informāciju un norādes:

- kustību komandas;
- darbību kārtību un izpildes nosacījumus;
- perifērijas vadības komandas (piemēram, satvērējiekārta, apstrādes instruments);
- sensoru datu apstrādes algoritmu;
- vispārīgas aritmētiskas darbības;

- ārēju tehnoloģiju datu izvērtēšanu un interpretāciju;
- papildu iekārtu vadību (papildās, sinhronizācija ar montāžas līniju).

No kopējās vadības sistēmas robota **kustību komandas** ir tikai neliela, taču, iespējams, uzskatāmākā un robotiem specifiskākā daļa. Pastāv dažādas kustību ievades metodes, kuras uzskaitītas 2.1. tabulā. Ar **tiešo kustību ievadi** (angļu val. *teach-in*) saprot manipulatora programmēšanu ar pulti, operatoram esot fiziski vienā telpā ar manipulatoru. Ar pulti, kustinot atsevišķas robota asis vai vadot tā instrumentu pa koordinātu asīm, operators uzdod vēlamos punktus telpā. Kad sasniegts kāds darba punkts, to saglabā. Operators var apskatīt saglabātās koordinātas, taču pozīcija ir redzama arī fiziskā telpā. Tādas programmas algoritmu komandas kā cikli, nosacījumi, signāli aprēķini u. c. jāievada papildus.

2.1. tabula. Programmu ievades metodes

|  |  |  |
|---|---|---|
| Tiešā kustību ievade | Kustību atkārtošana | Datormodelēšana |
| Iekārtas operators vada manipulatoru uz izvēlētiem punktiem un saglabā tos noteiktā secībā, kopā ar papildkomandām veidojot programmas algoritmu. | Manipulatora kustība tiek atkārtota pēc operatora iepriekš haptiski norādīta ceļa. Papildus ir jāsastāda programmas algoritma komandas. | Ar modelēšanas palīdzību tiek izveidots ražošanas šūnas modelis un katra robota kustība, kā arī programmas algoritma komandas tiek sastādītas virtuāli. |

Kustību ievades metode ar **kustību atkārtošānu** pieejama manipulatoriem, kas aprīkoti ar momenta sensoriem uz katras ass. Operators vada manipulatora korpusa posmus uz vēlamajiem punktiem telpā, un to pozīcijas saglabā. Šādi katru punktu iespējams sasniegt ātrāk, taču pārējās algoritma komandas joprojām ir jāsastāda atsevišķi.

Mūsdienās liela apjoma ražotnēs precīzu darbu veikšanai vairums

2.2. tabula. Programmu ievades līmeņi

| | |
|------------|--|
| 1. līmenis | Tieša kustību uzdošana katram punktam atsevišķi. Kopējā kustība sastāv no vairākām <i>no-punkta-uz-punktu</i> kustībām. |
| 2. līmenis | Kustību programmēšana ar datormodelēšanas palīdzību. Sarežģītu kustību grupu veidošana. |
| 3. līmenis | Strukturēta blokveida programmēšana, darba uzdevums tiek salikts no aplikāciju blokveida sagatavēm. Programmas gaita stipri atkarīga no sensoru datiem. |
| 4. līmenis | Uzdevumu līmeņa robota iestatīšana. Operators tiešā veidā neapstrādā programmas kodu, vai tas viņam nav pieejams. Robots patstāvīgi atpazīst savu apkārtni, apstrādā verbālas komandas un komunicē ar cilvēkiem. |
| 5. līmenis | Robotam piemīt telpas un darba uzdevuma izpratne, kas ir tuvu cilvēka inteliģencei. |

programmu sastāda virtuāli ar **datormodelēšanas** palīdzību. Sastāda pilnīgu ražošanas šūnas modeli, iekļaujot apstrādājamo detaļu, vidi, darba instrumentu un pašu robotu. Telpas punkti virtuālajā vidē tiek sasniegti ar abām iepriekšējām metodēm. Tad saglabā punktu koordinātas un sastāda programmas algoritmu. Priekšrocības virtuālajā vidē ir droša programmu pārbaude, ātra kļūdu atrašana, apstrādājamā objekta detaļas virtuāla klātie. Būtiska ir spēja programmu sastādīt iepriekš, lai uzstādīšanas process ražotnē būtu ātrāks.

Ievades metodes jeb darba uzdevumu robotam var uzdot iedalīt piecos līmeņos, kas aprakstīti 2.2. tabulā. Vairums šodien strādājošo industriālo robotu aplikāciju iederas 1. un 2. līmenī. Visvairāk inovāciju notiek tieši 3. un 4. līmenī, kur augošu popularitāti iegūst t. s. *no-code* metodes, kurās nav nepieciešams programmēšanas darbs un specifiskas robota valodas zināšanas.

Lai sasniegtu augstākos līmeņus, robotu sistēmas aprīko ar dažādām spējām un maņām kā redze, dzirde vai tauste, ļaujot lietotājam uzdot darba uzdevumus vispārīgā, ne tehniskā veidā, bez konkrētu kustību tipu un punktu uzdošanas. Šādas robotu sistēmas nereti ir papildinātas ar inteliģentu programmatūru un mākslīgā intelekta risinājumiem.

2.3.3. Galvenās drošības funkcijas

Ražošanas iekārtas drošība ir augsta prioritāte, jo kustīgas ierīces var savainot cilvēku vai produktu, ja tiek rupji pārkāpti vai netiek ievēroti drošības noteikumi. Tā kā robotu sistēmas pamatā ir universālas, tad ražošanas iekārtas bīstamība tiek vērtēta kopumā kā aplikācija, nevis pēc tā, cik bīstams darbā ir robots. Robotizētu mašīnu drošība analizēta 5.2. nodaļā, taču šajā apakšnodaļā aplūkoti tehniski drošības komponenti, kas tieši integrēti vadības sistēmā.

Viens no vadības sistēmas uzdevumiem ir uzraudzīt robota sistēmas jeb **mašīnas drošību**. Ražotāja uzdevums ir sistēmas izstrādē pēc iespējas novērst visus cilvēkam bīstamus elementus un uzskatāmi informēt lietotāju par tiem elementiem, kur tehniskā dizaina dēļ bīstamību novērst nav iespējams. Robota sistēmas kā universāli lietojamās ierīces piedāvā veselu klāstu drošības funkciju. Dažas no tām ir tehniska rakstura, bet citas vērstas uz lietotāja uzvedību vai darba organizāciju uzņēmumā, kurā robota sistēma ir uzstādīta.

Programmējami robota asu gala slēdži nodrošina, ka jebkura ass var griezties līdz kādam noteiktam leņķim. Pārsniedzot šo leņķi, nostrādā **virtuāls gala slēdzis**. Atļautās konstrukcijas maksimālajās robežās gala slēdža vērtība ir programmatiski iestatāma. Tas palīdz ierobežot robota darba telpu, jo ārpus šī leņķa asi šajā virzienā kustināt vairs nav iespējams.



a) Režīmu pārslēgšanas atslēga un avārijapstures spiedpoga uz vadības pulsts.



b) Kustību atļaujas taustiņi vadības pulsts mugurpusē.

2.28. attēls. Vadības pulsts drošības elementi *KUKA C4* kontrollerim.

Kustību atļaujas taustiņš ir fizisks vadības pultī integrēts slēdzis, kura ieslēgts stāvoklis apliecina, ka robots atrodas lietotāja tuvumā un redzamības laukā. Tas ir būtiski programmēšanas laikā, kad fiziski tiek kustināts manipulators. Drošības apsvērumu dēļ, nav vēlama un atļauta attālināta industriālo robotu programmēšana ar *teach-in* metodi. 2.28. (b) attēlā ilustrētajai pultij ergonomikas dēļ ir trīs identiskas nozīmes atļaujas taustiņi dažādās vietās. Kustību atļaujas taustiņi ir haptiski, un tiem ir divi līmeņi – nospiežot viegli, kustība tiek atļauta, nospiežot stingrāk līdz atdurei, kustības atļauja tiek bloķēta vai esošā kustība apstādināta. To sauc arī par **panikas režīmu** – bīstamā situācijā lietotājs izbīla dēļ pulti satvers stingrāk. Kustības laikā operatoram pulsts un kustību atļaujas taustiņi jātur apzināti.

Robota vadības režīma pārslēgšana ir pieļaujama tikai ar slēdzi, kas izvēlētajā pozīcijā ir bloķējams. Drošības funkcija ir obligāta robotiem pēc *ISO 10218-1*, un parasti šim nolūkam izmanto mehānisku slēdzi ar atslēgu vadības pultī (skat. 2.28. (a) att.). Izšķir trīs režīmus, no kuriem divi ir programmēšanas režīmi (*T1*, *T2* – no vārda *teach*) un vismaz viens automātikas režīms (*AUT*). Detalizēti tie aprakstīti 2.3. tabulā. Darba organizācija uzņēmumā nosaka, kā tieši ierobežot personāla pieeju šādai atslēgai. Pat ja pieeja nav īpaši ierobežota organizatoriski, lietotājam tomēr aktīvi jāapzinās pārslēgšanas fakts.

Avārijaptures spiedpoga nosūta analogu signālu uz vadības sistēmu, kas savukārt aptur jebkuru mehānisko kustību, taču ne sensoru vai kontrollera darbību. Šādu pogu izvieto uz pulsts un pie spēka elektronikas skapja. To var papildus izvietot pēc vajadzības citās vietās ražošanas šūnā.

Manipulatora asu momentu kontrole kustības laikā izvērtē, vai atļautā mehāniskā slodze nav pārsniegta. Momenta vērtības parasti aprēķina uz modeļa bāzes pēc elektromotora strāvas katrā asī. Aprēķinātā momenta vērtības pārsniegšanai par iemeslu var būt arī nevēlama sadursme starp manipulatoru un kādu nekustīgu šūnas konstrukciju.

Vadības sistēma veic arī **sistēmas diagnozi** ieslēgšanas procesā

2.3. tabula. Industriālo robotu kontrolleru darba režīmi (pēc *ISO 10218-1:2011* [2] un [42])

| | |
|---|---|
| T1 – rokas režīms ar samazinātu ātrumu | Programmēšanas režīms, kurā robotu var kustināt ar atsevišķām komandām, lai pārbaudītu individuālus darba punktus un sadursmes brīvu kustības trajektoriju. Visas kustību komandas tiek izpildītas ar vismaz 10 reižu mazāku ātrumu nekā maksimālais vai iestatītais (taisnvirziena kustībām līdz 250 mm/s). Lai vadītu manipulatoru, operatoram jātur nospiests kustību atļaujas taustiņš. |
| T2 – rokas režīms ar pilnu ātrumu | Tiek pārbaudītas veselas programmas vai to daļas ar paredzēto ātrumu (taisnvirziena kustībām virs 250 mm/s). Tiek vadītas ieprogrammētās perifērijas iekārtas ar I/O signāliem. Lai vadītu manipulatoru, operatoram jātur nospiests kustību atļaujas taustiņš. |
| AUT – automātikas režīms | Automātikas režīms izmanto tikai ražošanas šūnā, kurā nav augstāka līmeņa kontrolleru (<i>PLC</i>). Operatoram pieejamas tikai nedaudzas komandas kā <i>Start</i> , <i>Stop</i> , <i>Continue</i> – sākt, apturēt vai turpināt kustību. Vadības pultī tiek rādīta informācija par aktuālo programmu, kļūdas un paziņojumi. Programmas tiek izpildītas ieprogrammētajā ātrumā, taču operators var mainīt robota globālo ātrumu. Automātikas režīma nosacījums ir iekļauta drošības ķēde, piemēram, šūnas vārti ir slēgti. Izejot no šī režīma, robota kustība tiks apturēta. |
| AUT EXT – ārējā automātika | Automātikas režīms identisks automātiskajam, taču ar pieslēgtu augstāka līmeņa kontrolleri (<i>PLC</i>). [2] nosaka tikai vienu automātikas režīmu. |

vai regulāru kontroli noteiktos intervālos. Tā var būt, piemēram, manipulatora kalibrēšana, mehānisko komponentu (bremžu, piedziņas sistēmas) funkcijas pārbaude, temperatūras kontrole, piedziņas sistēmas palaišana u. c. Pie novirzes no noteiktas normas vadības sistēma brīdina lietotāju par nepieciešamu apkopi vai kļūdas stāvokli.

Robota drošība ir pamats tā drošai sadarbībai ar cilvēku. To par drošu var uzskatīt tad, ja normālā darba režīmā, kā arī pie nelielām pieļaujamām lietotāja kļūdām tā nerada bīstamību. Mašīnu drošība normatīvā skatījumā detalizēti analizēta 5.2. nodaļā.

2.4. Nākotnes attīstības tendences

Ieskats nākotnē jebkurā jomā ir grūts, un realitāte bieži izrādās citāda – robotika nav izņēmums. Taču prasības industriālajiem robotiem, kurus izmanto ražošanā, ir daudz pragmatiskākas un piezemētākas nekā vīzijas par personālajiem robotiem, ko nereti prototipē kā humanoīdus. Turpmāk uzskaitīti punkti, kas izriet no šodienas problēmām, kuras galalietotāji – iekārtu uzturētāji, operatori vai plānošanas inženieri – vēlas risināt. Mērķi ir uzlabot ražošanas procesu, samazināt uzturēšanas izmaksas, spēt uzstādīt iekārtas ātrāk vai spēt tās ātri un vienkārši pielāgot jauniem darba uzdevumiem. Šiem mērķiem var tuvojies, ja robotu sistēmu mehāniski pilnveido vairākos virzienos.

- **Precizitāte un punkta atkārtojamība** zem 0,1 mm visā celtspējas diapazonā. Parasti ne visā darba telpā manipulatora precizitāte ir vienādi augsta. To ietekmē mehāniskā uzbūve, kas katrā darba punktā citādi iedarbojas uz kinemātisko ķēdi. Precizitātes indikatori sīkāk apskatīti 4.4.2. nodaļā.
- **Augsta uzticamība** (angļu val. *reliability*). No lietotāja skatu punkta, mērķis ir panākt tik augstu uzticamību, lai ražojamā produkta dzīves ciklu nosegtu bez robota tehniskās apkopes. Tehnisko apkopi ideālajā scenārijā veic tikai tad, ja iekārtu pār-būvē produkta modifikācijas dēļ. Pie tehniskās apkopes pieder tādi regulārie darbi kā eļļas maiņa vai kalibrācija.
- **Vienkārša mehānisko detaļu maiņa** – standartizēti komponenti, ko izmanto dažādos robotu modeļos. Galalietotāji nereti patur noliktavā ražošanas iekārtu kritisko komponentu rezerves daļas. Palielinot izmantoto komponentu dažādību, aug nepieciešamība uzglabāt noliktavā vairāk rezerves daļu. Izmantojot standartizētu komponentu, ražotājs var uzstādīt dažāda tipa manipulatorus, piemēram, trīs dažādus ar atšķirīgu aizsniedzamību, taču nepieciešamība pēc papildu rezerves daļām nepalielinās.
- **Manipulatora korpusā integrētas enerģijas un datu komunikācijas sistēmas** no pamatnes līdz darba instrumentam.

Risinājums uzlabo drošību pret ārēju mehānisku ietekmi un bojājumiem, taču manipulators ir grūtāk pielāgojams specifiskām funkcijām, kurām varētu būt nepieciešami papildu pieslēgumi, ko manipulatora ražotājs nav integrējis korpusā.

- **Piedziņas tehnika integrēta robota korpusā.** Pārvades sistēmas parasti ir slēgtas, taču elektriskās mašīnas tikai daļēji ir paslēptas manipulatora korpusā. Integrējot piedziņas sistēmu korpusā pilnīgi, iespējams vienkāršot manipulatora ķermeņa formu, kas savukārt vienkāršāk izmantojama kustību modelēšanā un ceļa plānošanā. Manipulatoriem ar zemu celbspēju (līdz 5 kg) šāda sistēmas uzbūve jau šodien ir plaši izplatīta.
- **Konstruktora tipa / konfigurējama kinemātikas uzbūve.** Papildu komponentu standartizācija ļautu lietotājam mainīt robota kinemātikas modeli, lai pielāgotu robota celbspēju vai aizsniedzamību. Piemēram, vieglam instrumentam var izmantot kinemātikas posmus (un motoriku) ar zemāku celbspēju, lai optimizētu kopējo sistēmu. Šodien to dara robotu ražotājs pats, piedāvājot dažādus manipulatora modeļus. Lietderīgi būtu brīvi konfigurēt celbspēju vienas smaguma klases ietvaros līdz vienai tonnai. Automatizācijas uzņēmums *Beckhoff* ir publiski prezentējis pirmo komerciāli pieejamo un industriāli lietojamo modulāras uzbūves manipulatora sistēmu ar nelielu celbspēju, kas redzama publicitātes foto 2.29. attēlā.
- **Neliels montāžas laukums** robota pamatnei, kā arī nelieli vadības skapji ir priekšrocība, jo darba telpa ražotnē ir dārgs resurss. Zemas celbspējas robotu pamatne jau šodien nav būtiski lielāka par pirmā posma korpusa platumu. Daži robotu ražotāji piedāvā vienā kontroles skapī ievietot vairākas vadības un piedziņas sistēmas. Tāpat papildu priekšrocības sniedz arī korpusa komponenti, kas neaizņem daudz no instrumenta darba telpas.
- **Dažādi elektrotīkli.** Robota sistēmai jāspēj darboties dažādos elektrotīklos, kā, piemēram, Eiropas standarta 400 VAC sistēmā, gan ASV 480 VAC tīklā, gan arī līdzstrāvas mikrotīklā ar

nominālo spriegumu 650 VDC [43].

- **Optimizēts robota svara un celjspējas faktors** – jo vieglāks manipulators, jo vieglāka tā montāža. Jo lielāka celjspēja, jo plašāks iespējamais lietojums. Tātad mazs paša svars attiecībā pret celjspēju ir viena no manipulatora kvalitātes īpašībām. Parasti industriālajiem manipulatoriem šis koeficients ir ap 5.
- **Sadursmju izturīgs korpuss.** Sadursmes jeb kolīzijas iespējamās dažādos veidos – gan instrumentam pret objektiem apkārtņē, gan arī pret paša manipulatora korpusu. Protams, primāri sadursmes jānovērš. Taču, ja tās notiek, tad vēlams ierobežot korpusa deformāciju, kuras rezultātā var mainīties kinemātiskā ķēde un robota precizitāte.



2.29. attēls. Modulāri konfigurējams manipulators ar integrētām mediju un komunikācijas sistēmām (*Beckhoff Automation* [44]).

Lai cik inovatīvs būtu katrs no minētajiem punktiem, tie vienmēr ir saskaņā ar fizikas un materiālzinātnes likumiem, tādēļ šajos virzienos novērojama vairāk inkrementāla un evolucionāra attīstība. Kā daudzās citās nozarēs, tieši ar inovācijām vadības sistēmas elementos var manipulatorus izmantot daudz efektīvāk vai ērtāk. Programmatūru un vadības sistēmu jomā tiek sagaidīti vairāki inovatīvi attīstības virzieni.

- **Automātiska iestatīšana.** Joprojām viens no sarežģītākajiem elementiem robota pieņemšanai ekspluatācijā ir tā konfigurēšana. Tās laikā vadības sistēmai tiek darīts zināms, kāda tipa mehānika, piedziņas sistēma un controlleris (*PLC*) tai ir pieslēgts.

Lietotājam nereti jābūt ar speciālām zināšanām par konkrēto robota tipu. Mērķis būtu *plug-and-play* funkcionalitāte, kur nepieciešamā konfigurācija tiek veikta automātiski.

- **Dažādu veida datu komunikācija** vadības sistēmai (piemēram, *ProfiBus*, *ProfiNet* u. c.). Atkarībā no nozares un reģiona vairāk vai mazāk izplatīts ir kāds konkrēts komunikāciju protokols. Lai ražošanas iekārtu neierobežotu trūkstošas komunikācijas dēļ, robotiem realizē vairākus protokola tipus. Sistēmas integrators izvēlas tikai vienu komunikācijas veidu, lai robotu pievienotu kopējā tīklā.
- **Augsta līmeņa programmēšana** industriālajiem robotiem, dodot darba komandas verbāli vai izmantojot minimālu programmas kodu. Tas atbilst 3. un 4. līmeņa programmas ievades metodei (skat. 2.2. tab.).

Uzskaitījums nepretendē uz pilnīgumu, jo šeit nav izteikta nākotnes prognoze, bet analizētas tikai šodienas nepieciešamības robotikā. Lielākie industriālo robotu ražotāji (*Fanuc*, *ABB*, *KUKA*, *Yaskawa* u. c.) ar katru produktu paaudzi veic arvien vairāk uzlabojumus, tuvojoties vienam vai vairākiem minētajiem punktiem. Nevienā no punktiem nav konkrētas robežas, kas noteikti būtu jāsasniedz. Katrs uzlabojums kādā no punktiem atšķir vienu produktu no pārējiem.

Zināšanu paškontrolē

1. Skaidrot seriālās un paralēlās kinemātiskās ķēdes atšķirību!
2. Skaidrot termina *industriālā robota sistēma* nozīmi!
3. Nosaukt galvenos robotu manipulatoru uzbūves tipus!
4. Ilustrēt koordinātu sistēmas asis un pozitīvos griešanās virzienus pēc labās rokas likuma!
5. Kādas koordinātu sistēmas eksistē industriālajā robotikā? Kādās var noteikt darba punktus?
6. Cik apgriezīnu minūtē veic sinhronā mašīnu ar četriem polu pāriem pie 50 Hz maiņstrāvas frekvences?
7. Kādas elektriskās mašīnas apzīmē ar nosaukumu *servomašīna*?
8. Kas ir līdzstrāvas posms, un kādas ir tā īpašības?
9. Skaidrot induktīvās pozīcijas devēja funkciju!
10. Nosaukt robotikā izmantotos rotācijas kustības pārvades veidus!
11. Nosaukt izplatītākos komunikācijas protokolu veidus industriālajā automatizācijā!
12. Kas ir $T1$, $T2$, AUT darba režīmi industriālajiem robotiem?
13. Ko apzīmē ar *teach-in* metodi?

3. | MANIPULATORU MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA

Šajā nodaļā sniegts ieskats būtiskākajos aprēķina veidos, ko neredzi lieto praksē, izstrādājot kādu specifisku robotu aplikāciju. Atkārtojumam ir vērts apskatīt grāmatas 4. pielikumā aprakstītos vektoru algebras pamatjēdzienus, kur noteikts arī turpmāk lietotais pieraksts.

Koordinātu sistēmas rotācijas un taisnvirziena kustību aprēķins skaidrots 3.1. nodaļā. Kinemātika ir mācība par kustībām neatkarīgi no spēkiem, kas to izraisa. Ar praktiskiem aprēķina piemēriem 3.2. un 3.3. nodaļā skaidroti robotikā lietotie jēdzieni *tiešā* un *inversā* kinemātika, kuriem kustību noteikšanā ir būtiska loma. Kustību kinemātika ar Jakobi metodi skaidrota 3.4. nodaļā.

3.1. Koordinātu sistēmas transformācija

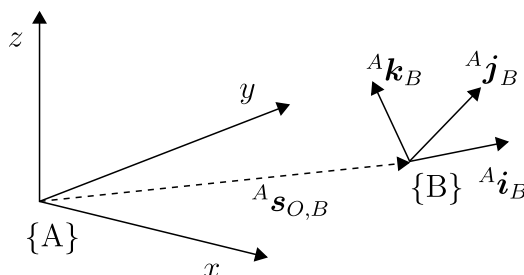
Robota kinemātiskajā ķēdē katra posma koordinātu sistēma var būt gan pagriezta, gan pārvietota attiecībā pret iepriekšējo. Šos dažādos stāvokļus apzīmē ar rotāciju, taisnvirziena kustību vai **pilnu transformāciju**, kas detalizēti apskatīti turpmāk. Tādus koordinātu sistēmu pārveidošanas veidus kā mērogošana vai bīdes deformācija industriālajā robotikā parasti neizmanto, tādēļ tie sīkāk netiek apskatīti. Pierakstam izmantotas koordinātu sistēmas $\{A\}$ un $\{B\}$, kur $\{A\}$ ir references koordinātu sistēma, bet $\{B\}$ ir pārveidotā koordinātu sistēma. Koordinātu sistēmu asis viena pret otru ir taisnos leņķos.

3.1.1. Rotācija

Koordinātu sistēmas rotāciju apzīmē ar 3×3 **rotācijas matricu** ${}^A_B\mathbf{R}$

$${}^A_B\mathbf{R} = [{}^A\mathbf{i}_B \quad {}^A\mathbf{j}_B \quad {}^A\mathbf{k}_B] = \begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x \\ i_y & j_y & k_y \\ i_z & j_z & k_z \end{pmatrix}, \quad (3.1.1)$$

kur koordinātu sistēma $\{B\}$ izteikta koordinātu sistēmā $\{A\}$ un ${}^A\mathbf{i}_B$, ${}^A\mathbf{j}_B$, ${}^A\mathbf{k}_B$ ir vienības vektori, norādot jaunās koordinātu sistēmas $\{B\}$ asu virzienus. Par piemēru ņemot vektoru ${}^A\mathbf{i}_B = [i_x \quad i_y \quad i_z]^T$, tā trīs koordinātas norādītas koordinātu sistēmā $\{A\}$, veidojot vektoru ar garumu $|{}^A\mathbf{i}_B| = 1$. Ievērot, ka references koordinātu sistēmas simbolu $\{A\}$ raksta kā indeksu augšā, bet jaunās pagrieztās koordinātu sistēmas simbolu $\{B\}$ – apakšā, pirms matricas simbola \mathbf{R} .



3.1. attēls. Koordinātu sistēmas $\{B\}$ taisnvirziena kustība par vektoru ${}^A\mathbf{s}_{O,B}$ un rotācija koordinātu sistēmā $\{A\}$.

Rotācijas matrica ir ortogonāla, tātad tās transponētā matrica ir vienāda ar savu inverso jeb apgriezto matricu. No tā izriet, ka tās reizinājums ar savu transponēto matricu dod vienības matricu:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}^T &= \mathbf{R}^{-1} \\ \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{R} &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}^T = \mathbf{I} \cdot \\ \det \mathbf{R} &= 1 \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

Turklāt koordinātu sistēmām determinants vienmēr ir 1.

Par pamata vai **bāzes rotācijas matricu** sauc rotācijas matricas, kuras attēlo rotāciju ap vienu asi. Ja rotācija ir ap z asi par leņķi α , tad rotācijas matricas vērtība ir

$$\mathbf{R}_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.1.3)$$

bet rotācija ap y un x asīm attiecīgi ir

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}, \quad (3.1.4)$$

$$\mathbf{R}_x(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}. \quad (3.1.5)$$

Ja rotācija tiek veikta ap vienu asi, rotācijas matricas var tiešā veidā izmantot, lai izteiktu kāda vektora koordinātas no vienas koordinātu sistēmas citā. Piemēram, dots vektors ${}^B\mathbf{p}$, kurš noteikts koordinātu sistēmā $\{B\}$ un griezts ap z asi. Lai iegūtu tā rotāciju koordinātu sistēmā $\{A\}$, tas ir jāreizina ar rotācijas matricu $\mathbf{R}_z(\gamma)$:

$${}^A\mathbf{p} = \mathbf{R}_z(\gamma) \cdot {}^B\mathbf{p}, \quad (3.1.6)$$

kur γ ir rotācijas leņķis ap z koordinātu sistēmā $\{B\}$.

3.1.2. Pilna rotācija un Eilera leņķi

Lai aprēķinātu kāda vektora vai koordinātu sistēmas rotāciju ap vairākām asīm, izmanto rotācijas matricu reizinājumu, iegūstot **pilnu rotāciju**. Obligāti jāievēro rotācijas matricu reizināšanas kārtība, jo matricu reizināšana nav komutatīva (t. i., mainot vietām reizinātājus, mainās rezultāts). Pastāv dažādas konvencijas, gan kādā secībā tiek

veiktas rotācijas, gan ap kuras koordinātu sistēmas asīm tā noris – references sistēmas $\{A\}$ vai rotējošās koordinātu sistēmas $\{B\}$ asīm. Visbiežāk izmantotie veidi ir **Eilera-ZYX**, **Eilera-ZYZ** (ap $\{B\}$ asīm) un **RPY** (ap $\{A\}$ asīm) konvencijas, kas detalizēti apskatītas turpmāk. Sākuma stāvoklī visos gadījumos abu koordinātu sistēmu asu virzieni sakrīt.

► Eilera-ZYX

Pēc Eilera konvencijām rotācijas noris tikai ap rotējošās koordinātu sistēmas $\{B\}$ asīm par leņķiem, kurus sauc arī par **Eilera leņķiem**. Minot terminu *Eilera leņķi*, ir jāzina arī rotācijas secība, jo termins nav viennozīmīgs. Pēc Eilera-ZYX konvencijas rotācijas tiek veiktas šādā kārtībā:

- rotācija ap kopējo z asi par leņķi α ;
- rotācija ap rotētās koordinātu sistēmas $\{B\}$ jauno y asi par leņķi β ;
- rotācija ap nu jau divreiz rotētās koordinātu sistēmas $\{B\}$ jauno x asi par leņķi γ ,

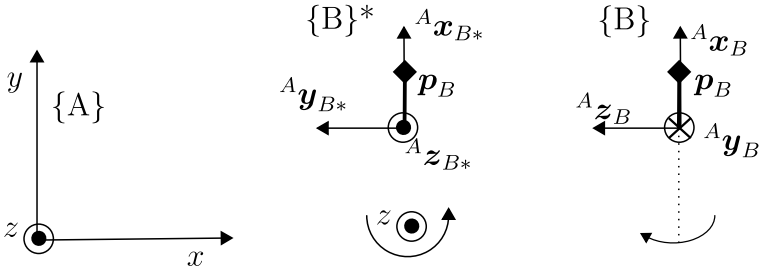
kas kopā veido rotācijas matricu

$${}^A_B \mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\gamma). \quad (3.1.7)$$

Matricu reizinājuma risinājums ir

$$\begin{aligned} {}^A_B \mathbf{R} &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \cos \gamma \sin \alpha & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta \\ \cos \beta \sin \alpha & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \gamma \sin \alpha \sin \beta - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.1.8)$$

Kā piemērs 3.2. attēlā dota koordinātu sistēma $\{A\}$, kurā rotēta instrumenta koordinātu sistēma $\{B\}$. No attēla izriet, ka pēc Eilera-ZYX konvencijas $\{B\}$ tiek rotēta ap sākotnēji kopējo ap z asi par $\alpha = \pi/2$ un tad ap jauno ${}^A \mathbf{x}_{B^*}$ asi par $\gamma = -\pi/2$. Ap ${}^A \mathbf{y}$ rotācijas



3.2. attēls. Rotācija pēc Eilera-ZYX konvencijas.

nav, tātad $\beta = 0$ un $\mathbf{R}_y(\beta)$ veido vienības matricu. Visu trīs matricu reizinājums pēc (3.1.7) dod rezultātu

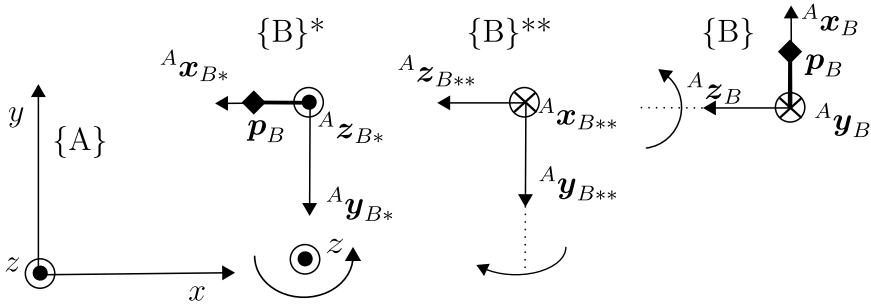
$${}^A_B\mathbf{R} = \begin{pmatrix} {}^A\mathbf{x}_B & {}^A\mathbf{y}_B & {}^A\mathbf{z}_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x \\ i_y & j_y & k_y \\ i_z & j_z & k_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3.1.9)$$

kur ${}^A\mathbf{x}_B$ apzīmē jaunās x ass no koordinātu sistēmas $\{B\}$ virzienu, kas izteikts $\{A\}$ koordinātās, un attiecīgi arī pārējās assis. Tā kā tikai elements $i_y = 1$, bet pārējie vektora elementi ir nulles, jaunā ${}^A\mathbf{x}_B$ ass norāda y virzienā references koordinātu sistēmā. Pēc (3.1.9) un 3.2. attēlā redzams, ka jaunā ${}^A\mathbf{y}_B$ ass norāda pretēji z , bet ${}^A\mathbf{z}_B$ norāda pretēji x .

Matrica lietojama pēc (3.1.6) darba instrumenta virziena noteikšanai. Ja virziens instrumenta koordinātu sistēmā $\{B\}$ ir ${}^B\mathbf{p} = [1, 0, 0]^T$ (tātad rāda x ass virzienā), tad tā virzienu pasaules vai bāzes koordinātu sistēmā $\{A\}$ var noteikt ar

$${}^A\mathbf{p} = {}^A_B\mathbf{R} \cdot {}^B\mathbf{p} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3.1.10)$$

kas nozīmē, ka bāzes koordinātu sistēmā $\{A\}$ instruments virziens ir y ass virzienā.


 3.3. attēls. Rotācija pēc *Eilera-ZYZ* konvencijas.

► Eilera-ZYZ

Pēc Eilera-ZYZ konvencijas atšķirībā no Eilera-ZYX trešā rotācija notiek ap jauno z , nevis x . Tā iekļauj soļus:

- rotāciju ap kopējo z asi par leņķi α ;
- rotāciju ap nu jau rotētās koordinātu sistēmas $\{B\}$ jauno y asi par leņķi β ;
- rotāciju ap nu jau divreiz rotētās koordinātu sistēmas $\{B\}$ jauno z asi par leņķi γ ,

kas kopā veido rotācijas matricu

$${}^A_B \mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_z(\gamma). \quad (3.1.11)$$

kas izvērstā formā rakstāma

$$\begin{aligned} {}^A_B \mathbf{R} &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma & -\cos \gamma \sin \alpha - \cos \alpha \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \gamma + \cos \beta \cos \gamma \sin \alpha & \cos \alpha \cos \gamma - \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \\ -\cos \gamma \sin \beta & \sin \beta \sin \gamma & \cos \beta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.1.12)$$

3.3. attēlā ilustrēts piemērs koordinātu sistēmas rotācijai, kura lietojama identiski piemēram (3.1.10). Taču pieeja rotācijas atrašanai ir atšķirīga – šeit $\{B\}$ tiek rotēta ap z asi par $\alpha = \pi$, tad ap jauno ${}^A \mathbf{y}_{B^*}$

asi par $\beta = \pi/2$ un pēc tam ap jauno ${}^A z_{B^{**}}$ asi par $\gamma = -\pi/2$. Rezultātā iegūst identisku rotācijas matricas skaitlisko rezultātu, ko var lietot pēc (3.1.7).

► RPY

Pēc RPY konvencijas rotācija noris tikai ap references koordinātu sistēmas $\{A\}$ asīm šādā secībā:

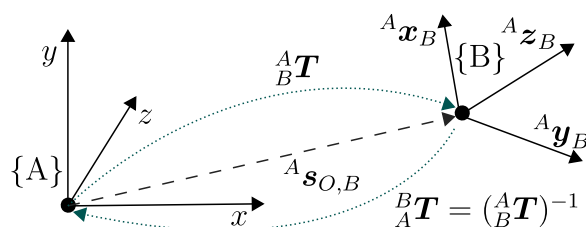
- rotācija ap $\{A\}$ asi x par leņķi γ ;
- rotācija ap $\{A\}$ asi y par leņķi β ;
- rotācija ap $\{A\}$ asi z par leņķi α ,

kas kopā veido rotācijas matricu, kura ir identiska Eilera-ZYX metodei pēc (3.1.7) un (3.1.8).

Atbilstoši 3.2. un 3.3. attēlā redzamajiem piemēriem koordinātu sistēma $\{B\}$ rotē ap $\{A\}$ asi x par $-\pi/2$, un tad pa z asi $\pi/2$.

3.1.3. Taisnvirziena kustība un pilna transformācija

Rotācijas matrica apraksta jaunās koordinātu sistēmas $\{B\}$ virzienu attiecībā pret citu koordinātu sistēmu $\{A\}$, taču nepasaka, kur atrodas tās sākumpunkts. Ar vektoru ${}^A s_{OB}$ no $\{A\}$ sākumpunkta uz $\{B\}$ sākumpunktu norāda $\{B\}$ koordinātu sistēmas atrašanās vietu $\{A\}$ koordinātu sistēmā, kā ilustrēts 3.4. attēlā (arī 3.1. att.). Papil-



3.4. attēls. Pilna transformācija – tiešā un inversā veidā.

dinot rotācijas matricu ar vēl vienu kolonnu un ievietojot tajā vektoru ${}^A s_{OB}$, veidojas homogēna 4×4 **transformācijas matrica**, kas apraksta gan rotāciju ap visām trim asīm, gan taisnvirziena kustību telpā

starp divām koordinātu sistēmām. To apraksta ar

$${}^A_B\mathbf{T} = \begin{pmatrix} {}^A_B\mathbf{R} & {}^A\mathbf{s}_{O,B} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.1.13)$$

Pilna transformācija no pamatnes līdz instrumentam ir vienlaikus **tiesās kinemātikas problēmas** atrisinājums, kas detalizēti analizēts 3.2. nodaļā. Ar transformācijas matricu iespējams izteikt arī projekciju un palielinājumu, ko gan robotikā nelieto. Lai matrica būtu simetriska, papildus ievietota ceturrtā rinda, kuru veido vektors $[0, 0, 0, 1]$. Arī atsevišķās rotācijas matricas (3.1.3), (3.1.4) un (3.1.5) var pārveidot par transformācijas matricām, pievienojot vektoru ${}^A\mathbf{s}_{OB}$ un matricas ceturto rindu.

Lai aprēķinātu brīvi izvēlēta vektora ${}^B\mathbf{p}$ pozīciju koordinātu sistēmā $\{A\}$ ar transformācijas matricu (līdzīgi kā (3.1.10)), tam jāpievieno ceturtais elements – skaitlis 1:

$${}^A\mathbf{p} = {}^A_B\mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} {}^B\mathbf{p} \\ 1 \end{pmatrix} = {}^A_B\mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} {}^B p_x \\ {}^B p_y \\ {}^B p_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^A p_x \\ {}^A p_y \\ {}^A p_z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.1.14)$$

Kā vienādojuma (3.1.14) piemēru var minēt iespēju aprēķināt spēku, kas darbojas uz robota pamatni, ja zināms spēks, kas darbojas uz tā instrumentu.

Transformācijas matricai ir arī inversā forma, kas apraksta $\{A\}$ koordinātu sistēmu koordinātās $\{B\}$ (skat. 3.4. att.). Tā aprēķināma pēc:

$${}^B_A\mathbf{T} = ({}^A_B\mathbf{T})^{-1} = \begin{pmatrix} {}^A_B\mathbf{R}^T & -{}^A_B\mathbf{R}^T \cdot {}^A\mathbf{s}_{OB} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.1.15)$$

Ar inverso transformācijas matricu iespējams identiskā veidā aprēķināt zināma vektora ${}^A\mathbf{p}$ virzienu koordinātu sistēmā $\{B\}$.

3.2. Tiešā kinemātika

Lai aprēķinātu manipulatora instrumenta pozīciju un virzienu telpā attiecībā pret manipulatora pamatni, izmanto **tiešo kinemātiku**. Ja zināmas asu vērtības ir apkopotas vektorā

$$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T, \quad (3.2.1)$$

bet jāatrod ir instrumenta pozīcija un virziens, tad tiešās kinemātikas problēmu var noteikt kā funkciju f no \mathbf{q} :

$$f(\mathbf{q}) = {}^0_n \mathbf{T}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{x}_n & {}^0\mathbf{y}_n & {}^0\mathbf{z}_n & {}^0\mathbf{s}_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.2)$$

kur ${}^0\mathbf{s}_n$ ir **instrumenta atrašanās pozīcija**, kas izteikta sākuma koordinātu sistēmā $\{0\}$. Matricas pirmās trīs kolonnas – vektori ${}^0\mathbf{x}_n$, ${}^0\mathbf{y}_n$, ${}^0\mathbf{z}_n$ – ir kinemātiskās ķēdes pēdējās koordinātu sistēmas $\{n\}$ asis, izteiktas kā vienības vektori, un norāda sistēmas $\{n\}$ virzienu koordinātu sistēmā $\{0\}$.

