

# ROBOTITEHNIKA KUTSEKOOIIDELE

ÕPPEMATERJAL KUTSEKOOIIDELE  
TÖNU LEHTLA, MARGUS MÜÜR, TIIT RÄTSEP



# **ROBOTITEHNIKA KUTSEKOOLOIDELE**

Õppematerjal kutsekoolidele

**Tõnu Lehtla  
Margus Mür  
Tiit Rätsep**

Tallinn 2014

Käesolev õppematerjal on valminud „Riikliku struktuurivahendite kasutamise strateegia 2007-2013” ja sellest tuleneva rakenduskava „Inimressursi arendamine” alusel prioriteetse suuna „Elukestev õpe” meetme „Kutseõppe sisuline kaasajastamine ning kvaliteedi kindlustamine” programmi „Kutsehariduse sisuline arendamine 2008-2013” raames.

Õppematerjalide koostamisel on lähtutud valdkonna kutsestandardite nõuetest ja tööstuse vajadustest. Õppematerjalid on vastavuses riiklike õppekavadega ja on abiks kutseõppeasutuste õppurtele tööks vajalike teadmiste omandamisel. Kompetentsel töötajal on eeldused tööturul tugevama positsiooni saavutamiseks. Oluline on, et iga töötaja oskaks oma töökohal kasutada vastavaid seadmeid ja tehnoloogiaid parimal viisil ning tunneks kulusäästliku ja tulemusliku töö põhimõtteid.

Mehaanika ja metallitöödega seotud sari sisaldab järgmisi õppematerjale kutsekoolidele:

1. Tootmise korraldamine;
2. Mehaanilise töötlemise tehnoloogiad ja kasutatavad seadmed;
3. Metalltoodete valmistamine, koostamine ja viimistlemine;
4. Keevitustööd;
5. Lehtmetalli töötlemistehnoloogiad;
6. Mehhatroonika komponendid;
7. Robotitehnika kutsekoolidele.

Kogu sarja ettevalmistuse ja eestvedamise juures on olnud: Jüri Riives, Tõnu Lelumees, Jaak Lavin, Triin Ploompuu, Lii Topaasia, Helina Seljamäe, Leelo Kingisepp ja Piret Kärtner.

ISBN 978-9949-547-86-9 (pdf)

## Autoritest

	<p><b>Tõnu Lehtla</b> on TTÜ elektrotehnika instituudi robotitehnika professor ja õppetooli juhataja, avaldanud üle 100 teadusliku ja õppe-metoodilise publikatsiooni ja on mitme eestikeelse robotitehnika alase raamatu autor.</p> <p>Ta on üle 20 aasta lugenud ülikoolis robotitehnika loenguid ja juhendanud üliõpilasi nii bakalaureuse kui ka magistriõppes.</p>
	<p><b>Margus Müür</b> omandas tehnikateaduste magistri kraadi Tallinna Tehnikaülikooli energeetikateaduskonnas. Alates 2006. aastast on ta ülikoolis läbi viinud õppetööd automaatika ja robotika valdkonnas nii tavaõppes kui ka täiendkoolitusena.</p> <p>Alates 2007. aastast on Eesti peaekspert WordSkills ja EuroSkills mehhatroonika eriala kutsemeistrivõistlustel ning korraldanud samu võistlusi ka Eestis. Margus Müür on mitme erialase õpperaamatu kaasautor.</p>
	<p><b>Tiit Rätsep</b> on lõpetanud TTÜ mehhatroonika magistratuuri ning pärast seda töötanud pikaajaliselt robotiinsenerina erinevates ettevõtetes.</p> <p>Alates 2006. aastast on ta osalenud Robotex-il ja tegeleb igapäevaselt elektroonika ning mobiilitarkvara arendusega.</p>

## Saateks

Käesolev õpik on mõeldud kasutamiseks kutsekoolides, mis tegelevad tööstusautomaatika ja robotitehnika alase õppetööga. Raamatu koostamisel on kasutatud varasematel aastatel eesti keeles avaldatud raamatuid ja õppevahendeid. Sellele lisaks on raamatus küllalt palju viiteid internetis levitatavale robotialasele materjalile. Raamat on rohkelt illustreeritud fotode ja joonistega, mis aitavad paremini mõista seal esitatud tehnilisi ja matemaatilisi kirjeldusi. Mõnes peatükis kasutatud matemaatilised kirjeldused võivad lugejalt nõuda küllaltki head matemaatilist ettevalmistust vähemalt keskkooli matemaatikakursuse tasemel. Samas on püütud anda piisavalt selgitusi nii, et raamatus esitatud materjalist ei oleks raske aru saada ka iseseisvalt õppides või õpetaja juhendamisel. Küllalt palju tähelepanu on pööratud praktiliste oskuste arendamisele, seda eriti roboti programmeerimisel. Kuna mõned robotiga seotud probleemid nagu programmeerimine ja tehniline hooldamine on seotud konkreetsete robotitüüpidega, siis on raske anda üldist roboti programmeerimisõpetust või hooldamisõpetust. Raamatus toodud programmeerimisnäited põhinevad valdavalt ABB robotitel.

Raamatu enamik peatükke on kirjutatud Tõnu Lehtla poolt, roboti programmeerimisega seotud alajaotised on kirjutanud Margus Müür ja roboti hooldamist käsitleva 7. peatüki on kirjutanud Tiit Rätsep. Raamatu on sisuliselt toimetanud Tõnu Lehtla.

# Sisukord

Saateks .....	4
Sisukord .....	5
1. SISSEJUHATUS .....	7
1.1. Robotitehnika ajaloost .....	7
1.2. Robotite olemus ja liigitus .....	13
1.3. Tööstusrobotite ehitus ja tehnilised omadused .....	17
1.4. Tootmise tehnoloogia ja robotid .....	20
1.5. Robotite veebilehed ja veebipõhised sidusajakirjad .....	22
2. ROBOTI KINEMAATIKA .....	24
2.1. Roboti kinemaatilised ahelad ja kinemaatikaülesanded .....	24
2.2. Manipulaatori töö kirjeldamine erinevates koordinaadistikes .....	30
2.3. Silindrilistes koordinaatides kirjeldatav manipulaator .....	31
2.4. Sfäärilistes koordinaatides kirjeldatav manipulaator .....	36
2.5. Rööpkinemaatikaga manipulaatorid .....	38
2.7. Liikurroboti kinemaatika .....	40
3. ROBOTI MEHAANIKA .....	50
3.1. Ülekandemehhanismid .....	50
3.2. Manipulaatormehhanismid .....	57
3.3. Lõtkuvabad mehhanismid .....	62
3.4. Kaod ülekandemehhanismides .....	63
3.5. Robotiajami mehaanika arvutusvalemid .....	66
3.6. Robotiajami koormus .....	68
3.7. Roboti haaratsid ja tööriistad .....	70
4. ROBOTI JUHTIMINE JA PROGRAMMEERIMINE .....	81
4.1. Raja- ja trajektoori plaanimise üldprobleemid .....	81
4.2. Manipulaatori tööorgani liikumise plaanimine .....	87
4.3. Roboti juhtimise üldpõhimõtted .....	94
4.4. Roboti liikumise kirjeldamine .....	97
4.5. Robotsüsteemide arenduskeskkond ehk virtuaalne robotitehnika .....	102
4.6. Robotite programmeerimine ja programmeerimiskeeled .....	106
4.7. Kordamisharjutused .....	117
4.8. Ülesanded virtuaalsete robotitega .....	118
5. ROBOTI AJAMID .....	136
5.1. Servoajam ja servomootor .....	136
5.2. Servomootori toiteahelad .....	144
5.3. Servomootori juhtimine .....	148
5.4. Robotiajami andurid .....	150
5.5. Servoajamite seadistustarkvara .....	153
6. LIIKURROBOTITE NAVIGATSIOON .....	156
6.1. Asukoha tuvastamise viisid .....	156
6.2. Liikurroboti lähitegevuse navigatsiooniandurid .....	159
6.3. Roboti asukoha määramine tasapinnal ja ruumis .....	172
7. ROBOTITE PAIGALDAMINE, TALITLUSJÄRELEVALVE JA HOOLDAMINE .....	179
7.1. Robotite paigaldamine .....	179

7.2.	Robotite hooldus.....	184
7.3.	Robotite talitlusjärelevalve ja ohutus .....	191
VASTUSED 4. PEATÜKI HARJUTUSTELE .....		194
KASUTATUD KIRJANDUS .....		197

# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1. Robotitehnika ajaloost

Robotitehnika ajalugu on tihedalt seotud automaatika ajalooga. Inimkonna soov näha enda ümber automaatselt liikuvaid asju ulatub tuhandete aastate taha. Enamasti olid need meelelahutuseks mõeldud mänguasjad (joonis 1.1). Umbes 270 aastat eKr ehitas muistne Kreeka insener Ctesibus liikuvate osadega figuure, mis liikusid koos vee jõul käitatavate kelladega. Automaatide massiline kasutamine kasuliku töö tegemiseks algas aga tunduvalt hiljem. Enamikus on need rakendused seotud tööstusliku ajastu saabumisega. 1801. aastal leiutas Joseph Jacquard tekstiilimasina, mida juhiti perfokaardi abil. Neid programmeeritavaid kudumistelgi kasutati masstootmises. Tekstiilimasina leiutamine oli programmjuhtimise ja masstootmise alguse tähtsündmus. 1830. aastal ehitas ameeriklane Christopher Spencer nukkmehhanismiga juhitava (s.o programmjuhtimisega) treipingi. 1892. aastal ehitas Seward Babbitt Ameerika Ühendriikides haaratsiga varustatud motoriseeritud kraana, et ahjust valuplokke välja tõsta. Mehaanilised masinad, programmeerimissüsteemid ja haaratsid võeti hiljem kasutusele ka robotite juures.



**Joonis 1.1. Isetoimivad mänguasjad on olnud kasutusel juba palju sajandeid (Wikipedia)**

[www.automatadolls.com/dolls/pianoplayer.htm](http://www.automatadolls.com/dolls/pianoplayer.htm)

Tööstuslike automaatide levik õhutas inimestes fantaasiat, et tulevikus vallutavad automaadid maailma. Näiteks, 1818. aastal kirjutas Mary Shelley raamatu "Frankenstein", mis kirjeldas hirmuäratavat tehisolendit, mille oli loonud dr Frankenstein. 1920. aastal kirjutas Tšehhi näitekirjanik Karel Čapek näidendi R.U.R ehk Rossum's Universal Robots. Sõna robot tuleneb tšehhikeelsest sõnast robota, mis tähendab tööd. Näidend esietendus 1921. aastal Londonis. 1942. aastal avaldas ulmekirjanik Isaac Asimov novellis „Runaround“ kolm robotiseadust:

- Robot ei tohi kahjustada inimest ja ähvardava ohu korral peab see inimest kaitsma
- Robot peab täitma inimese käske tingimusel, et need pole vastuolus esimese seadusega
- Robot peab ka ennast kaitsma, kui enesekaitse pole vastuolus esimese ja teise seadusega.



Need seadused on olulised robotite ja muude kõrgtehnoloogiliste masinate loojate eetika kujundamiseks. Robotit on võimalik panna tegema mistahes kuritegu. Tehnoloogia arenguga muutuvad kuritegeliku käitumise tagajärjed üha ohtlikumaks. Vahetu vägivald kaugeneb kuriteo sooritajast (vrd sõjapidamist mõõgaga, püssiga, suurtükiga, programmjuhitava raketiga). Jääb mulje, et roboti looja või programmeerija polegi süüdi roboti poolt sooritatud kuriteos. Meie kõigi kohus on hoolt kanda, et see petlik mulje ei süveneks.

Pärast II maailmasõda algas automaatikas ja robotiehituses uus ajajärk. J. Presper Eckert ja John Mauchly ehitasid Pensilvania Ülikoolis arvuti ENIAC, esimese elektronarvuti maailmas. Samal aastal pandi alus ka pooljuhttehnika võidukäigule. 1948. aastal avaldas Massachusettsi Tehnikaülikooli professor Norbert Wiener raamatu „Küberneetika ehk juhtimine ja side loomas ja masinas”, mis käsitles side- ja juhtimisprobleeme elektroonilistes, mehaanilistes ja bioloogilistes süsteemides. Sellest sai alguse uus teadusharu küberneetika, mis on tihedalt seotud robotitehnikaga

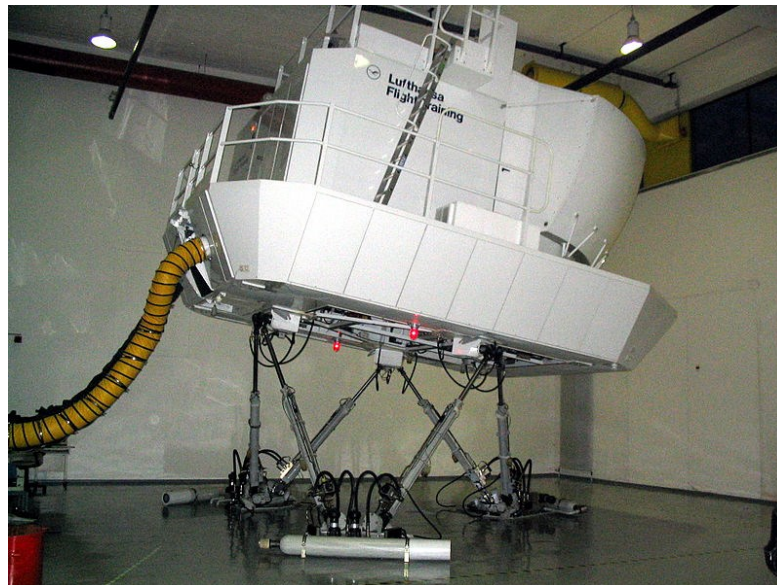
Automaatide areng jätkus ja tööstus hakkas üha enam vajama universaalseid ümberprogrammeeritavaid automaate. 1951. aastal ehitas Raimond Goertz Prantsusmaal aatomienergeetika komisjoni tellimisel esimese kaugjuhitava liigendkäe. Seadme ehitus põhines kahel mehaaniliselt ühendatud käel, millest üht (ülemseade ehk *master*) kasutati juhtimiseks ning teine (alluvseade ehk *slave*) jäljendas selle liigutusi. Samalaadised seadmed on kasutusel tänapäevani töötamiseks radioaktiivses keskkonnas. Seda leiutist on käsitletud jõutagasiside tehnoloogia olulise verstapostina. 1954. aastal ehitas Georg Devol esimese programmeeritava roboti ja võttis kasutusele universaalautomaadi mõiste, mis pani hiljem aluse ka firma Unimation nimele. G. Devol kirjutas: "Käesolev leiutis teeb inimesele esmakordselt kättesaadavaks üldotstarbelise universaalse masina, mida saab kasutada kõikjal, kus on tegemist tsüklilise tööprotsessiga."

1956. aastal kohtus Georg Devol noore lennundustööstuse inseneriga Joseph F. Engelbergeriga. Koos löid nad esimese robotifirma *Unimation Inc.* ning ehitasid 1958. aastal oma esimese roboti. Nende tegevus oli oma ajast kaugel ees. Engelbergeri sõnade järgi ei andnud firma *Unimation* kasumit kuni 1975. aastani.

1960. aastal alustati robotite Unimate väljatöötamist. Samal ajal tõi firma AMF (*American Machine and Foundry Corporation*) turule silindrilises koordinaadistikus töötava roboti Versatran, mille konstrueerisid Harry Johnson ja Veljko Milenkovic. 1962. aastal ostis General Motors firmalt *Unimation* esimene Unimate-tüüpi roboti ning pani selle New Jersey's voluliinile tööle. 1963. aastal loodi esimene arvutiga juhitud tehiskäsi (*artificial robotic arm*) *Rancho Arm*, mis ehitati puuetega inimeste abivahendiks. Käel oli 6 lüli, mis tagasid liigutuste piisava paindlikkuse.

1964. - 1965. aastal avati mitmel pool USAs tehisintellekti laboratooriumid ja robotitehnika instituudid. Roboti kinemaatika kirjeldamiseks hakati kasutada ühetaolist kinemaatiliste ahelate teisendust ehk homogeenet transformatsiooni (*homogeneous transformation*), mis on robotiteoorias kasutusel tänapäevani. Samast ajast on pärit ka idee luua rööpkinemaatikaga

robotid, kus manipulaatori kõik lülid on seotud paigalseisva alusega. Need koosnevad kahest platvormist, mille vahel on muutuva pikkusega „jalad“. Jalgade pikkuse muutmine võimaldab platvorme teineteise suhtes ruumis liigutada ja suunistada. Algselt kasutati niisuguseid platvorme lennusimulaatorites (joonis 1.2) lenduri kabiini liigutamiseks ja suunistamiseks. Kuna tegu oli platvormiga, siis nimetatakse niisugust konstruktsiooni selle loojate järgi ka *Gough/Stewarti* platvormiks. Tänapäeval on kasutusel nii kolmejalgsed kui ka kuuejalgsed rööpkinemaatikaga robotid.



**Joonis 1.2. Saksa lennufirma Lufthansa lennusimulaator kuuejalgsel rööpkinemaatikaga manipulaatoril (Wikipedia)**

Robotite valmistamine sai alguse peamiselt USAs, kuid peagi hakkas see levima üle maailma. 1967. aastal alustas Jaapan firmalt *AMF* ostetud Versatran-tüüpi robotite importimist (esimene robot Jaapanis). 1968. aastal ostis Jaapani firma *Kawasaki* hüdraulilise ajamiga roboti *Unimation* tootmise litsentsi ning alustas robotite tootmist Jaapanis. Peagi kaotas Ameerika Jaapanile oma kümme aastat kestnud liidripositsiooni robotite alal.