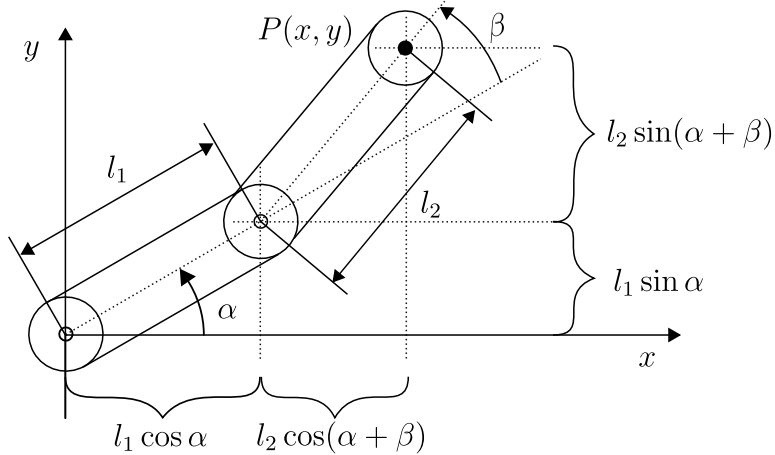
Iepriekš 3.1.3. nodaļā ar formulu (3.1.13) aprakstīta vektora pilna transformācija starp koordinātu sistēmām, kas ir funkcijas (3.2.2) risinājums ar ievietotu \mathbf{q} . Lai veiktu aprēķinu, jāpazīst manipulatora ģeometriskā uzbūve. Manipulatora korpuss tipiski sastāv no vairākiem posmiem, kuru izmēri ir konstantes, taču maināmi ir asu leņķi vai pārvietojums, ja ass ir lineāra. Tiešā kinemātika aprēķināma:

- **analītiski** jeb ģeometriski (skat. 3.2.1. nodaļu)
- pēc **Denavita-Hartenberga (DH) konvencijas** (skat. 3.2.2. nodaļu).

Turpmāk ar piemēriem skaidroti abi varianti.

3.2.1. Analītisks aprēķins 2D robotam

Ģeometriski vienkāršotā piemērā var pieņemt, ka robota roka darbojas tikai plaknē. Instrumenta virziens šajā piemērā tiek ignorēts. 3.5. attēlā redzamajā piemērā punkts $P(x, y)$ ir robota rokas gala-



3.5. attēls. Tiešās kinemātikas aprēķina piemērs.

punkts, skatoties no tā pamatnes. Punkta P koordinātas aprēķināmas, noskaidrojot tā pozīcijas vektoru:

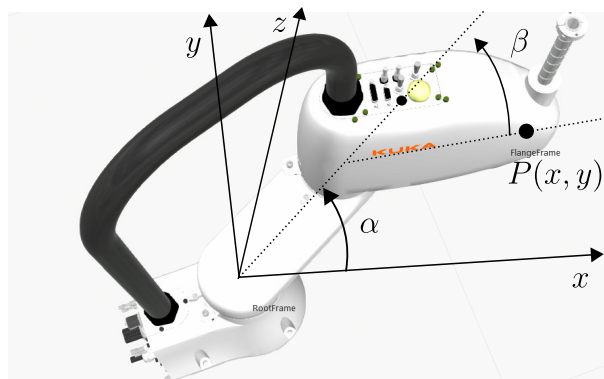
$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos \alpha + l_2 \cos(\alpha + \beta) \\ y &= l_1 \sin \alpha + l_2 \sin(\alpha + \beta) \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

Šādu aprēķinu var izmantot *SCARA* tipa robotiem, nosakot pozīciju plaknē, kā ilustratīvi parādīts 3.6. attēlā.

Aprēķins pārējām asīm (ja tādas ir) notiek pēc tāda paša paņēmiena, taču atkarībā no robota uzbūves, aprēķins var būt ļoti sarežģīts un apjomīgs, tādēļ robotikā to praktiski neizmanto. 3.2.2. nodaļā aplūkota DH konvencija, kas piemērota sarežģītākām kinemātiskām ķēdēm.

3.2.2. Denavita-Hartenberga konvencija

Denavita-Hartenberga (DH) konvencija tika ieviesta 1955. gadā, un tā ir matemātisko likumu krājums, kas apraksta koordinātu sistēmu relatīvās pozīcijas kinemātiskā ķēdē. Metodes priekšrocība ir tā, ka kinemātiskās ķēdes posmi viens pret otru tiek izteikti tikai ar četri



3.6. attēls. SCARA tipa robota pozīcija plaknē.

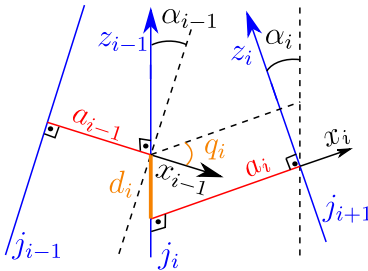
parametru palīdzību. Šo likumu kopums nav sarežģīts, taču nereti neskaidrība rodas, jo pastāv ne tikai viena konvencija, bet gan divi tās paveidi – **proksimālā** un **distālā** metode. Turpmāk sniegts skaidrojums un aprēķina piemērs sešu asu manipulatoram ar distālo metodi.

3.9. (a) un 3.9. (b) attēlā ilustrēts, kā izvēlas un apzīmē aprēķinos izmantojamās asis un leņķi. Pirmais solis ir numurēt visus kinemātiskās ķēdes posmus, sākot ar 0, kas ir pamatne, un beidzot ar n , kas ir galapunkta vai instrumenta koordinātu sistēma. Tālāk numurē visas locītavas jeb asis no 1 līdz n . Seriālajā kinemātiskajā ķēdē posms i atrodas starp locītavām j_{i-1} un j_i , un locītava j_i kustina posmu i . Katram posmam, izņemot pamatnes un gala posmu, ir tieši divas kustīgas asis. Posmam i ir nemainīgi piesaistīta koordinātu sistēma $\{i-1\}$. Locītava j_i atrodas uz koordinātu sistēmas $i-1$ ass z_{i-1} . Arī lineārās ass gadījumā kustība notiek pa z .

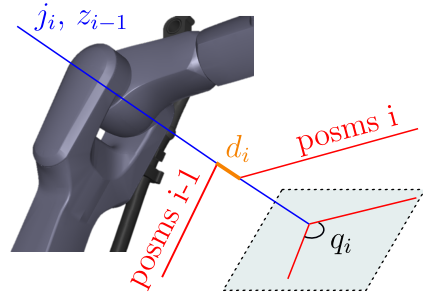
DH konvencijas aprēķiniem nepieciešami četri parametri katram kinemātiskās ķēdes posmam: a_i , d_i , α_i un q_i . Turpmāk uzskaitīti detalizēti soļi koordinātu sistēmu un šo parametru noteikšanai.

- Uz pirmās locītavas j_1 izvēlas asi z_0 . x_0 un y_0 virzieni nav būtiski, taču koordinātu sistēmai $\{0\}$ jābūt veidotai pēc labās rokas likuma. Vispārīgā gadījumā z_i ir izvēlēta kolineāri uz manipulatora locītavas ass j_{i+1} jeb $z_i = j_{i+1}$.

- Tiek noteikts koordinātu sistēmas $\{i\}$ nulles punkts O_i . Vienkāršākajā variantā tas ir abu locītavu asu j_i un j_{i+1} krustpunktā. Taču, ja krustpunkta nav, tiek atrasts normāles vektors starp locītavu asīm j_i un j_{i+1} , kuru apzīmē ar a_i . Attālums starp vektoriem z_{i-1} un z_i ir a_i .
- x_i tiek izvēlēta pa normāles vektoru a_i un ir vērsta no z_{i-1} uz z_i . Ja z_{i-1} un z_i krustojas, tad $a_i = 0$ un x_i izvēlas kā normāli plaknei, ko veido abas z_{i-1} un z_i .
- y_i ass ir izvēlēta tā, lai $\{i\}$ veidotu koordinātu sistēmu pēc labās rokas likuma. Punkts, kurā normāles vektors a_i starp asīm z_{i-1} un z_i krusto taisni z_i , ir koordinātu sistēmas sākumpunkts i .
- α_i ir leņķis starp taisnēm z_{i-1} un z_i ap x_i asi.
- d_i ir distance starp x_{i-1} un x_i pa z_{i-1} . d_i ir konstante rotācijas asij, bet mainīgais lineārai asij.
- q_i ir leņķis starp x_{i-1} un x_i ap z_{i-1} . Vienlaicīgi q_i ir manipulatora ass leņķis, kas ir konstante lineārai asij, bet mainīgais rotācijas asij.



a) DH parametru izvēle.



b) Robota ass un tās blakus posmi.

3.7. attēls. Manipulatora posmu un koordinātu asu izvēle pēc DH konvencijas.

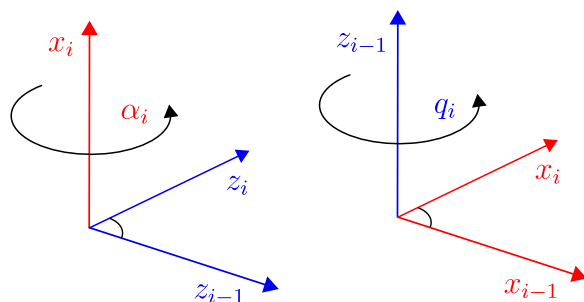
Ne visi izvēles soļi koordinātu sistēmu noteikšanā ir viennozīmīgi. Dažos gadījumos izvēle ir brīva, taču ieteicams izvēli izdarīt tā, lai modelis būtu pēc iespējas vienkāršāks.

- Pamatnes koordinātu sistēmā $\{0\}$ ir zināma tikai z ass, taču tās

sākumpunkts O_0 ir nenoteikts, un to var brīvi izvēlēties. Parasti to izvēlas kā punktu uz pamatnes, uz kuras montēts robots (piemēram, telpas grīda).

- Kinemātiskās ķēdes pēdējā posmā nosaka pēdējo koordinātu sistēmu $\{i\}$, kurā savukārt nosaka darba instrumentu. Pēc DH konvencijas ir skaidrs, ka x_i ass ir normāles vektors pret z_{i-1} , taču, tā kā nākamā locītava neeksistē, tad nav zināma arī z_i ass un tātad nav zināms koordinātu sistēmas $\{i\}$ sākumpunkts O_i . Parasti pieņem, ka z_i ir paralēla z_{i-1} .
- Ja divas locītavu asis z un z_{i+1} ir paralēlas, eksistē bezgalīgi daudz normāles vektoru starp tām un tātad bezgalīgi daudz variantu x_i asij. Šajā gadījumā x_i izvēlas kolineāri x_{i-1} , kas nozīmē $d_i = 0$. Alternatīvi izvēlas d_i vērtību tā, lai $\{i\}$ sākumpunkts veidotu ērtu un saprotamu robota modeļa uzbūvi.

Pozitīvos α_i un q_i rotācijas virzienus nosaka pēc labās rokas likuma konvencijas, kā parādīts 3.8. attēlā. Pozitīvs α_i leņķis ir no z_{i-1} uz z_i ap x_i . Pozitīvs q_i leņķis ir no x_{i-1} uz x_i ap z_{i-1} . Ievērot, ka q_i ir rotācijas leņķis ap iepriekšējās koordinātu sistēmas asi z_{i-1} .



3.8. attēls. α un q pozitīvie rotācijas virzieni.

Izmantojot DH konvenciju, iespējams samazināt aprēķinu apjomu, lai noteiktu vienas koordinātu sistēmas virzienu un sākumpunktu pret iepriekšējo koordinātu sistēmu. Konvencija nosaka, ka ir nepieciešamas tikai divas taisnvirziena kustības un divas rotācijas matricas. Tām jābūt 4×4 formā, un tās jāizmanto noteiktā secībā.

Rotācija ap z_{i-1} taisni par leņķi q_i :

$$\mathbf{R}_z(q_i) = \begin{pmatrix} \cos(q_i) & -\sin(q_i) & 0 & 0 \\ \sin(q_i) & \cos(q_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2.4)$$

Novirze pa z_{i-1} taisni par vektoru d_i :

$$\mathbf{D}_z(d_i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2.5)$$

Novirze pa x_i taisni par vektoru a_i :

$$\mathbf{D}_x(a_i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2.6)$$

Rotācijas matrica ap x_i taisni par leņķi α_i :

$$\mathbf{R}_x(\alpha_i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2.7)$$

Reizinot matricas norādītajā kārtībā, iegūst pilnu koordinātu sistēmas transformāciju:

$$\begin{aligned}
{}^{i-1}\mathbf{T} &= \mathbf{R}_z(q_i)\mathbf{D}_z(d_i)\mathbf{D}_x(a_i)\mathbf{R}_x(\alpha_i) = \\
&= \begin{pmatrix} \cos q_i & -\cos\alpha_i \sin q_i & \sin\alpha_i \sin q_i & a_i \cos q_i \\ \sin q_i & \cos\alpha_i \cos q_i & -\sin\alpha_i \cos q_i & a_i \sin q_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2.8)
\end{aligned}$$

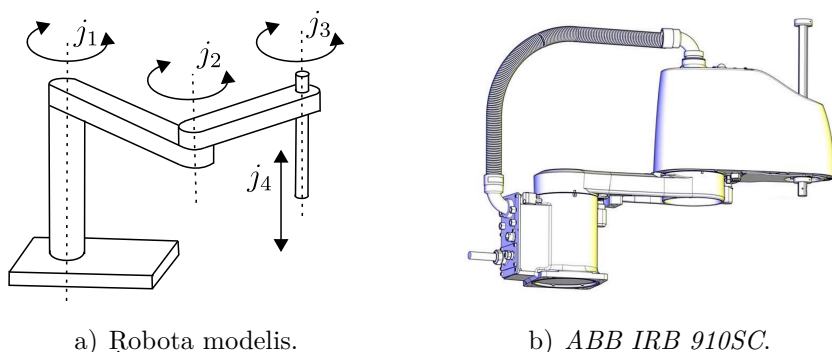
Katram manipulatora posmam transformāciju pret iepriekšējo var izteikt ar matricu ${}^{i-1}\mathbf{T}$ pēc (3.2.8). Tā kā manipulatora uzbūvē atsevišķos posmos kāds no DH parametriem nereti ir nulle, katra posma koordinātu sistēmai būs sava transformācijas matrica. Instrumenta pozīciju pret nulles koordinātu sistēmu var noteikt, reizinot visu posmu matricas:

$${}^b\mathbf{T} = {}_b\mathbf{T} \cdot {}_1^0\mathbf{T} \cdot {}_2^1\mathbf{T} \cdot \dots \cdot {}_n^{n-1}\mathbf{T} \cdot {}_t^n\mathbf{T}, \quad (3.2.9)$$

kur ${}^n_t\mathbf{T}$ ir pēdējā transformācija uz manipulatora instrumenta galapunktu (vienības matrica, ja instrumenta nav). ${}^b_t\mathbf{T}$ ir pilna transformācija, kas pēc uzbūves ir identiska (3.1.15) un (3.1.13).

3.2.3. Aprēķinu piemērs *SCARA* robotam

3.9. attēlā redzams manipulators, kuram ir četras asis – trīs rotācijas un viena taisnvirziena kustība. Sākumā asu pozitīvais virziens ir nenoteikts. Pirmajā solī izvēlas tikai visas z asis, kas sakrīt ar locītavu asīm. z_2 ass ir izvēlēta pretējā virzienā kā z_1 , lai instrumenta rotācija būtu vērsta pozitīvā virzienā uz darba objektu (3.10. att. uz leju). Kinemātiskās ķēdes galā pievienota papildu koordinātu sistēma $\{t\}$ darba instrumentam, kuram nav atsevišķas locītavas, tādēļ z_t izvēlas z_3 virzienā. Tālāk nosaka pārējos z asu pozitīvos rotācijas vai taisnvirziena kustības virzienus. Nākamajā solī izvēlas x asis, kuras pēc DH konvencijas sakrīt ar normāles vektoriem starp blakus esošām z asīm. Tā kā izvēlētajam *SCARA* robotam visas locītavu asis ir paralēlas, x asis var izvēlēties vienā virzienā. y asis atliek noteikt pēc labās rokas likuma.



a) Ķobota modelis.

b) ABB IRB 910SC.

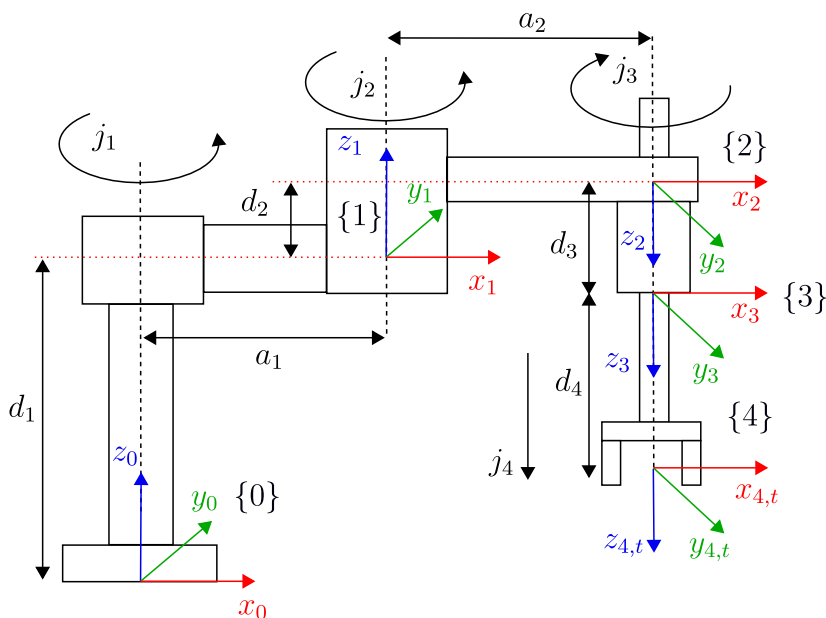
3.9. attēls. SCARA robota uzbūve.

Kad noteikts koordinātu sistēmas un virzieni, ir jāizvēlas to novietojums uz manipulatora. Rezultātā tiks iegūtas mainīgo a_i un d_i vērtības. Bāzes koordinātu sistēmai $\{0\}$ asi x_0 izvēlas tā, lai koordinātu sistēmas sākumpunkts O_0 atrastos uz pamatnes jeb montāžas virsmas. Koordinātu sistēma $\{1\}$ ir nobīdīta pret $\{0\}$ pa z_0 par d_1 un pa x_0 par attālumu a_1 . Līdzīgā veidā atrod d_2 un a_2 . Tā kā $\{2\}$, $\{3\}$ un $\{4\}$ visas z asis ir uz vienas taisnes, a vērtības ir nulle.

3.1. tabula. SCARA robota DH parametri

| i | α_i | a_i | q_i | d_i |
|---|------------|-------|-------|-------|
| 1 | 0 | a_1 | q_1 | d_1 |
| 2 | π | a_2 | q_2 | d_2 |
| 3 | 0 | 0 | q_3 | d_3 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | d_4 |

Iegūtās vērtības var apkopot 3.1. tabulā redzamajā veidā. Rotācijas asīm mainīgie ir q_1, q_2, q_3 , bet d_4 ir mainīgā vērtība taisnvirziena kustības asij j_4 , kurai rotācija vienlaikus ir 0. Pēc (3.2.8) iegūst atsevišķās



3.10. attēls. Izvēlētās SCARA robota koordinātu sistēmas.

transformāciju matricas:

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & a_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & a_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.10)$$

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos q_2 & \sin q_2 & 0 & a_2 \cos q_2 \\ \sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & a_2 \sin q_2 \\ 0 & 0 & -1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.11)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & 0 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.12)$$

$${}^3_4\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.13)$$

kurās reizina, lai iegūtu pilnu transformāciju no bāzes līdz instrumenta koordinātu sistēmai:

$${}^0_4\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} \cdot {}^1_2\mathbf{T} \cdot {}^2_3\mathbf{T} \cdot {}^3_4\mathbf{T}. \quad (3.2.14)$$

Apjoma dēļ izvērstā formā ${}^0_4\mathbf{T}$ šeit nav sniegts. Matrica lietojama līdzīgi kā (3.1.14).

Koordinātu sistēmu sākumpunktu atrašanās vietas var izvēlēties arī citur tā, ka d un a vērtības atšķiras. Piemēram, pieņemot, ka interesē tikai instrumenta galapunkts, nevis vidusposmu koordinātas, izvēlētajam manipulatoram pirmās trīs koordinātu sistēmas varētu izvēlēties arī tā, lai to x ass būtu uz vienas taisnes, bet d_1, \dots, d_3 būtu nulle. Taču pilna transformācija no bāzes uz instrumenta koordinātu sistēmu (${}^0_4\mathbf{T}$) ir vienāda.

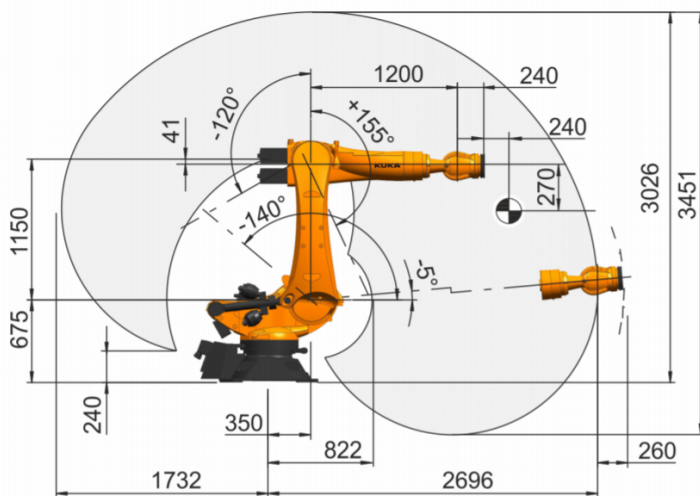
3.2.4. Aprēķinu piemērs sešu asu robotam

Nākamajā piemērā izmantots sešu asu robota manipulators *KUKA Quantec prime*, kuram sastādīts tā kinemātiskais modelis. Ražotāja specifikācijā [45] sniegtas robota dimensijas, kas parādītas 3.11. attēlā. Zinot atsevišķu asu savstarpējo novietojumu pēc 2.8. attēla un manipulatora posmu garumu pēc specifikācijas, iespējams sastādīt tā modeli un izvēlēties posmu koordinātu sistēmas.

3.12. attēlā ir redzamas visas koordinātu sistēmas. 3.2. tabulā ir apkopoti visi DH parametri. Turpmāk tie analizēti sīkāk.

- Koordinātu sistēma $\{0\}$.

Pirmā ass j_1 nosaka koordinātu sistēmas $\{0\}$ z -ass z_0 novietojumu. x_0 un z_0 var izvēlēties brīvi, taču šajā piemērā taisnes izvēlētas tā, lai tās veidotu koordinātu sistēmu pēc labās rokas

3.11. attēls. *KUKA Quantec* specifikācija [45].

likuma un sakristu ar ražotāja izmantotajiem virzieniem.

- $\{0\} \rightarrow \{1\}$.

3.2. tabulas pirmā rinda apzīmē koordinātu sistēmas $\{1\}$ novietojumu pret $\{0\}$. Koordinātu sistēma $\{1\}$ ar $\{0\}$ veido 90° leņķi ap x_1 . α_1 norādīts ar mīnusa zīmi, ievērojot griešanās virzienu pēc 3.8. attēla. d_1 ir attālums pa z_0 , bet a_1 ir attālums pa x_1 , kuru garumi doti 3.11. attēlā.

- $\{1\} \rightarrow \{2\}$.

Trešā ass j_3 koordinātu sistēmā $\{2\}$ ir paralēla j_2 . Tā kā nav nobīdes pa z_1 , jāņem vērā vienīgi posma garums a_2 .

- $\{2\} \rightarrow \{3\}$.

Koordinātu sistēmā $\{3\}$ atrodas ceturrtā ass j_4 , un tā ir pagriezta gan pa z_2 , gan x_3 par $-\pi/2$. Turklāt, $\{3\}$ nobīdīta pa x_3 negatīvā virzienā par a_3 . Mainīgā q_3 vērtībai vienmēr pieskaitīta $-\pi/2$, lai attēlotajā pozīcijā uzdotais ass leņķis būtu nulle.

- $\{3\} \rightarrow \{4\}$.

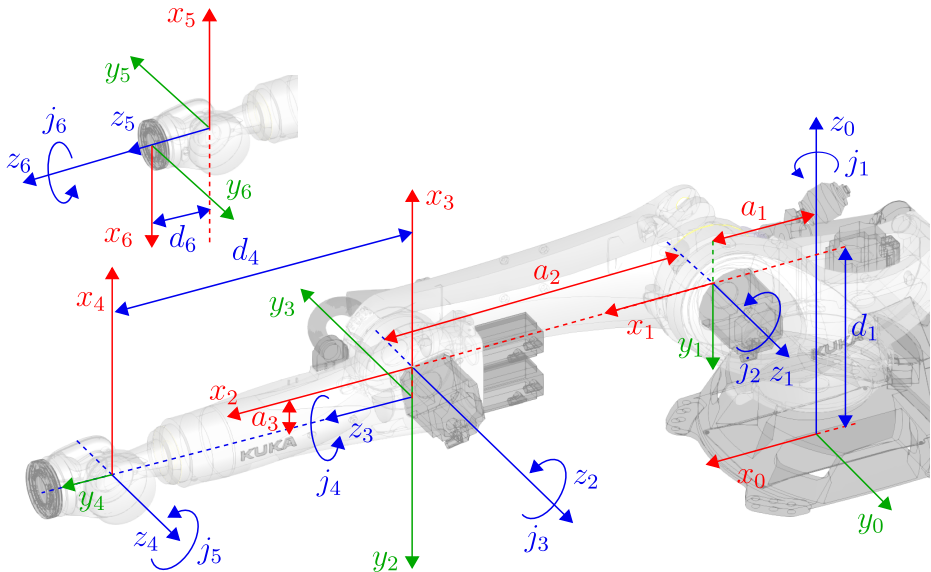
Piektā ass koordinātu sistēmā $\{4\}$ ir pagriezta par 90° ap x_4 un $\{4\}$ ir nobīdīta pa z_3 par d_4 .

- $\{4\} \rightarrow \{5\}$.

Koordinātu sistēmu $\{4\}$ un $\{5\}$ sākumpunkti pārklājas to z asu jeb locītavu krustpunktā, taču $\{5\}$ ir pagriezta par 90° ap x_5 .

- $\{5\} \rightarrow \{6\}$.

Pēdējā koordinātu sistēma $\{6\}$ ir pārvietota par d_6 pa z_5 , tādējādi $\{6\}$ sākumpunkts atrodas uz instrumenta montāžas plaknes. $\{6\}$ pagriezta par π ap z_5 , tādēļ mainīgajam q_6 vienmēr ir pieskaitīts π , lai attēlotajā pozīcijā uzdotā ass vērtība būtu nulle. Pēdējā koordinātu sistēmā nosaka darba instrumentu, kas attēlā nav ilustrēts.



3.12. attēls. Robota asis, to griešanās virzieni un posmu koordinātu sistēmas (*KUKA* robots *Quantec*).

Vērts atcerēties, ka α un a vērtības – rotācija un nobīde – vienmēr ir jaunās koordinātu sistēmas kontekstā, bet q un d – iepriekšējās.

Saskaņojot modeli ar fizisko controlleri konkrētajam *KUKA* manipulatoram, jāņem vērā, ka asu j_1 , j_4 un j_6 rotācijas virzieni ir pretējā virzienā (skat. 2.8. att.). Lai saskaņotu kustību ar controlleri izman-

3.2. tabula. Sešu asu *KUKA* robota DH parametri

| j_i | $\alpha_i[\text{rad}]$ | $a_i[\text{mm}]$ | $q_i[\text{rad}]$ | $d_i[\text{mm}]$ |
|-------|------------------------|------------------|--------------------|------------------|
| 1 | $-\pi/2$ | 350 | $-\theta_1$ | 675 |
| 2 | 0 | 1150 | θ_2 | 0 |
| 3 | $-\pi/2$ | -41 | $\theta_3 - \pi/2$ | 0 |
| 4 | $\pi/2$ | 0 | $-\theta_4$ | 1200 |
| 5 | $-\pi/2$ | 0 | θ_5 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | $-\theta_6 + \pi$ | 240 |

toto konvenciju, šiem leņķiem priekšā jālieto mīnusa zīme. 3.1. tabulā mainīgie q_1 , q_4 un q_6 uzdoti ar mīnusa zīmi, lai tie atbilstu 3.12. attēlā norādītajiem pozitīvajiem asu virzieniem. Koordinātu sistēmu izvēle detaļās var atšķirties (piemēram, z asu virzieni), tādēļ arī atsevišķas transformācijas matricas var būt citādas, taču pilnai transformācijai jābūt identiskai.

Pēc 3.11. un 3.12. attēla var aizpildīt DH parametru vērtības ar skaitļiem. 3.2. tabula satur visus DH parametrus, kur mainīgais θ_i izmantots kā robota vadības sistēmas lietotāja saskarnes uzdotā vērtība. Aprēķinos izmantotā vērtība ir q_i , kas ir lineāri saistīta ar θ_i pēc tabulas datiem. Katra posma transformāciju uz katru nākamo posmu var noteikt pēc 3.2. tabulas datiem. Atrisinot visas nulles vērtības un trigonometriskās funkcijas α leņķiem, iegūst:

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1) & a_1 \cos(q_1) \\ -\sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & -a_1 \sin(q_1) \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.15)$$

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos(q_2) & -\sin(q_2) & 0 & a_2 \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & a_2 \sin(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.16)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos(q_3 - \frac{\pi}{2}) & 0 & -\sin(q_3 - \frac{\pi}{2}) & a_3 \cos(q_3 - \frac{\pi}{2}) \\ \sin(q_3 - \frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(q_3 - \frac{\pi}{2}) & a_3 \sin(q_3 - \frac{\pi}{2}) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.17)$$

$${}^3_4\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos(q_4) & 0 & -\sin(q_4) & 0 \\ -\sin(q_4) & 0 & -\cos(q_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.18)$$

$${}^4_5\mathbf{T} = \begin{pmatrix} -\cos(q_5) & 0 & \sin(q_5) & 0 \\ -\sin(q_5) & 0 & -\cos(q_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.19)$$

$${}^5_6\mathbf{T} = \begin{pmatrix} -\cos(q_6) & -\sin(q_6) & 0 & 0 \\ \sin(q_6) & -\cos(q_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2.20)$$

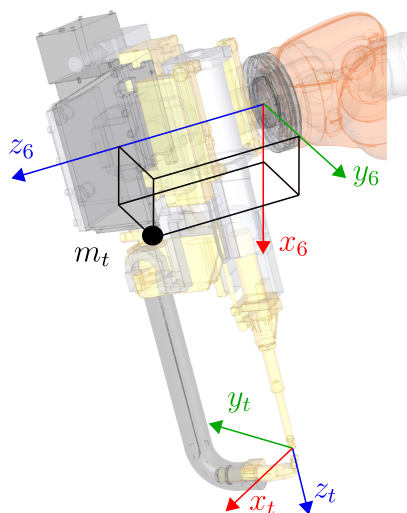
Pilna transformācija no pamatnes uz instrumentu

$${}^0_6\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} \cdot {}^1_2\mathbf{T} \cdot {}^2_3\mathbf{T} \cdot {}^3_4\mathbf{T} \cdot {}^4_5\mathbf{T} \cdot {}^5_6\mathbf{T} \quad (3.2.21)$$

veido 300 neatkarīgas sinusa un kosinusa funkcijas, tādēļ ${}^0_6\mathbf{T}$, kas izvērstā veidā netiek sniegta. Ja visi DH parametri būtu netriviāli (ne nulles), matricu reizinājuma rezultāts būtu 4×4 matrica, kurā mainīgos $q_{1,\dots,6}$ izmanto 277 reizes vairāk nekā 5000 trigonometriskās funkcijās. Manipulatorus konstruē tā, lai to modeļi būtu pēc iespējas vienkārši un mainīgo skaits minimāls.

3.2.5. Instrumenta virziens un koordinātas

Darba instrumenta virziens un pozīcija vadības kontrolleros parasti noteikti Eilera leņķu formā (skat. 3.1.2. nodaļu). 3.13. attēlā dots darba instruments, kura stāvoklis ir jāizsaka gan pilnas transformācijas matricas formā, gan Eilera leņķu formā. Instrumenta masas punktam nav virziena, tādēļ tam pietiekamas ir tikai atrašanās koordinātas. Praksē nereti Eilera leņķus vadības sistēmās apzīmē ar A , B



3.13. attēls. Instrumenta atrašanās vieta manipulatora pēdējā koordinātu sistēmā. Instrumenta masas m_t centra atrašanās vieta.

un C . *KUKA* kontrolleros izmanto Eilera-ZYX (3.1.7) konvenciju, kur Eilera leņķu apzīmējumi atbilst

- $A = \alpha$: rotācija ap z ;
- $B = \beta$: rotācija ap y ;
- $C = \gamma$: rotācija ap x .

Darba instrumenta pozīciju un virzienu pēc būtības var aprakstīt ar jaunu koordinātu sistēmu $\{t\}$. Instrumenta spice (piemēram, urbja vai metināšanas iekārtas) ir koordinātu sistēmas $\{t\}$ sākumpunkts. $\{t\}$ ir noteikta manipulatora kinemātiskās ķēdes pēdējā koordinātu sistēmā $\{n\}$, kuru var aprēķināt kā pilnu transformāciju no instrumenta mon-

tāžas virsmas uz instrumenta darba punktu ${}^n_t\mathbf{T}$ pēc (3.1.8). Turpmāk parādīta konvertācija no praksē izmantotajiem Eilera leņķiem uz matricas formu un otrādi.

► **ABC → matrica**

Aprēķinos nepieciešamo 4×4 matricu var sastādīt no vadības sistēmā dotajiem Eilera leņķiem, ievietojot tos rotācijas matricā un pievienojot pozīcijas vektoru. Instrumenta pozīcija dota ceturtajā kolonnā ar mainīgajiem x_t , y_t un z_t , taču 3×3 apakšmatricā tā virziens izsakāms pēc (3.1.8), kur α , β , γ attiecīgi var aizvietot arī ar A, B un C:

$${}^n_t\mathbf{T} = \begin{pmatrix} n_1 & n_2 & n_3 & x_t \\ m_1 & m_2 & m_3 & y_t \\ k_1 & k_2 & k_3 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2.22)$$

kur

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos(\alpha) \cos(\beta), \\ n_2 &= \cos(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) - \cos(\gamma) \sin(\alpha), \\ n_3 &= \sin(\alpha) \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\beta), \\ m_1 &= \cos(\beta) \sin(\alpha), \\ m_2 &= \cos(\alpha) \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma), \\ m_3 &= \cos(\gamma) \sin(\alpha) \sin(\beta) - \cos(\alpha) \sin(\gamma), \\ k_1 &= -\sin(\beta), \\ k_2 &= \cos(\beta) \sin(\gamma), \\ k_3 &= \cos(\beta) \cos(\gamma). \end{aligned}$$

Ja instrumenta virziens uzdots pēc Eilera-ZYX leņķiem un zināms tā attālums no montāžas punkta, tad robota pilnas tiešās kinemātikas (3.2.9) aprēķinos izmantota kinemātiskās ķēdes pēdēja transformācijas matrica ${}^n_t\mathbf{T}$.

► Matrica → ABC

Lai iegūtu Eilera leņķus A , B un C , ir jāatrisina (3.2.22), izmantojot trigonometrisko funkciju $\arctan2$:

$$A = \alpha = \arctan2(m_1, n_1), \quad (3.2.23)$$

$$B = \beta = \arctan2(-k_1, \sqrt{(k_2)^2 + (k_3)^2}), \quad (3.2.24)$$

$$C = \gamma = \arctan2(k_2, k_3). \quad (3.2.25)$$

Ja $k_1 = -1$ vai $k_1 = 1$, tad $B = 0$, jo $\cos(\pi/2) = 0$. Šajā gadījumā n_1 , m_1 , k_2 un k_3 ir nulles, ja satur reizinājumu $\cos(\pi/2) = 0$. Tādā gadījumā pieņem, ka $A = \alpha = \pi$, un aprēķina $C = \gamma = \arctan2(n_2, m_2)$. Vispārējā gadījumā $\arctan2$ funkciju aprēķina, izšķirot sešus gadījumus:

$$\arctan2(x, y) \rightarrow \begin{cases} \arctan \frac{y}{x}, & \text{ja } x > 0 \\ \arctan \frac{y}{x} + \pi, & \text{ja } x < 0, y > 0 \\ \pm\pi, & \text{ja } x < 0, y = 0 \\ \arctan \frac{y}{x} - \pi, & \text{ja } x < 0, y < 0 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{ja } x = 0; y > 0 \\ -\frac{\pi}{2}, & \text{ja } x = 0; y < 0 \end{cases}. \quad (3.2.26)$$

Aprēķinu izmanto gan pēdējai transformācijai no pēdējā posma uz instrumentu, gan arī pilnai – no bāzes koordinātu sistēmas uz instrumentu, jo transformācijas pieraksts (3.2.22) ir identisks.

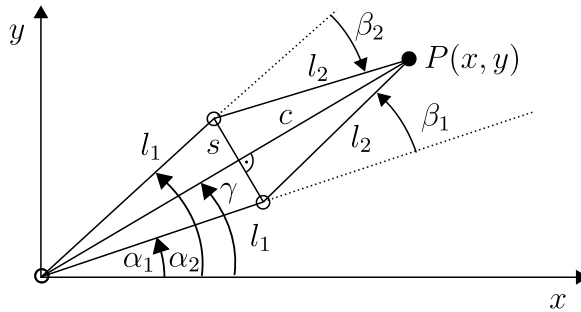
3.3. Inversā kinemātika

Inversā kinemātika ir matemātisks paņēmiens manipulatora locītavu asu pozīciju noteikšanai, ja ir zināma darba instrumenta pozīcija un virziens tā bāzes koordinātu sistēmā. Tā nepieciešama gandrīz jebkurai robotu uzdevumam, jo darba instrumenta pozīciju nosaka telpā, taču vadības sistēmai jāspēj iestatīt asis vērtībās, kas šo pozīciju ļautu sasniegt. Inversās kinemātikas funkcija ir nelineāra. Tai var būt vairā-

ki risinājumi, bet tai var nebūt arī neviena risinājuma. Problēmu var pierakstīt kā ${}^n_0\mathbf{T}(\mathbf{q})$, kur jāatrod asu leņķi q_1, \dots, q_n . Turpmāk sniegts inversās kinemātikas aprēķina piemērs manipulatoram ar divām brīvības pakāpēm.

3.3.1. Ģeometriskais aprēķins plaknē

Inversās kinemātikas aprēķinam izmantots tas pats robota manipulators kā 3.5. attēlā. Vienkāršotā veidā plaknē 3.14. attēlā ilustrēts zināms mērķa punkts P . Inversās kinemātikas problēma ir atrast leņķus α un β , lai ar robota darba instrumentu sasniegtu šo punktu. Zināma ir robota konstrukcija, tātad l_1 un l_2 .



3.14. attēls. Inversās kinemātikas aprēķina piemērs.

Aprēķins veicams piecos soļos.

► 1. Noteikt c garumu

$$c = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.3.1)$$

Robežgadījumi:

- $c > l_1 + l_2$ ģeometriski nav iespējams, nav risinājuma;
- $c < |l_1 - l_2|$ ģeometriski nav iespējams, nav risinājuma;
- $c = 0$ un $l_1 = l_2$ leņķi var būt jebkādi, bezgalīgi daudz risinājumu.

► **2. Noteikt γ**

γ var atrast pēc arctan funkcijas

$$\gamma = \arctan \frac{s}{c}, \quad (3.3.2)$$

taču aprēķins ir nepilnīgs, jo darbojas tikai vienā kvadrantā, tādēļ tiek izmantota paplašinātā arctan2 funkcija:

$$\gamma = \begin{cases} \arctan \left(\frac{s}{c} \right), & \text{ja } c > 0 \\ \arctan \left(\frac{s}{c} \right) + \pi, & \text{ja } c < 0, s > 0 \\ \pm\pi, & \text{ja } c = 0; s < 0 \\ \arctan \left(\frac{s}{c} \right) - \pi, & \text{ja } c < 0, s < 0 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{ja } c = 0, s > 0 \\ -\frac{\pi}{2}, & \text{ja } c = 0, s < 0 \end{cases}. \quad (3.3.3)$$

► **3. Analizēt manipulatora roku garumu**

Roku garums l_1 un l_2 nepieciešams īpašos gadījumos, kad roku posmi ir kolineāri. Ja otrās ass leņķis β ir nulle, roka ir "izstiepta" un garums c ir

$$c = l_1 + l_2, \text{ ja } \begin{cases} \alpha_1 = \alpha_2 = \gamma \\ \beta_1, \beta_2 = 0 \end{cases}. \quad (3.3.4)$$

Savukārt, ja otrās ass leņķis β ir pagriezts par 180° , risinājums ir atkarīgs no savstarpējo posmu l_1 un l_2 garumiem, kā ilustrēts 3.15. attēlā. Abos gadījumos

$$c = |l_1 + l_2|, \quad (3.3.5)$$

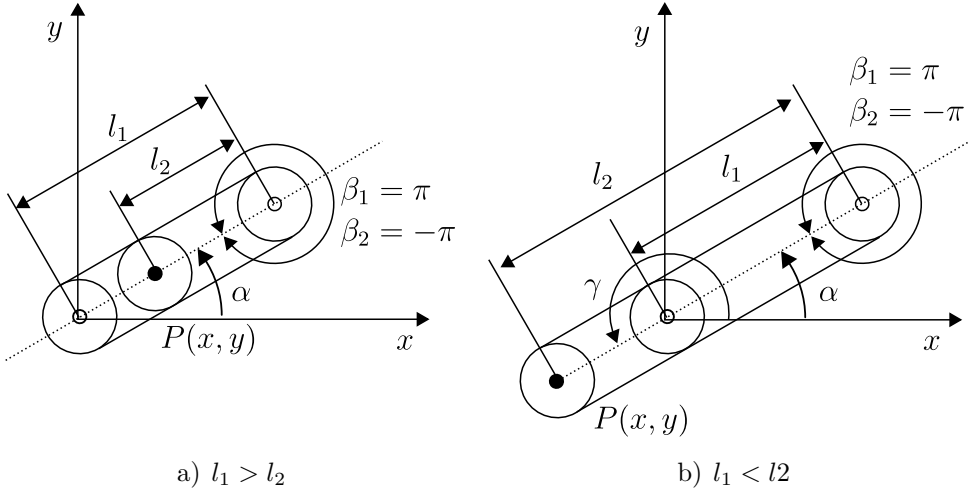
bet leņķu lielumi ir

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_2 = \gamma \\ \beta_1 = \pi \text{ vai } \beta_2 = -\pi \end{cases}, \text{ ja } l_1 > l_2 \quad (3.3.6)$$

un

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_2 = \gamma - \pi & \quad , \text{ ja } l_1 < l_2. \\ \beta_1 = \pi \text{ vai } \beta_2 = -\pi & \end{aligned} \quad (3.3.7)$$

Tātad, iespējamas divas atbildes pie dažādiem β . Ne visiem robotu veidiem visas asis iespējams pagriezt vairāk par 180° grādiem.



3.15. attēls. Roku posmu kolinearitāte jeb saliekta roka.

► 4. Aprēķināt β_1 un β_2

Aprēķināt β_1 un β_2 visos pārējos gadījumos, kad tas nav 0 , π vai $-\pi$ jeb

$$\begin{aligned} c &= l_1 + l_2 \\ c &> |l_1 - l_2| \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

3.14. attēlā var aplūkot abus trijstūrus, kuru kopējā mala ir c , un, izmantojot kosinusa teorēmu:

$$x_p^2 + y_p^2 = c^2 = \begin{cases} l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \beta_1 & \text{augšējam trijstūrim} \\ l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \beta_2 & \text{apakšējam trijstūrim} \end{cases} \quad (3.3.9)$$

β_1 un β_2 ir viena vērtība, taču atšķirīga zīme:

$$\beta = \pm \arccos \left(\frac{x^2 + y^2 - (l_1^2 + l_2^2)}{2l_1l_2} \right). \quad (3.3.10)$$

► **5. Aprēķināt α_1 un α_2**

Leņķis γ ir zināms pēc mērķa punkta

$$\gamma = \arctan \frac{y}{x}. \quad (3.3.11)$$

Pieņemot, ka σ ir starpība starp α un γ

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \gamma - \sigma \\ \alpha_2 &= \gamma + \sigma \end{aligned}, \quad (3.3.12)$$

ar kosinusa teorēmu var aprēķināt σ

$$\sigma = \arccos \left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + c^2}{2l_1c} \right) \quad (3.3.13)$$

un arī abus iespējamus α_1 un α_2 .

Tradicionālā ģeometrija ir matemātiski iespējams paņēmieni, taču tā ir salīdzinoši apjomīga. Turklāt tā ir specifiska konkrētai robota ģeometrijai un kompleksiem kinemātikas modeļiem var būt ļoti sarežģīta. Ja iespējami vairāki atbilstoši varianti, kā tas ir aplūkotajā piemērā, robota vadības sistēmai jāizvēlas viens no variantiem pēc noteiktiem kritērijiem, piemēram, tuvākā pozīcija esošajai vai sadursmju novēršana.

3.3.2. Inversās kinemātikas aprēķins telpā

Kā piemēru var izmantot manipulatoru, kas ilustrēts 3.12. attēlā iepriekš apskatītajā piemērā par tiešo kinemātiku. Instrumenta pozīcija un virziens pēc asu leņķiem tiek aprēķināti, izmantojot (3.2.21). Inversā kinemātika ļauj iegūt asu leņķus no zināmas instrumenta pozīcijas un tā virziena. Pēc *R. Paul* [46] metodes katru atsevišķo matricu var

pārnest no labās uz kreiso pusi kā inverso vērtību, rezultātā iegūstot vairākas matricu vienādojumu sistēmas. Pārnēsot pakāpeniski, iegūst:

$${}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^1_2\mathbf{T} \cdot {}^2_3\mathbf{T} \cdot {}^3_4\mathbf{T} \cdot {}^4_5\mathbf{T} \cdot {}^5_6\mathbf{T} = {}^1_6\mathbf{T}, \quad (3.3.14)$$

$${}^1_2\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^2_3\mathbf{T} \cdot {}^3_4\mathbf{T} \cdot {}^4_5\mathbf{T} \cdot {}^5_6\mathbf{T} = {}^2_6\mathbf{T}, \quad (3.3.15)$$

$${}^2_3\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^1_2\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^3_4\mathbf{T} \cdot {}^4_5\mathbf{T} \cdot {}^5_6\mathbf{T} = {}^3_6\mathbf{T}, \quad (3.3.16)$$

$${}^3_4\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^2_3\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^1_2\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^4_5\mathbf{T} \cdot {}^5_6\mathbf{T} = {}^4_6\mathbf{T}, \quad (3.3.17)$$

$${}^4_5\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^3_4\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^2_3\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^1_2\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_1\mathbf{T}^{-1} \cdot {}^0_6\mathbf{T} = {}^5_6\mathbf{T}. \quad (3.3.18)$$

Nākamais solis ir izvēlēties atsevišķus matricu elementus un sastādīt vienādojumus, lai pakāpeniski iegūtu q_1, \dots, q_6 vērtības. Piemēram, var sastādīt vienādojumu $i_{1,1} = k_{1,1}$, kur i ir kreisās puses matricas elements, bet k – labās. Ne vienmēr ir vienkārši atrast piemērotus elementu pārus, un nereti ir jāveic daudz aprēķinu. Izvērstā forma konkrētajam robotam ir pārāk apjomīga, lai to varētu šeit pilnībā aplūkot. Taču vienādojumus iespējams atrisināt, izmantojot kādu no matemātiskās modelēšanas datorprogrammām.

3.4. Kustību kinemātika

Lai vadītu robota instrumentu uz kādu noteiktu mērķa punktu, apietu šķēršļus vai veiktu kādu noteiktu ceļu, pietiek ar tiesās un inversās kinemātikas aprēķiniem, lai aprēķinātu leņķu vai instrumenta pozīciju un virzienu. Taču bieži ir jāveic arī darbības, kur būtisks ir ne tikai instrumenta ceļš, bet arī tā ātrums pa šo ceļu. Piemēram, robota instruments – līmes pistole – ir jāvada ar noteiktu ātrumu, lai līmes daudzums tiktu uzklāts vienmērīgi.

Seriālā robota **Jakobi matrica** palīdz aprēķināt instrumenta galapunkta virzes jeb lineāro ātrumu un virziena maiņu laikā pret kādu references punktu, piemēram, bāzi vai darbgaldu. Saīsinātā formā aprēķins rakstāms

$$\dot{\mathbf{x}}_t = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}}, \quad (3.4.1)$$

kur $\dot{\mathbf{x}}_t$ instrumenta lineārais un virziena maiņas ātrums kā vektors, $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_0, \dots, \dot{q}_n]^T$ atsevišķo asu griešanās vai lineārais ātrums, bet \mathbf{J} ir Jakobi matrica kā funkcija no asu vērtībām \mathbf{q} . Izvērstā formā vienādojumu (3.4.1) var rakstīt kā

$$\begin{bmatrix} dp_0 \\ \vdots \\ dp_m \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dq_0 \\ \vdots \\ dq_n \end{bmatrix}, \quad (3.4.2)$$

kur

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{pmatrix} \quad (3.4.3)$$

ir Jakobi matrica. Šeit $\partial f_i / \partial q_j$ ir daļējs atvasinājums no funkcijas f_i pēc asu vērtības. Tiek sastādīti m vienādojumi

$$p_i = f_i(q_1, \dots, q_n), \quad (3.4.4)$$

kuri apraksta vienas brīvības pakāpes ātrumu (lineāru vai rotāciju) atkarībā no visām asīm. Katrs vienādojums Jakobi matricā tiek atvasināts pēc katras atsevišķās ass. Rezultātā iegūst $m \times n$ matricu, kur rindu skaits m apzīmē robota brīvības pakāpes, bet kolonnu skaits n – neatkarīgu asu skaitu. Sešu asu robotam ir sešas brīvības pakāpes – trīs pozīcijas un trīs virziena leņķi. Tā Jakobi matrica ir 6×6 liela ($n = 6$ un $m = 6$). Septiņu asu robotam un sešām brīvības pakāpēm tā attiecīgi būtu 6×7 liela. Vektors $\dot{\mathbf{x}}_t$ satur rotācijas ātrumu rad/s un lineāro ātrumu m/s pret bāzes koordinātu sistēmu.

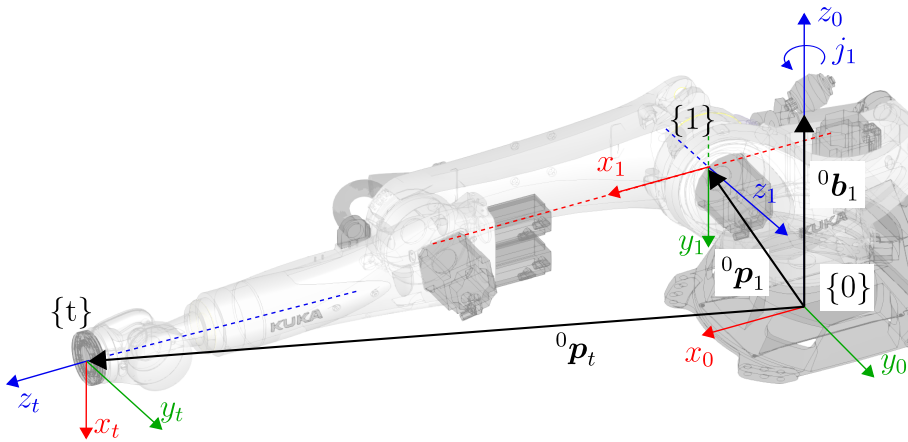
$$\dot{\mathbf{x}}_t = [v_x, v_y, v_z, \omega_\gamma, \omega_\beta, \omega_\alpha]^T. \quad (3.4.5)$$

Dažreiz aprēķinos rotācijas un pozīcijas vērtības maina vietām, sakārtojot vienādojumus rindās (3.4.3). Ja kāda no brīvības pakāpēm neeksistē, tad matricu samazina līdz attiecīgajam rindu skaitam.

Eksistē divu veidu Jakobi matricu tipi: **analītiskā** un **ģeometriskā** jeb parastā Jakobi matrica. Abas metodes sniedz vienu rezultātu lineārā ātruma atrašanai, taču rotācijai rezultāts atšķiras. **Analītiskā Jakobi matrica** dod iespēju atrast leņķa maiņas ātrumu (atvasinājumu no laika) ap kādu brīvi izvēlētu taisni. **Ģeometriskā Jakobi matrica** ļauj atrast fizisku īpašību – rotācijas ātrumu ω ap taisnēm x , y , z , kam ir daudz būtiskāka nozīme praksē.

Ģeometriskā Jakobi matrica

Triviāliem modeļiem, kā, piemēram, divu asu planāram manipulatoram, funkcijas f_i pēc (3.4.4) un tās atvasinājumu var sastādīt analītiski (piemērs dots 3.4.1. nodaļā). Apjomīgākiem un sarežģītākiem modeļiem izmanto ģeometrisku pieeju ar sakarībām no DH konvencijas (skat. 3.2.2. nodaļu).



3.16. attēls. Ģeometriskās Jakobi matricas vektori.

Ģeometriskā Jakobi matrica sastāv no atsevišķi aprēķinātiem vektoriem

$$\mathbf{J} = [\mathbf{J}_1 \dots \mathbf{J}_n], \quad (3.4.6)$$

kur \mathbf{J}_i ir attiecīgās i ass Jakobi vektors un n ir asu skaits. Rotācijas

asīm

$$\mathbf{J}_i = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{b}_i \times ({}^0\mathbf{p}_t - {}^0\mathbf{p}_i) \\ {}^0\mathbf{b}_i \end{pmatrix}, \quad (3.4.7)$$

bet lineārām asīm

$$\mathbf{J}_i = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{b}_i \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad (3.4.8)$$

kur $i = [1, 2, \dots]$. Tiek izmantoti trīs vektori.

- Vektors ${}^0\mathbf{b}_i$ apzīmē robota ass i virzienu bāzes koordinātu sistēmā $\{0\}$. Pēc DH konvencijas koordinātu sistēmā $\{i\}$ rotācijas ass atrodas kolineāri z_i un tiek numurēta ar $i + 1$. ${}^0\mathbf{b}_i$ ir uzdots trešajā kolonnā DH matricā ${}^0_i\mathbf{T}$.
- ${}^0\mathbf{p}_i$ apzīmē vektoru no bāzes koordinātu sistēmas $\{0\}$ sākumpunkta O_0 uz koordinātu sistēmas $\{i\}$ sākumpunktu, un tas ir izteikts $\{0\}$ koordinātās. ${}^0\mathbf{p}_i$ ir uzdots ceturtajā kolonnā DH matricā ${}^0_i\mathbf{T}$.
- ${}^0\mathbf{p}_t$ apzīmē vektoru no bāzes koordinātu sistēmas $\{0\}$ sākumpunkta O_0 uz robota instrumenta galapunktu jeb pēdējo koordinātu sistēmu $\{n\}$ vai $\{t\}$ (instruments), kas arī izteikta $\{0\}$. ${}^0\mathbf{p}_t$ ir uzdots ceturtajā kolonnā DH matricā ${}^0_n\mathbf{T}$.

Šeit izmantotais vektors ${}^0\mathbf{p}_t - {}^0\mathbf{p}_i$ griežas ap ${}^0\mathbf{b}_i$ pie q_i rotācijas. Turpmāk sniegti vairāki aprēķina piemēri.

3.4.1. Analītisks aprēķins 2D robotam

3.5. attēlā apskatītā planārā robota tiešās kinemātikas vienādojumus var pārrakstīt tā, ka to pozīcijas vērtības x un y ir funkcijas no asu leņķiem α un β :

$$\begin{aligned} f_1 = x(\alpha, \beta) &= l_1 \cos \alpha + l_2 \cos(\alpha + \beta) \\ f_2 = y(\alpha, \beta) &= l_1 \sin \alpha + l_2 \sin(\alpha + \beta) \end{aligned} \quad (3.4.9)$$

Planārajam robotam ir divas asis un divas brīvības pakāpes, tāvad Jakobi matricas izmēri ir 2×2 vienības. Sastādot vienādojumu pēc

(3.4.2), iegūst

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} & \frac{\partial x(\alpha, \beta)}{\partial \beta} \\ \frac{\partial y(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} & \frac{\partial y(\alpha, \beta)}{\partial \beta} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d\alpha \\ d\beta \end{bmatrix}, \quad (3.4.10)$$

kur Jakobi matrica satur daļējos atvasinājumus no funkcijām $x(\alpha, \beta)$ un $y(\alpha, \beta)$. Atrisinot atvasinājumu, iegūst

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin(\alpha) - l_2 \sin(\alpha + \beta) & -l_2 \sin(\alpha + \beta) \\ l_1 \cos(\alpha) + l_2 \cos(\alpha + \beta) & l_2 \cos(\alpha + \beta) \end{pmatrix}, \quad (3.4.11)$$

kas ir saistība starp $\dot{\alpha}$ un $\dot{\beta}$ – rotācijas ātrumu un \dot{x} , \dot{y} – pozīciju plaknē. Aprēķinu (3.4.10) var izmantot, ievietojot Jakobi matricā konstantes l_1 un l_2 , momentānās leņķu α , β vērtības un leņķiskā ātruma $\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$ vērtības (*rad* un *rad/s*).

3.4.2. Aprēķinu piemērs *SCARA* robotam

Turpmāk sniegts Jakobi matricas aprēķina piemērs *SCARA* tipa robotam no 3.10. attēla. Robotam ir trīs rotācijas un viena taisnvirziena kustības ass. Sākumā ir jānoskaidro transformācijas matricas no bāzes līdz katrai atsevišķai koordinātu sistēmai:

$$\begin{aligned} & {}^0\mathbf{T}_1; \\ & {}^0\mathbf{T}_2 = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2; \\ & {}^0\mathbf{T}_3 = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3; \\ & {}^0\mathbf{T}_4 = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3 \cdot {}^3\mathbf{T}_4. \end{aligned} \quad (3.4.12)$$

Jakobi matricu sastāda, aprēķinot katru tās vektoru $\mathbf{J}_1, \dots, \mathbf{J}_4$ atsevišķi.

► \mathbf{J}_1 aprēķins

No pirmās transformācijas matricas

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & a_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & a_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4.13)$$

trešās kolonnas pirmajiem trim elementiem iegūst

$${}^0\mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3.4.14)$$

un no ceturtās kolonnas pirmajiem trim elementiem iegūst:

$${}^0\mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} a_1 \cos q_1 \\ a_1 \sin q_1 \\ d_1 \end{bmatrix}. \quad (3.4.15)$$

Pēc (3.4.12) iegūst ${}^0_4\mathbf{T}$, kur ceturtā kolonna ir

$${}^0\mathbf{p}_t = \begin{pmatrix} a_1 \cos q_1 + a_2 \cos q_1 \cos q_2 - a_2 \sin q_1 \sin q_2 \\ a_1 \sin q_1 + a_2 \cos q_1 \sin q_2 + a_2 \cos q_2 \sin q_1 \\ d_1 + d_2 - d_3 - d_4 \end{pmatrix}. \quad (3.4.16)$$

Jakobi matricas pirmais vektors aprēķināms pēc (3.4.7):

$$\mathbf{J}_1 = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{b}_1 \times ({}^0\mathbf{p}_t - {}^0\mathbf{p}_1) \\ {}^0\mathbf{b}_1 \end{pmatrix} \quad (3.4.17)$$

$$= \begin{bmatrix} -a_1 \sin q_1 - a_2 \cos q_1 \sin q_2 - a_2 \cos q_2 \sin q_1 \\ a_1 \cos q_1 + a_2 \cos q_1 \cos q_2 - a_2 \sin q_1 \sin q_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

► J_2 aprēķins

No transformāciju matricu reizinājuma ${}^0_2\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} \cdot {}^1_2\mathbf{T}$ iegūst

$${}^0\mathbf{b}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{un} \quad {}^0\mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} a_1 \cos q_1 \\ a_1 \sin q_1 \\ d_1 \end{bmatrix}. \quad (3.4.18)$$

Vektors uz instrumenta darba punktu paliek nemainīgs ${}^0\mathbf{p}_t$ un ir vienāds ar (3.4.16). Jakobi matricas otrās kolonnas vektors aprēķināms:

$$\mathbf{J}_2 = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{b}_2 \times ({}^0\mathbf{p}_t - {}^0\mathbf{p}_2) \\ {}^0\mathbf{b}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -a_2 \cos q_1 \sin q_2 - a_2 \cos q_2 \sin q_1 \\ a_2 \cos q_1 \cos q_2 - a_2 \sin q_1 \sin q_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4.19)$$

► J_3 aprēķins

Trešā ass j_3 ir paralēla abām iepriekšējām, taču norāda pretējā virzienā, tātad z ir vērstas pretējā virzienā un ir ar mīnusa zīmi

$${}^0\mathbf{b}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T, \quad (3.4.20)$$

kas sakrīt ar ${}^0_3\mathbf{T}$ trešo kolonnu. Koordinātu sistēma $\{2\}$ no instrumenta koordinātu sistēmas $\{4\}$ jeb $\{t\}$ ir nobīdīta lineāri tikai par d_3 un d_4 :

$${}^0\mathbf{p}_t - {}^0\mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -(d_3 + d_4) \end{bmatrix}. \quad (3.4.21)$$

Ievietojot (3.4.20) un (3.4.21) Jakobi vektora aprēķinā, iegūst

$$\mathbf{J}_3 = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{b}_3 \times ({}^0\mathbf{p}_t - {}^0\mathbf{p}_3) \\ {}^0\mathbf{b}_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -(d_3 + d_4) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4.22)$$

► \mathbf{J}_4 aprēķins

Pēdējā lineārā ass j_4 vērsta tajā pašā virzienā, kurā j_3 , tādēļ vektors ${}^0\mathbf{b}_4$ ir vienāds ar ${}^0\mathbf{b}_3$:

$${}^0\mathbf{b}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^T, \quad (3.4.23)$$

bet ${}^0\mathbf{p}_4$ nav nepieciešams, jo taisnvirziena kustības ass aprēķinā (3.4.8) tas neparādās. Jakobi matricas ceturtnā kolonna vienkāršojas uz

$$\mathbf{J}_4 = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{b}_4 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (3.4.24)$$

► \mathbf{J} aprēķins

Visas aprēķinātās kolonnas ievieto kopējā Jakobi matricā

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \quad (3.4.25)$$

$$= \begin{pmatrix} -a_1 s q_1 - a_2 c q_1 s q_2 - a_2 c q_2 s q_1 & -a_2 c q_1 s q_2 - a_2 c q_2 s q_1 & 0 & 0 \\ a_1 c q_1 + a_2 c q_1 c q_2 - a_2 s q_1 s q_2 & a_2 c q_1 c q_2 - a_2 s q_1 s q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix},$$

kur izmantoti saīsinājumi $c = \cos$ un $s = \sin$. Redzams, ka \mathbf{J} pirmās divas rindas atkarīgas tikai no q_1 un q_2 , kas nosaka pozīciju xy plaknē. Neviena cita ass pozīciju xy plaknē ietekmēt nevar. Savukārt trešā rinda iekļauj tikai vienu skaitli -1 , kas atrodas pēdējā kolonnā. Tas nozīmē, ka kustības ātrums z virzienā ir tieši proporcionāls lineārajai asij j_4 , taču vērsts pretējā virzienā. Neviena cita ass, kā tikai j_4 , vertikālo kustību ietekmēt nevar.

4. un 5. rindā atrodas tikai nulles, kas nozīmē, ka neeksistē rotācijas ω_γ un ω_β , attiecīgi ap asīm x_0 un y_0 . Sestā rinda ar vektoru $[1 \ 1 \ -1 \ 0]$ norāda, ka rotācija ω_α ap z_0 ir tieši proporcionāla \dot{q}_1 un \dot{q}_2 , bet apgriezti proporcionāla \dot{q}_3 . To var secināt arī no 3.10. attēlā redzamā *SCARA* robota noteiktajiem pozitīvajiem asu griešanās virzieniem. Savukārt ceturtnā ass, rotāciju neietekmē, jo tā ir lineāra.

Uzdodot šajā asu pozīcijā asu rotācijas ātrumu $\dot{\mathbf{q}}$, ar vienādojumu (3.4.1) atrod robota pēdējās koordinātu sistēmas n sākumpunkta ātrumu $\dot{\mathbf{p}}_t$. Lineārais ātrums m/s ir vektora $\dot{\mathbf{p}}_t$ pirmie trīs elementi, bet rotācija $-rad/s$ vektora pēdējie trīs elementi.

3.4.3. Aprēķinu piemērs sešu asu robotam

Instrumenta darba punkta lineārais un rotācijas ātrums dots 3.12. attēlā redzamajam *KUKA Quantec* robotam. Manipulators atrodas stāvoklī $\mathbf{q}_0 = [0 \ 0 \ -\pi/2 \ 0 \ 0 \ \pi]^T$. Jakobi matrica ir funkcija no asu momentānā stāvokļa, tādēļ skaitliskās vērtības piemērā uzdotas \mathbf{q}_0 .

Visupirms pēc (3.4.7) sastāda katru Jakobi matricas vektoru. No robota pirmās transformācijas matricas

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos(q_1) & \cos(\alpha_1) \sin(q_1) & -\sin(\alpha_1) \sin(q_1) & a_1 \cos(q_1) \\ -\sin(q_1) & \cos(\alpha_1) \cos(q_1) & -\cos(q_1) \sin(\alpha_1) & -a_1 \sin(q_1) \\ 0 & \sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4.26)$$

trešās un ceturtās kolonnas iegūst

$${}^0\mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha_1) \sin(q_1) \\ -\cos(q_1) \sin(\alpha_1) \\ \cos(\alpha_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.4.27)$$

$${}^0\mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} a_1 \cos(q_1) \\ -a_1 \sin(q_1) \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.4.28)$$

Pilnās transformācijas matricas ceturtā kolonna ir vektors ${}^0\mathbf{p}_t$, kura skaitliskā vērtība ir

$${}^0\mathbf{p}_t = \begin{bmatrix} 2,940 \\ 0 \\ 0,634 \end{bmatrix}, \quad (3.4.29)$$

kas izvērstā formā, iekļaujot visus mainīgos, ir pārāk apjomīgs, lai ietilptu tekstā. Tā kā pirmā ass ir rotācijas ass, izmanto (3.4.7) un

$$\mathbf{J}_1 = \begin{pmatrix} {}^0\mathbf{b}_1 \times ({}^0\mathbf{p}_t - {}^0\mathbf{p}_1) \\ {}^0\mathbf{b}_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 - 2,940 \\ 0 - 0 \\ 0 - 0,634 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2,94 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4.30)$$

Līdzīgā veidā iegūst $\mathbf{J}_2, \dots, \mathbf{J}_6$, kur tikai ${}^0\mathbf{p}_t$ paliek nemainīgs. Rezultātā iegūst Jakobi matricu \mathbf{J} , kas sastāv no sešām kolonnām:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 & \mathbf{J}_5 & \mathbf{J}_6 \end{bmatrix}, \quad (3.4.31)$$

kur \mathbf{q} visu asu momentānais stāvoklis. Matricu lieto lineārā un rotācijas ātruma aprēķināšanai ar (3.4.1).

Zināšanu paškontrolē

1. Nosaukt koordinātu sistēmas transformācijas veidus!
2. Kas ir *pilna rotācija* un kas ir *vienkārša rotācijas matrica*?
3. Noteikt trīs leņķus un trīs distances un veikt pilnu transformāciju, izmantojot Eilera-ZYX konvenciju kādam brīvi izvēlētam priekšmetam telpā!
4. Noskaidrot, kura rotācijas konvencija lietota tev pieejamā robota manipulatora vadības sistēmā!
5. Skaidrot *tiešās* un *inversās kinemātikas* lietojumu robotikā!
6. Cik neatkarīgu parametru nepieciešams četrus asus manipulatora DH matricas sastādīšanai?
7. Kādi robotu manipulatoru parametri ir jāzina, lai aprēķinātu inverso kinemātiku?
8. Skaidrot Jakobi matricas lietojumu robotikā!

4. | ROBOTU VADĪBA

Kustību plānošanas un izpildes kontroles metodes pēc būtības ir kopīgas visiem industriālo robotu manipulatoriem, tādēļ tās var analizēt vispārināti, izmantojot vienkāršotus piemērus. 4.1. nodaļā apskatīti kustību plānošanas paņēmieni, savukārt konkrēti kustību izpildes tipi robotikā skaidroti 4.2. nodaļā. Kustību profilu aprēķinu metožu piemēri doti 4.3. nodaļā. Visbeidzot, robotikā tipiskās kinemātiskās problēmas, tādas kā asu konfigurācijas nenoteiktība, precizitāte, atkārtojamība, un kalibrācijas metodes skaidrotas 4.4. nodaļā.

4.1. Kustību plānošana

Robota kustības plānošana un izpildes kontrole ir sarežģīti uzdevumi, kurā iesaistīti teju visi galvenie robota sistēmas komponenti. Kas ir kustību problēma? Tālāk sniegts ieskats dažāda tipa kustību problēmu klasifikācijā. 4.1.2. un 4.1.3. nodaļā apskatīta robota programmas tipiska uzbūve un izpildes kontroles paņēmieni.

4.1.1. Kustību plānošanas problēmu klasifikācija

Vērtējot pēc **stāvokļu maiņas**, kustību plānošanas tipi ir šādi:

- asu pozīcijas maiņa;
- instrumenta darba punkta atrašanās vietas maiņa;
- sensoru stāvokļa maiņa;
- kāda ārēja objekta vai šķēršļa pozīcijas maiņa.

Kustību plānošanu var veikt visam **darba uzdevumam** (programmai) vai individuālai **kustību komandai**. Kustību plānošanas problēmu izšķir pēc apjoma, un to var iedalīt gan **globālā**, gan **lokālā** problēmā. Globālā kustību plānošanas problēma ietver individuālo kustību secību un to izpildes nosacījumus. Vairāku robotu gadījumā globālo un lokālo plānošanas paņēmieni izmanto attiecīgi robotu kopumam un individuālam robotam.



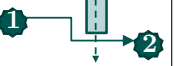


Kustību plānošanas paņēmieni atšķiras arī **pēc robotizētas iekārtas tipa**:

- kustības plānošana robotu manipulatoriem – instrumenta trajektorijas noteiktā trīsdimensiju darba telpā;
- mobiliem robotiem – ceļa plānošana salīdzinoši plašā darba vidē, taču parasti plaknē;
- citām automatizētām iekārtām.

Kustību plānošanas problēmu **pēc sarežģītības** var izšķirt, ņemot vērā nezināmo skaitu un problēmas tipu, kā ilustrēts 4.1. tabulā. Vienkāršākajā gadījumā kustības plānošanā visi apstākļi ir zināmi, piemēram, instrumenta sākuma un beigu punkts, šķēršļi, ja tādi ir, nereti arī dotais laiks. Industriālajā automatizācijā parasti sastop A kategorijas problēmas, kur robota darba vide ir pilnībā zināma. Ja ir neparedzēti šķēršļi robota darba telpā un kustības ceļā, notiks sadursme. Tādēļ, pielāgojot un mainot ražošanas telpu, ir jāpārlicinās par robotu programmām simulatīvi vai reālajā vidē.

Ja vides modelis zināms tikai daļēji, tad kustību vadības sistēmai jāspēj noteikt iespējamās šķēršļus un plānot ceļu tā, lai nenotiktu sadursme. Praksē tas nozīmē, ka robots ir aprīkots ar sensoriem, piemēram, distances sensoriem vai fotokameru un attēlu apstrādes sistēmu, kas rezultātu paziņo robota vadības sistēmai. Vadības sistēma no paša sākuma var izplānot ceļu bez sadursmēm. Kā B kategorijas problēmas piemēru var minēt detaļu paņemšanu no kastes (skat. 4.1. att.). Kastes izmēri var būt zināmi jau iepriekš, taču detaļu skaits tajā ir mainīgs, un tās atrodas jauktā kārtībā. Ceļu izplāno pēc detaļu kastes fotoattēla un attēlu apstrādes programmas rezultāta, kas kā uzdotās

4.1. tabula. Kustību plānošanas problēmas tipi

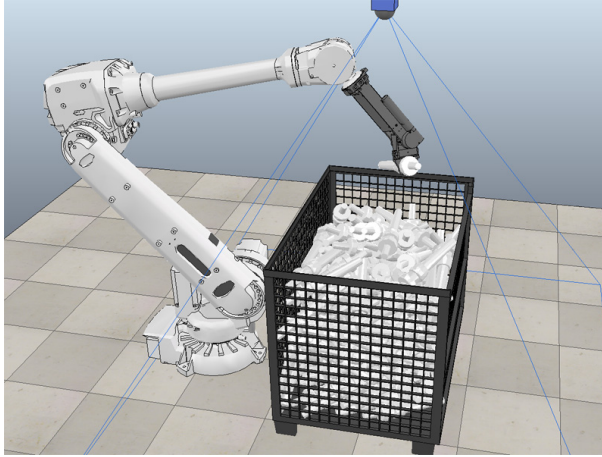
| | A | B | C | D | E |
|----------|---|---|---|---|--|
| Zināms |  |  |  |  |  |
| Atrasts | Ceļu no sākuma līdz beigu punktam | | | | Ceļu no sākuma punkta līdz kustīgam mērķim |
| Problēma | Noteikta un vienkārša | Sadursmes ar nezināmiem objektiem | Sadursmes ar šķēršļiem laikā un telpā | Kartogrāfija | Mērķis laikā un telpā mainīgs |

koordinātas tiek paziņotas robota manipulatoram.

C kategorijas kustību problēma apraksta laikā mainīgu vidi jeb kustīgus šķēršļus. Šajā gadījumā statisks momentuzņēmums kā fotogrāfija ir nepilnīgs, tā vietā dati jāuzņem un jāapstrādā nepārtraukti. Ja vienā darba telpā strādā robots un cilvēks, šāda sistēma ir nepieciešama, lai apstādinātu robotu, kad cilvēks atrodas tā darba ceļā. Šeit visbiežāk izmanto kapacitatīvos sensorus, kurus izvieto uz robota korpusa virsmas.

Mobilie roboti visbiežāk veic kartogrāfijas uzdevumu, patstāvīgi skenējot savu telpu, kurā tie strādā. Darba sākumā telpa tiem ir pilnībā sveša, kas atbilst D kategorijas problēmai. E kategorijas problēmu raksturo telpā mainīgs mērķis, kā arī mainīgs vides modelis. Industrijā sastopamas robotu aplikācijas, kurās statiski montēts robota manipulators seko darba objektam uz lineāri plūstošas ražošanas līnijas.

Kustību plānošanu var iedalīt arī **pēc rezultāta pilnības** [48]. **Precīzie** algoritmi atrod risinājumu vai arī pierāda, ka risinājums nav



4.1. attēls. Detaļu paņemšana no kastes *Bin picking* – virtuālais modelis algoritma trenēšanai (B kategorijas problēma) [47].

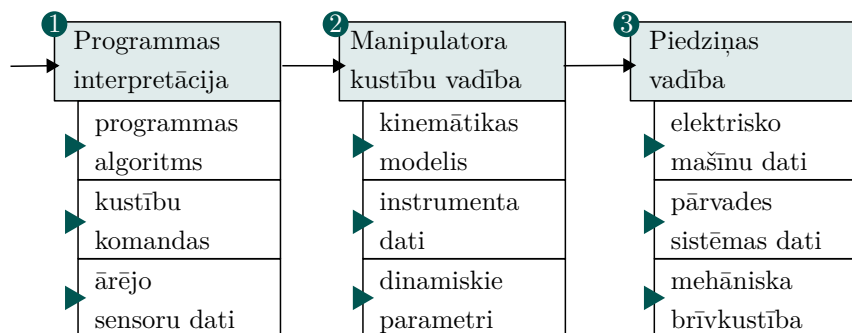
iespējams. **Heiristiski** algoritmi atrod risinājumu pēc iespējas īsā laikā, taču tas var nebūt labākais risinājums.

4.1.2. Programmas uzbūve un izpildes kontrole

Darba uzdevums ir noteikts robota programmā, un to uzdod teksta datnes veidā robota vadības panelī. Darba programma sastāv no programmas algoritma, kustību komandām un datu komunikāciju ar citām ierīcēm. Programmas algoritms ietver kustību komandu izpildes secību un saistību ar signālu datiem. Piemēram, ārējs signāls dod atļauju kādai noteiktai kustību komandai, taču līdz šī signāla saņemšanai, kustība netiek veikta.

Eksistē vairākas programmas ievades metodes (skat. 2.3.2. nodaļu), taču neatkarīgi no tās galarezultātā vadības sistēmā tiek saglabāta robota ražotājam specifiska darba programma.

4.2. attēlā doti galvenie algoritma vadības bloki. Izpildi uzsāk operators vadības panelī lokāli vai attālināti automātiskā režīmā (skat. 2.3.3. nodaļu). Pirmajā solī vadības sistēma interpretē uzdoto algoritmu. Kā ieejas datus izmanto darba programmu un kustību komandas. Programmas secība var mainīties dinamiski atkarībā no ārējo signālu vērtībām, tādēļ programmas interpretācija noris nepārtraukti.



4.2. attēls. Vadības sistēmas izpildes bloki.

Otrajā solī noris uzdoto kustību reāllaika vadība un izpildes kontrole. Šeit kā galvenie ieejas dati kalpo konkrētais kinemātikas modelis, izmantotā instrumenta dati un papildu slodzes uz manipulatora korpusa. Paša programmas algoritms un arī kustību komandas nav piesaistītas kādam konkrētam robota tipam. Tās iespējams pārnest no viena robota uz citu. Kinemātikas modelis un manipulatora piedziņas sistēmas parametri nosaka, vai programmu fiziski iespējams izpildīt ar konkrēto manipulatoru.

Trešais solis noris elektriskās piedziņas vadības līmenī, kuras uzdevums ir sasniegt uzdoto robota ass momentāno griešanās vērtību. Tiek regulēts elektriskās mašīnas rotācijas ātrums un paātrinājums, ņemot vērā konkrētās robota ass pārvades sistēmu, mehāniskās brīvkustības un elektriskos parametrus. Kā atgriezenisko saiti vadībai izmanto elektriskās mašīnas vārpstas pozīciju.

Programmā viena vai vairākas kustību komandas veido vienu kustību bloku. Kustību bloku veido **trajektorija** jeb ceļš un **kustību profils**, kas iekļauj turpmāk uzskaitītos parametrus.

► Trajektorija:

- sākuma un beigu punkts;
- papildpunkti, ja nepieciešams;

- kustību tips;
- papildinformācija kustību pārejai.

► **Kustību profils:**

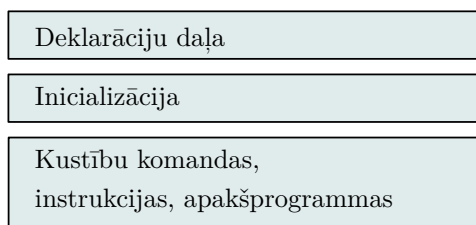
- kustības ātrums (instrumenta galapunkta vai asu rotācija);
- paātrinājums;
- papildinformācija par kustības apturēšanu;
- papildinformācija signālu nodošanai perifērijas iekārtām kustības laikā.

Katrai kustību komandai parametrus nodod ar šīs komandas konfigurāciju. Kustības ātrums programmā ir uzdots, ko vadības sistēma nepārsniedz. Katrai robota kustību komandai ir noteikti visi minētie parametri.

4.2. tabula. Izvēlētu robotu ražotāju izmantotās programmēšanas valodas

| Ražotājs | Valoda |
|------------------------|-----------------|
| <i>KUKA</i> | <i>KRL</i> |
| <i>ABB</i> | <i>RAPID</i> |
| <i>Fanuc</i> | <i>Karel</i> |
| <i>Yaskawa</i> | <i>Inform</i> |
| <i>Comau</i> | <i>PDL2</i> |
| <i>Univeral Robots</i> | <i>URScript</i> |
| <i>Kawasaki</i> | <i>AS</i> |

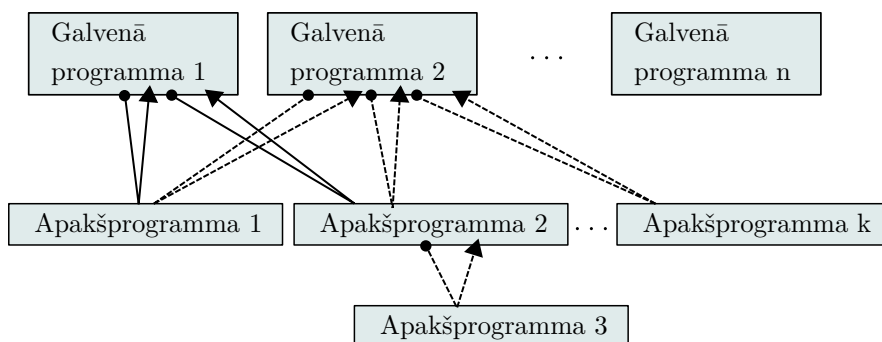
Programmas struktūra ir kopīga dažādām programmēšanas valodām, kuras ir uzskaitītas 4.2. tabulā. Kā ilustrēts 4.3. attēlā, programma sākas ar deklarāciju daļu, kurā uzdoti programmas mainīgie. Šie mainīgie jāuzdod ar noteiktu sākuma vērtību, jo noklusētās vērtības robotu programmēšanas valodās neizmanto, lai to vērtības netiktu interpretētas kļūdaini. Mainīgajiem, piemēram, pozīcijas mainīgajam x , pirms to izmantošanas ir jāpiešķir noteikta vērtība, pretējā gadījumā tiek ziņots par kļūdainu programmas saturu.