1969. aastal konstrueeris Stanfordini Ülikooli professor Victor Scheinman sfäärilises koordinaadistikus töötava robotkäe, mille kinemaatika tuntakse tänapäeval Stanfordini käena. Stanfordini käsi oli elektriagamitega kuue liikuvusastmega (viie pöördliikumise ja ühe lineaarliikumise) liigendkäsi, mis sobis hästi tööstuslikuks kasutamiseks ning võimaldas robotil täita keerukaid ülesandeid ja liigutada kätt mööda keerukat trajektoori, tänu millele sai teha keerukaid koostetöid ning kaarkeevitust. Stanfordini Ülikoolis loodud elektriagamitega robotkäe kinemaatika muutus robotivallas standardiks (*standard arm*).

1973. aastal tõi firma *Cincinnati Milacron* turule roboti T3 (*The Tomorrow Tool*), esimese miniarvutiga juhitava tööstusroboti. Peagi loodi juba paljudes firmades mitmed eri konstruktsiooniga robotkäed, mis suutsid kokku monteerida väikestest detailidest koostusid ning kasutasid puute- ja survetundlikke andureid.

1976. aastal kasutati robotkäät planeet Marssi uurinud kosmosesõidukitel *Viking 1* ja *Viking 2* pinnaseproovide võtmiseks. Robotkäe juhtimiseks võttis firma *Vicarm Inc.* kasutusele mikroarvuti. Sellele edule panid aluse mikroprotsessorid. Teatavasti loodi 1971. aastal maailma esimene 4-bitine mikroprotsessor ja 1974. aastal ilmus turule firma Intel poolt konstrueeritud 8-bitine mikroprotsessor Intel 8080. See protsessor pani aluse mikroarvutite võidukäigule. 1978. aastal töötas firma *Unimation* välja tööstusroboti PUMA (*Programmable Universal Machine for Assembly*). Õnnestunud ehituse tõttu sarnaneb ka paljude nüüdisrobotite ehitus PUMA robotiga (joonis 1.3).



**Joonis 1.3. Manipulaator Unimate 500 Puma (1983)**

Robotiehitus kandus edasi ka Euroopasse. 1977. aastal tõi Rootsi firma *ASEA* (firma *ABB* üks eelkäijatest) turule kaks eri suurusega elektriagamitega varustatud tööstusrobotit. Mõlema roboti programmeerimiseks ja talitluse juhtimiseks kasutati mikroarvutit. Nüüdisajal on firma *ABB* üks suuremaid robotitootjaid maailmas.

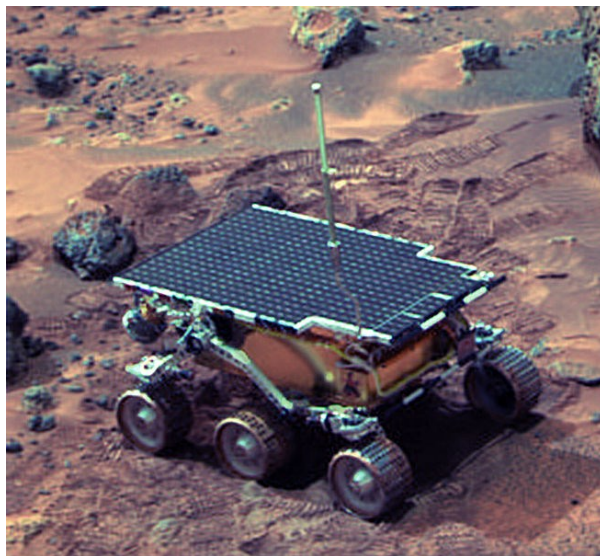
1979. aastal tõi firmad *Sankyo* ja *IBM* turule horisontaalse liigendkäega roboti, mis kujunes PUMA tüüpi robotite kõrval teiseks üldlevinud robotikäe tüübiks. *SCARA* (*Selective Compliant Articulated Robot Arm*) tüüpi robotikäsi töötati välja Yamanashi Ülikoolis Jaapanis.

1990. aastatel tegutses robotiturul enam kui 40 Jaapani firmat, sh sellised gigandid nagu *Hitachi* ja *Mitsubishi*. Võrdluseks olgu öeldud, et Ameerikas oli vaid tosinajagu firmasid, kes tootsid roboteid müügiks. Nende seas olid juhtivateks *Cincinnati Milacron* ning veidi varem ka *Westinghouse's Unimation*. Vaatamata aktiivsele teadus- ja arendustööle Ameerikas, oli Jaapan robotite tööstuslikus kasutamises jõudnud maailmas kindlalt liidripositsioonile.



**Joonis 1.4. SCARA-tüüpi manipulaator (Wikipedia)**

1997. aastal viis NASA kosmoselaev *Sojourner* Marsile marsikulguri *PathFinder*. Kulguri edukas tegutsemine Marsil võimaldas Maale saata mitmeid panoraamfotosid (joonis 1.5). See saavutus oli oluliseks teetähiseks liikurrobotite arendamisel. Maastikul või õhus isetoimivate masinate arendamine on seotud nii kosmose- ja allveeuuringutega, sõjandusega kui ka tuleviku transpordikorraldusega. Ennast isejuhtivate autode väljaarendamine on jõudnud praktiliste katsetusteni.



**Joonis 1.5. Marsikulgur Pathfinder (Wikipedia)**

1980. -1990. aastatel hakkas robotialane arendustöö üha enam kalduma ümbrustaju ja tehisintellekti arendamise suunas. Inimesesarnaste robotite ehk humanoidide välmimisega hakkasid peamiselt tegelema mitmed Jaapani firmad. Sageli olid niisugused robotid mõeldud eelkõige üldsuse tähelepanu tõmbamiseks, et sellega firma põhitegevusele kaasa aidata. 1997. aastal esitles Jaapani firma *Honda* humanoidrobotit P3, 2000. aastal esitles Jaapani firma *Honda* humanoidide uue põlvkonna robotit *Asimo* (joonis 1.6). Samal aastal esitles ka firma *Sony* näitusel *Robodex* humanoidroboteid nimega *Sony Drem Robots* ja II põlvkonna robotkoera *Aibo*.



**Joonis 1.6. Honda Company on loonud ASIMO nimelise humanoidroboti.**

Robotite kasutusvaldkond on pidevalt laienenud. Peale tööstusrobotite on hakatud roboteid kasutama ka olmes (robot-tolmuimejad ja -muruniidukid), meditsiinis (robotkirurgid), loomakasvatuses (robot-lüpsjad), demineerimistöodel (joonis 1.7), sõjanduses jm.



**Joonis 1.7. Demineerija ja demineerimisrobot**

Robotite arendamine jätkub. Robotid on muutumas inimese igapäevasteks kaaslasteks. Neist on inimesele palju kasu, kuid pahatahtlikes kätes võivad nad muutuda ka inimesele ohtlikuks. Kindlasti on üheks selliseks valdkonnaks sõjandus. USA kaitseministeeriumi prognoosi kohaselt algab hiljemalt 2025. aastal robotisõdade ajastu. Juba praegu on olemas automaatselt maastikul või õhus orienteeruvad masinad. Nende tegevus sõltub esialgu veel inimesest, kes on neid loonud ja programmeerinud. Võimatu pole aga ka olukord, kus tehisintellekt hakkab vastu võtma iseseisvaid otsuseid.

## 1.2. Robotite olemus ja liigitus

Tänapäeval mõeldakse roboti all automaati, mis asendab inimest tööprotsessis. Kuna inimene teeb enamikku töödest käte abil, siis on ka tööstusrobotil mehaaniline käsi ehk manipulaator. Manipulaatori juhtimiseks kasutatakse mikroprotsessoritel põhinevat juhtseadet. Tavaliselt on robot integreeritud mingisse tootmisprotsessi ja töötab koos teiste masinatega. Nendeks masinateks võivad olla mitmesugused tööpingid (stantsid, treipingid, freespingid) või konveierid. Robotid võivad töötada esemete haaramiseks ja teisaldamiseks mõeldud haaratsiga või teha teatud kindlat tööd selleks ettenähtud tööriistaga.

Robotite kasutamiseks on olemas kolm peamist põhjust:

1. töökeskkond on inimese jaoks ohtlik (ohtlikud gaasid, radioaktiivsus)
2. tehtav töö on inimese jaoks nüri, monotoonne (väikeste detailide stantsimine)
3. inimese füüsilised võimed ja keskkonnataluvus pole töö tegemiseks piisavad

**Robotite liigituse** aluseks võivad olla mitmesugused põhimõtted. Näiteks saab roboteid liigitada otstarbe, kasutusala, konstruktsiooni, ajamite, energiavarustuse, kinemaatilise skeemi, juhtimissüsteemi ja muude tunnuste järgi.