4.3. attēls. Programmas struktūra.

Trešais satura bloks ir programmas kods, kas sastāv no kustību komandām (skat. 4.2. nodaļu), programmas vadības komandām, loģiskajiem operatoriem, matemātiskām, trigonometriskām un binārajām operācijām. Programmas vadības komandas ietver:

- *if...then...else...endif* – nosacījuma operators;
- *switch...case...endswitch* – vairāku izvēļu nosacījums;
- *repeat...until* – cikls līdz nosacījumam;
- *while...endwhile* – cikls, kamēr atbilst nosacījums;
- *for...endfor* – cikls ar noteiktu skaitu;
- *loop...endloop* – nenoteikts cikls;
- *wait for...* – programmas pauze līdz nosacījumam;
- *wait sec* – programmas pauze ar noteiktu laika sprīdi.



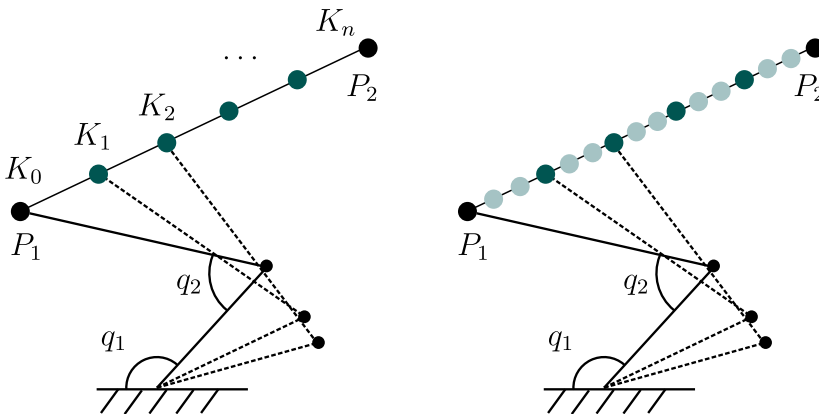
4.4. attēls. Galveno programmu un apakšprogrammu hierarhijas piemērs.

Vienkāršākās programmas struktūra ir ilustrēta 4.3. attēlā. To iespējams izveidot vienas datnes un sekvences ietvaros. Sarežģītos uzde-

vumos izmanto programmēšanas paņēmienu, nosakot noteiktus darba uzdevumus atsevišķi (apakšprogrammās) un apvienojot vairākus šādus uzdevumus kopējā galvenajā programmā. Vairākas galvenās programmas savas izpildes gaitā izsauc vienu vai vairākas apakšprogrammas. Savukārt apakšprogrammas var izsaukt arī citas apakšprogrammas. Šādi operatoram ir iespēja organizēt robotam veicamu darbu kopumu strukturēti, izmantojot iepriekš noteiktus blokus atkārtoti, kas līdzinās vienkāršotai objektorientētai programmēšanai.

4.1.3. Interpolācija

Robota darba programma, kas uzdots kā atsevišķas kustību komandas, telpā veido vienotu kustību kopumu. Lai robota piedziņa spētu veikt uzdoto kustību, ceļu telpā starp uzdotajiem punktiem P_1 un P_2 sadala vienādos posmos (skat. 4.5. (a) att.), atdalot tos ar punktiem K_0, K_1, \dots, K_n , kur $K_0 = P_1$ un $K_n = P_2$, tādējādi veicot **ceļa interpolāciju**. Ja ir uzdots ceļa kustība (piemēram, lineāra), tad katram apakšpunktam veic inverso kinemātiku, iegūstot asu leņķus pozīcijas $\mathbf{q}_{0,k}, \mathbf{q}_{1,k}, \dots, \mathbf{q}_{n,k}$, kur $\mathbf{q}_{i,k} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ jeb katras robota ass leņķis.

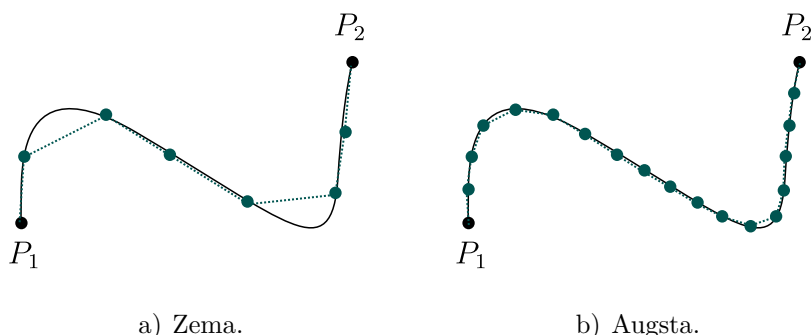


a) Ceļa interpolācija telpā un inversā kinemātika.

b) Detalizētā interpolācija.

4.5. attēls. Ceļa kustības interpolācijas fāzes.

Katra pozīcija $\mathbf{q}_{k,i}$ katrā interpolācijas punktā ir jāpārrēķina elektrisko mašīnu vārpstas pozīcijās. Tā kā manipulatoriem izmanto pārvadi ar augstu pārvades koeficientu, nelielas asu leņķu izmaiņas var nozīmēt vairākus desmitus apgriezienu uz robota ass. Lai kustība nebūtu pārāk strauja un saraustīta, izmanto vēl vienu interpolācijas līmeni – **detalizēto interpolāciju** (skat. 4.5. (b) att.). Aprēķina vairākas motora vārpstas pozīcijas $\mathbf{q}_{m,i} = [q_{m,1}, q_{m,2}, \dots, q_{m,n}]^T$ starp jebkuriem diviem ass interpolācijas punktiem. Tātad sistēma izmanto divus interpolācijas līmeņus – ass un elektriskās mašīnas vārpstas vadības interpolāciju, kuras aprēķina soļa lielums dažādiem ražotājiem atšķiras.



4.6. attēls. Interpolācijas izšķirtspēja.

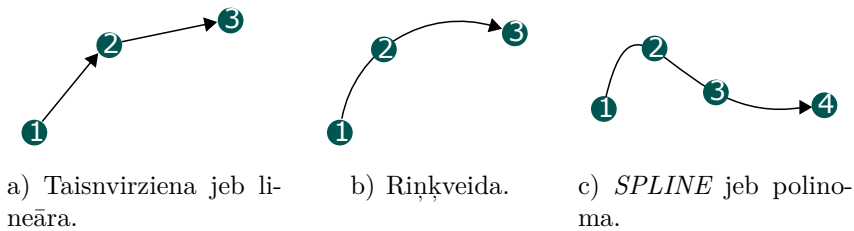
Instrumenta precizitāte jeb spēja izsekot uzdotajam ceļam ir atkarīga no interpolācijas lieluma. 4.6. attēlā dots ilustratīvs piemērs ceļam, kas veido riņķa līniju. Zema interpolācija (= augsta izšķirtspēja) nepieciešama sarežģītas struktūras trajektorijām, lieliem kustības ātrumiem un augstai ceļa kvalitātei. Augstu interpolāciju (= zema izšķirtspēja) var izmantot visām *no-punkta-uz-punktu* kustībām. *PTP* kustībām pilnībā izpaliek inversās kinemātikas aprēķins, ja komanda jau ir uzdots asu leņķos.

4.2. Kustību tipi

Robota manipulatora kopējo kustību veido atsevišķas kustību komandas. Kustību komanda parasti satur informāciju par izpildes ātrumu, paātrinājumu, sasniedzamo punktu un, ja nepieciešams, arī par papildpunktiem. Standarta kustību komandas ir:

- **PTP** – *point to point* jeb *no punkta uz punktu* – instruments tiek pārvietots pa ātrāko iespējamo ceļu no sākuma punkta uz beigu punktu;
- **LIN** – *linear* – instruments telpā tiek pārvietots pa taisni;
- **CIRC** – *circular* – instruments veic apla vai loka kustību;
- **SPLINE** – *polinoma funkcija* – metode neregulāru kustību definīcijai.

Papildus mēdz izšķirt, vai manipulators komandas beigās apstājas, vai plūstoši pāriet nākamajā kustībā. *LIN*, *CIRC* un *SPLINE* kustības pieder pie **ceļa kustību tipa**, jo nosaka ne tikai sākuma un beigu punktu (kā tas ir *PTP*), bet arī visu ceļu darba telpā. 4.7. attēlā parādīti atsevišķo ceļa kustību varianti.



4.7. attēls. Ceļa kustības.

Visas minētās kustības nākamajās apakšnodalās aprakstītas detalizētāk. Piemēros izmantota *KUKA* sistēmas vadības programma. Līdzīga sintakse sastopama arī visplašāk izmantotajiem robotiem.

4.2.1. No punkta uz punktu

PTP kustībā mērķa pozīciju parasti uzdod katrai asij. Mērķa pozīciju uzdod vismaz vienai asij, piemēram, $q_1 = 45^\circ$, un kustības koman-

da ir pilnīga arī tad, ja pārējām asīm vērtība nav noteikta. Kādas ass mērķa pozīciju neminēšana nozīmē, ka ass vērtība nemainās. Pozīciju uzdod telpas koordinātās, norādot x, y, z, A, B un C , ko vadības sistēma pārrēķina asu leņķos ar inverso kinemātiku. Kustību var uzdot arī tiešā veidā asu leņķos q_1, q_2, \dots, q_n .

PTP

PTP – absolūta kustība uz uzdoto pozīciju. Trešā ass tiks pagriezta pozīcijā $A3=45^\circ$:

PTP {A3 45}

Instrumentis tiks pavirzīts uz pozīciju telpā $X = 200 \text{ mm}$:

PTP {X 200}

PTP_REL – relatīva kustība no pašreiz esošās pozīcijas. Trešā ass tiks pagriezta par 45° :

PTP_REL {A3 45}

Instrumentis tiks pavirzīts par $X = 200 \text{ mm}$:

PTP_REL {X 200}

Izšķir **relatīvo** un **absolūto** PTP kustību. Relatīvajā kustībā norāda, par kādu attālumu vai leņķi no pašreizējās pozīcijas notiks kustība. Absolūti uzdota pozīcija norāda mērķa pozīciju neatkarīgi no pašreizējās atrašanās vietas. Ja relatīvo kustību kādu iemeslu dēļ pārtrauc tās izpildes laikā, tad, to atsākot, kustība tiks izpildīta no jauna, t. i., par uzdoto vērtību. Ja pārtrauc absolūto kustību, tad, to atsākot, kustība tiks turpināta no pēdējās pozīcijas.

Parasti papildus ir iespējams iestatīt kustības ātrumu, ko PTP kustībām parasti norāda procentos no maksimāli iespējamā. PTP kustībām absolūts ātrums nav zināms, jo instrumenta ceļš telpā dažādām kustībām ir atšķirīgs.

4.2.2. Taisnvirziena kustība

Taisnvirziena jeb lineārās kustībās visas asis tiek vadītas tā, lai instrumenta darba punkts virzītos pa taisni. Kustību uzdod, norādot mērķa punktu. Līniju nosaka starp kustības sākuma un mērķa punktiem. Lineārās kustības izmanto konkrētos darba uzdevumos ar

noteiktu ātrumu vai arī lai novērstu sadursmes ar šķēršļiem. Sākuma pozīcijā robota vadības sistēmai jābūt viennozīmīgā pozīcijā, t. i., inversajai kinemātikai jābūt atrisinātai.

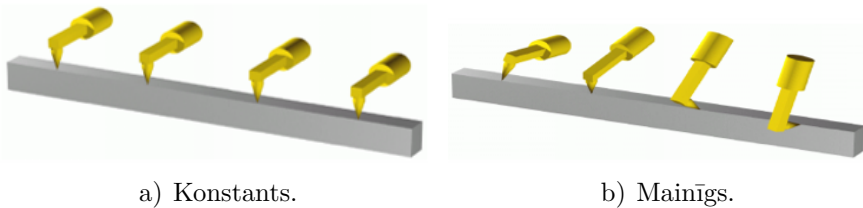
LIN

LIN – absolūta kustība uz uzdoto pozīciju telpā. Instruments tiks virzīts **uz** pozīciju $x = 20$:

```
LIN {X 20}
```

LIN_REL – relatīva kustība telpā no pašreizējās pozīcijas. Instruments tiks pavirzīts **pa** $x = 20$:

```
LIN_REL {X 20}
```



a) Konstants.

b) Mainīgs.

4.8. attēls. Instrumenta virziens ceļa kustībā.

Taisnvirziena kustībām, tāpat kā citām ceļa kustībām, var noteikt, vai kustības izpildes laikā saglabājas nemainīgs instrumenta virziens telpā. 4.8. (b) attēlā ilustrēts konstanta un mainīga instrumenta virziena piemērs.

Instrumenta virziens

ORI_TYPE – sistēmas mainīgais instrumenta virziena noteikšanai kustības laikā. Nemainīgs virziens:

```
$ORI_TYPE=#CONSTANT
```

Mainīgs instrumenta virziens:

```
$ORI_TYPE=#VAR
```

4.2.3. Kustība pa riņķa līniju vai loku

Cirkulāras jeb riņķveida kustības pārvieto instrumentu pa loku, kuram noteikti vismaz divi papildpunkti. Ģeometriski caur jebkuriem

trim punktiem var novilkt riņķa līniju, ja tie neatrodas uz vienas taisnes. Trešo punktu atsevišķi nenosaka, jo tas ir manipulatora atrašanās punkts kustības sākumā. Riņķveida kustībai ne vienmēr jābūt pilnam aplim. Tas var būt arī loka lielums, kura leņķi uzdod kā papildu maiņīgo.

CIRC

CIRC – riņķveida kustība telpā no aktuālās pozīcijas uz mērķa pozīciju. Ja pašreizējā pozīcija ir $x=-20, y=0$, tad tiks izveidota riņķa līnija ar loka lielumu 180° :

CIRC {X 0, Y 20}, {X 20, Y 0}

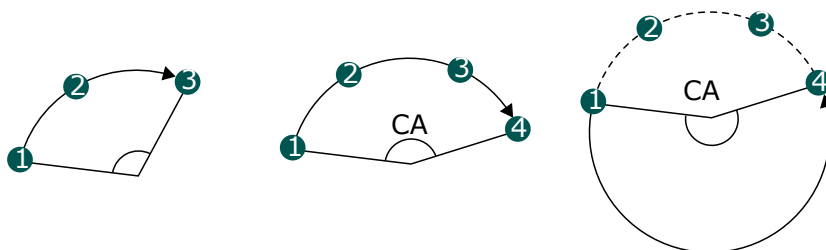
CIRC ar opciju CA (circular angle) – ja pašreizējā pozīcija ir $x=-20, y=0$, tad tiks izveidota riņķa līnija ar loka lielumu 90° :

CIRC {X 0, Y 20}, {X 20, Y 0}, CA 90

Pilns aplis nosakāms ar $CA=360$. Negatīvam virzienam norāda mīnusa zīmi:

CA=-90

4.9. attēlā parādīta atšķirība starp pozitīvu un negatīvu kustības virzienu. Ja nav norādīts leņķis, ceļš tiek plānots caur pirmo un otro papildpunktu. Ja leņķis ir norādīts, tad ne vienmēr abiem noteiktajiem papildpunktiem pieskarsies darba instruments, kā redzams 4.9. (c) attēlā. Līdzīgi kā citām komandām, arī cirkulāru komandu iespējams noteikt kā relatīvu kustību, ko praksē gan lieto reti.



a) Sasniegtais punkts ir tālākais papildpunkts.

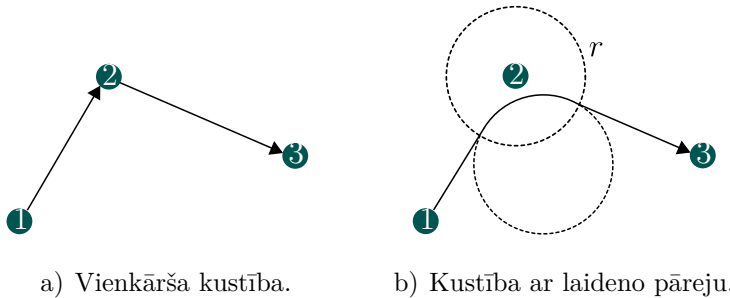
b) Pozitīva kustība ar norādi $CA = 160^\circ$.

c) Negatīva kustība ar norādi $CA = -160^\circ$.

4.9. attēls. Riņķveida kustību definīcija, 1 – sākuma punkts, 2 – papildpunkts, 3 – tālākais papildpunkts, 4 – sasniegtais punkts.

4.2.4. Laidenā punktu pāreja

Būtiska kustību īpašība ir norāde, vai manipulatoram katrā kustību komandas mērķa punktā noteikti jāapstājas, vai arī tas drīkst laideni pāriet nākamajā kustībā. Ja atsevišķu kustību papildus nosaka ar *fly-by* opciju (angļu val. *fly-by* – palidot garām), kas pieejama visiem izplatītākajiem robotu ražotājiem. Komandu kopējā kustība ir laidena, un vizuāli ir grūti atšķirt katru atsevišķo kustību posmu. Praksē šo iespēju izmanto bieži, jo tā saīsina kopējo darba izpildes laiku un samazina mehānisko nolietojumu, jo atsevišķas asis ir retāk jābremzē un jāpaātrina.



4.10. attēls. Kustību salīdzinājums.

4.10. (a) un 4.10. (b) attēlā salīdzinātas kustības ar laideno pāreju starp divām kustībām un bez tās. Nosaka virtuālu lodi ar centru punktā, kurš uzdots ar laideno pāreju. Darba instruments (*TCP*) šķērso lodes sfēru divos punktos, to sasniedzot un atstājot, lai turpinātu kustību uz nākamo punktu. Abi papildpunkti uz lodes sfēras tiktu sasniegti arī tad, ja laidenā punktu pāreja nebūtu uzdots. Laidenā pāreja kā papildu opcija pieejama visām kustību komandām. *LIN*, *CIRC* un *SPLINE* kustībām tā ir plaknē, taču *PTP* tā var būt arī neregulāra.

4.2.5. *SPLINE* funkcija

Nepārtraukta instrumenta kustība iespējama ar iepriekš minētajām līnijveida, *no-punkta-uz-punktu* vai riņķveida kustībām, starp tām izmantojot laideno punktu pāreju. Taču, lai realizētu sarežģītus nere-

Laidenā punktu pāreja

Laidenā punktu pāreja iespējama ne tikai pēc ģeometriskas lodes definīcijas, bet arī pēc citiem kritērijiem, piemēram, sasniedzot minimālo ātrumu vai instrumenta virzienu. *KUKA* vadības sistēmās šim mērķim izmanto trīs mainīgos:

APO.CDIS – distance ar tipu *REAL*, atļauts atstāt standarta trajektoriju, kad distance līdz laidenajam punktam mazāka par šo vērtību;

APO.CVEL – ātruma kritērijs, atļauts atstāt standarta trajektoriju, kad ir sasniegts programmētais ātrums;

APO.CORI – virziena maiņas distance ar tipu *REAL*, atļauts atstāt standarta trajektoriju, kad dominējošās ass leņķis instrumenta virziena maiņai līdz mērķa punktam mazāks nekā šī vērtība.

Laideno punktu pāreju uzdod ar papildopciju *C_DIS*, mainīgajiem piešķir vērtību pirms kustību komandas.

APO.CDIS=20

LIN {X 1200, Y 100, Z 800, A 12.1, B 56.0, C 110.1} *C_DIS*

gulāras, ģeometriskas formas ceļus, izmantojot šīs komandas, ceļa apraksts var būt neprecīzs. Turklāt, programmas apraksts ir apjomīgs, jo sastāv no daudz īsām kustībām. Polinoma funkcija jeb *SPLINE* funkcija šajā gadījumā sniedz priekšrocības, jo, apvienojot vairākus noteiktus punktus (ceļa segmentus), veido vienotu kustību bloku.

Trajektoriju aprēķina, izmantojot *B-spline* funkciju caur visiem kustību bloka punktiem. Kustību kontrolēti virza caur šiem punktiem, kas ir vēl viena būtiska atšķirība no laidenās punktu pārejas metodes, kur noteikti punkti sasniegti netiek. Turklāt ceļš *SPLINE* blokā nav atkarīgs no kustību ātruma vai paātrinājuma iestatījumiem. Citas priekšrocības ietver:

- ātrāku taisnvirziena vai riņķveida kustību izpildi *SPLINE* bloka ietvaros;
- mazāk pārslodzes gadījumu;
- precīzāku ceļa izpildi;
- precīzāku uzdota kustības ātruma izpildi;
- plašāku funkcionalitāti *SPLINE* bloka ietvaros (nosacījuma kustības apturēšana, kustība pretējā virzienā, ceļa bloki ar noteiktu ātrumu).

SPLINE

Kustības bloku *KUKA* vadības sistēmā iekļauj segvārdos ***SPLINE*** un ***ENDSPLINE***. Pirms *SPLINE* bloka obligāti nepieciešama vismaz viena parasta kustību komanda, no kuras sāk aprēķināt *SPLINE* bloku. *SPLINE* blokā izmanto atslēgvārdus ***SPL***, ***SLIN*** un ***SCIRC***, kas ir ekvivalenti parastajām *PTP*, *LIN* un *CIRC* kustībām.

4.11. (a) attēlā dota programma

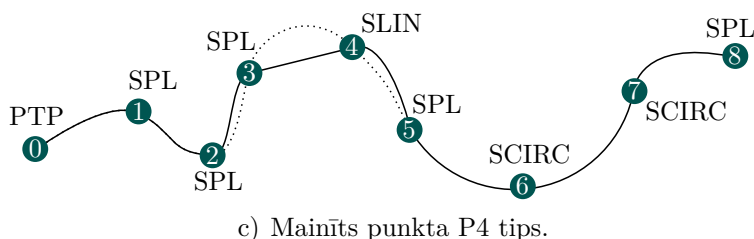
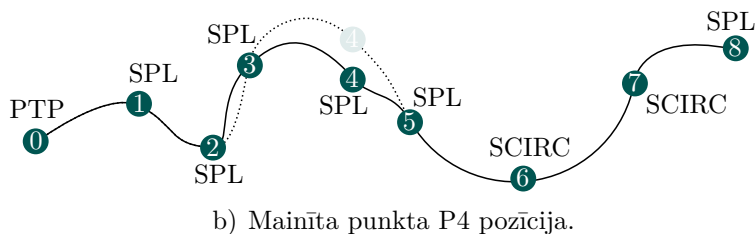
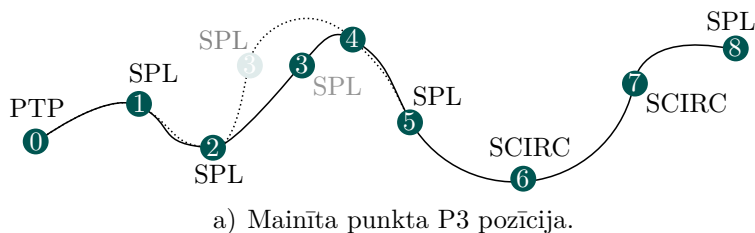
```
PTP P0
SPLINE
    SPL P1
    SPL P2
    SPL P3
    SPL P4
    SPL P5
    SCIRC P6, P7
    SPL P7
ENDSPLINE
```

To sasniedz, jo visu kustību bloku aprēķina, modelējot pirms kustību izpildes, un plānošanā ietver robota manipulatora fiziskās robežas. Parastajās kustību komandās fiziskās robežas ņem vērā tikai kustību izpildes laikā, nevis plānošanas laikā, kas nereti noved pie neparedzētas kustības apturēšanas pārslodzes dēļ [49].

4.11. attēlā pēc [49] parauga sniegti dažādi piemēri trajektorijas izmaiņām, ja tiek mainīta kāda punkta pozīcija telpā. Ja tiek mainīts punkts P3 (skat. 4.11. (a) att.), tad mainās trajektorija četros segmentos P1-P2, P2-P3, P3-P4, P4-P5 jeb divos segmentos pirms punkta un divos pēc tā. Parasti nelielas punkta pozīcijas izmaiņas izraisa nelielas ceļa izmaiņas. Taču, ja divi blakus esošie segmenti ir būtiski atšķirīgi pēc lieluma, izmaiņas var būt ļoti lielas.

Tālāk 4.11. (b) attēlā tiek mainīta punkta P4 pozīcija. Šajā gadījumā mainās tikai trīs segmenti P2-P3, P3-P4, P4-P5, jo segments P5-P6 pieder pie riņķveida kustību komandas *SPLINE* bloka ietvaros. Šajā gadījumā tika mainīti divi segmenti pirms punkta un viens segments pēc tā. Segmentus, kas noteikti kā lineāri vai riņķveida, nemaina.

Piemērā 4.11. (c) attēlā ir mainīts punkta P4 tips, nosakot seg-



4.11. attēls. Trajektorijas definīcija ar *SPLINE* kustības komandu, piemērs atvasināts no [49].

mentu P3-P4 kā taisnvirziena kustību. Šajā gadījumā mainīti ir divi segmenti – pirms un pēc taisnvirziena kustības.

Gan *SPLINE* bloka ietvaros, gan tā sākumā un beigās iespējams papildus izmantot laideno punktu pāreju, kā to identiski nosaka arī vienkāršām kustību komandām pēc apraksta 4.2.4. nodaļā.

4.3. Kustību profilu aprēķina metodes

Atsevišķa kustību komanda ir lokāls kustību problēmas risinājums. Nereti uzdota ir tikai jaunā asu pozīcija (vai jaunā instrumenta atrašanās vieta telpā), jo parasti esošā atrašanās pozīcija ir zināma. Vispār-

rīgā gadījumā kustību plānošanai nepieciešamā informācija par katru atsevišķu asi ietver

$$\begin{aligned}
 q_{i,0} & \text{ – sākuma pozīcija,} \\
 q_{i,f} & \text{ – beigu pozīcija,} \\
 \dot{q}_{i,0} & \text{ – sākuma rotācijas ātrums,} \\
 \dot{q}_{i,f} & \text{ – beigu rotācijas ātrums.}
 \end{aligned}
 \tag{4.3.1}$$

Kustību arī ierobežo, izmantojot iepriekš zināmas konstantes, kas ietver attiecīgi katras ass rotācijas ātruma, paātrinājuma un tā atvasinājuma maksimālās vērtības:

$$\begin{aligned}
 |\dot{q}_i(t)| & \leq \dot{q}_{i,max}, \\
 |\ddot{q}_i(t)| & \leq \ddot{q}_{i,max}, \\
 |\dot{\ddot{q}}_i(t)| & \leq \dot{\ddot{q}}_{i,max}.
 \end{aligned}
 \tag{4.3.2}$$

Pilnīgāki algoritmi iekļauj arī dinamisko konstanti

$$|\tau_i(t)| \leq \tau_{i,max}, \tag{4.3.3}$$

kas uzskatāmības dēļ turpmāk netiks lietota.

Robota manipulatora ass kustībai izmanto dažādas aprēķina metodes, kas veido noteiktu kustības profilu. Pazīstamākas metodes ir:

- **minimālā laika** (maksimālā paātrinājuma) metode,
- **sinusa funkcijas** kustību profils,
- **trešās, piektās un septītās pakāpes polinoma** funkcijas,
- **trapeces jeb septiņu segmentu tipa** profils.

Uzskatāmības labad ir izlaists ass indekss un lielumi turpmāk apzīmēti ar $v_0 = \dot{q}_{i,0}$, $v_f = \dot{q}_{i,f}$, $v_m = \dot{q}_{i,max}$, kas attiecīgi ir sākuma, beigu un maksimālie asu ātrumi. Turklāt $a_m = \ddot{q}_{i,max}$ un $j_m = \dot{\ddot{q}}_{i,max}$ ir attiecīgi paātrinājuma un tā atvasinājuma maksimālās vērtības no (4.3.2). Piemēros turpmāk izklāstītas divas metodes (vairāk literatūras avotā [50]), kā arī sniegts ieskats asu sinhronizācijas metodēs.

4.3.1. Minimālā laika kustību profils

Minimālā laika kustību profils no paša kustības sākuma izmanto maksimālo paātrinājumu, līdz tiek sasniegts maksimālais ass rotācijas ātrums. Attiecīgi rotācijas apturēšanai izmanto maksimālo negatīvo paātrinājumu. Paātrinājuma un konstanta ātruma fāzes ilgums vienkāršotiem simetriskiem profiliem (sākuma un beigu ātrums ir nulle) ir attiecīgi:

$$t_a = \begin{cases} \sqrt{\frac{t_f}{a_m}}, & \text{ja } \frac{v_m^2}{a_m} \geq t_f \\ \frac{v_m}{a_m} & \text{citā gadījumā,} \end{cases} \quad (4.3.4)$$

$$t_v = \begin{cases} 0, & \text{ja } \frac{v_m^2}{a_m} \geq t_f \\ \frac{t_f - a_m t_a^2}{v_m} & \text{citā gadījumā.} \end{cases} \quad (4.3.5)$$

Savukārt ass kustības ilgums ir

$$t_f = t_v + 2t_a. \quad (4.3.6)$$

Ass pozīciju noteiktā laika sprīdī aprēķina ar

$$q(t) = \begin{cases} q_0 + \frac{at^2}{2}, & \text{ja } t < t_a \\ t_f - \frac{a}{2}(t_f - t)^2, & \text{ja } t > t_f - t_a \\ \frac{1}{2}(t_f + q_0 - v t_f) + v t^2 & \text{citos gadījumos.} \end{cases} \quad (4.3.7)$$

Ar t šeit ir apzīmēts konkrēts laika moments. Metodi neizmanto moderniem daudzasu manipulatoriem, jo to kustības ir ļoti straujas, veidojot lielu mehānisko slodzi gan robota asīm, gan instrumentam. Rezultātā saīsinās kalpošanas mūžs un apkopes intervāli. Minimālā laika kustību profila metodi var izmantot nelieliem portālrobotiem.

4.3.2. Trapeces tipa profils

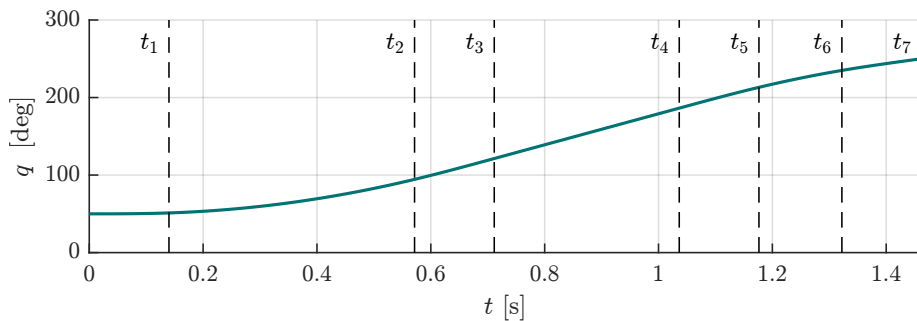
Tālāk sniegts plašāk izplatīts trajektorijas aprēķina veids, kurā uzdod gan ātruma, gan paātrinājuma, gan tā atvasinājuma maksimālās vērtības no (4.3.1). **Trapeces tipa** profilu sauc arī par **septiņu segmentu tipa profilu**, kas nodrošina laidenu kustību no visā tās laikā. Šeit pieņemts, ka paātrinājuma un palēninājuma maksimālās vērtības ir vienādas, kā arī griešanās maksimālais ātrums nav atkarīgs no griešanās virziena.

Ja pieņem, ka ass sākuma pozīcija ir q_0 , bet mērķa pozīcija ir q_f , tad trapeces tipa kustības profilu veido septiņi kustības profila segmenti, kas ilustrēti 4.12. attēlā. Septiņas izteiksmes atkarībā no laika momenta t ir:

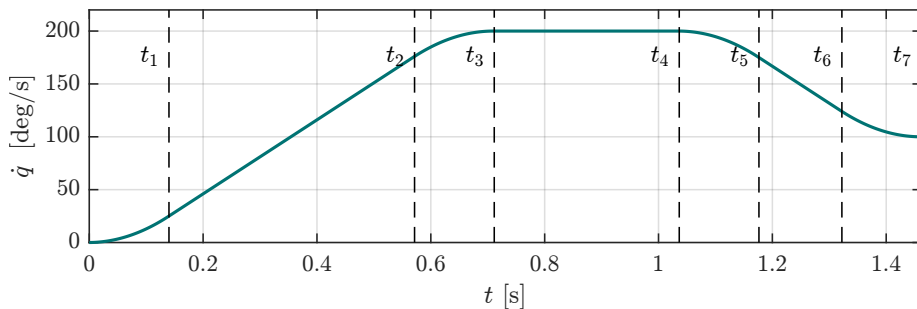
$$\begin{aligned}
 q(t) = & \\
 & \frac{j_m t^3}{6} + v_0 t + q_0, \quad \text{jā } 0 < t \leq t_1, \\
 & q_0 + v_0 t + \frac{a_m t^2}{2} + \frac{a_m^3}{6 j_m^2} - \frac{a_m^2 t}{2 j_m}, \quad \text{jā } t_1 < t \leq t_2, \\
 & q_0 + v_0 t - \frac{j_m}{6} (t - t_3)^3 + a_m t_2 t - \frac{a_m t_2 t_3}{2}, \quad \text{jā } t_2 < t \leq t_3, \\
 & q_0 + v_m t + \frac{t_3}{2} (v_0 - v_m), \quad \text{jā } t_3 < t \leq t_4, \\
 & q_0 + v_m t + \frac{t_3}{2} (v_0 - v_m) - \frac{j_m}{6} (t - t_4)^3, \quad \text{jā } t_4 < t \leq t_5, \\
 & q_0 + v_m t + \frac{t_3}{2} (v_0 - v_m) - \frac{a_m}{2} (t - t_5)^2 + \frac{a_m^2}{j_m} \left(\frac{t_4}{6} - \frac{t}{2} + \frac{t_5}{3} \right), \quad \text{jā } t_5 < t \leq t_6, \\
 & q_f + v_f (t - t_7) - \frac{a_m}{2} (t - t_7)^2 + \frac{j_m}{6} (t - t_6)^3 \\
 & + \frac{a_m^2}{j_m} \left(\frac{t_6}{6} - \frac{t}{2} + \frac{t_7}{3} \right), \quad \text{jā } t_6 < t \leq t_7.
 \end{aligned} \tag{4.3.8}$$

Lai izteiksmes lietotu, ir jāzina katra segmenta beigu momenta vērtība t_1, \dots, t_7 . Paātrinājuma fāze jeb pirmie trīs segmenti ilgst

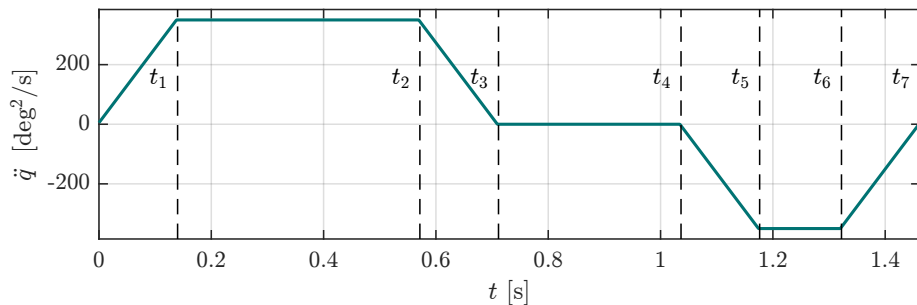
$$t_3 = t_{a,0} = \frac{a_m}{j_m} - \frac{v_0 - v_m}{a_m}, \tag{4.3.9}$$



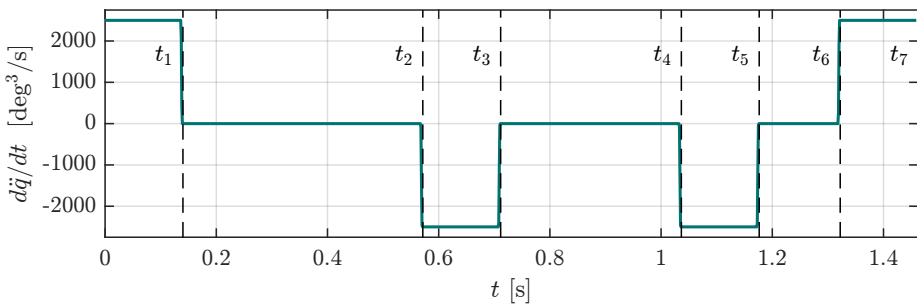
a) Ass leņķis.



b) Ātrums.



c) Paātrinājums.



d) Paātrinājuma atvasinājums.

4.12. attēls. Trapeces tipa kustības rādītāju izmaiņa laikā.

kas vienlaikus ir t_3 lieluma risinājums. Bremzēšanas fāze ilgst

$$t_{a,f} = \frac{a_m}{j_m} - \frac{v_f - v_m}{a_m}. \quad (4.3.10)$$

Ja kustību profils ir simetrisks, t. i., sākuma un beigu ātrumi ir vienādi, tad $t_{a,0} = t_{a,f}$. Paātrinājuma maiņa notiek laika sprīdī

$$t_1 = t_j = \frac{a_m}{j_m}, \quad (4.3.11)$$

kas noved pie t_1 un t_2 risinājuma:

$$t_2 = t_3 - t_1. \quad (4.3.12)$$

Kā nākamais ir jāaprēķina konstanta rotācijas ātruma laika sprīdis, kurā izmanto iepriekš aprēķinātos $t_{a,0}$ un $t_{a,f}$:

$$t_4 - t_3 = t_v = \frac{1}{v_m} \left(q_f - q_0 - t_{a,0} \frac{v_0 + v_m}{2} - t_{a,f} \frac{v_f + v_m}{2} \right). \quad (4.3.13)$$

Zinot t_v , var aprēķināt trūkstošos laika segmentus:

$$\begin{aligned} t_4 &= t_v + t_3, \\ t_5 &= t_4 + t_j, \\ t_7 &= t_4 + t_{a,f}, \\ t_6 &= t_7 - t_j. \end{aligned} \quad (4.3.14)$$

Kopējais ass kustību ilgums ir t_7 . Tā kā šeit eksistē laika segmenti, kuros $a < a_m$, tātad šajā segmentā netiek pielikts maksimālais paātrinājums. Rezultātā kopējais kustības ilgums trapeces tipa kustību profilam ir lielāks nekā minimālā laika kustību profilam (4.3.6). Piemērs ilustrēts ar absolūtajām vērtībām $q_0 = 50 \text{ deg}$, $q_f = 250 \text{ deg}$, $v_0 = 0$, $v_f = 100 \text{ deg/s}$. Uzskatāmi redzams, ka trapeces profils veidojas no paātrinājuma līknes. Lai iegūtu momentāno ātrumu, ir jāaprēķina atvasinājums (4.3.8) pēc laika t , iegūstot:

$$\begin{aligned}
\dot{q}(t) = & \\
& v_0 + \frac{j_m t^2}{2}, \quad \text{ja } 0 < t \leq t_1, \\
& v_0 + a_m t - \frac{a_m^2}{2j_m}, \quad \text{ja } t_1 < t \leq t_2, \\
& v_0 + a_m t_2 - \frac{j_m}{2} (t - t_3)^2, \quad \text{ja } t_2 < t \leq t_3, \\
& v_m, \quad \text{ja } t_3 < t \leq t_4, \\
& v_m - \frac{j_m}{2} (t - t_4)^2, \quad \text{ja } t_4 < t \leq t_5, \\
& v_m - a_m (t - t_5) - \frac{a_m^2}{2j_m}, \quad \text{ja } t_5 < t \leq t_6, \\
& v_f - a_m (t - t_7) + \frac{j_m}{2} (t - t_6)^2 - \frac{a_m^2}{2j_m} \quad \text{ja } t_6 < t \leq t_7.
\end{aligned} \tag{4.3.15}$$

Savukārt paātrinājumu iegūst pēc (4.3.15) atvasinājuma:

$$\begin{aligned}
\ddot{q}(t) = & \\
& j_m t, \quad \text{ja } 0 < t \leq t_1, \\
& a_m, \quad \text{ja } t_1 < t \leq t_2, \\
& -j_m (t - t_3), \quad \text{ja } t_2 < t \leq t_3, \\
& 0, \quad \text{ja } t_3 < t \leq t_4, \\
& -j_m (t - t_4), \quad \text{ja } t_4 < t \leq t_5, \\
& -a_m, \quad \text{ja } t_5 < t \leq t_6, \\
& j_m (t - t_6) - a_m \quad \text{ja } t_6 < t \leq t_7.
\end{aligned} \tag{4.3.16}$$

Vēl viens atvasinājums pēc laika t dod 4.12. (d) attēlā ilustrēto profilu ar periodiski konstantiem lielumiem j_m . Ja ceļš $q_f - q_0$ ir pārāk īss, lai sasniegtu maksimālo ātrumu v_m , tad konstantā rotācijas ātruma segments t_v izkrīt un veidojas kustību profils ar sešiem segmentiem.

4.3.3. Vairāku asu sinhronizācija

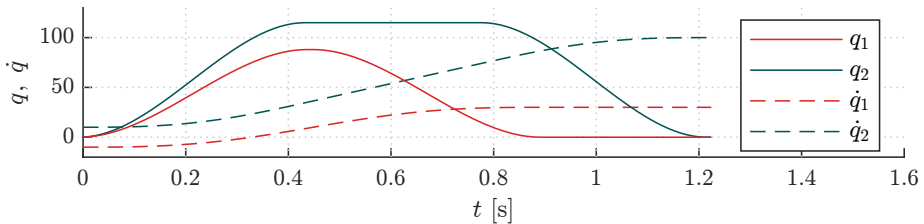
Robota asis rotācijas kustību sāk vienlaikus jeb $t_{i,0} = t_{i+1,0}$. Atkarībā no **asu sinhronizācijas tipa** atsevišķu asu mērķa sasniegšanas moments var atšķirties. Izšķir **asinhronas**, **sinhronas** vai **pilnīgi sinhronas** kustības. 4.13. attēlā vienkāršotā formā parādīti divu izvē-

lētu asu *PTP* kustību sākuma un beigu leņķu maiņa laikā, kā arī leņķa maiņas ātrums.

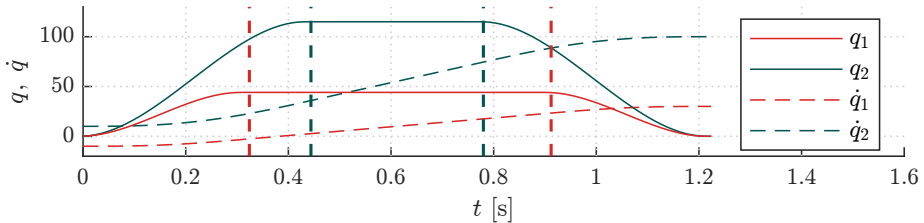
Asinhronā kustībā katras ass rotācija notiek ar maksimālo ātrumu un maksimālo paātrinājumu, kā rezultātā katra ass savu individuālo mērķa pozīciju sasniedz citā laikā, t. i., $t_{i,f} \neq t_{i+1,f}$. 4.13. (a) attēlā redzams, ka ass q_1, f (sarkanā līkne) mērķi sasniedz ātrāk nekā q_2, f (zaļā līkne). Kopējais robota visu asu kustību ilgums ir

$$t_f = \max\{t_{1,f}, \dots, t_{n,f}\}. \quad (4.3.17)$$

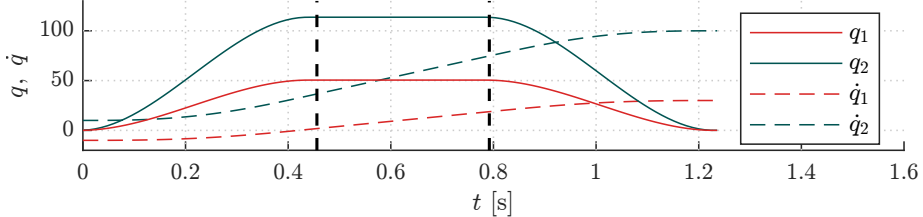
Metode der liela izmēra portālrobotiem, bet ne augstas precizitātes daudzu asu manipulatoriem, jo rezultējošā kustība nav laidena.



a) Asinhrona.



b) Sinhrona.



c) Pilnīgi sinhrona.

4.13. attēls. Vienkāršu *PTP* asu sinhronizācijas tipi.

Sinhronās PTP kustībās visas ass neatkarīgi no to Δq vērtības (ja vien tā nav nulle) sasniedz savu mērķi vienlaicīgi. Lai to īstenotu, asu rotācijas ātrumus izvēlas tā, lai katras ass kopējais rotācijas ilgums būtu vienāds ar visilgākās ass rotāciju. Tā var būt gan ass, kura ir lēnāka, gan arī ass, kurai veicams garāks ceļš. Metodi var definēt kā

$$t_f = t_{i,f} = t_{i+1,f} = \max\{t_{1,f}, \dots, t_{n,f}\}. \quad (4.3.18)$$

4.13. (b) attēlā redzams, ka $q_1, f = q_2, f$, taču konstanta ātruma fāze katrai asij sākas un beidzas citā momentā (iezīmēts ar vertikālām līnijām).

Pilnīgi sinhronā kustībā tiek sinhronizēts ne tikai kopējais kustības ilgums, bet gan arī atsevišķas kustības fāzes – paātrinājums, konstants griešanās ātrums, bremzēšanas laiks (skat. 4.13. (c) att.). To var definēt kā

$$t_{i,a} = t_{i+1,a}, \quad (4.3.19)$$

$$t_{i,v} = t_{i+1,v}. \quad (4.3.20)$$

Kopējais laiks ir nedaudz lielāks kā sinhronām kustībām. Rezultātā iegūst ļoti laidenu kustību ar stabilu un vienmērīgu griešanās ātrumu pie garākām kustībām.

Neņemot vērā dinamiku un atļauto maksimālo momentu piedziņai, idealizētas kustības pozīcijas un ātruma maiņa laikā var redzēt 4.13. attēlā. Pilnīgi sinhronas kustības ir visizplatītākās, taču rezultējošā kustība nav visātrākā iespējamā. Visātrāko rezultātu sasniedz ar asinhronām kustībām un sinhronām kustībām, kuru ilgums ir vienāds.

Praksē sinhronizācijas pakāpi uzdod robota vadības sistēma, un tikai retos gadījumos to var mainīt mašīnas operators. Paņēmiens ir būtisks, ja plāno trajektoriju, apejot komerciālo robotu iebūvētos kustību plānošanas algoritmus.

4.3.4. Profila aprēķins ceļa kustībām

Iepriekš uzskaitītie lielumi ir uzdoti manipulatora asu kontekstā, kas ir atkarīgi no manipulatora tehniskās uzbūves, motoru veiktspējas u. c. tehniski ierobežojošiem aspektiem. Taču trajektorijas plānošanā, kas izriet no kustības 3D darba telpā, izmanto sākuma un beigu lielumus, kas uzdoti telpā:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{t,0} &= [x_{t,0}, y_{t,0}, z_{t,0}, \gamma_{t,0}, \beta_{t,0}, \alpha_{t,0}]^T \\ \mathbf{x}_{t,f} &= [x_{t,f}, y_{t,f}, z_{t,f}, \gamma_{t,f}, \beta_{t,f}, \alpha_{t,f}]^T.\end{aligned}\quad (4.3.21)$$

Ja kustība telpā nesākas no nulles un mērķa punktā neapstājas, tad nepieciešami arī kustības sākuma un beigu dati – lineārais ātrums un virziena maiņas ātrums:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_{t,0} &\text{ – sākumā,} \\ \dot{\mathbf{x}}_{t,f} &\text{ – beigās.}\end{aligned}\quad (4.3.22)$$

Ja darba uzdevums nosaka, ka instruments nedrīkst pārsniegt kādu noteiktu kustības ātrumu, tiek ieviesti papildu ierobežojumi $\dot{\mathbf{x}}_t$ un $\ddot{\mathbf{x}}_t$. Aprēķinam izmanto (3.4.1) no 3.4. nodaļas:

$$\dot{\mathbf{x}}_t = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}} \leq \dot{\mathbf{x}}_{t,max}, \quad (4.3.23)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_t = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \leq \ddot{\mathbf{x}}_{t,max}, \quad (4.3.24)$$

kur $\dot{\mathbf{J}}$ ir atvasinājums no Jakobi matricas pēc laika t .

Ceļa kustība darba telpā ir jāaprēķina, veicot **ceļa interpolāciju** (skat. 4.1.3. nodaļu) un inverso kinemātiku katram interpolācijas punktam, lai iegūtu nepieciešamos asu leņķu lielumus. Šis ir salīdzinoši intensīvs aprēķins, jo atkarībā no interpolācijas soļa to veic daudz reižu. Ceļa kustībām var lietot kustību profila aprēķinu metodes (skat. 4.3.2. nodaļu) kustībai telpā no $\mathbf{x}_{t,0}$ uz $\mathbf{x}_{t,f}$.

4.4. Seriālo manipulatoru specifiskas problēmas

Īpašu seriālo robotu asu konfigurāciju sauc par singularitāti, kas analizēta nākamajā nodaļā. Kas raksturo spējīgu robotu un kā to pārbaudīt, skaidrots 4.4.2. nodaļā. Savukārt par robota darbspēju uzlabošanu ar dažādiem kalibrācijas paņēmieniem rakstīts 4.4.3. nodaļā.

4.4.1. Nenoteikti stāvokļi un singularitāte

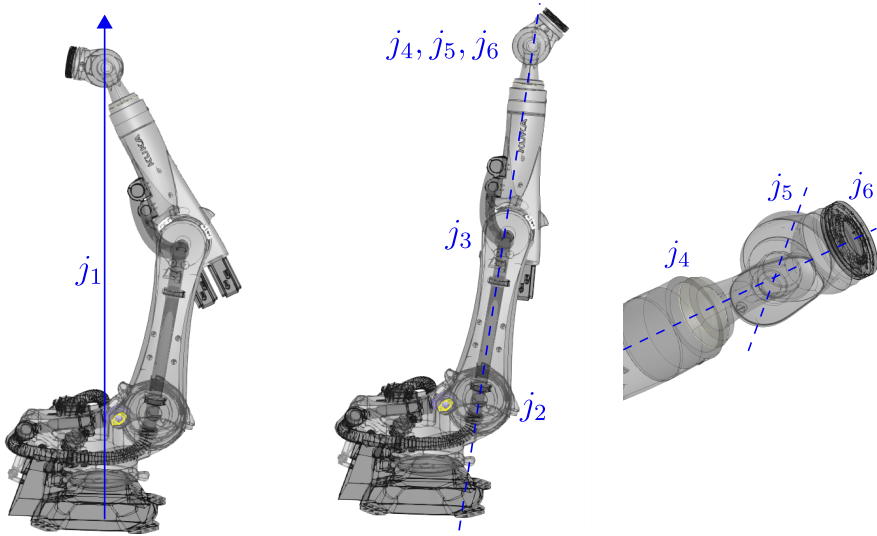
Inversā kinemātika nav viennozīmīga, ja pastāv vairāk nekā viens risinājums. Singularitātes ir matemātikas problēma robotikā, kad darba telpā divas vai vairākas asis nespēj neatkarīgi mainīt instrumenta pozīciju vai tā virzienu. Inversās kinemātikas problēmai šajā gadījumā ir bezgalīgi daudz risinājumu. Praksē bieži nākas saskarties ar singularitātes problēmu, tādēļ darbā ar industriālajiem manipulatoriem tam ir būtiski pievērst uzmanību. Singularitāte novērojama manipulatoriem ar vismaz divām kolineārām rotācijas asīm (vai divām paralēlām taisnvirziena kustības asīm) – šajos gadījumos asis nespēj neatkarīgi veikt kustību, jo kustību var kompensēt ar citu asi.

Singularitāte rada divu tipu problēmas.

- **Singulāros stāvokļos** robots zaudē vienu vai vairākas brīvības pakāpes un instruments nespēj ieņemt noteikto pozīciju un virzienu darba telpā.
- Tuvu **singularitātes punktiem** rodas nestabili vadības stāvokļi, kuros asu rotācijas ātrumi pārsniedz maksimāli atļautos. Nestabilitāte skaidrojama ar to, ka ļoti nelielām kustības distancēm telpā nepieciešams ļoti liels asu ātrums, lai noturētu konstantu instrumenta kustības ātrumu.

► Singularitātes noteikšana

Matemātiski singularitātes problēmu raksturo divas vai vairāk kolonnas Jakobi matricā, kas kļūst lineāri atkarīgas viena no otras. Matrica nav invertējama, un tās determinants $\det(\mathbf{J}) = 0$. Rezultātā tiek zaudēta viena vai vairākas robota brīvības pakāpes.



a) Atpakaļskata singularitāte. b) Taisnvirziena singularitāte. c) Rokas singularitāte.

4.14. attēls. *KUKA Quantec KR 210 R2700* robota singularitātes.

Lai noteiktu visus singularitātes stāvokļus, jā sastāda vienādojums

$$\det \mathbf{J}(\mathbf{q}) = 0, \quad (4.4.1)$$

kuram jāatrod visi iespējamie risinājumi. Nereti singularitāte iestājas, ja asu konfigurācijā leņķu vērtības ir 0° vai 180° .

► Sešu asu robota singularitātes piemērs

Sešu asu *KUKA* industriālajiem robotiem parasti izšķir trīs singularitātes veidus: **atpakaļskata**, **taisnvirziena** un **rokas singularitātes**. Tās ir noteiktas manipulatora pozas, kurās inversā kinemātika nav aprēķināma pat tad, ja norādīti S un T mainīgie. Atpakaļskata singularitātē krustojas roku asu j_4 , j_5 un j_6 krustpunkts, kurš vienlaidīgi atrodas uz j_1 taisnes. Šāda kombinācija veidojas pie noteiktām q_2 un q_3 vērtībām. Ass j_1 var ieņemt jebkuru vērtību, ko var kompensēt ar rokas asīm (skat. 4.14. (b) att.). Iespējamais risinājums ir iestatīt $q_1 = 0$ un mērķa punktā to nemainīt. Taisnvirziena singularitāte rodas tad, ja caur asu j_4 , j_5 un j_6 krustpunktu un asīm j_2 , j_3 var novilkt

taisni. Šajā gadījumā manipulators atrodas izstieptā pozā uz savas darba telpas robežas. Inversā kinemātika ir aprēķināma, taču nelielas pozīcijas maiņas telpā noved pie straujas asu pārkārtošanas. Rokas singularitāte iestājas, ja asis j_4 un j_6 ir kolineāras, jo to vērtību summa vienmēr ir vienāda. Tas notiek gadījumos, ja $q_5 = 0$ vai tā vērtība dalās ar π . Kā risinājumu var iestatīt $q_4 = 0$, un to nemainīt kustības laikā, ja kustība ir tuvu singularitātes punktam.

► Nenoteiktu stāvokļu novēršana vadības sistēmās

Ja pozīcija uzdots telpā, robotu vadības sistēmā pozīcijas definīciju bez x, z, z, A, B, C vērtībām var norādīt arī papildu bitu mainīgos: *S-status* un *T-turn*. Tas palīdz viest skaidrību par robotu asu konfigurāciju nesingulāros stāvokļos, kuros iespējami vairāki inversās kinemātikas risinājumi.

S un *T* biti

KUKA robotu vadības sistēmā kustības noteikšanai izmanto papildu mainīgos: *S-status* un *T-turn*, kas nosaka robota pozīciju gadījumos, ja inversajai kinemātikai ir vairāk nekā viens risinājums. Mainīgie *S* un *T* nepieciešami tikai telpā uzdotām pozīcijām.

Mainīgo *T* izmanto, lai palīdzētu risināt neviennozīmīgas inversās kinemātikas problēmas. 4.3. tabulā parādīts risinājums asu pozīcijām, norādot bitveida mainīgā *T* vērtības. Piemēram, ja $T = 11001$, tad q_6, q_5 un q_1 ir negatīvi, bet q_4, q_3, q_2 ir pozitīvi. 4.15. attēlā ilustrētas divas tipiskas asu savstarpējās konfigurācijas problēmas. Gadījumā (a) 5. posma atrašanās vietu var sasniegt ar diviem dažādiem j_2 un j_3 leņķiem. Gadījumā (b) 6. posma virzienu var noteikt ar bezgalīgi daudz j_4 un j_6 kombinācijām. Nosakot *T* pēc 4.3. tabulas, problēma (a) tiek atrisināta, bet (b) ierobežota.

Papildu bitveida mainīgais *S-turn* raksturo sešu asu robota asu stāvokļus. To nozīme ir:

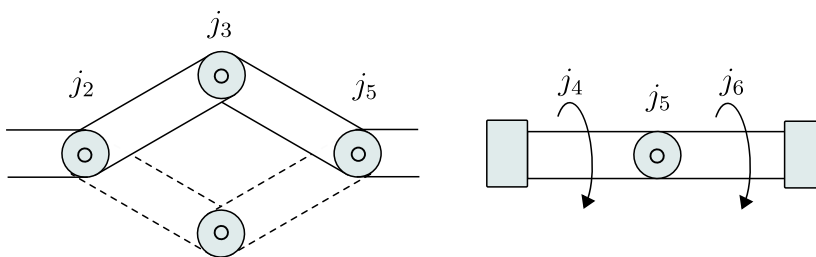
- **0. bits** – pamata vai apgāztā poza;
- **1. bits** – rumpja konfigurācija;

4.3. tabula. Asu virziena mainīgais T -turn

| Vērtība | 5. bits | 4. bits | 3. bits | 2. bits | 1. bits | 0. bits |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | $q_6 \geq 0^\circ$ | $q_5 \geq 0^\circ$ | $q_4 \geq 0^\circ$ | $q_3 \geq 0^\circ$ | $q_2 \geq 0^\circ$ | $q_1 \geq 0^\circ$ |
| 1 | $q_6 < 0^\circ$ | $q_5 < 0^\circ$ | $q_4 < 0^\circ$ | $q_3 < 0^\circ$ | $q_2 < 0^\circ$ | $q_1 < 0^\circ$ |

4.4. tabula. Asu virziena mainīgais S -status

| Vērtība | 2. bits | 1. bits | 0. bits |
|---------|---|---|----------------|
| 0 | $0^\circ \geq q_5 < 180^\circ$, $q_5 < -180^\circ$ | $q_3 < \phi$, kur ϕ atkarīgs no robotu modeļa | pamatstāvoklis |
| 1 | $-180^\circ \leq q_5 < 0^\circ$, $q_5 \geq 180^\circ$ | $q_3 \geq \phi$, kur ϕ atkarīgs no robotu modeļa | apgāztā poza |



a) 2., 3. un 5. ass.

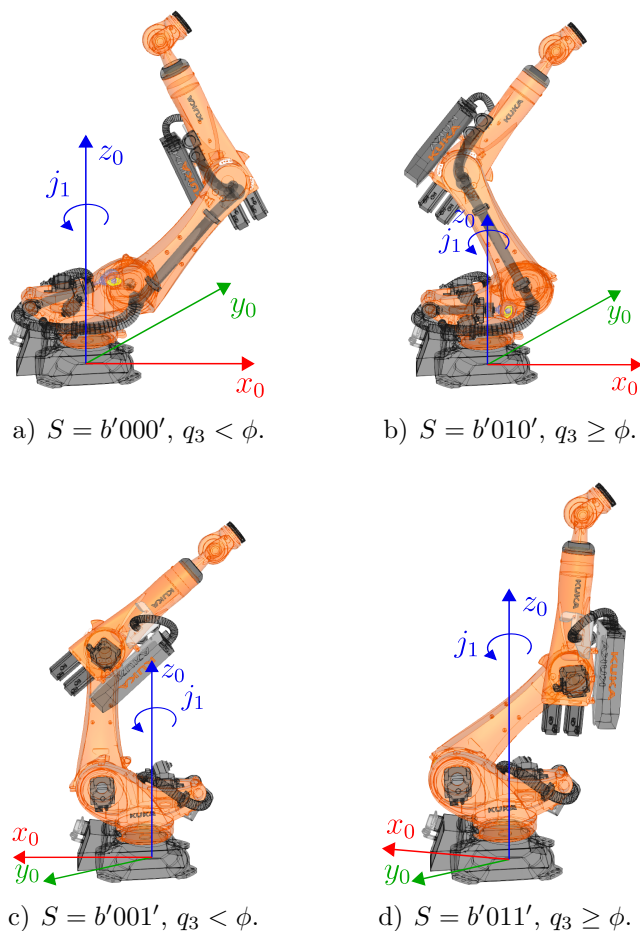
b) 4. un 6. ass.

4.15. attēls. Kolineāro asu vērtību nenoteiktība.

- **2. bits** – rokas vai delnas konfigurācija.

Ja robota manipulatora rokas (konkrēti j_4 , j_5 un j_6 krustpunkts) atrodas koordinātu sistēmas $\{0\}$ x_0 ass pozitīvajā pusē (skat. 4.16. (a) att., 4.16. (b) att.), tad robots atrodas pamata pozā. Ja roka atrodas x_0 negatīvajā daļā, robots atrodas apgāztā pozā (skat. 4.16. (c) att., 4.16. (d) att.). Robotam griežoties ap asi j_1 jeb z_0 , līdzīgi griežas arī $\{0\}$, tātad apgāzto pozu nevar sasniegt, kustinot tikai asi j_1 .

1. bits ir atkarīgs no manipulatora kinemātikas – robotiem, kuriem j_3 un j_4 krustojas (tātad $a_3 = 0$ pēc 3.12. att.), tad $\phi = 0$. Tātad 1. bits ir nulle, ja $q_3 < 0^\circ$. 1. bits ir viens, ja $q_3 \geq 0^\circ$. Robotiem, kuriem assis j_3 un j_4 nekrustojas, ϕ ir atkarīgs no ražotāja noteiktās ϕ definīcijas. 4.16. (b) un 4.16. (d) attēlā redzamas pozas, ja $q_3 \geq \phi$.



4.16. attēls. Sešu asu manipulatora pamata (a, b) un apgāztās pozīcijas (c, d).

Līdzīgā veidā nosaka arī 2. bitu, kas norāda, kādā leņķu grupā atrodas ass q_5 vērtība. Kaut arī, mainot 2. bitu, mainīsies arī asu q_4 un q_6 leņķi, tie ir atkarīgi no q_5 , lai sasniegtu to pašu pozīciju telpā. Kopumā konkrēto punktu var sasniegt astoņos neatkarīgos veidos, taču tā nav visiem punktiem telpā, jo atsevišķām asīm nereti būtu jāpārsniedz fiziskie asu limiti to konstrukcijas dēļ. Praksē lietotājs aktīvi norāda tikai konfigurāciju ar mainīgo S , bet, iestatot robotu ar *teach-in* metodi, mainīgie ir zināmi, jo manipulators jau pozū ir sasniedzis.

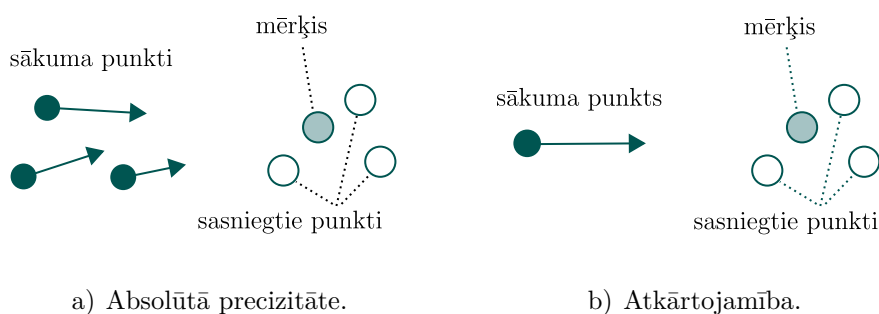
4.4.2. Precizitātes indikatori

Viena no mehāniska manipulatora kvalitātes īpašībām ir norādīto punktu un uzdotā ceļa precīza sasniegšana. Kaut arī roboti izceļas ar ārkārtīgi augstu darba kvalitāti, neviena mehāniska sistēma nevar būt absolūti precīza. Arī robotika nav izņēmums – katrs norādītais punkts telpā fiziski tiks sasniegts ar noteiktu kļūdu.

Industriālā robota precizitāte visvairāk ir atkarīga no:

- korpusa uzbūves stingrības (asu novietojums, histerēze) – rotācijas asīm ir noteikta brīv kustība, bet lineārās asis slodzes ietekmē deformējas;
- vadības sistēmas kļūdām;
- koordinātu sistēmu transformācijas kļūdām;
- nominālās slodzes (pārslodze samazina precizitāti);
- robota piedziņas sistēmas darba temperatūras (elektriskās mašīnas, pārvade);
- pozīcijas mērsistēmas veida un izšķirtspējas, kas nosaka mazāko mērāmo vienību vienai asij.

Robotikā izšķir **punkta pozīcijas** un **ceļa precizitāti**. Abos variantos papildus izšķir **absolūto precizitāti** un **atkārtojamību**.



4.17. attēls. Punkta precizitātes indikatori.

► Punkta absolūtā precizitāte

Punkta pozīcijas precizitātē izšķir **absolūto precizitāti** un **punkta atkārtojamību**, kā arī **distances precizitāti**. Absolūtās preci-

zītātes mērīšanai kā piemēru var iztēloties, ka robota bāze un instruments – smalka spice – ir zināmi un iestatīti. Robota bāze ir darbgalds jeb plakne. Lai noteiktu absolūto precizitāti, uz darbgalda virsmas nosaka vienu punktu, ko sasniedz ar instrumenta spici no dažādām manipulatora pozīcijām. Izvēlētais punkts tiks sasniegts aptuveni ar noteiktu vidējo kļūdu – ar distances novirzi no vēlamā. Maksimālais attālums starp reāli sasniegto un uzdoto mērķa punktu ir robota absolūtā precizitāte. Tiesa gan, ja piemērā izmantotu rakstāmrīku un papīra virsmu, praktiskais rezultāts būtu grūti saredzams, jo mūsdienišu roboti sasniedz atsevišķa punkta precizitāti aptuveni $\pm 0,1\text{--}0,5$ mm, bet pildspalvas spice ir apmēram 0,7 mm liela.

Ja robota programmas sastādītas ar *teach-in* metodi, tad absolūtajai precizitātei nav būtiskas nozīmes. Taču absolūtā precizitāte ir īpaši svarīga, ja robota programmas veidotas simulācijas modeļos un tad izmantotas reālā robotā (skat. 5.1.3. nodaļu).

► Punkta atkārtojamība

Automatizācijā visbiežāk izmanto programmas vai darba uzdevumus, kas dzīves laikā nereti atkārtojas tūkstošiem reižu. Tādēļ par absolūto precizitāti praksē daudz būtiskāka ir **atkārtojamība**, kas apzīmē novirzi no uzdotā punkta vienai un tai pašai kustībai – ar vienu sākumu punktu un kustības ātrumu. Kustība tiek atkārtota vairākas reizes. Pēc būtības šī pieeja daudz vairāk modelē reālo lietojumu, taču ir atkarīga no tā, ar kādu metodi robots ir programmēts (kustību atkārtošana vai datormodelēšana, skat. 2.1. tab.). Punkta atkārtojamība moderniem robotiem var sasniegt pat $\pm 0,1$ mm. Parasti mazāki roboti uzrāda augstākus absolūtās precizitātes un atkārtojamības rādītājus, kas saistīts ar atsevišķu posmu garumu – neliela kļūda rotācijas asī veido salīdzinoši lielu kļūdu posma galā.

Robotu izstrādātāji to specifikācijās norāda precizitātes datus. Taču kā pārbaudīt, ka tie patiešām atbilst realitātei? Starptautiskais standarts *ISO 9283* [51] apraksta industriālo robotu veikspējas testa metodiku, kurā iekļauti iepriekš uzskaitītie precizitātes indikatori. Pēc

standarta gan absolūtās, gan atkārtojamības punkta precizitātes mērīšanā izmanto divu lielumu slodzes – 100 % un 10 % no nominālās, kuru katru mēra pie trīs dažādiem ātrumiem – 100 %, 50 % un 10 %. Vienu mērījumu atkārtoti 30 reižu.

► Distances precizitāte

Pastāv **distances precizitātes** mērīšanas metode, ar kuru mēra distances novirzi no uzdotās starp diviem noteiktiem punktiem. Punktus var uzdot ar datormodelēšanas palīdzību vai noteiktu komandu ar distances norādi (piemēram, ar relatīvās kustības komandām *PTP_REL*, *LIN_REL*). Nenovēro ceļu un kustības izpildi pa to. Izšķir gan distances absolūto precizitāti, gan distances atkārtojamību.

Visos trīs veidos mēra gan punkta pozīciju, gan instrumenta virzienu šajā punktā.

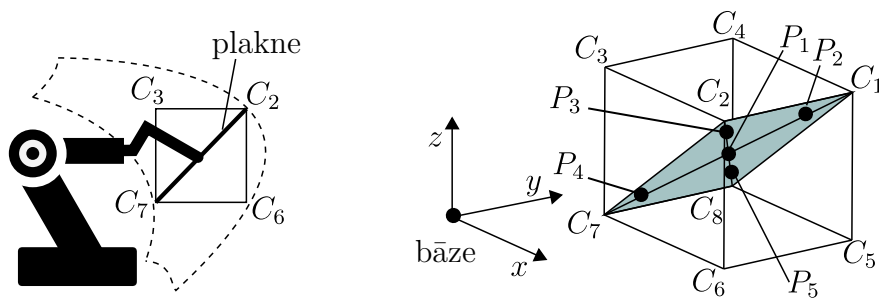
► Pozīcijas stabilizācijas laiks

Laika sprīdi, kurā robots ieņem mērķa pozīciju, sauc par **pozīcijas stabilizācijas laiku**. To nosaka šādi: ap mērķa pozīciju tiek noteikta lode, kuras rādiuss ir vienāds ar nomērīto vai ražotāju uzdoto atkārtojamības vērtību (t. s. **tolerances lodi**). Sākuma moments ir tad, kad kustība, tuvojoties mērķa pozīcijai, pirmoreiz sasniedz lodi. Beigu moments ir mirklī, kad pēdējoreiz lodes telpa tiek atstāta.

Tuvināts pozīcijas stabilizācijas laika indikators ir maksimālā distance no mērķa punkta pēc tam, kad robots ir sasniedzis mērķa pozīcijas tolerances lodi (angļu val. *overshoot*). Atkārtojamības vērtību ietekmē robota un vides temperatūra, robota nolietojums un instrumenta svars. Kā kvalitātes indikatoru novēro arī precizitātes atšķirību starp diviem viena un tā paša tipa robotiem, kas galalietotājam apliecina spēju nomainīt robotus ražošanas iekārtā.

► ISO kubs

Lai precizitātes mērīšanas metodiku varētu lietot dažāda lieluma robotiem, ir ieviests t. s. **ISO kubs** (skat. 4.18. (a) att.). Tas ir ģeometriski vislielākais virtuālais kubs, kas ietilpst konkrēta manipulatora darba telpā un atrodas tā visbiežāk izmantotajā darba telpas zonā.



a) Kuba atrašanās vieta robotā darba telpā.

b) Mērījumu punktu atrašanās vietas uz izvēlētas plaknes sešu asu robotiem.

4.18. attēls. ISO kubs.

Kubu nosaka ar punktiem C_1, \dots, C_8 . Mērījumus veic plaknē C_1, C_2, C_7, C_8 . Robotiem ar mazāku asu skaitu par sešām var izmantot citas plaknes, kas ir ortogonālas bāzei. Pozīcijas mērījumi notiek punktos P_1, P_5 , kas atrodas uz 4.18. (b) attēlā ilustrētās plaknes. Kaut arī virtuālais kubs dažādiem robotu tipiem ir atšķirīga lieluma, metode sniedz relatīvu kvalitātes salīdzinājumu.

► Ceļa precizitāte

Otrajā precizitātes indikatoru grupā novēro ne tikai mērķa punktu, bet arī veikto ceļu uz šo punktu. Ar **ceļa jeb trajektorijas precizitāti** izsaka robota spēju noteiktā ātrumā ieturēt iepriekš noteikto ceļa kustību. Līdzīgi kā attiecībā uz punktiem, izšķir **absolūto ceļa precizitāti** un **atkārtojamību**. 4.19. attēlā ilustrēts tolerances tunelis ap uzdoto kustības ceļu. Tuneļa rādiuss ir atkārtojamība, kuras ietvaros pieļaujama nobīde no uzdotā ceļa. Savukārt tuneļa centra līnijas nobīde no uzdotā ir ceļa absolūtā precizitāte.

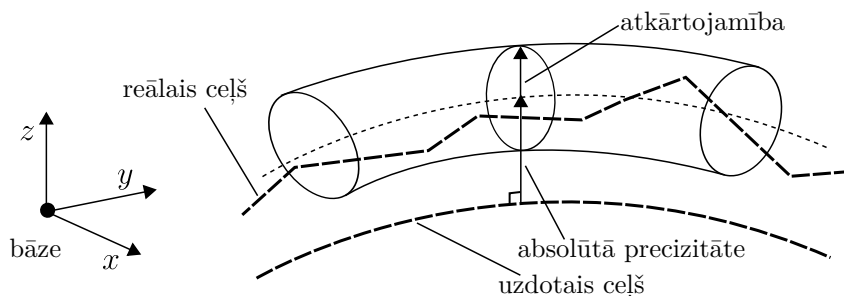
Citi precizitātes mērījumi iekļauj:

- maksimālo instrumenta attālumu no uzdotā ceļa kādā posmā;
- vidējo attālumu no uzdotā ceļa un tā normālo sadalījumu;
- absolūto kustības ātrumu, atkārtojamību vai ātruma fluktuāciju pa uzdoto ceļu;
- vidējo instrumenta virziena maiņu no uzdotā ceļa un tās normālo

sadalījumu;

- 90° stūru sasniegšanas kvalitāti (piemēram, stūri tiek noapaļoti);
- mazu rādiusu sasniegšanas kvalitāti.

Vispārīgā gadījumā ceļa precizitātes indikatori attiecas uz visu veidu ceļa kustību komandām. Vairāk par ceļa precizitātes indikatoriem var lasīt *ISO 9283*.



4.19. attēls. Ceļa precizitātes indikatori pēc [51].

Kā pēdējais uzskaitītais precizitātes kritērijs ir robota spēja noturēt statistisku pozīciju pie dažādām slodzēm jeb **statiska pozīcijas tolerance**. Saskaņā ar [51] mērījuma laikā novēro instrumenta pozīcijas izmaiņu, pieliekot spēku bāzes koordinātu sistēmas asu virzienos punktā P_1 ar soli 10 % no 0 % līdz 100 % no nominālā. Mērījumus veic, kad manipulatora pozīcija tiek turēta ar servomotoriem, nevis mehāniskām bremsēm. Rezultātu fiksē milimetros uz ņūtonu.

Arī standartā *VDI 2861* [52] sniegts robota precizitātes pārbaudes metožu kopums, bet ne konkrēts pārbaudes uzdevums – ceļu un punktus nosaka pārbaudes veicējs. Atbilstoši šim standartam precizitātes mērījumos izmanto pēc iespējas plašāku darba telpu, aprīkojot manipulatoru ar instrumentu tuvu tā nominālajai slodzei. Praksē dažādu ražotāju robotu salīdzināšana ne vienmēr ir viennozīmīga un bieži atkarīga no specifiska uzdevuma.

4.4.3. Kalibrēšana

Robota manipulatora precizitāte var samazināties tā dzīves laikā, kā arī mehānisku bojājumu vai nolietojuma rezultātā. Neprecizitāte

pastāv, ja vadības sistēmā saglabātais modelis atšķiras no reālās mehāniskās uzbūves. Neprecizitātes iemesli iekļauj:

- mērīšanas kļūdas, piemēram, asu pozīcijas devēju ekscentritātes;
- parametru kļūdas vadības sistēmas modelī, piemēram, pārvades sistēmas koeficientu kļūdas vai atsevišķo manipulatora posmu izmēru izmaiņas;
- vides izmaiņas, piemēram, temperatūra un citi nelineāri aspekti kā berze, slodze, manipulatora izgatavošanas/montāžas kļūdas;
- aprēķina kļūdas (datu vienkāršošana);
- aplikācijas jeb darba uzdevuma konfigurācijas kļūdas.

Kā ilustratīvu piemēru var izmantot 3.12. attēlā redzamo manipulatoru. Ja pirmās ass kļūda ir tikai pusotrs arcmin ($0,025^\circ$), tad attēlā norādītajā pozā robota instrumenta montāžas punkta nobīde pa y pārsniedz 1 mm. Šādā gadījumā runa ir par absolūto precizitāti, jo atkārtojamība paliek nemainīga.

Par **robota kalibrāciju** sauc procesu, kurā ar izmaiņām kinemātikas modelī iespējams paaugstināt robota precizitāti, nemainot tā vadības sistēmu vai kādu fizisku komponenti [53]. Izšķir trīs līmeņus, kas attiecas uz paša robota kalibrāciju:

- **asu kalibrācija** – noteikt asu pozīciju un pārvades koeficientu piedziņas sistēmā starp manipulatora asi un elektrisko mašīnu;
- **kinemātiskā modeļa kalibrācija** – noteikt visa manipulatora ģeometriju un asu koeficientus;
- **neģeometriskā kalibrācija** – iekļauj tādus parametrus kā berzes zudumi, asu brīvkustība, slodzes efekts.

Lietotājam vienkāršākā metode ir pirmā līmeņa jeb **asu kalibrācija**. Ar metroloģijas metodi **lāzera triangulāciju** iespējams noteikt izmaiņas robota kinemātikas modelī, un tā nav atkarīga no robotu vadības sistēmas, taču mērīšanai nepieciešams speciāls aprīkojums.

► Asu kalibrācija

Manipulatora asu pārvades koeficients γ_i pret elektriskās mašīnas vārpstu $q_{i,m}$ visbiežāk saistīts lineāri $q_i = \gamma_i q_{i,m}$. Asu koeficientu pār-

baudi var veikt, pārliedzinoties, ka vadības sistēmā iestatīti specifiskā norādītie parametri. Mehānisko asu references jeb **nulles pozīcijas** iestata ar tā saucamo *EMD* ierīci (angļu val. *electronic mastering device*), kas redzama 4.20. attēlā. Katru manipulatora asi vada noteiktā kalibrēšanas pozīcijā. *EMD* ierīces devējs dod signālu, kad ass atrodas nulles pozīcijā. Esošā pozīcija tiek saglabāta un izmantota vadības sistēmā turpmāk. Dažiem robotiem vai atsevišķām asīm ass nulles pozīciju nosaka tikai vizuāli ar references marķējumu palīdzību uz diviem blakus esošiem posmiem.



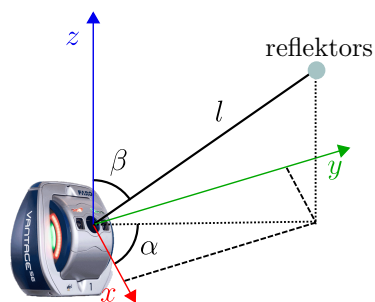
4.20. attēls. Trešās ass nulles pozīcijas iestatīšana ar *EMD* ierīci.

Asu pozīcijas kalibrācija jāveic

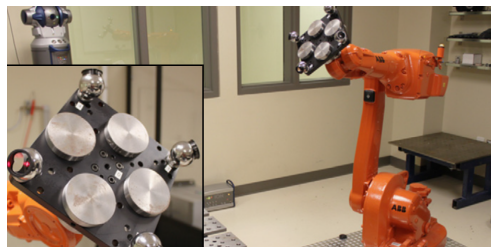
- pirms pirmreizējas ekspluatācijas,
- ja nomainīts ass komponents,
- ja notikusi sadursme,
- noteiktos apkopes intervālos.

► Lāzera metroloģija

Lai noteiktu manipulatora mehāniku un DH parametrus (skat. 3.2.2. nodaļu), var izmantot triangulācijas metodi. To dara ar speciālu mēraparatūru – lāzera interferometru (piemēram, no *API/RADIAN*, *Faro* vai *Leica*), kas spēj noteikt objektu atrašanās vietu telpā vairāku metru attālumā ar precizitāti līdz dažiem desmitiem mikrometru. Ierīce sastāv no interferometra, kurš ar paša izstarotu lāzera staru spēj sekot kustīgiem reflektoriem. Nereti mērījumi noved pat pie labāka matemātiskā modeļa, nekā to sniedz robotu izstrādātāja nominālais modelis, absolūto precizitāti uzlabojot pat divas līdz trīs reizes [54].



a) Triangulācijas paņēmieni.



b) Kalibrēšanas instalācija [54].

4.21. attēls. Robota kalibrēšana ar metroloģijas metodi, izmantojot lāzera interferometru.

Turpmāk aplūkots lāzera interferometra darbība un mērīšanas process. Uz statīva ārpus robota darba telpas uzstāda mērīšanas ierīci – lāzera interferometru. Uz robota instrumenta montāžas punkta piestiprina speciāli pielāgotu mērīšanas palīgplati ar vienu vai vairākiem sfēriskiem reflektoriem (angļu val. *SMR – spherically mounted retro-reflector*), kuri atstaro gaismu (lāzera staru) tieši tajā pašā virzienā, no kurienes tas izstarots. Interferometrs strādā ar vairākiem tūkstošiem lāzera pulsu sekundē. Tas ir montēts uz vadāmas horizontālās un vertikālās ass mēriekārtā. Mēriekārta strādā koordinātu sistēmā, kā ilustrēts 4.21. (a) attēlā. Šeit abi leņķi α un β ir zināmi no mēriekārtas pozicionēšanas devējiem, bet distanci līdz sfērai l sniedz distances mērīšanas modulis. Sfēras atrašanās vieta telpā aprēķināma pēc:

$$\begin{aligned}x &= l \cos \beta \cos \alpha \\y &= l \cos \beta \sin \alpha \cdot \\z &= l \sin \beta\end{aligned}\tag{4.4.2}$$

Manipulatoru vada uz dažādām pozīcijām tā darba telpā, kuras fiksē ar mēriekārtu. Instalācijas piemērs dots 4.21. (b) attēlā. Ir zināmas sfēru atrašanās vietas attiecībā pret instrumenta montāžas punktu (manipulatora pēdējā posma koordinātu sistēmas sākumpunktu). Izmantojot

vismaz trīs sfēras uz palīgplates, ir aprēķināms instrumenta montāžas punkts jeb robota pozīcija un virziens telpā. Izmantojot robota kinemātikas modeli pēc DH konvencijas un vadot manipulatora atsevišķas asis, vairākos desmitos mērījumu nosaka iespējamās DH parametru kļūdas.