Sõltuvalt roboti kasutusotstarbest ja inimese elutegevuse valdkonnast saab roboteid liigitada järgmiselt:

**Tööstusrobotid** ja **transpordirobotid** on eesmärgipäraseks liikumiseks (*motion control*) mõeldud masinad, mida kasutatakse tootmise automatiseerimiseks (*industry automation*), samuti telemanipulatsiooni, autonoomse transpordi, ladude ja kaubamajade automatiseerimisvahendid. Tööstusrobotiteks võivad olla nii kohtrobotid (*stationary robots*) kui ka liikurrobotid (*mobile robots*). Vt ka joonis 1.8.



**Joonis 1.8. Tööstuslik mobiilne transportrobot (Lynx Mobile Robot)**

**Kohtrobotid** põhinevad statsionaarsel manipulaatoril, mis paigaldatakse tehnoloogiliste vajaduste kohaselt kas

- põrandale
- seinale
- lakke
- liikuvale masinale.

**Liikurrobotid** koosnevad pinnal (põrandal, maapinnal) liikuvast veokist ning sellele paigaldatud seadmestikust, vajaduse korral ka manipulaatorist.

**Turvateenistus- ja sõjandusrobotid:** valverobotid ja avaliku korra tagamise robotid, iseliikuvad soomukid, tiibraketid, piloodita luurelennukid, robotsüsteem sihtmärkide tuvastamiseks ja neutraliseerimiseks Syrano (joonis 1.9). Relvastatud piloodita lennuk ehk nn droon Predator on näidatud joonisel 1.10.

**Uurimisrobotid:** autonoomsed või kaugjuhtimisega kosmose ja süvamere uurimise masinad, samuti uurimistöodeks tervistkahjustavas keskkonnas ettenähtud mehitamata sõidukid, amfiibsõidukid. Joonisel 1.11 on näidatud firma Bluefin Robotic autonoomne allveesõiduk, mida kasutatakse edukalt ookeanide ja meresügavuste uuringuteks.



**Joonis 1.9. Relvastatud robotsõidukid (paremal Syrano - esimene robot lahinguväljal)**



**Joonis 1.10. Relvastatud piloodita lennuk ehk droon**  
**Joonis 1.11. Autonoomne allveesõiduk (Bluefin Robotics)**

**Olmerobotid:** laiatarbe automaatsed tolmuimejad, muruniidukid jms, mis aitavad inimest majapidamistöodel, õpiabirobotid, mis aitavad inimesel omandada teadmisi või oskusi. Robot-tolmuimeja on varustatud akustilise radariga, mis näitab takistusi (kas ees on sein või mõni muu takistus). Robot-tolmuimeja on 30...60 cm läbimõõduga lame ketas. Lisaks tolmuimejale võib robotisse olla integreeritud ka põrandapesur. Niisugusel robotil on neli funktsiooni: robot koristab – korjab üles lahtise prügi, liiva ja mustuse, peseb – kasutab pinnale hõõrumiseks puhast pesuvedelikku, küürib – nühib hoolega põranda puhtaks ja kuivatab – korjab üles niiskuse ning jätab põranda puhtaks ja kuivaks.



**Joonis 1.12. Robot-tolmuimeja ja robot-muruniiduk**

Tolmuimejaga sarnase tööpõhimõttega töötab ka muruniiduk. Robot-muruniiduk võib olla eelprogrammeeritav, nt õpetamisega. Programmeerimiseks peab hooldaja koos muruniidukiga ettenähtud ala läbi jalutama. Muruniiduk jätab selle trajektoori meelde ja suudab seda hiljem autonoomselt korrata. Muruniidukitel on ka muid programmeerimis- ja talitluspõhimõtteid.

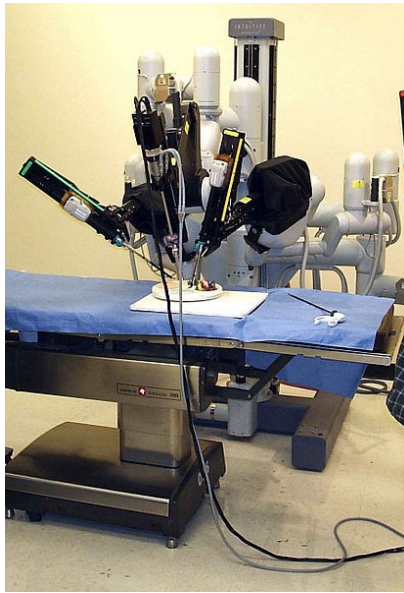
**Mängurobotid** - mõtlemist, konstrueerimist ja programmeerimisoskusi arendavad mänguasjad igas vanuses inimestele, sh detailidest kokkupandavad, nn LEGO-robotid (joonis 1.13) ja kõik automaatliikurid, mida inimese fantaasia suudab välja mõelda ja realiseerida.



**Joonis 1.13. LEGO-robotid noorematele lastele**

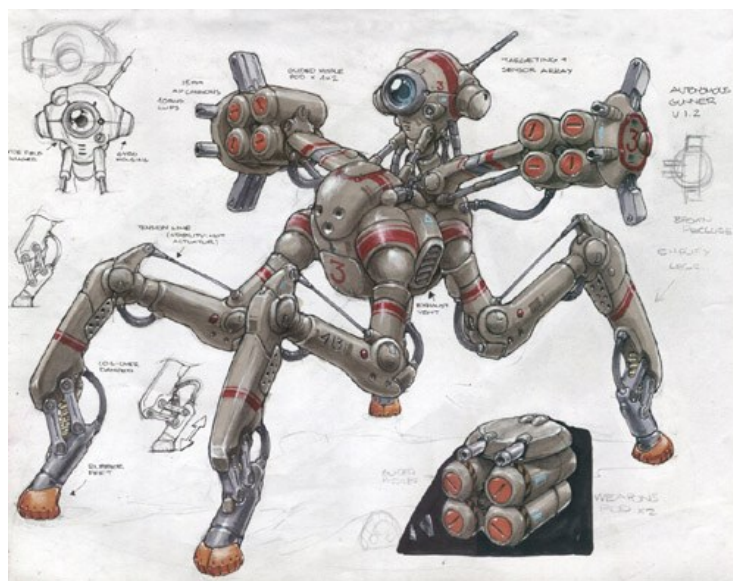


**Meditšiinirobotid:** haiglate automatiseerimiseks, operatsioonidel, taastusravil olevate inimeste jälgimiseks (robotõed) või liikumispuudega inimeste liikumisfunktsiooni taastamiseks kasutatavad robotid, bioloogiliselt inspireeritud robotid (bioonikal põhinevad robotid), ohtlike ainetega ja bioloogiliselt saastatud keskkonnas töötavad robotid. Robotkirurgia esimesed katsetused pärinevat 1980-ndate aastate keskelt. Joonisel 1.14 on näidatud robotkirurgid günekoloogilisteks ja ortopeedilisteks operatsioonideks (firma *MAKO Surgical RIO Robotic Arm for Orthopedic Surgeries*)



**Joonis 1.14. Robotkirurgid**

**Ulmerobotid:** kõik automaatliikurid, mida inimese fantaasia suudab välja mõelda, kuid ei suuda täna realiseerida; nt Hollywoodi filmitegelased, Frankensteini koletis jt. Nende jaoks on kasutusel mõiste *science fiction robot*. Üks näide niisugusest robotist on joonisel 1.15.



**Joonis 1.15. Ulmeline relvastatud robot-sõdur**

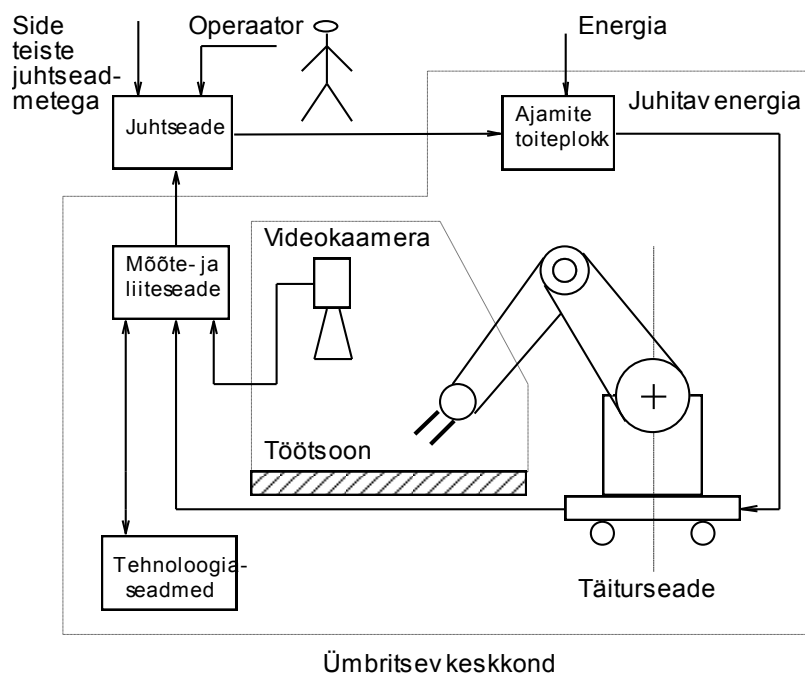
### 1.3. Tööstusrobotite ehitus ja tehnilised omadused

**Tööstusrobotite koostisosad.** Statsionaarne tööstusrobot koosneb ühest või mitmest manipulaatorist ja programmjuhtimisseadmest. Liikurobot koosneb programmjuhitavast veokist (sõidukist), millel võib paikneda üks või mitu manipulaatorit.