Rezultātā sastāda jaunu DH parametru kopumu, ar kuru precizē robota vadības sistēmā izmantoto manipulatora modeli, lai turpmākajos tiešās un inversās kinemātikas aprēķinos kinemātiskās ķēdes izmaiņas tiktu ņemtas vērā. Tiesa gan, ne visi komerciālie robotu izstrādātāji ļauj veikt izmaiņas kinemātiskajā modelī. Kaut arī veikta kalibrēšana, tas nereti paliek ierobežojums.

Manipulatoru var arī kalibrēt salīdzinoši nelielā darba telpas daļā, šādā veidā paaugstinot absolūto precizitāti tieši tur, kur robotam jāveic darba uzdevums. Ja robots novietots uz konveijera (septītās) ass, lai palielinātu darba telpu, precizitātes uzlabojums manipulatoram pret iespējamo kļūdu papildu ass dēļ var būt salīdzinoši maznozīmīgs.

► Robotu šūnas iemērīšana

Maldīgs priekšstats par robota precizitāti var rasties no vienkāršām aplikācijas kļūdām, ja neprecīzi ir noteikta bāzes vai pasaules koordinātu sistēma. Robota šūnā, kurā ir vairāki roboti un darbgaldi, tikpat būtiski ir iemērīt nepieciešamās aplikācijas koordinātu sistēmas (skat. 2.1.5. nodaļu). Robota montāžas rezultātā robota manipulators normālā gadījumā vienmēr atrodas nedaudz citā pozīcijā, nekā modelēts simulācijā, kurā tapušas robota programmas. Šajā gadījumā novērojama absolūtā kļūda, kuru novērš, precīzi nosakot katra atsevišķa robota atrašanās vietu un to rotāciju pret izvēlētu pasaules koordinātu sistēmu. Arī šeit iemērīšanu var veikt ar triangulāciju, izmantojot lāzera interferometru. Darbgaldiem (parasti viena no robota bāzes koordinātu sistēmām) konstrukcijā ir paredzēti speciāli iemērīšanas punkti.

Modernas robotu vadības sistēmas ļauj noteikt koordinātu sistēmas ar speciālu programmatūru, ja nav pieejama speciāla mēraparatūra. Izmantojot lietotāja ceļvedi, operatoram jāvada jau montēts instru-

ments pa jaunās koordinātu sistēmas asīm. Izmantojot zināmo robotu kinemātikas modeli, vadības sistēma automātiski nosaka jauno bāzes koordinātu sistēmu.

Zināšanu paškontrolē

1. Skaidrot galvenās atšķirības starp dažādām kustību komandām!
2. Kā atšķirtas *relatīvās* kustību komandas no *absolūtajām* kustību komandām?
3. Kādi iestatījumi nosaka robota kustības *trajektoriju*, un kādi nosaka kustības *profilu*?
4. Ilustrēt B kategorijas kustību plānošanas problēmas piemēru!
5. Pēc savas izvēles nosaukt piecas programmas vadības komandas!
6. Kas ir laidenā punktu pāreja? Kādas ir tās priekšrocības un trūkumi?
7. Ilustrēt *PTP* kustības profila septiņas fāzes!
8. Kādēļ praksē industriālo robotu vadībā nelieto *minimālā laika trajektorijas*?
9. Izskaidrot robotu asu sinhronizācijas tipus kustību plānošanā!
10. Kad industriālais robots var sasniegt nestabilu stāvokli, un kā noteikt šādus stāvokļus?
11. Skaidrot industriālā robota *atkārtojamību* un *absolūto precizitāti*! Kā to mēra?
12. Kādi pasākumi jāveic jau uzstādītā robotu šūnā, lai sasniegtu pēc iespējas precīzāku robota darba izpildi?

5. | ROBOTIZĒTAS RAŽOŠANAS IEKĀRTAS PLĀNOŠANA

Šajā nodaļā skaidrota industriālā robota loma automatizētā ražošanā. Kā galvenā vadlīnija izvēlēta ražošanas iekārtas drošība, kas piemērojama visos automatizācijas risinājumos. Dažādos starptautiskajos standartos lietots vispārīgs apzīmējums *mašīna*, kas ietver gan atsevišķus industriālos robotus, gan robotizētas ražošanas iekārtas, gan arī citas mehāniskas ierīces. Drošums un drošuma noteikšanas metodika skaidrota 5.2. nodaļā, kur citējot standartus nereti izmantots vispārīgais jēdziens *mašīna*. Tas, kā robota sistēma iekļaujas ražošanas automatizācijas procesos, skaidrots 5.1. nodaļā, iekļaujot drošuma analīzi robotizētas ražošanas iekārtas sadarbībai ar cilvēku.

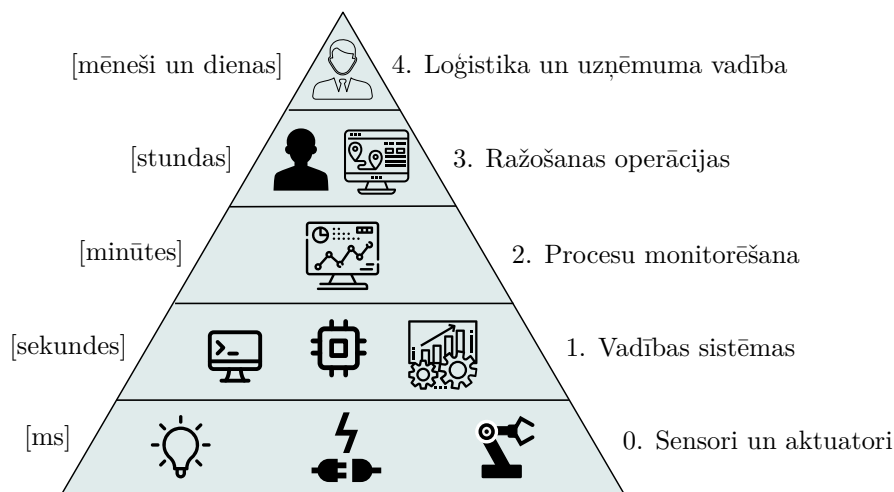
5.1. Robotu integrācija ražošanas procesā

Tālāk sniegts ieskats par industriālā robota iederību automatizētā ražotnē (skat. 5.1.1. nodaļu) un aplūkoti pirmie soļi robotizētas iekārtas plānošanā, montāžā un verifikācijā (skat. 5.1.2. nodaļu). Ieskats digitālajā ražošanas plānošanā sniegts 5.1.3. nodaļā. Savukārt darba telpas koplietošana ar cilvēkiem apskatīta 5.1.4. nodaļā.

5.1.1. Automatizācijas piramīda

Automatizētas ražošanas iekārtu parasti realizē pēc vadības kontroles piramīdas shēmas. 5.1. attēlā parādīta vairāku līmeņu automatizācijas piramīda, kāda sastopama apjomīgu ražošanas iekārtu uzbūvē.

Tā sastāv no pieciem līmeņiem, kas numurēti no 0 līdz 4. Zemākais jeb 0. līmenis apzīmē fiziskos komponentus, kas ietver devējus, elektriskās mašīnas, dažādas mehāniskās ietaises un arī robota manipulatoru.



5.1. attēls. Ražošanas automatizācijas piramīda.

1. līmenī atrodas atsevišķu iekārtu vadības sistēmas, programmējamie loģiskie kontrolleri (*PLC*), *PID* algoritmi (angļu val. *proportional integral derivative*), signālu apstrādes ierīces, invertori un jaudas pārveidotāji, ieejas-izejas (*IO*) moduļi. *PID* kontrole parasti ir integrēta kādā no *PLC* un notur uzdoto vērtību kādam no 0. līmeņa aktuatoriem (piemēram, elektriskās mašīnas griešanās ātrumu). 2. līmenī ietilpst augstāka mēroga iekārtu vadība robota šūnā vai robotu līnijā. Tās ir *SCADA* sistēmas, monitorēšanas ierīces, vadības pultis un arī robotu vadības sistēma. *SCADA* ir saīsinājums no **industriālo procesu kontroles un attēlošanas sistēmas** (angļu val. *supervisory control and data acquisition*) un pēc būtības ir kombinācija no individuālām iekārtām ar centralizētu pieeju. Ar *SCADA* sistēmas palīdzību tiek vadīti dažādi ražošanas procesi, ne tikai viens komponents (piedzīņa, robots). **Lietotāja saskarne** (angļu val. *HMI – Human-Machine Interface*) ir būtiska 2. līmeņa sastāvdaļa, lai operatoram sniegtu pārskatu par ražošanas iekārtas stāvokli. Tā kā parasti robotu vadības

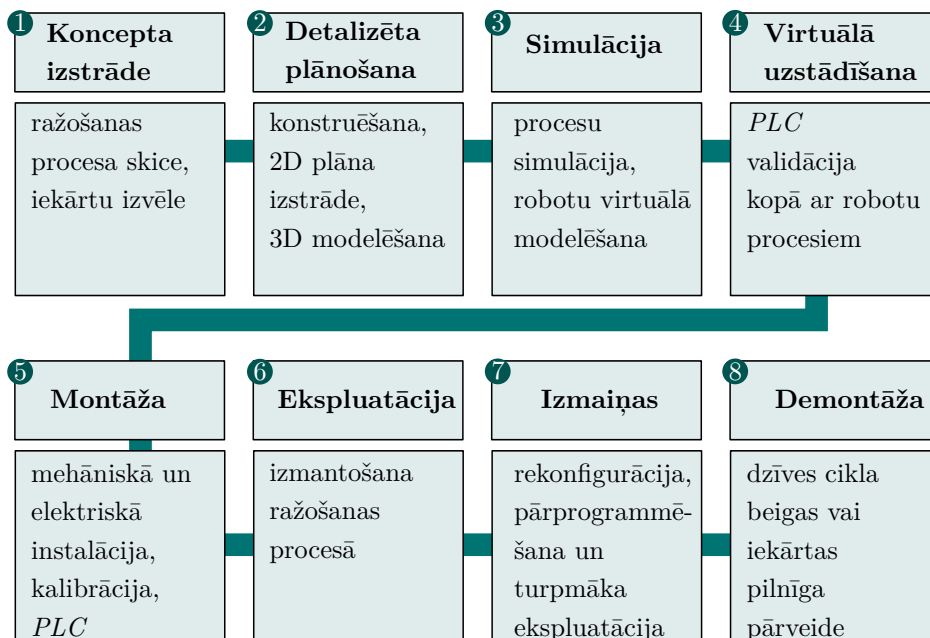
sistēma ir pieejama kā viens noslēgts elements, kurā integrēta gan piedziņas sistēma, gan visa robota vadības sistēma, pults u. c., tad tās funkcijas atrodas gan 1., gan 2. līmenī. Vairāku robotu ražošanas šūnā robots pēc automatizācijas hierarhijas vienmēr atrodas zem šūnas *PLC*.

Ražošanas operācijas un plānošana noris 3. līmenī, kas sniedz pilnīgu ieskatu ražošanas procesā no izejmateriāliem līdz gatavam produktam. Šajā līmenī novēro, vai uzdotais ražošanas apjoms tiek sasniegts un kādi pasākumi jāveic, lai to sasniegtu. Visas ražotnes darba organizācija noris 4. līmenī, kas iesaista jau citas uzņēmumu daļas – loģistiku, iepirkumu daļu, uzņēmuma vadību u. c. Šeit tiek pieņemti vispārīgi lēmumi, kāds produkts, kad un kādā apjomā tiks ražots. Abos augstākajos līmeņos lēmumu pieņemšanā parasti ir iesaistīti cilvēki un automatizācija ir ierobežota.

Ļoti mazām ražošanas iekārtām 1. un 2. līmenis var būt kopīgs, bet mazām organizācijām 3. un 4. līmenis var būt grūti atsevišķi izdalāms. Katru līmeni var sasaistīt ar aptuvenu laika sprīdi, kādā no jauna noris darba uzdevumu plānošana vai automatizācijas komandu aprēķins. Sensoru un aktuatoru līmenī komandas tiek izpildītas un signālu dati tiek ievākti milisekundēs vai pat mikrosekundēs. Industriālo automatizācijas komunikāciju sistēmas strādā ar t. s. **cikla laiku** 20–100 ms. Tas ir laiks, pēc kura katra tīkla iekārta no jauna saņems komandu vai nosūta datu paketi *PLC*. Parasti 0.–2. līmenis ir lokālas sistēmas. 3. un 4. līmenis visbiežāk realizēti kā IT aplikācijas un atrodas datu centros, nereti arī ārpus ražotnes vai uzņēmuma robežām (t. s. mākonī).

5.1.2. Robotu sistēmas plānošana un uzstādīšana

Robotu sistēmas reti izmanto izolēti. Gandrīz vienmēr robotu sistēma ir daļa no lielākas ražošanas iekārtas. Apjomīgas ražošanas iekārtas dzīves cikls vienkāršotā skatījumā ietver astoņus posmus, kas uzskaitīti 5.2. attēlā. Par apjomīgu iekārtu šajā kontekstā var dēvēt iekārtu, kurā izmantoti četri vai vairāk industriālie roboti.



5.2. attēls. Ražošanas iekārtas – robotizētas ražošanas līnijas vai robotu šūnas – dzīves cikls.

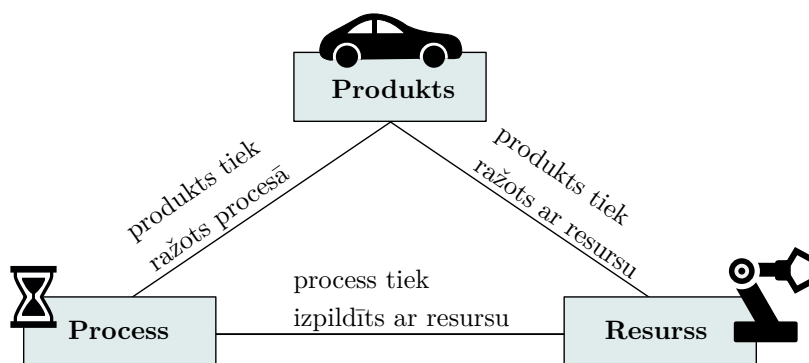
► Ražošanas koncepta izstrāde

Pirmais posms ir ražošanas iekārtas koncepta izstrāde, kurā ieski- cē ražošanas procesu, izvēlas galvenās tehnoloģijas un izsver tehniskās alternatīvas. Kā ieejas informācija šeit nepieciešamas būtiskākās vadlī- nijas – ražojamā detaļa un produkcijas apjoms. Lēmumiem šajā posmā ir vislielākā ietekme uz gatavās ražošanas iekārtas uzbūvi, piemēram, cik robotu tiks izmantoti, kāda izejmateriālu padeves sistēma tiks lie- tota un kāds būs atsevišķu ražošanas staciju saķēdējums.

Augsti automatizētās liela mēroga rūpnīcās izmanto ražošanas plā- nošanas metodiku **PPR** – **produkts, process, resurss**. Nosaukums ietver trīs komponentus.

- **Produkts (kas?)** apzīmē uzdoto uzdevumu – tas veido sākuma informāciju un realitātē ir ražojamā detaļa jeb produkts. Bieži mēdz būt vairākas detaļas, ko apstrādā vienā darba uzdevumā.

- **Resurss** (ar ko?) ir ražošanas iekārtas komponents, kas piedalās detaļas ražošanas solī. Resurss var būt robots, konveijers, instruments, utt.
- **Process** (kā?) ir plānošanas elements, kas veido darba uzdevuma būtību un loģiski saista abus iepriekšējos. Tas ir kā darbības vārds teikumā. Process apzīmē konkrētu darbību ražošanas procesā, piemēram, pārvietot, metināt, līmēt utt.



5.3. attēls. Produkts, process un resurss automatizētas ražošanas plānošanā.

5.3. attēlā ilustrēta visu trīs elementu savstarpējā saistība. Plānošanu veic, izmantojot speciālu programmatūru, kas savieno noteiktus ražošanas soļus ar noteiktiem resursiem un detaļām loģiskā un hronoloģiskā kārtībā. Ja procesiem ir noteikts noteikts darba izpildes ilgums, tad iespējams noteikt arī kopējo ražošanas ilgumu. Plānošanas posma rezultāts iekļauj:

- secinājumu, vai ražošanas process ir realizējams;
- sarakstu ar galvenajām nepieciešamajām ražošanas iekārtām;
- aptuvenu ražošanas ilgumu vai šūnas takts laiku;
- pārbaudi, vai visi nepieciešamie ražošanas soļi ir iekļauti;
- pārbaudi, cik efektīvi tiek izmantots katrs resurss.

► Detalizētā plānošana

Kad ražošanas koncepts ir apstiprināts, no piegādātājiem ir jāiegūst 3D modeļi vai jākonstruē tie no jauna. 3D modelis nepieciešams katram robotu šūnas komponentam, kas atrodas robotu darba telpā. Tas ietver darbgaldus, robotu satvērējierīces, palīgiekārtas, ēkas būvelementus un citus objektus. Robota šūnas vai līnijas konstruēšana notiek, izvietojot gatavos modeļus 3D virtuālajā telpā, šādi iegūstot pilnīgu priekšstatu par iespējamām aprūtinājumiem, piemēram, nepietiekamu telpu robota un tā instrumenta kustībām vai tieši otrādi – komponenti atrodas pārāk tālu viens no otra. Ja organizatoriski iespējams, tad šajā posmā pieņem lēmumu par to, kurus manipulatoru tipus izmantot.

► Robotu šūnas simulācija

Pilnvērtīga industriālo robotu simulācija iespējama tikai tad, ja viss šūnas 3D modelis un arī pats ražojamais produkts/detaļa ir pieejami digitālā formā. Simulācijas, ko sauc arī par *CAR* (angļu val. *computer aided robotics*), uzdevumi ir:

- sastādīt gatavas robotu programmas;
- sastādīt robotu kustību elementus;
- pārbaudīt, vai uzdevuma izpildē ir izslēgtas jebkāda veida sadursmes;
- pārbaudīt, vai vēlamais darba izpildes laiks ir sasniegts.

Tieši šajā posmā programmē katra robota kustības, kas ļoti tuvu atbilst vēlāk realizētajām. Iespējamās mehāniskās sadursmes ietver:

- robota instrumenta sadursmes ar apkārtnes objektiem, piemēram, darbgaldiem, grīdu/griestiem;
- robota instrumenta sadursmes ar manipulatora korpusu;
- vairāku robotu vai to instrumentu savstarpējās sadursmes.

Sadursmes izslēdz, simulācijā iestatot instrumenta kustību trajektorijas un programmas algoritmu tā, lai sadursmes tiktu izslēgtas. Simulāciju parasti veic visas šūnas ražošanas procesam, kurā iekļauts ir arī ražojamais produkts, bet industriālā robota manipulators ir viens no

vairākiem simulācijas modeļa elementiem. Vairāk par robotu šūnas simulāciju skatāms 5.1.3. nodaļā.

► Virtuālā uzstādīšana

Simulācijai ir mehāniskais raksturs, t. i., tās uzdevums ir pārbaudīt mehāniskas kustības un izslēgt iespējamās sadursmes. Datu komunikācija starp *PLC* un zem *PLC* hierarhiski pakārtotiem komponentiem pārbaudīta t. s. **virtuālajā uzstādīšanā** (angļu val. *virtual commissioning*). Arī industriālais robots ir hierarhiski pakārtots *PLC*. Mērķis šajā posmā ir sastādīt gatavas *PLC* programmas virtuālajā vidē, lai taupītu laiku, iekārtu pieņemot ekspluatācijā. 4. posms vairāk ir piemērots ražošanas iekārtām ar desmit vai vairāk robotiem, vai ļoti sarežģītu ražošanas procesu. Tā izpildei nepieciešama speciāla digitālā programmatūra, kura ietver katra komponenta nevis konstruktīvo, bet **tehniskās komunikācijas un uzvedības modeli**. Sīkāk par simulāciju tipiem skatāms 5.1.3. nodaļā.

► Montāža

Ar montāžu uz vietas (5. posms) saprot visu mehāniskās un elektriskās instalācijas darbu kopumu, kā arī iekārtu konfigurāciju, robotu un *PLC* programmēšanu. Ja jau īstenots 3. un 4. posms, tad vairumā gadījumu iepriekš jau sagatavoto programmatūru iespējams dublēt uz robotiem un *PLC*. Mehāniskās uzbūves tolerances dēļ manipulatoru pozīciju telpā vienmēr nosaka ļoti precīzi. Ieteicamie soļi robota sistēmas pieņemšanai ekspluatācijā doti *ISO 10218-2*, un tie uzskaitīti 5.1. tabulā. Robota sistēmas funkcionālā pārbaude iekļauj komunikācijas ar *PLC* pārbaudi, perifērijas funkcionalitāti, drošības funkciju testus, aplikāciju testus. Robota šūnas verifikācija ietver vispārīgās funkcionalitātes pārbaudi, ilgstošu novērošanu darbības laikā, mērījumus, aplikācijai specifisku riska novērtējumu un dokumentācijas pārbaudi.

► Ražošanas iekārtas ekspluatācija

Visilgākais robotu dzīves posms ir ekspluatācijas fāze. Industriālās ražošanas iekārtas izmanto atšķirīgi ilgi, jo tas atkarīgs no nozares

5.1. tabula. Robotu sistēmas pirmreizējās ekspluatācijas soļi [1] (pēc *ISO 10218-2*)

1. Pārbaudīt, vai pirms ieslēgšanas pilnīgi veikta robota sistēmas instalācija:

- | | |
|-----|--|
| 1.1 | mehāniskā montāža (uz podesta, grīdas vai griestiem); |
| 1.2 | elektriskā montāža (enerģijas padeve, piedziņas sistēma); |
| 1.3 | palīgiekārtu pieslēgumi (tīkla iekārtas); |
| 1.4 | komunikācijas pieslēgumi (<i>PLC, IO</i> iekārtas, <i>ProfiNet, ProfiBus</i> vai cits); |
| 1.5 | perifērijas iekārtu pieslēgumi (instrumenti, avārijaptures ierīces); |
| 1.6 | darba telpas ierobežojošas ietaises (žogs). |

2. Instruēt personālu/operatoru. Visām personām atstāt robota darba zonu pirms piedziņas sistēmas ieslēgšanas. Ieslēgt robota sistēmu.

3. Pēc ieslēgšanas pārbaudīt:

- | | |
|-----|---|
| 3.1 | avārijaptures darbību; |
| 3.2 | katras ass kustību – vai tā kustas, kā paredzēts; |
| 3.3 | robota atbildi uz būtiskākajām vadības sistēmas komandām; |
| 3.4 | vizuālo un trokšņu novērtējumu; |
| 3.5 | drošības zonu darbību; |
| 3.6 | ātruma ierobežošanu rokas režīmā. |

un produkta dzīves cikla. Piemēram, autobūvē robotizētas ražošanas iekārtas ekspluatācijas ilgums parasti ir septiņi gadi. Pēc tam notiek produktu maiņa, kam nepieciešama ražošanas iekārtas pārbūve un tās konstruēšana pilnīgi no jauna, taču nereti izmantojot jau lietotas iekārtas. Atsevišķu iekārtu dzīves cikls sasniedz pat 25 gadus, taču šajos gadījumos pastāv risks, ka tik senām iekārtām nepieciešamības gadījumā var nebūt pieejamas rezerves daļas.

► **Izmaiņas**

Ekspluatācijas laikā var rasties nepieciešamība pārbūvēt robotizētās ražošanas iekārtu vai pielāgot robotu programmas. Visbiežākie pārbūves iemesli iekļauj:

- darba soļu un procesu optimizāciju;
- ražojamās detaļas vai produkta izmaiņas;
- jauna produkta ražošanu;
- produkta apstrādes laika samazināšanu.

5.2. attēlā ilustrētais 7. posms nav obligāts un ir atkarīgs vienīgi no produkta un ražotnes specifikas. Neliela robotu programmas pielāgošana bieži var iztikt bez iepriekšējas simulācijas, jo operatoram uzskatāmi pārredzama visa ražošanas šūna.

► Demontāža

Kā pēdējo – 8. posmu – var minēt iekārtas demontāžu tās dzīves cikla beigās. Robotu manipulatorus novieto transportam un loģistikai paredzētās pozās.

Mazām ražošanas iekārtām, kurās robotu skaits ir no viens līdz četri, var apvienot visus simulatīvos/modelēšanas posmus (2–4) vai pat pilnībā tos izlaist. Atkarībā no uzdevuma sarežģītības visu robotu šūnas programmēšanu var veikt bez iepriekšējas virtuālas verifikācijas. Augstvērtīgas modelēšanas un simulācijas programmatūras ir salīdzinoši dārgas, lai to izmantošana atmaksātos mazu iekārtu plānošanai vai retai izmantošanai. Šādā gadījumā gan būtiski pieaug plānošanas riski. Jāapzinās, cik liels ir organizatoriskais darba apjoms, ja vēlu secināts, ka jāpasūta cits industriālais robots pārāk mazas manipulatora darba telpas dēļ.

5.1.3. Digitālā modelēšana un simulācija

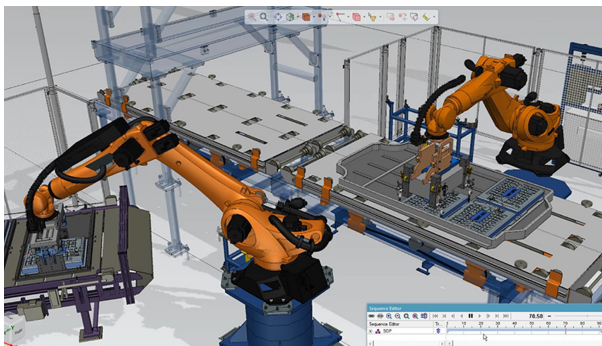
Apjomīgu ražošanas procesu plānošanai parasti izmanto digitālās plānošanas programmatūru, kas atbilst 3. posmam 5.2. attēlā. 3D modelēšanas programmatūras piedāvā reālistisku attēlošanu kinemātiskām ķēdēm, darba instrumentiem, perifērijas iekārtām un apstrādājamaam objektam. Izmantojot šādu programmatūru, robotu programmē ar *teach-in* metodi virtuālajā vidē. Dažas programmatūras piedāvā daļēji automatizētu trajektorijas atrašanu ražošanas darba uzdevumiem. Kaut arī pētniecība šajā virzienā ir tikpat sena kā pati robotu vēsture, praksē šis paņēmiens joprojām neieņem būtisku lomu.

5.2. tabula. *CAR* modelēšanas programmatūra, izvēlēti produkti

| Nosaukums | Izstrādātājs | Komerציāls [€], atvērtā koda [o] |
|--------------------------------|--|-------------------------------------|
| <i>Process Simulate</i> | <i>Siemens</i> | € |
| <i>3DEXPERIENCE</i> | <i>Dassault Systèmes</i> | € |
| <i>KUKA.Sim</i> | <i>KUKA</i> | € |
| <i>RobotStudio</i> | <i>ABB</i> | € |
| <i>FastSuite</i> | <i>Cenit</i> | € |
| <i>Visual Components</i> | <i>Visual Components</i> | € |
| <i>CoppeliaSim</i> | <i>Coppelia Robotics</i> | € |
| <i>Robotics System Toolbox</i> | <i>MathWorks</i> | € |
| <i>RoboDK</i> | <i>RoboDK</i> | € |
| <i>Webots</i> | <i>Cyberbotics</i> | o |
| <i>Gazebo</i> | <i>Open Source Robotics Foundation</i> | o |

Izšķir **neatkarīgu** un konkrēta **robotu ražotājam specifisku** programmatūru, no kurām pēdējā parasti var simulēt tikai šī ražotāja robotu modeļus. Neatkarīgā *CAR* programmatūrā kustība un programmas vadības komandas uzdod universālā iekšējā formātā. Virtuāli sastādītā uzdevuma pārvešanu uz reālu robotu sauc par **lejupielādi**. Tikai lejupielādes laikā tiek ģenerēts kods robotu ražotājam atbilstošā valodā (skat. 5.2. tab.). Ja *CAR* programmatūru piedāvā pats robotu ražotājs, tad parasti konvertācija lejupielādes laikā nav nepieciešama, jo modelēšanas laikā jau izmanto oriģinālo robotu valodu. Šādi var izslēgt kļūdas, kas saistītas ar programmas koda konvertāciju un interpretāciju, taču simulācija ir ierobežota izmantošanai tikai ar viena tipa robotiem. 5.4. attēlā sniegts robotu šūnas modelēšanas piemērs [55].

Robotu simulācijā izšķir **uz notikumiem** vai **laika bāzētu** simulāciju. Vienkāršāka, laika bāzēta simulācija sastāv no noteiktā secībā

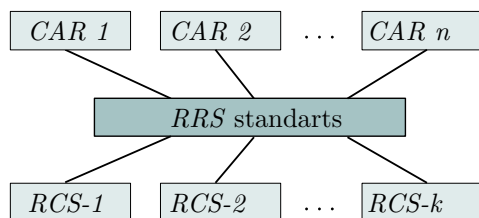


5.4. attēls. Robotu šūnas simulācija *Process Simulate* [55].

sakārtotām komandām, kurā katrs solis, piemēram, kustības bloks, sākas iepriekš noteiktā momentā. Uz notikumiem bāzēta simulācija ietver nosacījumus, pēc kuru izpildes ierosina nākamo simulācijas notikumu. Šādas simulācijas izveide ir apjomīgāka, taču reālu ražošanas iekārtu attēlo tuvāk realitātei.

CAR programmatūra simulācijā kustību komandām izmanto universālu un nereti vienkāršotu trajektorijas plānošanu (skat. arī 4.2. nodaļu). Tomēr trajektorijas plānošanas metodes starp dažādiem robotu ražotājiem atšķiras, kaut arī kustību komandas pēc uzbūves ir vienādas. Rezultātā gan izplānotais kustības ceļš, gan izpildes laiks atšķiras. Lai paaugstinātu simulācijas precizitāti, izstrādāts starptautisks *de facto* standarts **RRS-1** (angļu val. *realistic robot simulation*) [56]. Robotu ražotājs izstrādā programmatūru jeb t. s. **RCS moduli** (angļu val. *robot control simulation*), kurā kustību interpolāciju aprēķina gandrīz identiski, kā tas tiek darīts reālā robota vadības sistēmā. *CAR* programmatūrai nav pieejama informācija par trajektorijas plānošanas algoritmu, taču tā var izmantot *RCS* moduli, tādējādi iegūstot daudz augstākas precizitātes simulāciju.

RRS turpinājums – standarts **RRS-2** – tika izveidots, lai definētu vienotu saskarni ar **VRC moduli** (angļu val. *virtual robot controller*), kuru, līdzīgi kā *RCS* moduli, varētu izmantot *CAR* programmatūrā. *VRC* modulis bez kustību komandu simulācijas spēj modelēt arī visu robota vadības sistēmu, ieskaitot signālu apmaiņu, lietotāja saskarni,



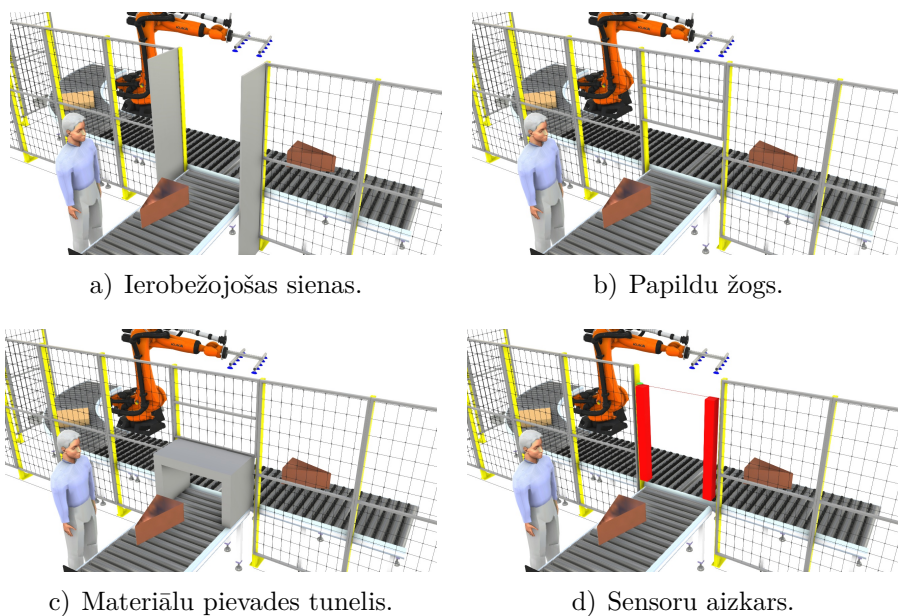
5.5. attēls. *RCS* (*robot control simulation*) moduļa izmantošana *CAR* (*computer aided robotics*) programmas struktūrā [56].

datņu struktūru u. c. Turklāt *RRS-2* standartā papildus ieviests **virtuālais simulācijas laiks**, kāds nav *RRS-1*. Virtuālais simulācijas laiks ļauj paātrināt vai palēnināt simulāciju.

Taču *RRS-2* standarts nav guvis plašu popularitāti augstās sarežģītības dēļ. Atšķirības starp robotu ražotājiem līdz šim ir bijušas pārāk lielas, lai praksē ieviestu šo standartu. Turklāt, lai pilnīgi simulētu robota vadības sistēmas ārējos signālus visas ražošanas iekārtas kontekstā, tikpat detalizēti ir jāsimulē arī saistītās ierīces. Šis uzdevums galvenokārt tiek realizēts iekārtas virtuālajā uzstādīšanā, kurā simulēta visa ražošanas iekārta (skat. 4. posmu 5.2. att.). Virtuālā uzstādīšana iekļauj gan kinemātiku (roboti un perifērija), gan komunikāciju un ražošanas iekārtas *PLC* programmu. *PLC* programmas un datu komunikācijas pārbaude nav daļa no tipiskas robotu simulācijas, tādēļ šim nolūkam izmanto citu programmatūru. Dažas no 5.2. tabulā uzskaitītajām *CAR* programmatūrām, var papildināt ar attiecīgiem paplašinājumiem.

5.1.4. Cilvēka un robota sadarbība

Viens no biežākajiem cilvēka un robota kopīgās darba telpas punktiem ir materiālu padeves punkts. Katrai ražošanas iekārtai neatkarīgi no automatizācijas lieluma būs punkts, kurā tiek padotas apstrādājamās lietas – materiāli, detaļu sagataves vai izejvielas (skrūves, naglas u. c.). Tā ir vieta, kur darbinieks būs tuvu robotam vai pat atradīsies kopējā darba telpā.



5.6. attēls. Cilvēka un robota darba telpas norobežošana.

5.6. attēlā pēc *ISO 10218-2* parauga ilustratīvi sniegti četri dažādi materiālu padeves zonas aizsardzības veidi. Piemērā materiāls tiek padots uz T tipa konveijera. Nožogojumā atrodas industriālā robota šūna. Drošības sistēmas uzdevums ir ierobežot riskus – nejaušu roku ievietošanu robota šūnā, iekāpšanu vai pārliekšanos pāri žogam (apzinātu vai nejaušu). 5.6. (a) attēlā izmantotas sienas, lai distancētu jebkādu cilvēka klātbūtni darba telpā. 5.6. (b) attēlā materiālu piegādes lūka samazināta līdz materiālu izmēram, izmantojot papildu nožogojumu. Šādā veidā tai vairs nevar izkāpt cauri, taču robota darba telpu iespējams aizsniegt ar rokām. 5.6. (c) attēlā samazinātā lūka papildināta ar tuneļa konstrukciju, lai papildus apgrūtinātu aizsniedzamību. 5.6. (d) attēlā nav izmantotas mehāniskas konstrukcijas, bet gan digitāls sensoru aizkars, kas, detektējot šķērsli, nosūta apstādinašanas signālu. Izejmateriālu piegādes momentā pa konveijera sistēmu attiecīgā augstumā un īslaicīgi sensoru var deaktivēt.

Pēc *ISO 10218-2* kopējām robota un cilvēka darba telpām ir īpašas

prasības [1]:

- cilvēka un robota kopējā darba telpa ir skaidri vizuāli atpazīstama;
- kopējā darba telpa ir jāuzrauga ar drošības komponentiem (t. i., *safety-rated* – ar noteiktu *PL* vai *SIL*, skat. 5.2.3. nodaļu);
- ir jāiestata un droši jāuzrauga robota asu robežas;
- manipulatora korpusa vai tā instrumenta attālums līdz operatoram nedrīkst būt mazāks par 500 mm, lai izslēgtu ķermeņa iespiešanas apdraudējumu starp robotu un citiem objektiem;
- ja distanci virs 500 mm ieturēt nav iespējams, ir jāparedz papildu drošības ietaises.

Industriālo robotu paveids, kas īpaši pielāgots sadarbībai ar cilvēku, ir koboti, ko apraksta *ISO TS 15066* [57]. Kooperējošie roboti ir aprīkoti ar spēka momentu sensoriem, kas ļauj precīzi novērtēt sadurmes ar citiem ķermeņiem smaguma pakāpi. Tas ļauj robotam aktīvi strādāt kopējā darba telpā ar cilvēku. Metodika riska novērtējumam ir nemainīga kā jebkurai citai robotizētai iekārtai, taču manipulatora papildu sensitivitāte palīdz ierobežot riskus.

Asu momentu sensori vienlaicīgi ļauj īstenot jauna tipa aplikācijas – robota manipulators ir daudz jutīgāks un spēj labāk pildīt īpašu rūpību un uzmanību prasošus montāžas uzdevumus, ar kuriem netiktu galā parastie industriālie roboti. To programmēšanu iespējams papildināt ar kustību atkārtošanos metodi (skat. 2.1. att. 2.3.2. nodaļā), robotam haptiski parādot veicamo ceļu.

5.2. Automatizētas iekārtas drošums

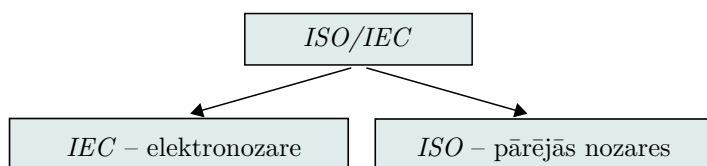
Iepriekš apskatīti robotu vadības sistēmas drošības elementi (skat. 2.3.3. nodaļu). Lai robotizētu ražošanas iekārtu pieņemtu ekspluatācijā, tai jāatbilst prasībām, kas uzskaitītas vairākos standartos. Diemžēl neeksistē viens kopējs standarts, kurā būtu ietvertas visas nepieciešamās drošības prasības, taču tālāk analizēti būtiskākie standarti. Standartu vispārīgā organizācija skaidrota 5.2.1. nodaļā. Robotizētu ražo-

šanas iekārtu risku analīze sniegta 5.2.2. nodaļā. Funkcionāla drošība robotizētas ražošanas kontekstā apskatīta 5.2.3. nodaļā, savukārt robotu drošības prasības pēc *ISO* standartiem analizētas 5.2.4. nodaļā.

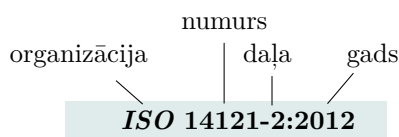
5.2.1. Drošības standarti un to iedalījums

Tehniska rakstura starptautiskos standartus galvenokārt izstrādā divās organizācijās: Starptautiskajā standartizācijas organizācijā (angļu val. *International Organization for Standardization*, saīsinājumā – *ISO*) un Starptautiskajā elektrotehnikas komisijā (angļu val. *International Electrotechnical Commission*, saīsinājumā – *IEC*). Šo organizāciju standartus valstis parasti adaptē nacionālajos normatīvajos aktos vai standartos. Latvijā tos adaptē, nosaukumam pievienojot "LVS" [58]. *ISO* aptver visas jomas, izņemot elektronikas un elektrotehnikas nozares, ko pārstāv *IEC*.