Tööstusroboti **manipulaatori** põhilised mehaanilised komponendid on

- liikuroboti veok
- manipulaatori käsi e teisaldusmehhanism
- manipulaatori käelaba e suunistusmehhanism
- manipulaatori tööorgan (haarats või tööriist).

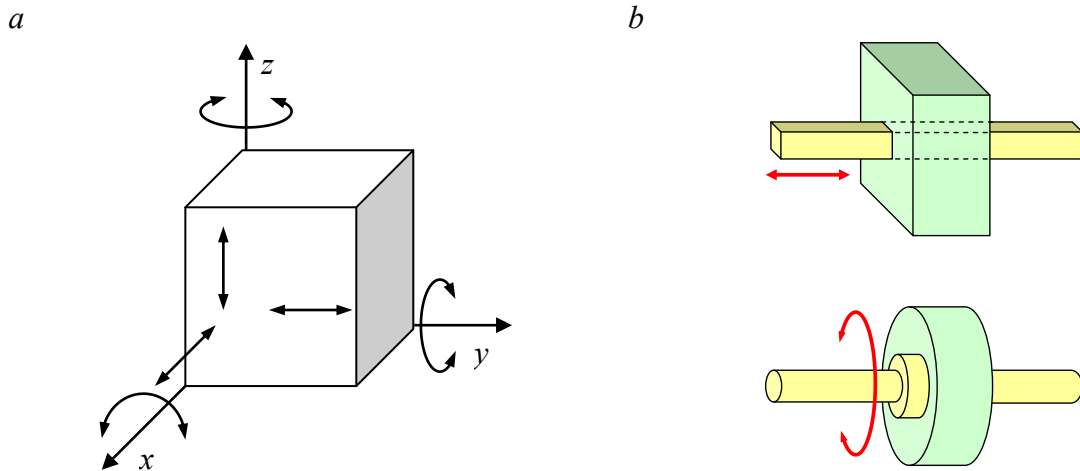
Robotite enamlevinud tööriistadeks on punktkeevitustangid, keevituspõletid, värvipihustid, mutrikeerikud jms. Robotsüsteemi võimalikud koostisosad on näidatud joonisel 1.16.



**Joonis 1.16. Robotsüsteem**

**Kohtrobotite ehitus ja liigitus.** Kohtroboteid saab liigitada manipulaatori ehituse järgi jada- ja rööpkinemaatikaga robotiteks. Jadakinemaatikaga robotitel on kõik lülid üksteise suhtes jadamisi nagu nt inimkäel õlavars ja küünarvars. Lülide arvust ja asendist üksteise suhtes sõltub roboti tööruumi ulatus ning võime tööd teha. Täiuslikuks liikumiseks ruumis on vaja kokku kuut liikuvusastet - kolme kulgliikumist ja kolme pöördliikumist. Need võimaldavad meil roboti tööorgani juhtida suvalisse tööruumi punkt ja suunistada tööorganit igas võimalikus suunas (joonis 1.17). Tavaliselt on manipulaatoritel neli kuni kuus lüli ning vastavalt sellele ka sama palju liikuvusastmeid. Iga lüli saab eelmise lüli suhtes liigutada vaid ühes koordinaadis. Niisuguseks liikumiseks võib olla kas sirgliikumine või pöördliikumine. Vastavad kinemaatilised

paarid on näidatud joonisel 1.17. Iga lüli liikuma panemiseks on manipulaatoril ka oma ajam. Võrdlusena võib öelda, et keraliigendi korral oleks lülil kolm liikuvusastet, kuid väga raske on luua kolme liikuvusastmega ajamit.

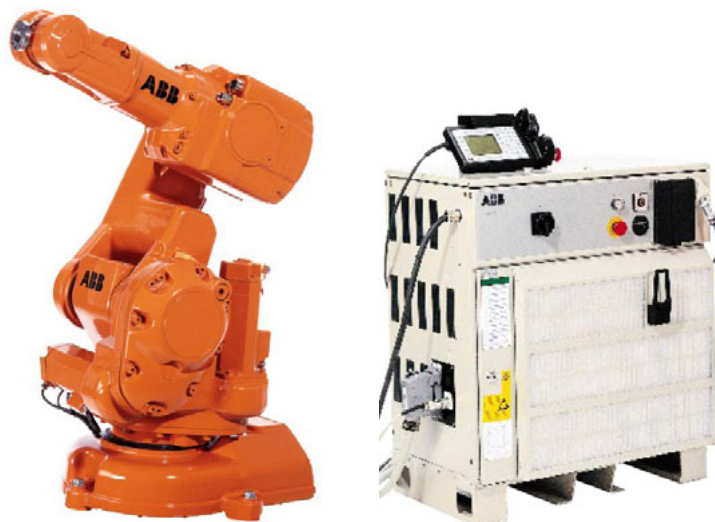


**Joonis 1.17. Liikumised ruumis ja ühe liikuvusastmega kinemaatilised paarid**

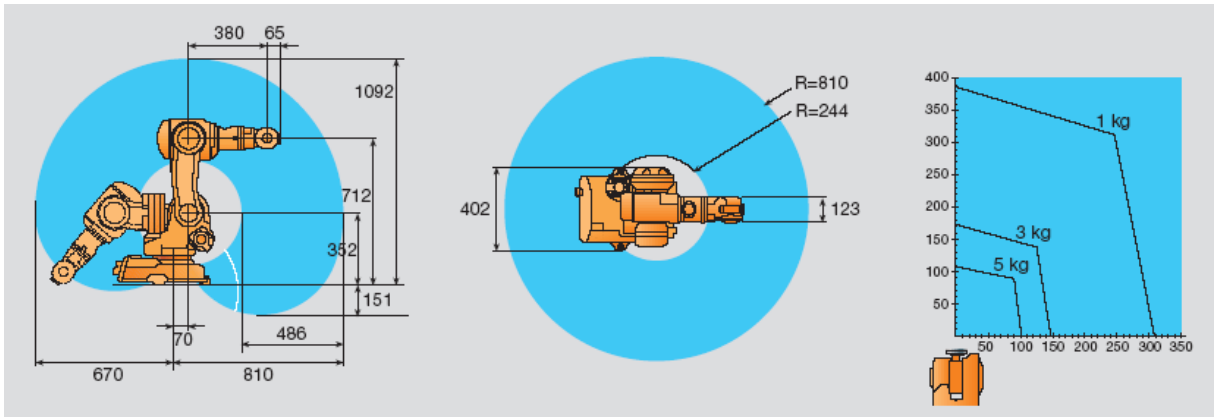
Liikuvusastmete ehk koordinaatide arv (number of axes) võimaldab liikumist järgmiselt:

- 1 koordinaat – 1 sirgjooneline või 1 pöördliikumine
- 2 koordinaati - liikuda etteantud punkti tasapinnal
- 3 koordinaati - liikuda etteantud punkti ruumis
- 4 koordinaati - liikuda etteantud punkti ruumis ja pöörata eset ümber ühe telje
- 5 koordinaati - liikuda etteantud punkti ruumis ja pöörata eset ümber kahe telje
- 6 koordinaati - liikuda etteantud punkti ruumis ja pöörata eset suvalisse asendisse;

Firma ABB valmistatud tööstusroboti IRB 140 jadakinemaatikaga manipulaator ja juhtseade on joonisel 1.18. Sama roboti tööruumi (*envelope*) mõõtmed ja manipulaatorile lubatud koormused on näidatud joonisel 1.19.



**Joonis 1.18. Tööstusroboti IRB 140 manipulaator ja juhtseade S4Cplus koos teisaldatava õpetamispuldiga**



**Joonis 1.19. ABB roboti IRB 140 tööruum ja lubatud teisaldatav mass**

Viimastel aastatel on hakatud kasutama üha enam ka rööpkinemaatikaga manipulaatoreid. Näited neist on esitatud joonisel 1.20. Vasakul on firma ABB poolt valmistatud Flex Picker ehk paindlik noppija, mida laiemalt kasutatakse toiduainetetööstuses. Robot on väga suure toimekiirusega ning sobib hästi väikese massiga toodete kokkukorjamiseks konveierilt ja pakendamiseks. Toodeteks võivad olla nii kompvekid, saiapätsid, lihalõigud jms. Suur toimekiirus saavutatakse tänu sellele, et lülide ajamid asuvad kõik paigalseisval alusel ega koorma liikuvaid osasid. Liikuvate osade väike mass (väike inertsimoment) tagabki suure toimekiiruse.