Standarta apzīmējumu pieraksta ar tā izdevējorganizācijas saīsinājumu un standarta numuru. Ja standartam ir vairākas daļas, tās atdala ar defisi "-", aiz tās rakstot daļas kārtas numuru. Ja eksistē hronoloģiski atjaunotas versijas, tad ar kolu beigās atdala izdošanas gadu. Papildus standartiem pastāv arī tehniskās specifikācijas, kuras apzīmē ar *ISO-TS* (angļu val. *technical specifications*).



5.7. attēls. Standartu iedalījums.

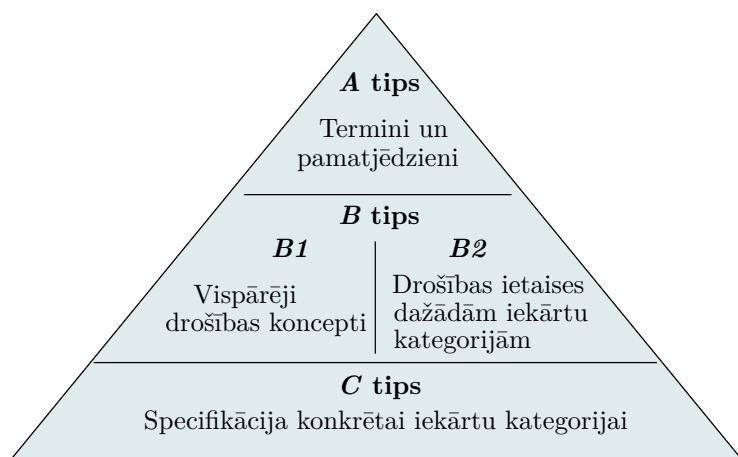


5.8. attēls. Standarta nosaukuma uzbūve.

ISO 12100:2010 definēti dažādi ar drošību saistīti termini, un standarts sniedz detalizētas norādes iekārtas riska novērtējumam. Tas balstīts uz vispārēju pieredzi un zināšanām iekārtu izstrādē, lai atpazītu riskus un novērstu negadījumus tās ekspluatācijā visā dzīves ciklā [59]. Šeit ieviestas arī trīs hierarhiskas standartu grupas specifiskākām drošības prasībām – *A*, *B* un *C*. Pirmā jeb *A* grupa apraksta **pamata drošības prasības** un vispārīgus mašīnas droša dizaina noteikumus, precizē pamatjēdzienus un terminoloģiju. Šai kategorijai pieder arī *ISO 12100*. *B* grupas standarti apraksta **vispārējas drošības prasības**, kuras tiek organizētas pēc

- **noteikta drošības aspekta** jeb *B1* tipa (piemēram, droša distance no iekārtas, darbgalda virsmas temperatūra);
- **drošības ietaises** jeb *B2* tipa (piemēram, dubulta kontrole, ārkārtas gadījuma poga).

B grupas standartus lieto dažāda veida iekārtām. Savukārt *C* grupa ir visšaurākā kategorija, un tās standartus lieto **specifiskai mašīnu kategorijai**, piemēram, tikai industriālajiem robotiem, tikai konveijeriem vai tikai presēm. Ja noteikumi atšķiras, augstāka prioritāte ir šaurākas specializācijas standartam (*C*).



5.9. attēls. Iekārtu drošības standartu tipu pārskats.

5.3. tabulā sniegti standarti, kas jāpiemēro ražošanas iekārtām, tai

skaitā aplikācijām, kurās izmanto industriālos robotus. Tabulā uzskaitītie *C* grupas standarti iekļauj tikai robotizētām iekārtām specifiskus dokumentus.

5.3. tabula. Ar industriālo robotu drošību saistīti standarti

| Tips | Numurs | Nosaukums |
|-------------|-------------------------|---|
| - | <i>2006/42/EG</i> | Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva par mašīnām |
| A | <i>ISO 12100:2010</i> | Mašīnu drošums. Vispārīgie projektēšanas principi. Risku novērtēšana un risku samazināšana <i>Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction</i> |
| | <i>ISO 14121-2:2012</i> | Mašīnu drošums. Riska novērtējums. 2. daļa: praktiskas vadlīnijas un metožu piemēri <i>Safety of machinery – Risk assessment – Part 2: Practical guidance and examples of methods</i> |
| B1 | <i>ISO 13849-1:2015</i> | Mašīnu drošums. Ar drošumu saistītās vadības sistēmu daļas – 1. daļa: Vispārīgie projektēšanas principi <i>Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design</i> |
| | <i>IEC 62061:2021</i> | Mašīnu drošība – Ar drošību saistīto elektrisko, elektronisko un programmējamo elektronisko vadības sistēmu funkcionālais drošums <i>Safety of machinery – Functional safety of safety-related control systems</i> |
| B2 | <i>IEC 60204-1:2016</i> | Mašīnu drošums – Mašīnu elektroaprīkojums – 1. daļa: Vispārīgās prasības <i>Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements</i> |
| | <i>IEC 61508:2010</i> | Elektrisko/elektronisko/programmējamo elektronisko sistēmu funkcionālais drošums <i>Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems</i> |

(Turpinājums nākamajā lapā)

5.3. tabulas turpinājums

| Tips | Numurs | Nosaukums |
|----------|--------------------------|---|
| | <i>ISO 13850:2015</i> | Mašīnu drošums. Avārijaptures ierīces. Konstruēšanas principi <i>Safety of machinery – Emergency stop function – Principles for design</i> |
| | <i>ISO 13851:2019</i> | Mašīnu drošums. Divu roku vadības ierīces. Projektēšanas un izvēles principi. <i>Safety Of Machinery – Two-Hand Control Devices – Principles For Design And Selection</i> |
| <i>C</i> | <i>ISO 10218-1:2011</i> | Roboti un robotu iekārtas. Drošuma prasības industriālajiem robotiem – 1. daļa: Roboti <i>Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots</i> |
| | <i>ISO 10218-2:2011</i> | Roboti un robotu iekārtas. Drošuma prasības industriālajiem robotiem – 2. daļa: Robotu sistēmas un integrācija <i>Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration</i> |
| | <i>ISO TS 15066:2016</i> | Roboti un robotu iekārtas. Kooperējošie roboti <i>Robots and robotic devices - Collaborative robots</i> |

Nākamajās nodaļās apskatīti un skaidroti visi 5.3. tabulā minētie standarti.

5.2.2. Iekārtas apdraudējuma riska novērtēšana

Ražošanas iekārtas izstrādātāja pienākums ir izstrādāt mašīnas **apdraudējumu un risku novērtējumu**. Apdraudējums ir kaut kas, kam ir potenciāls nodarīt kaitējumu. Risks ir iespējamība, ka apdraudējums patiešām nodarīs kaitējumu. Robotikas kontekstā apdraudējums var būt manipulatora sadursme ar cilvēku, kā rezultātā cilvēks gūst traumu. Šāda negadījuma risku var samazināt, uzstādot izturīgu metāla žogu vai sensoru aizkaru ap robota šūnu.

Apdraudējumu un riska novērtējums sniedz pārskatu, kādi riski pa-

5.4. tabula. Riska ierobežošana pēc piecu līmeņu kontroles hierarhijas [59]

| | Kategorija | Piemērs |
|----|-------------------------------|--|
| 1. | Drošs tehniskais dizains | Riska novēršana vai aizvietošana |
| 2. | Drošības ietaišu projektēšana | Iekārtas žogs, pastāvīgi aizsargi, kustīgi aizsargmehānismi, brīdinājuma gaismekļi vai sirēnas |
| 3. | Informācijas pasniegšana | Lietotāja instrukcija, brīdinājumi, iekārtas vadības lietotāja saskarne (<i>HMI</i>) |
| 4. | Administratīvie pasākumi | Lietotāju apmācības, uzraudzība, atslēga |
| 5. | Personīgie aizsarglīdzekļi | Aizsargbrilles, aizsargcimdi, ausu aizbāžņi |

stāv, kurus riskus var akceptēt un kuri riski ir jānovērš. Tas apraksta ražošanas iekārtas drošību, bet ne vispārējo darba drošību. Apdraudējumu analīzes metodika ir definēta *ISO 12100:2010* un *ISO 14121-2:2012*, no kuriem pēdējais satur iekārtu riska novērtējuma paraugu. Riska novērtējums iekļauj analīzi:

- kādus apdraudējumus robotizētas ražošanas iekārta var radīt cilvēkiem, dzīvniekiem vai videi;
- cik liels ir iespējamais kaitējums, ņemot vērā iespējamā kaitējuma smaguma pakāpi;
- cik augsta ir apdraudējuma iestāšanās iespējamība.

Riskiem, kas nav pieļaujami, balstoties uz normatīvajiem aktiem, standartiem vai viedokli, ir jāparedz pasākumi, kas šos riskus ierobežo. Pēc *ISO 12100* izšķir trīs veidus, kā ierobežot noteiktos iekārtas apdraudējumus un riskus. Uzņēmumos tos papildina ar vēl diviem, kas neattiecas uz pašu ražošanas iekārtu, bet gan uz personālu – ražošanas iekārtas lietotājiem. 5.4. tabulā sniegts pārskats par iekārtu risku novēršanas kategorijām. Ražošanas iekārtu projektēšanu primāri jātiecas īstenot atbilstoši pirmajai un otrajai kategorijai.

Apdraudējuma pilnīga novēršana vai riska izslēgšana ar ražošanas iekārtas tehnisko dizainu vienmēr ir labāks risinājums nekā projektēt aizsargmehānismus riska vai apdraudējuma samazināšanai. Ja tomēr aizsargmehānismi tiek ieviesti, ir jānovērtē to spēja risku mazināt

(skat. 5.2.3. nodaļu). Kā piemēru var analizēt robotizētu ražošanas iekārtu – industriālo robotu šūnu, kurā robots apstrādā kādu detaļu (skat. 5.11. att.).

- Pastāv **apdraudējums** cilvēkam savainoties neparedzētā sadursmē ar robota korpusu (piemērā vienkāršības pēc ignorēts darba instruments).
- Pastāv **1. risks**, ka persona atradīsies robota darba telpā, t. i., robota šūnā, kad robots strādā automātiskā režīmā.
- Pastāv **2. risks**, ka darbinieka rokas atradīsies robota darba telpā, kad robots strādā automātiskā režīmā, piemēram, ieliekot apstrādājamo detaļu.

1. kategorijas – riska pilnīga novēršana – pasākums būtu iekārtu konstruēt tā, ka kustīgu elementu ražošanas iekārtā nav – tātad nav iespējams gūt savainojumu, taču realitātē šāds risinājums visdrīzāk nespēs veikt pašu ražošanas uzdevumu. Ja tomēr iekārtā paredzēts izmantot kustīgas ietaises (robotu), to iespējams iežogot (2. kategorija – projektēti aizsargmehānismi). Robota mehānikas kustīgās daļas parasti ir krāsotas spilgtā brīdinājuma krāsā – dzeltens, oranžs vai sarkans (3. kategorija – informācija par apdraudējumu). Tehniskā personāla adekvāta instruktāža pieder 4. kategorijai – organizatoriskie pasākumi. Turklāt ražošanas telpā personāls drīkst atrasties tikai ar drošības apaviem (5. kategorija – cilvēka personiskie aizsarglīdzekļi).

Riska kontroli vairākkārt izvērtē atbilstoši 5.4. tabulā ietvertajām kategorijām, līdz visiem iepriekš noteiktajiem apdraudējumiem ir rasts risinājums, kas šo apdraudējumu novērš vai tā nodarīto kaitējumu un iestāšanās varbūtību samazina līdz minimumam. Mašīnas, kurām veikta risku analīze un riski ierobežoti, ir iespējams marķēt ar *CE* zīmi, kas ļauj to piedāvāt Eiropas Savienības tirgū saskaņā ar Eiropas Parlamenta direktīvu 2006/42/EG [3]. *CE* marķējumu produktiem piešķir paši ražotāji, tādējādi apliecinot, ka tas atbilst visām uz šo produktu attiecināmajām prasībām.

5.2.3. Funkcionālā drošība

Iepriekšējā nodaļā noteikti apdraudējuma riski. Ja pēc to novērtēšanas paredzēts projektēt drošības ietaises, kuru uzdevums ir samazināt šos riskus, joprojām paliek jautājums, cik lielā apmērā risks ir jāsamazina.

► **IEC 61508:2010** – elektronisko sistēmu funkcionālā drošība

Standarts *IEC 61508:2010* sniedz atbildi uz šo jautājumu – tas piedāvā vadlīnijas produktu izstrādē, kas nepieļauj nesamērīgus riskus iekārtu lietotājam vai videi. Standarts sniedz ieteikumus, kādi ar drošību saistīti aspekti mašīnu izstrādē ir jāparedz, kā arī kādas darbības ir jāveic izstrādātāja darba organizācijā un kā tās dokumentē. Tā ir standartu sērija elektriskām, elektroniskām un programmējamām sistēmām, kas izpilda kādu drošības funkciju mašīnā [60].

Drošības funkcijas nepieciešamas apdraudējuma risku samazināšanai, piemēram, novērst, ka pie atvērtiem vārtiem tiek darbināta robotu piedziņa. Minētajai drošības funkcijai nepieciešams vārtu sensors, programmas algoritma vadība un aktuators – robotu manipulators (skat. 5.11. att.). Vienmēr pastāv neliela varbūtība, ka drošības funkcijas izpildē var rasties kļūda un tā nestrādās, jo kļūda radusies kādā komponentā. Individuālo komponentu kļūdas varbūtību apraksta ar:

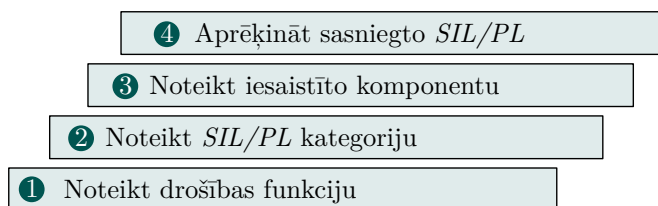
- PFH_D vai λ_D (angļu val. *probability of dangerous failure per hour*) – bīstamas kļūdas varbūtību stundā. To lieto automatizācijas iekārtām, kur drošības funkcija ir aktīva nepārtraukti;
- PF_D (angļu val. *probability of dangerous failure on demand*) – bīstamas kļūdas varbūtību brīdī, kad funkcija tiek izsaukta. To parasti lieto automatizācijas procesos, kur drošības funkcija tiek izsaukta reti.

Tiek pieņemts, ka ekonomiski nav iespējams izstrādāt un saražot produktu, kurš dzīves laikā strādās 100 % bez kļūdām, vai arī jebkuru kļūdu diagnosticēs un attiecīgi uz to reaģēs. Automatizācijā ar industriālajiem robotiem parasti izmanto kļūdas varbūtību stundā – λ_D , jo

drošības funkcijas tiek izpildītas nepārtraukti.

Kopā septiņās daļās standarts apraksta **funkcionālo drošību**. Tajā definē drošības prasības kategorijas *SIL1-SIL4* (angļu val. *safety integrity level*). Tās nosaka, cik lielā mērā drošības funkcijai jāspēj samazināt risku, turklāt *SIL1* – zema spēja, *SIL4* – ļoti augsta. Praksē parasti augstākā sastopamā kategorija bieži ir *SIL3*.

Analītisko procesu veic pēc 5.10. attēlā ilustrētās shēmas – pirmais solis ir noteikt, kas ir katra riska attiecīgā drošības funkcija. Pēc riska analīzes nosaka, kādā kategorijā funkciju ir jāīsteno, lai risks būtu pietiekami samazināts. Pēdējos soļos nosaka iesaistīto komponentu un to kopējo spēju sasniegt nepieciešamo drošības kategoriju.

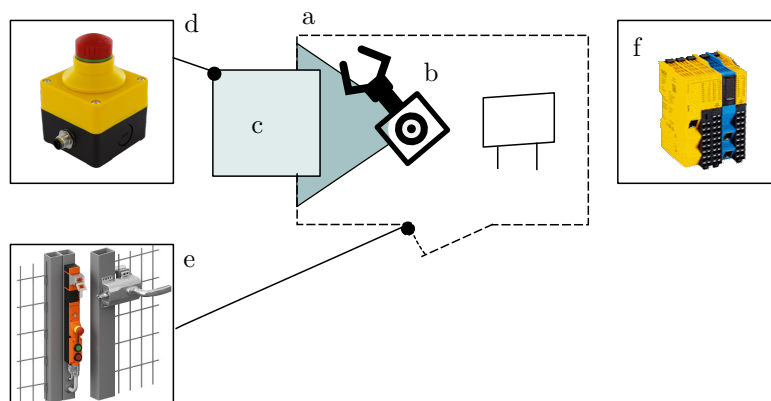


5.10. attēls. Drošības analīzes soļi.

Kā piemēru var analizēt 5.11. attēlā vienkāršotā veidā parādīto robota šūnu, kas sastāv no iežogota (a) industriālā robota (b), materiālu piegādes zonas ar sensoru paklāju (c) un avārijas apturēšanas slēdži (d), šūnas vārtiem ar devēju (e) un vadības sistēmas (f). Pirmais solis ir noteikt drošības funkcijas:

- robota apstādināšana pēc avārijas slēdža (d) nospiešanas;
- robota apstādināšana pēc vārtu atvēršanas (e) automātiskā darba režīmā;
- robota apstādināšana, ja materiāla piegādes zonā (c) atrodas gan robots, gan cilvēks.

Nozaru specifiskajos (*C* tipa) standartos – medicīnā, dzelzceļa tehnikā, autonomarē un citās jomās – funkcionālo drošību apraksta arī detalizētāk. Nepieciešamo *SIL* kategoriju nosaka pēc riska analīzes. Tālāk apskatīti divi standarti, kas sniedz divus dažādus veidus, kā ar



5.11. attēls. Robota šūnas uzbūve ar integrētiem drošības elementiem (attēli no [61], [62], [63]).

robotizētām ražošanas iekārtām veikt riska analīzi un noteikt nepieciešamo kategoriju.

► **IEC 62061:2021 – funkcionālā drošība pēc SIL**

Standarts *IEC 62061:2021* sniedz rekomendācijas tehniskajai uzbūvei ar drošību saistītām funkcijām ražošanas iekārtu vadības sistēmās [64]. Šis standarts papildina *IEC 61508:2010* visas daļas un piemērojams automatiskām iekārtām (tai skaitā robotizētām), ne tikai elektriskām, bet arī hidrauliskām un pneimatiskām, kas netiek pastāvīgi darbinātas ar rokas vadību. Dokumentā [64] katru noteikto risku analizē pēc punktu sistēmas četrās kategorijās:

- ievainojuma smagums (*Se – Severity*);
- ievainojuma biežums un ilgums (*Fe – Frequency*);
- negadījuma iespējamība (*Pr – Probability*);
- iespējamība novērst vai samazināt risku (*Av – Avoidance*).

Katru riska iespējamo ievainojuma smagumu (*Se*) vērtē ar pārējo kritēriju punktu summu, rezultātā nosakot drošības funkcijas nepieciešamo kategoriju pēc *SIL* skalas. Tam izmanto 5.5. un 5.6. tabulu. Saskaitot faktoros *Fr*, *Pr* un *Av*, iegūst negadījuma varbūtības skaitli *Cl*.

$$Cl = Fr + Pr + Av \quad (5.2.1)$$

5.5. tabula. Apdraudējuma riska noteikšana pēc *IEC 62061:2021*

| <i>Fr</i> | | <i>Pr</i> | | <i>Av</i> | |
|-------------------------------|---|------------------|---|-----------------|---|
| Biežums un ilgums | | Negadījuma iesp. | | Iespēja novērst | |
| ≥ 1 stundā | 5 | ļoti augsta | 5 | | |
| < 1 stundā līdz ≥ 1 dienā | 5 | augsta | 4 | | |
| < 1 dienā līdz ≥ 1 divās ned. | 4 | vidēja | 3 | neiespējami | 5 |
| < 1 divās ned. līdz ≥ 1 gadā | 3 | reti | 2 | iespējams | 3 |
| < 1 gadā | 2 | ļoti reti | 1 | ticami | 1 |

5.6. tabula. Nepieciešamās *SIL* kategorijas noteikšana pēc *IEC 62061:2021*

| <i>Se</i> – Traumas smagums | | <i>Cl</i> – Negadījuma varbūtība | | | | |
|---|---|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 4 | 5–7 | 8–10 | 11–13 | 14–15 |
| Nāve, roku vai acs zudums | 4 | <i>SIL2</i> | <i>SIL2</i> | <i>SIL2</i> | <i>SIL3</i> | <i>SIL3</i> |
| Neatgriezeniskas sekas, pirkstu zudums | 3 | | | <i>SIL1</i> | <i>SIL2</i> | <i>SIL3</i> |
| Bez paliekošām sekām, medicīniskā palīdzība | 2 | | | | <i>SIL1</i> | <i>SIL2</i> |
| Bez paliekošām sekām, pirmā palīdzība | 1 | | | | | <i>SIL1</i> |

Skaitli *Cl* un ievainojuma smagumu salīdzina ar 5.6. tabulu, lai noteiktu rezultējošo *SIL* kategoriju.

Apskatot iepriekš ilustrēto piemēru, pēc (5.2.1) un 5.5. tabulas var aprēķināt negadījuma iespējamību. 1. riskam – robota sadursmei ar cilvēku, ja tas atrodas robota darba telpā, – to var noteikt šādi:

$Fe = 4$; kāds var ieiet šūnā biežāk nekā reizi divās nedēļās

$Pr = 4$; sadursmes iespējamība ir augsta

$Av = 1$; negadījumu ir viegli novērst

$Cl = 4 + 4 + 1 = 9$

(5.2.2)

Pieņemot, ka sadursme var būt nāvējoša, t. i., $Se = 4$, pie $Cl = 9$ pēc 5.6. tabulas nepieciešamā kategorija drošības funkcijai – apstādināt robotu pie atvērtiem vārtiem vai nospiesta avārijas slēdža gadījumā – jābūt vismaz *SIL2*.

2. riskam – roku savainošana, ieliekot detaļu – traumas smagumu var vērtēt ar $Se=3$, taču negadījuma iespējamība Cl aprēķina:

$$\begin{aligned} Fe &= 5; \text{ detaļu piegāde noris nepārtraukti} \\ Pr &= 3; \text{ sadursmes iespējamība ir vidēja} \\ Av &= 3; \text{ novēršana iespējama, bet darba telpa kopēja} \\ Cl &= 5 + 3 + 3 = 11 \end{aligned} \tag{5.2.3}$$

Pēc 5.6. tabulas redzams, ka arī dažādas vērtības $Cl=11$ un $Se=3$ noved pie vienas kategorijas *SIL2*. Subjektīva vērtēšana bieži noved pie līdzīga rezultāta, taču nereti pa dažādiem ceļiem. Konkrētajā piemērā drošības funkcijai – apstādināt robotu, ja cilvēks atrodas materiālu piegādes zonā – nepieciešams vismaz *SIL2*.

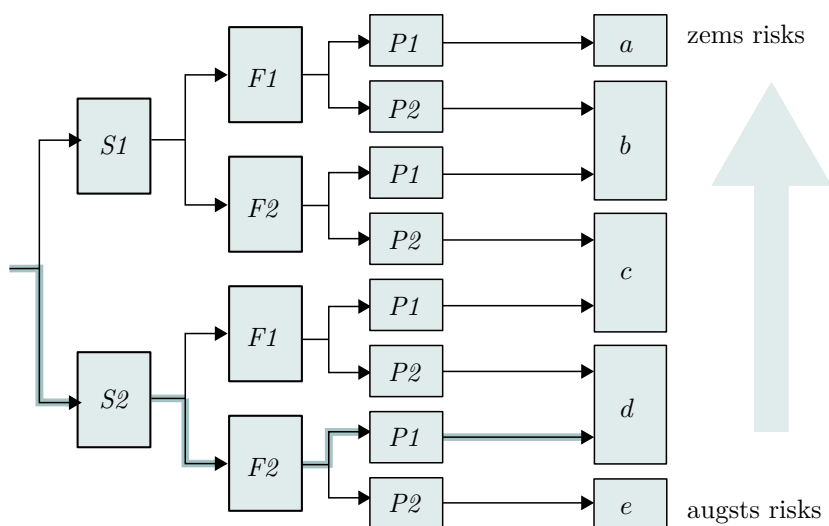
SIL kategorijas izmanto gan drošības funkcijas prasības noteikšanai, gan funkcijas tehniskās realizācijas veiktspējas apzīmēšanai.

► **ISO 13849-1:2015 – funkcionālā drošība pēc PL**

Arī standarts *ISO 13849-1:2015* nosaka vadlīnijas un principus drošas iekārtas izstrādē un drošības aspektu integrēšanā vadības sistēmās [65]. Standarts ir paredzēts iekārtu izstrādātājiem, un tas piedāvā vienkāršotu pieeju funkcionālās drošības sasniegšanai salīdzinājumā ar *IEC 62061:2021*. Šeit ieviestas drošības funkciju veiktspējas kategorijas *PL* (angļu val. *performance levels*), kas nosaka funkcijas spēju īstenot riska samazinājumu. Tos numurē no *a* līdz *e* jeb no vismazākā pienesuma riska samazināšanā līdz visaugstākajam.

Lai noteiktu *PL* kategoriju, rīkojas atbilstoši 5.12. attēlā redzamajai shēmai, izmantojot izvēlnes no kreisās puses.

1. Noteikt apdraudējumu vai traumas lielumu (S – *severity*):
 - $S1$ – neliels, trauma bez paliekošām sekām;
 - $S2$ – augsts, trauma ar paliekošām sekām, ieskaitot nāvi.



5.12. attēls. Nepieciešamās *PL* kategorijas noteikšana pēc *ISO 13849-1:2015*.

2. Noteikt apdraudējuma biežumu un ilgumu (F – *frequency*):
 - $F1$ – reti līdz bieži vai īslaicīgs;
 - $F2$ – regulārs, pastāvīgs vai ilgstošs apdraudējums.
3. Noteikt iespējamību ierobežot apdraudējumu (P – *possibility*):
 - $P1$ – noteiktos apstākļos iespējams;
 - $P2$ – gandrīz neiespējami.

5.11. attēlā ilustrētajā robota šūnā jebkurai no uzskaitītajām trim drošības funkcijām ir jāsasniedz vismaz d jeb *SIL2*. Iespējamais analīzes ceļš 5.12. attēlā ir iekrāsots:

- $S2$ – trauma ar paliekošām sekām, jo iespējama sadursme;
- $F2$ – regulārs apdraudējums, jo cilvēkam ir kopīga darba telpa;
- $P1$ – apdraudējumu ir viegli ierobežot, apstādinot robotu.

Arī šajā standartā netiek sniegts priekšlikums, kādi drošības komponenti nepieciešami kādai konkrētai iekārtai, taču piedāvāta metodika iekārtas drošības funkcijas analīzei. Metodika ir atšķirīga no *IEC 62061:2021* piedāvātās, taču parasti noved pie līdzīga rezultāta, jo jebkuru *PL* iespējams pārtulkot *SIL* kategorijā pēc 5.7. tabulas. Mašīnu

5.7. tabula. Drošības funkciju veiktspējas kategorijas pēc *SIL* un *PL* skalas

| <i>PL</i> | Bīstamas kļūdas iespējamība [$\lambda_D =$ gadījumi stundā] | <i>SIL</i> |
|-----------|--|-------------|
| <i>a</i> | $10^{-5} \geq \lambda_D < 10^{-4}$ | - |
| <i>b</i> | $3 \cdot 10^{-6} \geq \lambda_D < 10^{-5}$ | <i>SIL1</i> |
| <i>c</i> | $10^{-6} \geq \lambda_D < 3 \cdot 10^{-6}$ | <i>SIL1</i> |
| <i>d</i> | $10^{-7} \geq \lambda_D < 10^{-6}$ | <i>SIL2</i> |
| <i>e</i> | $10^{-8} \geq \lambda_D < 10^{-7}$ | <i>SIL3</i> |
| - | $\lambda_D > 10^{-8}$ | <i>SIL4</i> |

izstrādātāji var izmantot gan ar vienu, gan otru standartu.

► Drošības funkcijas realizācija un pārbaude

Kad noteiktas katras drošības funkcijas *PL* vai *SIL* kategorijas, nosaka visus komponentus, kas piedalās konkrētas drošības funkcijas nodrošināšanā. Pirmajā drošības funkcijā – robota apstādināšana, nospiežot avārijas apturēšanas slēdzi – izmanto ārkārtas apturēšanas pogu, *PLC* un robotu, kura kustība jāaptur. Katram komponentam atsevišķi nosaka $\lambda_{D,i}$ – bīstamas kļūdas varbūtību stundā, kas izriet no atsevišķā komponenta sasniegtās *PL* vai *SIL* kategorijas. Drošības funkcijas rezultējošais λ_D ir visu iesaistīto komponentu $\lambda_{D,i}$ summa. Apskatītajai drošības funkcijai $\lambda_{D,1} = 10^{-8} + 10^{-7} = 1,1 \cdot 10^{-7}$. 5.8. tabulā sniegts katras drošības funkcijas aprēķins un rezultāts.

Ja izmanto tikai mehāniskos komponentus, kuriem nav zināma *PL/SIL* kategorija, tad izvērtē, vai kļūdu iespējams izslēgt. To drīkst darīt, ja:

- paredzamā kļūda ir ārkārtīgi maza;
- to atļauj vispārīgi pieņemtā prakse un pieredze;
- to atļauj iekārtas tehniskā uzbūve, ņemot vērā risku un apdraudējumu.

Piemēram, ja ārkārtas apstādināšanas pogu paredzēts lietot ne biežāk

5.8. tabula. Drošības funkcijas nodrošināšanā iesaistītie komponenti

1. Robota apstādināšana pie avārijas apturēšanas slēdža nospiešanas.

| Ārkārtas apturēšanas poga | <i>PLC</i> | Robots, ārkārtas apturēšana | Rezultāts |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| klūda izslēgta | <i>SIL3, PL e</i> | <i>PL d</i> | <i>PL d</i> |
| – | $\lambda_{D,f} = 10^{-8}$ | $\lambda_{D,b} = 10^{-7}$ | $\lambda_{D,1} = 1,1 \cdot 10^{-7}$ |

2. Robota apstādināšana, atverot vārtus.

| Vārtu slēdzis, klūda | <i>PLC</i> | Robots, droša apturēšana | Rezultāts |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| izslēgta rokturim | <i>SIL3, PL e</i> | <i>PL d</i> | <i>PL d</i> |
| $\lambda_{D,e} = 1,1 \cdot 10^{-7}$ | $\lambda_{D,f} = 10^{-8}$ | $\lambda_{D,b} = 10^{-7}$ | $\lambda_{D,2} = 2,2 \cdot 10^{-7}$ |

3. Robota apstādināšana, cilvēkam atrodoties materiāla piegādes zonā.

| Sensoru paklājs | <i>PLC</i> | Robots, darba telpas uzraudzība | Rezultāts |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| <i>PL d</i> | <i>SIL3, PL e</i> | <i>PL d</i> | <i>PL d</i> |
| $\lambda_{D,c} = 3 \cdot 10^{-8}$ | $\lambda_{D,f} = 10^{-8}$ | $\lambda_{D,b} = 10^{-7}$ | $\lambda_{D,3} = 1,4 \cdot 10^{-7}$ |

kā reizi dienā un ir zināms tās maksimālais ciklu skaits – 10 000, savukārt iekārtu paredzēts lietot 20 gadus, tas būtu $10\,000/20/365 = 1,37 > 1$. Tātad, var pieņemt, ka komponenta klūdu var izslēgt. Ja klūda komponentā tomēr notiek, par to atbild iekārtas izstrādātājs. Tādēļ drošības funkciju realizēšanā jācenšas izmantot komponentus, kuriem ir zināma *PL* vai *SIL* kategorija.

Trešajai drošības funkcijai – robota apstādināšana, cilvēkam atrodoties materiāla piegādes zonā, – devējs ir sensoru paklājs, kuram ražotājs norāda $\lambda_{D,c} = 3 \cdot 10^{-8}$. Robotam šajā gadījumā atbilst iekšējā drošības funkcija – darba telpas uzraudzība. Visu trīs komponentu summa dod $\lambda_{D,3} = 1,4 \cdot 10^{-7}$.

5.8. tabulā visām drošības funkcijām klūdas iespējamība stundā ir robežās $10^{-7} > \lambda_{D,i} > 10^{-6}$. Ar to tiek sasniegta drošības kategorija *PLd/SIL3*, kas atbilst riska ierobežošanas prasībām.

5.2.4. Industriālo robotu drošības prasības

Tālāk sniegts ieskats vairākos citos *B* un *C* grupas standartos, kas būtiski ietekmē robota sistēmas vai robotizētas ražošanas iekārtas uzbūvi.

► *IEC 60204-1:2016* – iekārtu elektroaprīkojums

Standarts *IEC 60204-1:2016* [66] apraksta prasības elektriskām, elektroniskām un programmējamām ierīcēm un sistēmām, kas tiek vadītas automātiski. Tas iekļauj elektriskās ierīces no elektrotīkla pieslēguma punkta līdz izpildmehānismiem zemspriegumā (līdz 1000 V *AC* un līdz 1500 V *DC*). Tā kā parasti robotu sistēma ir daļa no ražošanas iekārtas, kas darbojas ar elektroenerģiju, uz to attiecināms arī šis standarts. Standarts iekļauj ar elektroenerģiju saistītus apdraudējumus un riskus:

- elektriskās sistēmas kļūdu, kas var izraisīt elektrošoku, elektrisko loku vai apdraudēt ugunsdrošību;
- elektropadeves pārtraukšanu un tās izraisītu iekārtas neatbilstošu funkciju;
- elektromagnētiskos traucējumus, kas noved pie iekārtas nevēlamas funkcionēšanas;
- uzkrātās enerģijas atdošanu;
- no elektroiekārtas izstarojošu akustisko troksni vai karstumu, kas var apdraudēt cilvēkus.

Dokumentā, piemēram, noteikts, ka iekārtas elektriskajai daļai jāspēj darboties vismaz temperatūras robežās no $+5^{\circ}\text{C}$ līdz $+40^{\circ}\text{C}$, pie 50 % gaisa mitruma $+40^{\circ}\text{C}$ temperatūrā, līdz 1000 m virs jūras līmeņa u. c. vispārīgas prasības. Detalizēti minēts, kādi elektriskie aizsargmehānismi kādā elektriskā tīkla formā lietojami (izolācijas pretestības mērīšana, pārslodzes un nevienmērīgas slodzes detektēšana), vizuālie marķējumi un brīdinājuma zīmes.

IEC 60204-1 ieviestas **STOP** kategorijas, kuras lieto pēc riska novērtējuma.

- **STOP kategorija 0:** tūlītēja apstādināšana, atslēdzot enerģijas

- padevi iekārtas elektriskajām mašīnām (bet ne vadības sistēmai);
- **STOP kategorija 1:** kontrolēta apstādināšana, pie kuras iekārtas elektriskās mašīnas kontrolēti aptur un tikai pēc tam atslēdz to enerģijas padevi;
 - **STOP kategorija 2:** kontrolēta apstādināšana, pie kuras iekārtas elektriskās mašīnas neatslēdz no enerģijas padeves.

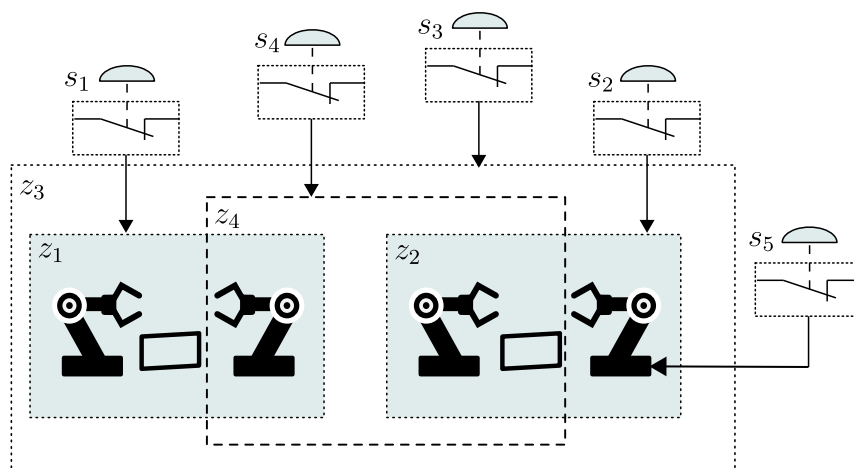
Standarts nosaka, ka pamatā visām iekārtām ir jābūt ar vismaz *STOP* kategoriju 0. Nav noteikts, kā apturēšana jāsasniedz – vienkāršākajā gadījumā tā var būt arī kontaktdakšas izraušana no ligzdas. Avārijas apturēšanas slēdžu nepieciešamību pamato ar *C* grupas standartiem vai pēc riska analīzes. Tikai atsevišķos gadījumos un saskaņā ar riska analīzi var izvēlēties augstāku kategoriju. *STOP* kategoriju 2 izvēlas, ja mehāniska kustības apturēšana ar aktīvu piedziņu iespējama ātrāk, un enerģijas padeves zuduma gadījumā iekārta kļūtu bīstama, piemēram, krānu sistēmas vai vertikālās asis. Savukārt industriālajiem robotiem spēcīgas mehāniskās bremzes apstādina kustību un notur pozīciju arī bez enerģijas padeves, tādēļ piemērotāka ir *STOP* kategorija 0.

Turpmāk noteikts, ka dažādu darba režīmu pārslēgšanai nepieciešams slēdzis, kura stāvoklis ir bloķējams. Darba režīmi *T1*, *T2*, *AUT* un *AUT EXT* robota pultī pārslēdzami tikai ar atslēgu. Režīma pārslēgšanai nedrīkst automātiski sekot iekārtas darbība, piemēram, robotam – jauna kustība.

► *ISO 13850:2015* – avārijaptures ierīces

Kaut arī *STOP* kategoriju 2 var lietot normālai iekārtas apstādināšanai, tā nav pietiekama ārkārtas situācijai saskaņā ar *ISO 13850:2015*. Avārijapturi jeb ārkārtas apturēšanu realizē tikai ar *STOP* kategoriju 0 un 1. Tā paredzēta tikai iekārtām automātiskā režīmā, kas netiek vadītas ar roku. Avārijaptures funkcijai ir visaugstākā prioritāte, un to nedrīkst ierobežot ar citām sistēmas funkcijām, taču vienlaikus nedrīkst ierobežot citu drošības funkciju darbību [67].

Ārkārtas apturēšanu var piemērot visai ražošanas iekārtai vai tikai tās daļai. Var izveidot vairākas avārijaptures zonas, kā tas ir 5.13. at-



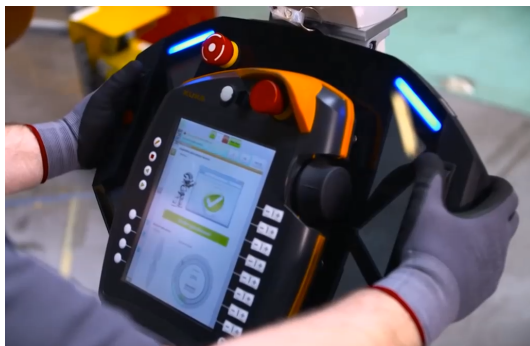
5.13. attēls. Ražošanas iekārtas avārijaptures zonu sadalījuma piemērs.

tēlā redzamajā piemērā. Tajā redzamas zonas $z_1 - z_4$, no kurām z_1 un z_2 ir neatkarīgas ražošanas iekārtas daļas – robotu šūnas, kurām katrai ir sava avārijaptures spiedpoga s_1 un s_2 . Zonā z_3 ir iekļautas abas šūnas, kurai ir sava spiedpoga s_3 . Savukārt zonā z_4 iekļauta tikai daļa no zonu z_1 un z_2 atsevišķiem komponentiem. Sadalījums ir atkarīgs no riska novērtējuma, robotu šūnas apturēšanai bieži izmanto *STOP* kategoriju 1, un mazām iekārtām nereti ir tikai viena zona. Lietotājam noteikti ir nepārprotami jāspēj atpazīt atsevišķas zonas un to, kuri avārijas slēdži iedarbojas uz kuru zonu. 5.13. attēlā ilustrētais slēdzis s_5 ir individuāla robota avārijaptures poga ar *STOP* kategoriju 0 (skat. 2.28. (a) att. 2.3.3. nodaļā). Visbiežāk konkrēta robota apturēšana (ar *STOP* kategoriju 0) noved pie visas robota šūnas darba apturēšanas (ar *STOP* kategoriju 1), ja ražošanas process ir saķēdēts.

Avārijaptures spiedpogas, sviras vai virves parasti izvieto vietās, kurās strādā cilvēks vai kurām ir viegli piekļūt, piemēram, robotu šūnas ieejā vai detaļu iekraušanas zonā.