**Joonis 1.20. Rööpkinemaatikaga manipulaatorid**

Robotit iseloomustavad peamised tehnilised andmed on järgmised:

1. Teisaldatav mass (handling capacity)
2. Koordinaatide arv (number of axes)
3. Toitepinge, toiteahela võimsus ja haaratsit toitva suruõhu rõhk
4. Lülide liikumisulatused, tööruumi kuju ja mõõtmed
5. Lülide maksimaalsed liikumiskiirused ja kiirendused
6. Manipulaatori ja juhtseadme mass
7. Töökeskkonna omadused
8. Juhtimis- ja talitlusjärelvalve funktsioonid

## 1.4. Tootmise tehnoloogia ja robotid

Tootmise areng on seotud ühiskonna arenguga ja selles võib täheldada suhteliselt pikki rahuliku arengu ning nendega vahelduvaid tormilise arengu perioode. Rahulikele arenguperioodidele järgnevad tavaliselt tööstuslikud revolutsioonid, mis omakorda mõjutavad kogu ühiskonna arengut. Nii on areng kulgenud agraarühiskonnast tööstusrevolutsiooni kaudu industriaalühiskonda ja sealt infotehnoloogilise revolutsiooni kaudu postindustriaalsesse infoühiskonda.

**Tööstusrevolutsioon** oli tehnoloogilises mõttes energeetiline revolutsioon, mis sai alguse Watti aurumasina leiutamisest ja maapõue kütusevarude (fossiilkütuste) tööstuslikust kasutamisest. Sellega kaasnes energia tarbimise ja keskkonna saastamise drastiline suurenemine.

**Infotehnoloogilise revolutsiooni** sisuks on automaatide (sh robotite) massiline kasutuselevõtt.

### **Tootmine:**

- käsitöö manufaktuuris, töökojas
- käsitööl põhinev tööstuslik konveiertootmine (H. Fordi autotööstus ja *Ford Model T*)
- automaatliinidel põhinev vooltootmine (masstootmine)
- robotsüsteemidel põhinev paindtootmine (tänapäeva autotööstus).

### **Tootmise dilemmad:**

- käsitöö või automaatide töö
- tootmise paindlikkus (ümberseadistatavus) või jäikus (mittemuudetavus)
- masstootmine või individuaaltootmine
- odav hind või kõrge kvaliteet.

### ***Käsitöö (handicraft production)***

***Vooltootmine e masstootmine (mass production)*** – suure hulga standardtoodete valmistamine. Standardimine võimaldas muuta tooted odavaks, masinate kasutamine suurendas detailide täpsust, spetsialiseerumine tööviljakust. Ühe kindla tööoperatsiooni tegemiseks polnud vaja muuta keha asendit ega vahetada tööriista. Koosted liikusid ühelt töökohalt teisele konveierliini abil. Töölise vilunud liigutused muutusid aina kiiremaks, kuid käsitööl põhinev masstootmine muutus töölisele koormavaks. 20. sajandil oli selle tootmisviisi loojaks ja populariseerijaks Henry Ford (auto *Ford Model T*).

***Portsjon- ehk saritootmine (batch production)*** on tootmisviis või tootmine, mille puhul tooteid tehakse portsjonite kaupa ning see vastandub pidevale tootmisele (*continuous production*) või tähtajalisele tootmisele (*on time production*). Portsjontootmise näiteks on pagaritöökoda. Toodet (leiba) küpsetatakse ahjus portsjonite kaupa. Portsjontootmise puuduseks on protsessi peatamine ja sellega seotud ajakulu, seadmete ümberseadistamise ja/või täiendava katsetamise vajadus jms.

Saritootmine on kasulik väikeettevõtetes, kus tootmise maht on väike. Saritootmist kasutatakse ka katsetootmisel. Väikese partii (portsjoni) puhul pole tootja kahjum suur, kui tootel pole turul minekut.

**Tellimustootmine** (*Just in Time, JIT*) on vaheladudeta tootmisviis, millega kiirendatakse investeeringute tasuvust (vähendatakse tasuvusaega), suurendatakse efektiivsust ja parandatakse kvaliteeti. Iga toode või detail valmib täpselt selleks hetkeks, mil teda vajatakse tootmise jätkamiseks. See süsteem eeldab väga täpset tootmiskorraldust.

Portsjontootmise eeliseks on väikesed algkulutused, sest ühtede ja samade seadmetega saab valmistada erinevaid tooteid.

**Toyota tootmissüsteem** (*Toyota Production System, TPS*) on omaette idamaisel filosoofial põhinev tootmise korraldusviis, mis seob tootjad, varustajad ja kliendid üheks tervikuks.

Põhieesmärgiks on likvideerida ebakõlad tootmises ehk tootmissaaste (*waste*). Eristatakse 7 liiki ebakõlaid:

- defektidega tooted (*defects*)
- ületootmine (*overproduction*)
- transport (*transportation*)
- ooteaeg (*waiting*)
- lõpetamata toodang, detailide varud (*inventory*)
- liikumine (*motion*)
- liigtöötlemine (*overprocessing*).

**Väheste kulutustega tootmine** (*lean manufacturing*) on ärihuvisid arvestav tootmise plaanimine selleks, et süstemaatiliselt vähendada toote hinda tootmise kõikides etappides ning see põhineb tervel real tootmist iseloomustavatel inseneriaruannetel. Kulutuste revideerimine algab toote projekteerimisest (dilemma projekti tehnilise ja ärilise õnnestumise vahel).

Edasi kaasatakse tootmise ülevaatamisse süsteemiinsenerid, mehaanikainsenerid, elektriinsenerid, tarkvarainsenerid - kõik, kes revideerivad tootmisprotsessi omast vaatevinklist. Süsteemiinsenerid käsitlevad üldisi valikuid (riistvara – tarkvara, elekter – mehaanika). Mehaanika-, elektri- ja tarkvarainsenerid vaatavad üle oma valdkonna valikud selleks, et muuta toode odavamaks ning säilitada seejuures tema funktsionaalsed ja tehnilised omadused.

**Väheste kulutustega tootmise põhimõtted:**

- probleemide lahendamine kohe nende tekkimisel ehk kvaliteetne ja defektideta toode kohe ilma hilisemate parandusteta;
- ressursside, jäätmete ja saaste minimeerimine, ohutuse suurendamine;
- pidev täiustamine, hinna vähendamine, tootlikkuse suurendamine, informatsiooni jaotamine (laialijagamine);
- tootmine kliendi soovil (*pull processing*), s.t toodet tõmbab klient, mitte ei tõuka tootja;

- paindlikkus ehk erinevate toodete valmistamine väheste ümberseadistamistega, mis tähendab ka väikeste partiide valmistamist suure efektiivsusega;
- usalduslike ja pikaajaliste suhete loomine, ühiste riskide võtmine, kulutuste ja info jagamine tarnijatega.

**Väheste kulutustega tootmine on õige tulemuse saavutamine õigel ajal, õiges kohas ja õiges koguses, tekitades minimaalselt jäätmeid ja saastet, olles samal ajal paindlik ja muutustele avatud.**

**Paindlikkus** saavutatakse robotite ja programmjuhtimisega tööpinkidega töötluskeskuste abil. Paintöötlemissüsteem (*flexible manufacturing system, FMS*).

**Raalprojekteerimine koos raaltootmisega** (*computer-aided design, computer-aided manufacturing, CAD-CAM*) on tänapäeva tootmise üks põhisuundumusi tootmistsükli vähendamiseks. Arvuti virtuaalkeskonnas projekteeritud toode viiakse võimalikult lühikese ajaga tootmisse. Näiteks saab tootmises kasutatavaid roboteid arvuti virtuaalkeskonnas programmeerida enne tehasehoone valmimist ja robotite füüsilist paigaldamist.

**Pöördprojekteerimine** (*reverse engineering*) on projekti tuletamine valmistootest. Uus toode luuakse ilma vanalt tootelt midagi otseselt kopeerimata. Tavaliselt tehakse seda selleks, et vältida autoriõiguse või litsentsi ostmist. On patendiseaduse rikkumisvõimaluste tõttu seotud riskidega, kuid on vastukaaluks patendiomanike agressiivsele ja väljapressivale käitumisele turul. Pöördprojekteerimist kasutatakse ka konkurenti toote uurimiseks ja hindamiseks. Pöördprojekteerimine on olulisel kohal sõjanduses, kui tahetakse vaenlase relvasüsteeme järele teha.