► **ISO 13851:2019 – divu roku vadības ierīces**

Šis *B2* grupas standarts apraksta prasības **divu roku vadības ierīcēm** (angļu val. *two-hand control device (THDC)*), kādas izmanto



5.14. attēls. Robota šūnas divu roku vadības ierīce [69].

robotu manipulatora vadīšanai. Iekārtas vadīšanai vienlaicīgi ir jāizmanto abas rokas, tādējādi palielinot aizsardzību personai, kas to vada [68].

Vienas rokas atlaišana nozīmē tūlītēju aktuatora apstādināšanu. Robota vadības pultij taustiņi izvietoti tā, ka pulsts turama tikai ar abām rokām (skat. 2.28. (b) att. 2.3.3. nodaļā). Arī robota šūnas vadībai var izmantot divu roku vadības ierīci, ja to nosaka riska analīze. 5.14. attēlā ilustrēta speciāla divu roku vadības iekārta, kurā integrēta arī robota pulsts. Tā kā pats robots strādā automātiskā režīmā, nav jādarbina robota pulsts taustiņi. Taču darba uzdevums robota šūnā tiek veikts rokas vadībā, tādēļ divu roku vadības noteikums ir ieturēts un izmantojami citi tam paredzēti taustiņi.

► *ISO 10218-1:2011* – vispārīgās drošības prasības industriālajiem robotiem

Dokuments sniedz vadlīnijas un prasības drošam industriālo robotu tehniskajam dizainam un nepieciešamajiem aizsardzības aspektiem [2]. Šeit uzskaitīti visbiežāk sastopamie apdraudējumi un riski saistībā ar robotu sistēmām, kā arī sniegta metodika to samazināšanai un novēršanai.

Viens no dizaina elementiem nosaka, ka visiem pārvades sistēmas mehāniskajiem komponentiem, tādiem kā zobrati, siksnas un ķēdes (skat. 2.2.4. nodaļu), ir jābūt aiz pastāvīgiem vai noņemamiem aizsargiem. Praksē visbiežāk tie iebūvēti manipulatora korpusā. Enerģijas

padeves zudums nedrīkst radīt apdraudējumu, turklāt enerģijas padeves atjaunošanas gadījumā robots nedrīkst automātiski atsākt kustību. Tas ir saskaņā ar iepriekš apskatītajiem standartiem.

Standarts atsaucas uz *IEC 60204-1*, saskaņā ar kuru jābūt īstenotam visam robota elektriskajam aprīkojumam. Līdzīgi atsaucies izmantotas uz 5.2.3. nodaļā apskatītajiem *ISO 13849-1* un *IEC 62061*, pēc kuriem (viena vai otra) realizējamas ar drošību saistītas vadības sistēmas funkcijas. Noteikts, ka robota sistēmā visas ar drošību saistītās funkcijas realizējamas ar *PLd* vai *SIL2*, kas nozīmē:

- viena vienīga kļūda nedrīkst novest pie drošības funkcijas zuduma;
- jebkura drošības funkcijas kļūda jāspēj noteikt, pirms šī drošības funkcija ir jāizsauc vēlreiz;
- robota sistēmai jāspēj atklāt visas paredzamās kļūdas.

Piemērs: pēc ieslēgšanas industriālais robots pārbauda mehānisko bremžu darbību katrai asij – ja kādā no asīm detektē nepietiekamu bremzēšanas spēku, turpmākais darbs nav atļauts.

Robota apstādināšanai izšķir divus neatkarīgus funkciju veidus:

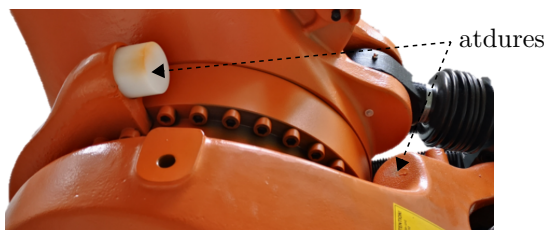
- **avārijapturi** un
- **preventīvo apstādināšanu.**

Avārijapture jeb ārkārtas apturēšanas funkcija saskaņā ar *IEC 60204-1* un *ISO 10218-1* realizējama tikai ar *STOP* kategoriju 0. Standartā papildu ieviesto preventīvo apstādināšanu var realizēt arī ar *STOP* kategoriju 2, t. i., piedziņas sistēma paliek aktīva.

Pēc standarta manipulatora asu robežas var ierobežot:

- **mehāniski,**
- **statiski programmatiski,**
- **dinamiski programmatiski.**

Mehāniska atdure (skat. 5.15. att.) ir konstrukcijas risinājums, kas ierobežo ass kustību tikai mehāniski – robota modelis neatļauj veikt kustību ārpus darba telpas, būtiski nesabojājot pašus korpusa elementus. Konstrukcijai jāspēj apstādināt robotu pie nominālās slodzes un maksimālā ātruma.



5.15. attēls. Mehāniska atdures ietaise 2. asij.

Mehāniskās asu robežas praksē tiek pārsniegtas ārkārtīgi reti. Normālā gadījumā tās reģistrē vadības sistēmā **statiski** kā konstantes. Sasniedzot asu robežas (arī asu ātruma vai momenta robežas), tiek iedarbināta preventīvā apstādināšana. Tātad apstādināšanu ierosina ar vadības sistēmu – programmatūras palīdzību. Aplikācijās, kurās vienā telpā strādā cilvēks un robots, ierobežojošo darba telpu var papildus iestatīt arī **dinamiski**, kur signāla dati nāk, piemēram, no kameras vai citiem sensoriem, kas spēj noteikt personas klātbūtni. Arī šajā gadījumā tiek ierosināta preventīvā apstādināšana.

Turpmāk standartā definē drošības prasības rokas vadības režīmiem $T1$ un $T2$, kas apskatīti 2.3.3. nodaļā, kā arī prasības divu roku vadības pultij. Pēc standarta ir atļauts izmantot vienu vadības pulti vairākiem robotiem sinhronu vai atsevišķu kustību programmēšanai.

Automātisku robotizētu iekārtu riska novērtējumam iespējams izmantot uzskaitītos apdraudējuma veidus, no kuriem vairums ir mehāniska rakstura, bet iekļauj arī elektriskus, termālus, ergonomiskus u. c. apdraudējuma veidus.

► **ISO 10218-2:2011 – robotizēta ražošanas iekārta**

Ja standarta *ISO 10218* pirmā daļa attiecas uz viena robota sistēmu, tad otrā daļa apraksta drošības prasības un iespējamus riskus veselām robotu grupām – **šūnām** un **līnijām**, kurās iekļauti vairāki roboti un arī citas tehnoloģijas [1].

Kustību ierobežošana robotu šūnā pamatā balstās uz robota sistēmas drošības funkcijām. Roboti ražošanas šūnās parasti strādā automātiskā režīmā, un vairākus robotus vienlaicīgi apstādina ar preventīvo

apstādināšanu. Automātisko režīmu drīkst iedarbināt, tikai atrodoties ārpus darba zonas.

Standarts nosaka īpašus noteikumus robotu attālinātai darbināšanai vai inspekcijai rokas režīmā ($T1$ un $T2$), prasības drošības zonu realizācijai, robota šūnas pieņemšanai ekspluatācijā (skat. 5.1. nodaļu), cilvēka un robota sadarbībai (skat. 5.1.4. nodaļu), minimālo dokumentācijas saturu, kā arī instrukcijas demontāžai un transportēšanai. Standarta pielikumā uzskaitīti visbiežāk sastopamie apdraudējumi un riski robotizētās ražošanas iekārtās un piedāvātas vadlīnijas šo risku samazināšanai.

Zināšanu paškontrolē

1. Nosaukt automatizācijas piramīdas līmeņus un vismaz vienu šī līmeņa uzdevuma piemēru! Nosaukt, ar kāda tipa fiziskām ierīcēm katrs vadības līmenis tiek realizēts!
2. Raksturot ražošanas piemēru, izmantojot *PPR* plānošanas principu *produkts, process, resursi*!
3. Kādus uzdevumus veic ar robotu simulācijas palīdzību (*CAR*)?
4. Nosaukt nepieciešamās tehniskās pārbaudes pirmreizējas robota uzstādīšanas laikā pirms tā ieslēgšanas?
5. Nosaukt galvenās prasības kopējai darba telpai robotu un cilvēka sadarbībā industriālajā ražošanā!
6. Kādas ir būtiskākās atšķirības starp kooperējošajiem robotiem un parastiem industriālajiem robotiem?
7. Ar piemēriem skaidrot starptautisko tehnisko standartu kategorijas *A*, *B* un *C*!
8. Skaidrot *apdraudējuma* un *riska* jēdzienus ražošanas iekārtas drošības kontekstā!
9. Kādas ir ražošanas iekārtas apdraudējuma un riska samazināšanas kategorijas?
10. Atbilstoši kādiem standartiem izstrādātāji var veikt robotizētas ražošanas iekārtas riska analīzi?
11. Nosaukt pēc *IEC 60204-1* definētās *STOP* kategorijas un to nozīmi!
12. Skaidrot robotizētas ražošanas sistēmas uzbūves elementus – *darbstacija, robotu šūna* un *līnija*!

PIELIKUMI

1. pielikums. Saīsinājumi

| Saīsinājums | Nozīme (<i>tulkojums oriģinālvalodā</i>) |
|-------------|---|
| 3D | trīs-dimensiju |
| AC | maiņstrāva (<i>Alternating Current</i>) |
| CAD | datorizētā projektēšana (<i>Computer Aided Design</i>) |
| CNC | datorizēta ciparu vadība (<i>Computerized Numerical Control</i>) |
| CAN | kopnes standarts (<i>Controller Area Network</i>) |
| CAR | datorizēta robotizētu iekārtu plānošana (<i>Computer Aided Robotics</i>) |
| DC | līdzstrāva (<i>Direct Current</i>) |
| DH | Denavits-Hartenbergs (<i>Denavit-Hartenberg</i>) |
| EMD | elektroniskā kalibrēšanas ierīce (<i>Electronic Mastering Device</i>) |
| GPS | globālā pozicionēšanas sistēma |
| HMI | lietotāja saskarne (<i>Human-Machine Interface</i>) |
| IEC | Starptautiskā elektrotehnikas komisija (<i>International Electrotechnical Commission</i>) |
| IFR | Starptautiskā robotikas federācija (<i>International Federation of Robotics</i>) |
| IRL | Industriālo robotu valoda (<i>Industrial Robot Language</i>) |
| ISO | Starptautiskā standartizācijas organizācija (<i>International Organization for Standardization</i>) |
| IO | ieeja/izeja (<i>Input/Output</i>) |

Saīsinājums Nozīme (*tulkojums oriģinālvalodā*)

| | |
|----------------|--|
| <i>IT</i> | informācijas tehnoloģijas |
| <i>KR</i> | <i>KUKA</i> robots |
| <i>KUKA</i> | Kellers un Knapišs Augsburga (<i>Keller und Knappich Augsburg</i>) |
| <i>LIN</i> | taisnveida (<i>Linear</i>) |
| <i>MIG/MAG</i> | lokmetināšana (<i>Metal Insert Gas, Metal Active Gas</i>) |
| <i>PCB</i> | iespiedshēmu plate (<i>Printed Circuit Board</i>) |
| <i>PFH</i> | bīstamas kļūdas iespējamība stundā (<i>Probability of Dangerous Failure per Hour</i>) |
| <i>PID</i> | proporcionalitāte, integrālis, atvasinājums (<i>Proportional Integral Derivative</i>) |
| <i>PL</i> | drošības funkcijas veiktspējas kategorija (<i>Performance Level</i>) |
| <i>PLC</i> | programmējams loģiskais kontroleris (<i>Programmable Logic Controller</i>) |
| <i>PTP</i> | no punkta uz punktu (<i>Point-to-Point</i>) |
| <i>RCS</i> | robotu vadības simulācija (<i>Robot Control Simulation</i>) |
| <i>RMS</i> | vidējais kvadrātiskais (<i>Root Mean Square</i>) |
| <i>RRS</i> | reālistiska robotu simulācija (<i>Realistic Robot Simulation</i>) |
| <i>SIL</i> | drošības prasības kategorija (<i>Safety Integrity Level</i>) |
| <i>SCARA</i> | robotu tips (<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>) |
| <i>SCADA</i> | industriālo procesu kontroles un attēlošanas sistēma (<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>) |
| <i>SMR</i> | sfēras tipa reflektors (<i>Spherically Mounted Retroreflector</i>) |
| <i>TCP</i> | instrumenta centra punkts (<i>Tool Center Point</i>) |
| <i>THDC</i> | divu roku vadības ierīce (<i>Two-Hand Control Device</i>) |
| <i>VAC</i> | volti maiņstrāva (<i>Volts Alternating Current</i>) |
| <i>VDC</i> | volti līdzstrāva (<i>Volts Direct Current</i>) |
| <i>VDI</i> | Vācijas inženieru apvienība (<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>) |
| <i>VRC</i> | virtuālā robotu vadība (<i>Virtual Robot Control</i>) |

2. pielikums. Matemātiskais pieraksts

Atsauce tekstā uz attēliem vai tabulām ir saīsinājuma formā rakstīta "2.3. attēls" vai "2.3. tabula", kur pirmais skaitlis ir nodaļas numurs, bet skaitlis pēc punkta ir attēla vai tabulas kārtas numurs nodaļā. Atsauce uz formulām vai aprēķiniem rakstīta kā (2.3.4), kur pirmais skaitlis ir nodaļas numurs, otrais skaitlis ir apakšnodaļas numurs, bet trešais ir aprēķina/formulas kārtas numurs. Atsauce uz literatūras avotu pierakstīta kvadrātiekvās [12], kur skaitlis apzīmē kārtas numuru literatūras sarakstā. Elektroniskajā versijā visas atsauces iekļauj hipersaiti uz attiecīgo dokumenta vietu.

Skalārās vērtības pierakstītas vienkāršā veidā, piemēram, $x = 10$. Ar lielo burtu parasti apzīmēts punkts, plakne vai kāds objekts, piemēram, laukums S . Elektrotehnikas kontekstā mazais burts u parasti apzīmē mērvienības momentāno vērtību, bet lielais U – mērvienības RMS vērtību. Simbols treknrakstā \mathbf{a} parasti apzīmē vektoru. Vektora izvērsta pieraksts (arī \vec{a}), norādot tā vērtības, uzdots kolonnas formā vai transponētā formā. Treknrakstā un ar lielo burtu apzīmē matricu, piemēram, \mathbf{T} . Transformācijas vai rotācijas matricas ${}^i_k\mathbf{T}$ apzīmētas ar references koordinātu sistēmas indeksu i (augšā), un mērķa vai rezultējošo koordinātu sistēmas k indeksu apakšā.

Ja kontekstā par robota manipulatoru asīm lieto skalārus lielumus ar vairākiem indeksiem, tad ass indeksu raksta vispirms:

$$q_{i,max},$$

kur i ir ass numurs, bet max ir mainīgā satura apzīmējums.

3. pielikums. Matricu operācijas

Matricas elementi var būt indeksēti, kur pirmais indekss apzīmē rindas kārtas numuru, bet otrais indekss – kolonnas:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{pmatrix}.$$

Līdzīgi kā, skalāru lielumu reizinot ar apgriezto vērtību, iegūst ($a \cdot 1/a = 1$), tā arī, reizinot matricu ar tās **inverso** jeb **apgriezto matricu**, iegūst **vienības matricu**

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Vienības matricā diagonāles elementi ir 1, bet pārējie ir 0. Inversā matrica eksistē tad un tikai tad, ja tās determinants nav nulle

$$\det(\mathbf{A}) \neq 0.$$

Ja determinants nav nulle, tad matricu sauc par **invertējamu**, **apgriežamu** vai **regulāru** matricu. Ja determinants ir nulle, tad matricu sauc par **singulāru** matricu. Ja matrica ar dimensijām $m \times n$ tiek pagriezta pa tās diagonāli, iegūstot pārkārtotu $n \times m$ matricu, tad rezultātu sauc par **transponēto matricu**

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 5 \\ 3 & 6 \end{pmatrix}.$$

Matricu, kas sastāv tikai no vienas kolonnas, sauc par **vektoru** un

apzīmē ar mazo burtu treknrakstā:

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_{1,1} \\ p_{2,1} \\ \dots \\ p_{n,1} \end{pmatrix}.$$

► **Matricu saskaitīšana**

Matricai \mathbf{A} pieskaitot vai atņemot skalāro vērtību λ , iegūst matricu, kurai katram elementam pieskaitīta vai atņemta šī vērtība:

$$\mathbf{A} \pm \lambda = \begin{pmatrix} a_{1,1} + \pm\lambda & a_{1,2} + \pm\lambda + \dots + a_{1,n} + \pm\lambda \\ a_{2,1} + \pm\lambda & a_{2,2} + \pm\lambda + \dots + a_{2,n} + \pm\lambda \\ \dots & \dots \\ a_{m,1} + \pm\lambda & a_{m,2} + \pm\lambda + \dots + a_{m,n} + \pm\lambda \end{pmatrix}.$$

Divu **matricu summa** vai **atņemšana** ir to skalāro vērtību saskaitīšana vai atņemšana:

$$\mathbf{A} \pm \mathbf{B} = \begin{pmatrix} a_{1,1} + \pm b_{1,1} & a_{1,2} + \pm b_{1,2} + \dots + a_{1,n} + \pm b_{1,n} \\ a_{2,1} + \pm b_{2,1} & a_{2,2} + \pm b_{2,2} + \dots + a_{2,n} + \pm b_{2,n} \\ \dots & \dots \\ a_{m,1} + \pm b_{m,1} & a_{m,2} + \pm b_{m,2} + \dots + a_{m,n} + \pm b_{m,n} \end{pmatrix},$$

no kā izriet, ka matricu dimensijām jābūt vienādām.

► **Matricu reizināšana ar skalāru lielumu**

Matricu reizināšanā ar skalāru skaitli katrs matricas elements reizināts ar šo skaitli

$$\lambda \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \lambda a_{1,1} & \lambda a_{1,2} + \dots + \lambda a_{1,n} \\ \lambda a_{2,1} & \lambda a_{2,2} + \dots + \lambda a_{2,n} \\ \dots & \dots \\ \lambda a_{m,1} & \lambda a_{m,2} + \dots + \lambda a_{m,n} \end{pmatrix} = \mathbf{B},$$

kur katrs \mathbf{B} elements ir $b_{i,n}\lambda$. Matricu reizināšanā ar skalāru lielumu, kas nav nulle, saglabājas īpašība

$$(\lambda \cdot \mathbf{A})^{-1} = \lambda^{-1} \cdot \mathbf{A}^{-1}.$$

► **Matricu reizināšana ar vektoru**

Ja matricu \mathbf{A} , kuras dimensijas ir $m \times n$, reizina ar vektoru \mathbf{p} ar dimensijām $n \times 1$, iegūst vektoru \mathbf{b} , kura dimensijas ir $m \times 1$:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{p} = \begin{pmatrix} a_{1,1}p_1 + a_{1,2}p_2 + \dots + a_{1,n}p_n \\ a_{2,1}p_1 + a_{2,2}p_2 + \dots + a_{2,n}p_n \\ \dots \\ a_{m,1}p_1 + a_{m,2}p_2 + \dots + a_{m,n}p_n \end{pmatrix} = \mathbf{b}.$$

► **Matricu īpašības**

Matricu reizināšanā saglabājas **asociatīvā īpašība**

$$(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) \cdot \mathbf{C} = \mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \cdot \mathbf{C})$$

un labā un kreisā **distributīvā īpašība**

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}) \cdot \mathbf{C} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{C},$$

$$\mathbf{C} \cdot (\mathbf{A} + \mathbf{B}) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{B}.$$

Taču matricu reizināšana **nav komutatīva**:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \neq \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}.$$

Matricu reizinājuma inversā matrica ir vienāda ar attiecīgo inverso matricu reizinājumu apgrieztā secībā

$$(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{A}^{-1}.$$

Inversās matricas inversā vērtība ir tā pati matrica

$$(\mathbf{A}^{-1})^{-1} = \mathbf{A}.$$

Transponētas matricas inversā vērtība ir vienāda ar inversās matricas transponēto vērtību

$$(\mathbf{A}^T)^{-1} = (\mathbf{A}^{-1})^T.$$

4. pielikums. Vektoru algebra

Robotu kinemātikas pierakstiem un dažādiem aprēķiniem bieži nākas lietot vektoru algebru. Ģeometrijā par vektoru sauc nogriezni uz taisnes, kuram ir noteikts sākuma un galapunkts.

► Vektoru pieraksts un definīcijas

Vektoru mēdz apzīmēt ar simbola bultu virs mainīgā, piemēram, \vec{a} . Šajā grāmatā vektori apzīmēti galvonokārt ar simbolu treknrakstā, bet vektora skalārās vērtības satur kolonna:

$$\mathbf{a} = \vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix} = (a_1, \dots, a_n)^T$$

Ja ar simbolu \mathfrak{R} apzīmē reālo skaitļu kopu, tad vektora vērtības pieder šai skaitļu kopai

$$a_1, \dots, a_n \in \mathfrak{R}$$

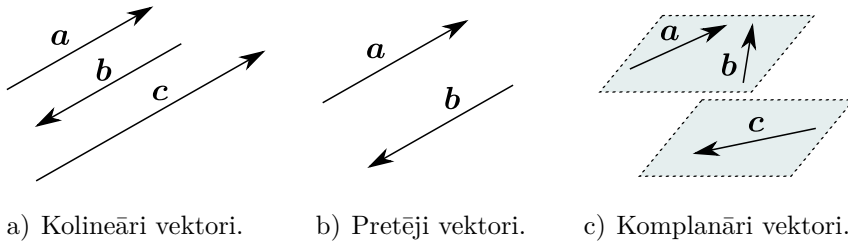
Pēc (5.2.4.) redzams, ka vektora vērtības uzdotas kolonnā vai tās transponētā formā. Par **vektora garumu** jeb moduli sauc nogriežņa garumu, ko var apzīmēt veidos:

$$|\mathbf{a}| = |\vec{a}| = a = AB,$$

kur A ir vektora sākumpunkts un B tā beigu punkts. Vektora garumu iegūst ar kvadrātsakni no skalāra reizinājuma pašam ar sevi:

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{\mathbf{a}^T \mathbf{a}} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

Vektoru sauc par **brīvu vektoru**, ja tā sākumpunktu var pārnest uz jebkuru punktu telpā. Vektora garums un virziens paliek nemainīgs. Savukārt, ja vektora sākumpunkts ir nemaināms, tad to sauc par **saitītu vektoru**. Taču, ja vektora sākumpunkts vienlaikus ir koordinātu sistēmas sākumpunkts O , tad tas ir **pozīcijas vektors**. Vektori ir **kolineāri**, ja tie atrodas uz paralēlām taisnēm, kā ilustrēts 6.1. (a) attēlā,

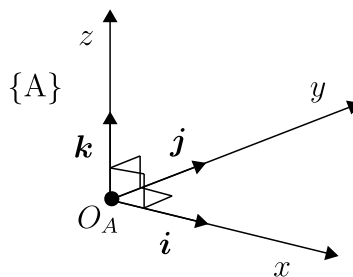


6.1. attēls. Vektoru iedalījums.

un tos pieraksta $\mathbf{a} \parallel \mathbf{b}$. Vektori ir **vienādi**, ja tie vienlaikus ir kolineāri, to garumi ir vienādi un tie vērsti vienā virzienā. Vektori ir **pretēji**, ja tiem ir vienāds garums, tie ir kolineāri, taču ir vērsti pretēji viens otram. Vektoru, kas ir tieši vienu vienību garš $|\mathbf{a}_0| = 1$, sauc par **vienības vektoru**, kuru var aprēķināt jebkurai vektoram:

$$|\mathbf{a}_0| = \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|} = \frac{1}{|\mathbf{a}|} (a_x \ a_y \ a_z)^T.$$

Koordinātu sistēma parādīta 6.2. attēlā, kur vienības vektori \mathbf{i} atrodas uz x ass, \mathbf{j} uz y ass, bet \mathbf{k} uz z ass. Tātad vienības vektori \mathbf{i} , \mathbf{j} un \mathbf{k} ir savstarpēji perpendikulāri. Robotu modelēšanā aprēķinos izmantota Dekarta koordinātu sistēma pēc labās rokas likuma jeb labā sakārtojuma. Ja nepieciešams, koordinātu sistēmu apzīmē, izmantojot



6.2. attēls. Koordinātu sistēma pēc labā sakārtojuma.

lielo burtu, kuru lieto figūriekavās, piemēram, $\{A\}$. Koordinātu sākumpunktu parasti apzīmē ar burtu O_A , kur indekss norāda piederību

koordinātu sistēmai.

Vektora \mathbf{a} projekciju uz koordinātu sistēmas asīm aprēķina pēc kosinusa funkcijas

$$\begin{aligned} a_x^0 &= |\mathbf{a}| \cos \alpha \\ a_y^0 &= |\mathbf{a}| \cos \beta, \\ a_z^0 &= |\mathbf{a}| \cos \gamma \end{aligned}$$

kur α , β un γ ir attiecīgi leņķi pret asīm x , y , z . Tā vienības vektors ir vienāds ar kosinusu vērtībām:

$$\mathbf{a}^0 = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{pmatrix}.$$

Vektora pierakstu no (5.2.4.) ar tā projekciju vērtībām un vienības vektoriem var izteikt arī kā

$$\mathbf{a} = a_x^0 \mathbf{i} + a_y^0 \mathbf{j} + a_z^0 \mathbf{k} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}.$$

Starp divām taisnēm var atrast **normāles vektoru**, kurš veido taisnu leņķi ar abām šīm taisnēm. Ja divas taisnes ir paralēlas, tad normāles vektoru ir bezgalīgi daudz. Ja taisnes ir perpendikulāras, normāles vektors neeksistē. Visos citos gadījumos eksistē tieši viens normāles vektors.

► Vektoru saskaitīšana un reizināšana

Vektoru saskaitīšanā, vektoru saskaitīšanā ar skalāru lielumu un vektoru reizināšanā ar skalāru lielumu saglabājas matricu īpašības. Praksē izmantotajiem vektoriem telpā kā indeksus var izmantot x, y, z , kur matricu elementi ir to projekcijas uz attiecīgajām koordinātu asīm. Divu vektoru \mathbf{a} un \mathbf{b} skalārais reizinājums ir

skalārs lielums:

$$\mathbf{a}^T \cdot \mathbf{b} = (a_x \ a_y \ a_z) \cdot \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z,$$

taču pirmo reizinātāju transponē. No tā izriet, ka skalārais reizinājums perpendikulāriem vektoriem ir nulle. Tātad, lietojot skalāro reizinājumu diviem vektoriem, kuru garums nav nulle, var aprēķināt leņķi starp tiem, kā arī pārbaudīt, vai šie vektori ir perpendikulāri.

Skalāro reizinājumu var iegūt arī tad, ja zināmi abu vektoru garumi un leņķis starp tiem:

$$\mathbf{a}^T \cdot \mathbf{b} = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \cos \theta.$$

Skalāram reizinājumam ir **komutatīvā īpašība**:

$$\mathbf{a}^T \cdot \mathbf{b} = \mathbf{b}^T \cdot \mathbf{a},$$

distributīvā īpašība:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}^T \cdot (\mathbf{b} + \mathbf{c}) &= \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{b} + \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{c} \\ (\mathbf{b} + \mathbf{c})^T \cdot \mathbf{a} &= \mathbf{b}^T \cdot \mathbf{a} + \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{a} \end{aligned}$$

un **asociatīvā īpašība**:

$$\lambda(\mathbf{a}^T \cdot \mathbf{b}) = (\lambda\mathbf{b})^T \cdot \mathbf{a} = \mathbf{b}^T \cdot (\lambda\mathbf{a}).$$

► Vektoriālais reizinājums

Divu vektoru \mathbf{a} un \mathbf{b} **vektoriālais reizinājums** ir vektors \mathbf{c} , kura garums ir

$$|\mathbf{c}| = |\mathbf{a}| \times |\mathbf{b}| \cdot \sin(\theta),$$

kur θ ir mazākais leņķis starp abiem vektoriem \mathbf{a} un \mathbf{b} , un kura virziens ir noteikts pēc labās rokas likuma. Vektors \mathbf{c} vienmēr ir perpendikulārs

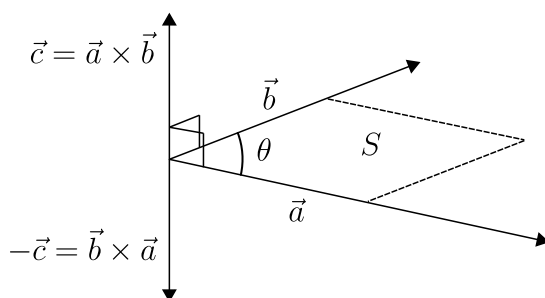
vektoru \mathbf{a} un \mathbf{b} plaknei. Pēc tā izriet, ka kolineāru vektoru vektoriālais reizinājums ir nulle, jo $\sin(0) = 0$. Koordinātu formā vektoriālo reizinājumu var izteikt

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_y b_z - a_z b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b_x \end{pmatrix}$$

vai arī kā determinantu un tā risinājumu:

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_y b_z - a_z b_y)\mathbf{i} + (a_z b_x - a_x b_z)\mathbf{j} + (a_x b_y - a_y b_x)\mathbf{k}$$

kur \mathbf{i} , \mathbf{j} un \mathbf{k} ir vienības vektori attiecīgi asu x , y un z virzienos abu vektoru koordinātu sistēmā. Ja abi vektori veido paralelograma divas blakus malas, to vektoriālais reizinājuma modulis būs vienāds ar paralelograma laukumu $S = |\mathbf{a} \times \mathbf{a}|$. Vektoriālajam reizinājumam



6.3. attēls. Vektoriālais reizinājums.

ir **antikomutatīvā īpašība** (mainot reizinātājus vietām, ir jāmaina zīme):

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = -(\mathbf{b} \times \mathbf{a}),$$

distributīvā īpašība:

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \mathbf{c}$$

$$(\mathbf{b} + \mathbf{c}) \times \mathbf{a} = \mathbf{b} \times \mathbf{a} + \mathbf{c} \times \mathbf{a}$$

un asociatīvā īpašība:

$$\lambda(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) = (\lambda\mathbf{b}) \times \mathbf{a} = \mathbf{b} \times (\lambda\mathbf{a}).$$

LITERATŪRA

- [1] *ISO 10218-2:2011 Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration*, ISO Standarts, 2011.
- [2] *ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots*, ISO Standarts, 2011.
- [3] *Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council*, EU Standarts, 2006. [Internets]. Resurss:
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/42/oj/?locale=LV>
- [4] “Press conference world robotics 202,” IFR International Federation of Robotics, 2021.
- [5] I. R. Dāvis Meike, “New Type of Power Converter for Common-ground DC-Bus Sharing to increase the Energy Efficiency in Drive Systems,” in *2nd IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition, 2012 / Advances in Energy Conversion Symp*, 2012.
- [6] (2021) Jacquard Webstuhl. [Internets]. Resurss:
<https://nat.museum-digital.de/index.php?t=objekt&oges=31073>
- [7] (2022) Der Jacquard-Bandwebstuhl – Vorläufer des Computers? [Internets]. Resurss: <https://tgtub.hypotheses.org/1727>
- [8] R. C. Goertz, “Remote control manipulator,” U.S. Patent US2 632 574A, 1949.
- [9] D. F. U. Raymond C Goertz, “Electrical manipulator,” U.S. Patent US2 679 940A, 1951.
- [10] G. C. Devol, “Programmed Article Transfer Patent,” U.S. Patent US2 988 237, 1954.

-
- [11] (2020) Die KUKA Geschichte. [Internets]. Resurss: <https://www.kuka.com/de-de/unternehmen/über-kuka/geschichte>
- [12] (2020) Stanford Robot Arm. [Internets]. Resurss: <http://infolab.stanford.edu/pub/voy/museum/pictures/display/Calculators.htm>
- [13] (2021) UNIMATE The First Industrial Robot. [Internets]. Resurss: <https://www.automate.org/a3-content/joseph-engelberger-unimate>
- [14] IFR International Federation of Robotics, Ed., *Executive Summary World Robotics 2021 Industrial Robots*, 2021.
- [15] (2021) Operational stock of multipurpose industrial robots worldwide from 2010 to 2020. [Internets]. Resurss: <https://www.statista.com/statistics/281380/estimated-operational-stock-of-industrial-robots-worldwide/>
- [16] IFR International Federation of Robotics, Ed., *Executive Summary World Robotics 2022 Industrial Robots*, 2022.
- [17] IFR International Federation of Robotics, Ed., *Executive Summary World Robotics 2023 Industrial Robots*, 2023.
- [18] IFR International Federation of Robotics , Ed., *Executive Summary World Robotics 2016 Industrial Robots*, 2016.
- [19] “Press conference world robotics 2023,” IFR International Federation of Robotics, 2023.
- [20] (2021) China overtakes USA in robot density. [Internets]. Resurss: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/china-overtakes-usa-in-robot-density>
- [21] Handelsblatt GmbH, Ed., *Wirtschaftswoche 2021-50*, 2021.
- [22] ABB Robotics, *IRB 5500 FlexPainter*, 2020.
- [23] (2021) RIVSET Stanznieten ist ein Verfahren aus der Fügetechnik. [Internets]. Resurss: <https://www.boellhoff.com/>
- [24] (2020) Roboterklebeanlagen. [Internets]. Resurss: <https://www.asmdimatec.de/de/roboterklebeanlage.html>
- [25] A. H. Tullo. (2014) Automakers Look to Adhesives and Aluminum for Gas Savings. [Internets]. Resurss: <https://cen.acs.org/articles/92/i16/Automakers-Look-Adhesives-Aluminum-Gas.html>
- [26] (2011) Robofact AG 3D Roboterfräsen. [Internets]. Resurss: <https://www.robofact.ch/>

- [27] (2012) Güdel – sorting and palletising of tires. [Internets]. Resurss: <https://www.gudel.com/>
- [28] (2021) How to know when a SCARA robot is the right choice for your application. [Internets]. Resurss: <https://www.fanuc.eu/>
- [29] (2021) Electronics Assembly – Robustly automate precise handling of sensitive components. [Internets]. Resurss: <https://www.artiminds.com/>
- [30] *VDI 2860 – Kenngrößen für Industrieroboter*, VDI Standarts, 1988.
- [31] *ISO 9787 – Robots and robotic devices – Coordinate systems and motion nomenclatures*, ISO Standarts, 2013.
- [32] *ISO 8855 – Road vehicles – Vehicle dynamics and road-holding ability – Vocabulary*, ISO Standarts, 2013.
- [33] (2014) Motoren. [Internets]. Resurss: <https://www.lenze.com/de-de/produkte/motoren/>
- [34] M. Pellicciari, A. Avotins, K. Bengtsson, B. Lennartson, D. Meike, “AREUS – Innovative Hardware and Software for Sustainable Industrial Robotics,” lpp. 1325–1332, 2015.
- [35] D. W. Novotny, T. A. Lipo, T. M. Jahns, *Ievads elektriskajās mašīnās un elektropiedziņā*. RTU Izdevniecība, 2019.
- [36] (2021) HTD Riemen. [Internets]. Resurss: <https://www.krebs-kessel.de/>
- [37] F. A. Lohmüller. (2021) Bike chain. [Internets]. Resurss: <http://www.f-lohmueller.de/>
- [38] (2021) Cycloidal drive. [Internets]. Resurss: https://en.wikipedia.org/wiki/Cycloidal_drive
- [39] (2020) Rf-p solid shaft component sets. [Internets]. Resurss: <https://www.nabtesco.de/en/products/series/rf-p>
- [40] (2018) Cycloidal advantage. [Internets]. Resurss: <http://www.darali.com/page21.html>
- [41] (2020) Harmonic gear. [Internets]. Resurss: <https://www.harmonicdrive.net/technology>
- [42] *KUKA System Software 5.5. data sheet, Operating and Programming Instructions for End Users*, KUKA Roboter GmbH, 2008.
- [43] A. Sauer, *Die Gleichstromfabrik: Energieeffizient. Robust. Zukunftsweisend.*, 2020.

- [44] (2022) ATRO: Automation technology for robotics. [Internets]. Resurss: <https://www.beckhoff.com/de-de/produkte/motion/atro-automation-technology-for-robotics/>
- [45] “KUKA KR 210 R2700 prime,” KUKA Deutschland GmbH, Techreport, 2020.
- [46] R. P. Paul, *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*. MIT Press, 1981.
- [47] K. Kleeberger. (2018) Deep Grasping – Künstliche Intelligenz perfektioniert den Griff-in-die-Kiste. [Internets]. Resurss: https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/Deep_Grasping.html
- [48] K. Y. Hwang N. Ahuja, “Gross motion planning – a survey,” in *’ACM Computing Surveys*, 1992.
- [49] *KUKA System Software 8.3*, KUKA Roboter GmbH, 2014.
- [50] M. Wenz, “Automatische Konfiguration der Bewegungssteuerung von Industrierobotern,” disertācija, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2008.
- [51] *ISO 9283:1999 Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods*, ISO Standarts, 1999.
- [52] *VDI 2861-3 Kenngrößen für Industrieroboter – Prüfung und Kenngrößen*, VDI Standarts, 1988.
- [53] Z. Roth, B. Mooring, B. Ravani, “An overview of robot calibration,” *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Sēj. 3, Nr. 5, lpp. 377–385, 1987.
- [54] A. Nubiola I. A. Bonev, “Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Sēj. 29, Nr. 1, lpp. 236–245, 2013.
- [55] (2022) Prozesssimulation – Grundlagen und neue Funktionen. [Internets]. Resurss: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/webinar/process-simulate/76807>
- [56] *Realistic Robot Simulation*, RRS-Interface Maintenance Group Standarts, Vers. 1.3, 1997.
- [57] *ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots*, ISO Standarts, 2017.
- [58] (2020) Latvijas Republikas Ministru kabineta tiesību aktu projekti. [Internets]. Resurss: <http://tap.mk.gov.lv/valsts-parvaldes-politika/kvalitates-vadiba/Kvalitates-vadibas-modeli/ISO/>

- [59] *ISO 12100:2010 Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction*, ISO Standarts, 2010.
- [60] *IEC 61508 – Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems*, IEC Standarts, 2021.
- [61] (2021) Türgriffbetätiger für SAFEMASTER STS. [Internets]. Resurs: <https://www.dold.com/unternehmen/presse/komfortables-und-ergonomisches-oeffnen-von-schutztueren>
- [62] (2021) Sicherheitssteuerungen Flexi Compact. [Internets]. Resurs: <https://www.sick.com/de/de/senscontrol-sichere-steuerungsloesungen/sicherheitssteuerungen/flexi-compact/c/g547438>
- [63] (2021) Not-Aus / Not-Halt-Taste mit 2 Zwangsöffnern im IP65 Gehäuse. [Internets]. Resurs: <https://shop.murrelektronik.de/Schnittstellen/Befehlsgeraete/>
- [64] *IEC 62061:2021 Safety of machinery – Functional safety of safety-related control systems*, IEC Standarts, 2021.
- [65] *ISO 13849-1:2015 Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design*, ISO Standarts, 2015.
- [66] *IEC 60204-1:1997 Safety of machinery – Electrical equipment of machines*, IEC Standarts IEC 60 204-1.
- [67] *ISO 13850:2015 Safety of machinery – Emergency STOP function – Principles for design*, ISO Standarts, 2015.
- [68] *ISO 13851:2019 Safety of Machinery – Two-Hand control devices – Principles for design and selection*, ISO Standarts, 2019.
- [69] (2016) Mensch-Roboter-Kooperation im Mercedes-Benz Werk Bremen. [Internets]. Resurs: <https://www.youtube.com/watch?v=PBLGCl0H8yo>



Dāvis Meike pieredzi ražošanas plānošanā guvis pētniecības un izstrādes darbā autobūves industrijā. Viņa zinātniskās intereses iekļauj industriālās robotu sistēmas, ražošanas tehnoloģijas un automatizāciju, digitālās plānošanas metodes un industriālos līdzstrāvas tīklus. Viņš ir vairāku starptautisko paten-
tu un zinātnisko publikāciju autors. Savā promocijas darbā Dāvis Meike strādāja pie industriālo robotu energoefektivitātes paaugstināšanas, 2013. gadā iegūstot zinātnisko doktora grādu elektrotehnikā. Kopš 2021. gada darbojas Rīgas Tehniskajā universi-
tātē kā asociētais profesors.

Kas ir industriālie roboti? Kur tos lieto un kā tie strādā?

Šī grāmata sniedz ievadu industriālās robotikas nozarē. Tajā aptverti gan šīs jomas teorētiskie, gan praktiskie aspekti. Grāmatā aplūkots robotu lietojums lielās un mazās ražošanas iekārtās. Tā ļaus iedziļināties robotu tehniskajā uzbūvē un pārliecināties par to darbību. Grāmata paredzēta robotikas studentiem, taču tajā sniegtās vadlīnijas robotu drošai integrācijai sarežģītākās sistēmās būs noderīgas arī nozares speciālistiem.