## 1.5. Robotite veebilehed ja veebipõhised sidusajakirjad

### Veebilehed tööstusrobotite otsinguks

[www.abb.com](http://www.abb.com)

[www.fanucrobotics.com](http://www.fanucrobotics.com)

[www.staubli.com](http://www.staubli.com)

[www.kuka.com](http://www.kuka.com)

[www.festo.com](http://www.festo.com)

[www.mitsubishielectric.com](http://www.mitsubishielectric.com)

[www.scara-robots.com](http://www.scara-robots.com)

[www.motoman.com/products/robots](http://www.motoman.com/products/robots)

[www.intelligentactuator.com](http://www.intelligentactuator.com)

[www.paa-automation.com](http://www.paa-automation.com)

[www.robots.epson.com](http://www.robots.epson.com)

[www.yamaharobotics.com](http://www.yamaharobotics.com)

[www.densorobotics.com](http://www.densorobotics.com)

**The International Robots & Vision Show** - [www.robots-vision-show.info](http://www.robots-vision-show.info)

Tehisnägemisealane konverentsiinfo.

**Machine Vision Online e-Newsletters** - [www.machinevisiononline.org](http://www.machinevisiononline.org)

Tehisnägemisealane info.

**Engineers Handbook** - [www.engineershandbook.com/sitemap.htm](http://www.engineershandbook.com/sitemap.htm)

Inseneri *on-line* andmebaas.

**Manufacturing Automation** - [www.automationmag.com](http://www.automationmag.com)

Valmistusautomaatika ja tootmise automatiseerimise probleemid.

**RobotBooks.com** - [www.robotbooks.com](http://www.robotbooks.com)

Robotitehnikat käsitlevate raamatute ülevaated, ajakirjad, õppe- ja mängurobotite komplektid, hobirobotid.

**Antenen Research** - [www.antenen.com/](http://www.antenen.com/)

Suurim valik uusi ja kasutatud roboteid koos nende andmetega.

**UsedRobots.com** - [www.used-robots.com/](http://www.used-robots.com/)

Robotite ja nende osade ost ja müük firmadelt Motoman, Panasonic, ABB, Fanuc jt.

**The International Federation of Robotics** - [www.ifr.org/](http://www.ifr.org/)

Rahvusvahelise robotikaföderatsiooni veebileht.

**Robotics Industries Association** - [www.roboticonline.com](http://www.roboticonline.com)

Robotika tööstusassotsiatsiooni veebileht. Assotsiatsiooni kuulub üle 200 kollektiivliikme, kuhu on koondunud tuhanded spetsialistid ja eksperdid.

**Principles of robotics -**

<http://www.epsrc.ac.uk/research/ourportfolio/themes/engineering/activities/principlesofrobotics/>

Robotieetika põhimõtted.

**Robotics history timeline -**

[http://robotics.ece.auckland.ac.nz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=31](http://robotics.ece.auckland.ac.nz/index.php?option=com_content&task=view&id=31)

Robotitehnika illustreeritud ajalugu.

### **Kordamisküsimused**

1. Mis on robot?
2. Millest tuleneb nimetus „robot“?
3. Millest koosneb robotsüsteem?
4. Mille järgi saab roboteid liigitada?
5. Nimetage roboti poolt tehtavaid töid ja tööstusharusid, kus roboteid kõige enam kasutatakse.
6. Võrrelge jada- ja rööpkinemaatikaga robotite tehnilisi omadusi: tööruumi suurust võrreldes roboti enda mõõtmetega, tööorgani liikumiskiirust, positsioonimistäpsust.
7. Mitu liikuvusastet on vaja keha teisaldamiseks ja suunistamiseks ruumis.
8. Kirjeldage ühe liikuvusastmega kinemaatilisi paare.



## 2. ROBOTI KINEMAATIKA

### 2.1. Roboti kinemaatilised ahelad ja kinemaatikaülesanded

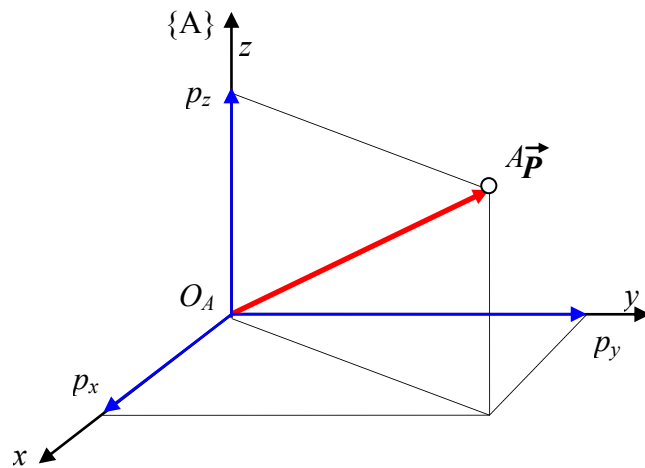
**Roboti kinemaatika** uurib ajamitega tekitatud manipulaatori või veoki liikumist arvestamata seejuures rakendatud jõudude mõju. Liikumist iseloomustavateks suurusteks on manipulaatori lülide asendid, kiirused, kiirendused ja tõuked. Kõik need suurused on üksteisega seotud. Roboti tööorgani (haaratsi või tööriista) asendit kirjeldatakse asukohavektori ja suunistusega ruumi ristkoordinaadistikus. Kiirust iseloomustatakse asendi muutumisega ajas ehk asendi tuletisega aja järgi. Kiirendus on omakorda kiiruse muutumine ajas ehk kiiruse tuletis aja järgi. Kiirenduse tuletis aja järgi on aga tõuge. **NB! Käesolevas peatükis kasutatud matemaatilised kirjeldused ei kuulu kutsekoolide matemaatikaprogrammi, kuid on hädavajalikud roboti tööpõhimõttest arusaamiseks.**

Roboti juhtimiseks on kõige olulisem kirjeldada tema tööorgani asukohta ümbritsevas ruumis. See ei ole lihtne ülesanne, sest roboti manipulaatoril on palju üksteisega seotud lülisid, mis moodustavad keeruka kinemaatilise süsteemi. Tööorgani asukoha kirjeldamine ümbritseva ruumi või roboti aluse koordinaadistikus toimub koordinaadistike järk- järguliste teisenduste abil. Manipulaatori iga lüliga seotakse üks koordinaadistik, mida kirjeldatakse kinemaatilises ahelas sellele lülile eelnenud lüli koordinaadistikus. Kuna kaks kõrvutiasuvat lüli on omavahel pööratud või nihutatud ainult ühe koordinaadi suhtes, siis on niisugune kirjeldus ja vastav koordinaatide teisendamine suhteliselt lihtne. Terve manipulaatori kinemaatika kirjeldamiseks tuleb koordinaadistike teisendamine läbi viia kõikide omavahel kõrvuti asuvate lülide suhtes.

**Punkti asukoht ristkoordinaadistikus {A}** on kirjeldatav vektoriga  ${}^A\vec{P}$  (joonis 2.1), mis on määratud selle projektsiooniga telgedele  $x, y, z$ .

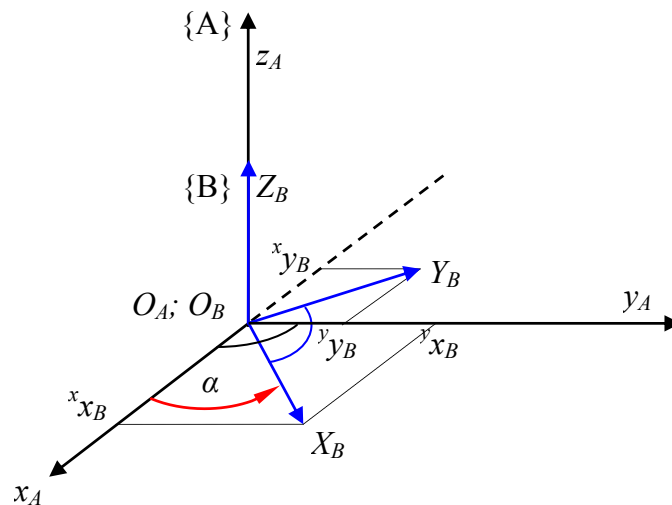
$${}^A\vec{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

**Keha orientatsioon ehk suunistus** ruumis määratakse ristkoordinaadistikus {A} kolme ühikvektoriga  $x_B, y_B, z_B$ . Need vektorid on üksteisega risti ning moodustavad kehaga seotud ristkoordinaadistiku {B}. Seega on keha suunistuse muutumine kirjeldatav ühe ristkoordinaadistiku pööramisega teise ristkoordinaadistiku suhtes (joonis 2.2). Ristkoordinaadistiku {B} teljed loeme ühikvektoriteks, mida saab kirjeldada koordinaadistikus {A}. Joonisel näidatud juhtumil on koordinaadistik {B} pööratud koordinaadistiku {A} suhtes ümber  $z$ -telje. Üldjuhul võib pööramine toimuda kõigi kolme telje  $x, y, z$  suhtes. Ühikvektor  $x_B$  on kirjeldatav koordinaadistikus {A} selle kolme projektsiooniga koordinaadistiku {A} telgedel  $x, y, z$ . Samamoodi on kirjeldatavad ka ühikvektorid  $y_B$  ja  $z_B$ .



Joonis 2.1. Punkti asendivektor ristkoordinaadistikus

$${}^A\vec{X}_B = \begin{bmatrix} x x_B \\ y x_B \\ z x_B \end{bmatrix} \quad {}^A\vec{Y}_B = \begin{bmatrix} x y_B \\ y y_B \\ z y_B \end{bmatrix} \quad {}^A\vec{Z}_B = \begin{bmatrix} x z_B \\ y z_B \\ z z_B \end{bmatrix} \quad (2.2)$$



Joonis 2.2. Koordinaadistiku {B} kirjeldamine koordinaadistikus {A}

Vektorid  ${}^A\vec{X}_B$ ,  ${}^A\vec{Y}_B$ ,  ${}^A\vec{Z}_B$  moodustavad **rotatsioonimaatriksi**  ${}^A R_B$ , mis iseloomustab koordinaadistiku {B} suunistust koordinaadistiku {A} suhtes. Koordinaadistiku {B} telgede projektsioonidest saab moodustada rotatsioonimaatriksi järgmiselt (2.3):

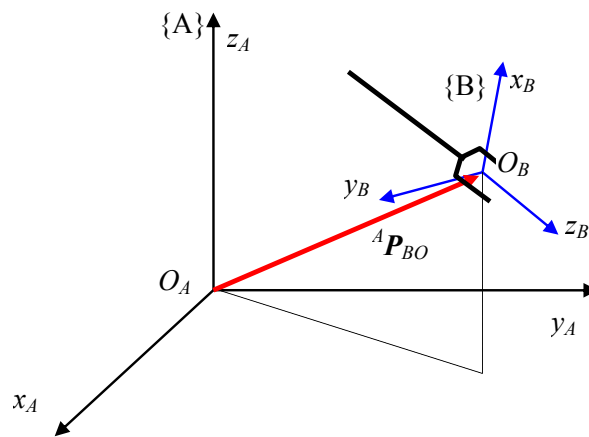
$${}^A R_B = \begin{bmatrix} x x_B & x y_B & x z_B \\ y x_B & y y_B & y z_B \\ z x_B & z y_B & z z_B \end{bmatrix} = [{}^A\vec{X}_B, {}^A\vec{Y}_B, {}^A\vec{Z}_B] \quad (2.3)$$

Kui lähtuda joonisel 2.2 näidatud olukorrast, kui koordinaadistikku {B} on pööratud ümber z-telje, ja lugeda koordinaadistikku {B} teljed ühikvektoriteks (s.t nende pikkus on 1), siis saadakse rotatsioonimaatriks kujul:

$${}^A_B R(Z) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Suvalise koordinaadistiku ehk teljestiku {B} asend teljestiku {A} suhtes (joonis 2.3) määratakse selle teljestiku alguspunkti asendivektoriga  ${}^A \vec{P}_{BO}$  ning rotatsioonimaatriksiga  ${}^A_B R$

$$\{B\} = \left\{ {}^A_B R, {}^A \vec{P}_{BO} \right\} \quad (2.5)$$



Joonis 2.3. Haaratsi või tööriista suunistuse määramine

**Erijuhtumitel:**

1) lükatud teljestikus {B} kirjeldatud asendivektorit  ${}^B \vec{P}$  (joonis 2.3) kirjeldatakse koordinaadistikus {A} kahe vektori summana

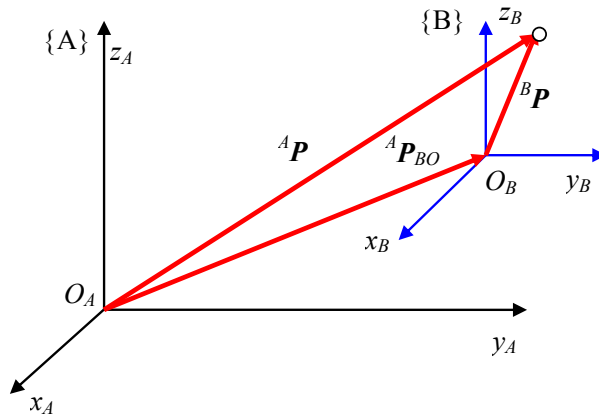
$${}^A \vec{P} = {}^B \vec{P} + {}^A \vec{P}_{BO} \quad (2.6)$$

2) pööratud teljestikus {B} kirjeldatud asendivektorit  ${}^B \vec{P}$  kirjeldatakse koordinaadistikus {A} rotatsioonimaatriksi  ${}^A_B R$  abil, kusjuures asendivektor  ${}^A \vec{P}$  on rotatsioonimaatriksi  ${}^A_B R$  ja asendivektori  ${}^B \vec{P}$  korrutis.

$${}^A \vec{P} = {}^A_B R \cdot {}^B \vec{P} \quad (2.7)$$

Rotatsioonimaatriks võimaldab ka vastupidist teisendust, s.t määrata teljestiku {A} suunistust teljestiku {B} suhtes. Seda kirjeldab rotatsioonimaatriks  ${}^A_B R$ . Vastupidist teisendust nimetatakse

pöördteisenduseks, mida maatriksite puhul tähistatakse astmega -1. Lineaaralgebra kursusest on teada, et rotatsioonimaatriksi pöördmaatriks võrdub transponeeritud maatriksiga ehk maatriksiga, mille read ja veerud on omavahel vahetatud



Joonis 2.4. Asendivektori teisendamine lükatud teljestikus

$${}^A_B R = {}^B_A R^{-1} = {}^B_A R^T \quad (2.8)$$

**Asendivektori üldistatud teisendamiseks**, s.o lükatud ja pööratud teljestikus {B} antud vektori  ${}^B \vec{P}$  kirjeldamiseks koordinaadistikus {A}, kasutatakse valemit

$${}^A \vec{P} = {}^A_B R \cdot {}^B \vec{P} + {}^A \vec{P}_{BO} \quad (2.8)$$

Valemi 2.10 saab esitada ka kujul

$${}^A \vec{P} = {}^A_B T \cdot {}^B \vec{P} \quad (2.10)$$

kus  ${}^A_B T$  on koordinaadistiku {B} teisendusmaatriks (*Homogeneous Transform*).

**Koordinaadistiku {B} teisendusmaatriks** saadakse 3x3 rotatsioonimaatriksi ja 3x1 teljestiku alguspunkti asendivektori ühendamisel. Valemi 2.10 saab esitada kujul

$$\begin{bmatrix} {}^A \vec{P} \\ - \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{{}^A_B R} & \boxed{{}^A \vec{P}_{BO}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^B \vec{P} \\ - \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Viimase rea [0 0 0 1] lisamine teisendusmaatriksile ning 1 lisamine asendivektoritele on matemaatiline manipulatsioon, mille tulemusena saadakse **4x4 ruutmaatriks** ja **4x1 asendivektorid**, mille viimast elementi asendi määramisel arvesse ei võeta.

Seega tuleb kahe kõrvuti oleva ja kinemaatilise paariga seotud manipulaatori lüli koordinaadistike teisendamiseks koostada nn  $4 \times 4$  teisendusmaatriks. Terve manipulaatori kinemaatika kirjeldamiseks ja tööorgani asendi määramiseks roboti aluse või ümbritseva ruumi koordinaadistikus tuleb kõik üksikud teisendusmaatriksid omavahel järjekorras läbi korrutada.

**Kinemaatika otsene ülesanne.** Manipulaatori kinemaatika otsese ülesande lahendamisel leitakse manipulaatori lülide mõõtmete ning nende lülide omavaheliste suhteliste asendivektorite ja pöördenurkade järgi manipulaatori tööorgani (haaratsi) asendivektor ja suunistusnurgad manipulaatori baaskoordinaadistikus. Lühidalt öeldes toimub haaratsi või tööriista asendi määramine baaskoordinaadistikus lülide etteantud koordinaatide (nt suhteliste pöördenurkade) järgi.

**Kinemaatika pöördülesanne.** Manipulaatori kinemaatika pöördülesande lahendamisel tuleb tööorgani etteantud asendi ja suunistusnurkade järgi määrata manipulaatori kõikide lülide omavahelised asendivektorid ja pöördenurgad, s.t määrata lülide asend (nt suhtelised pöördenurgad) haaratsi või tööriista etteantud baaskoordinaatide järgi.

Kinemaatika otsese ülesande lahendamise meetodid:

- geomeetriline meetod (geomeetria ja trigonomeetria põhiteisendused)
- maatriksmeetod (koordinaadistike teisendusmaatriksid).

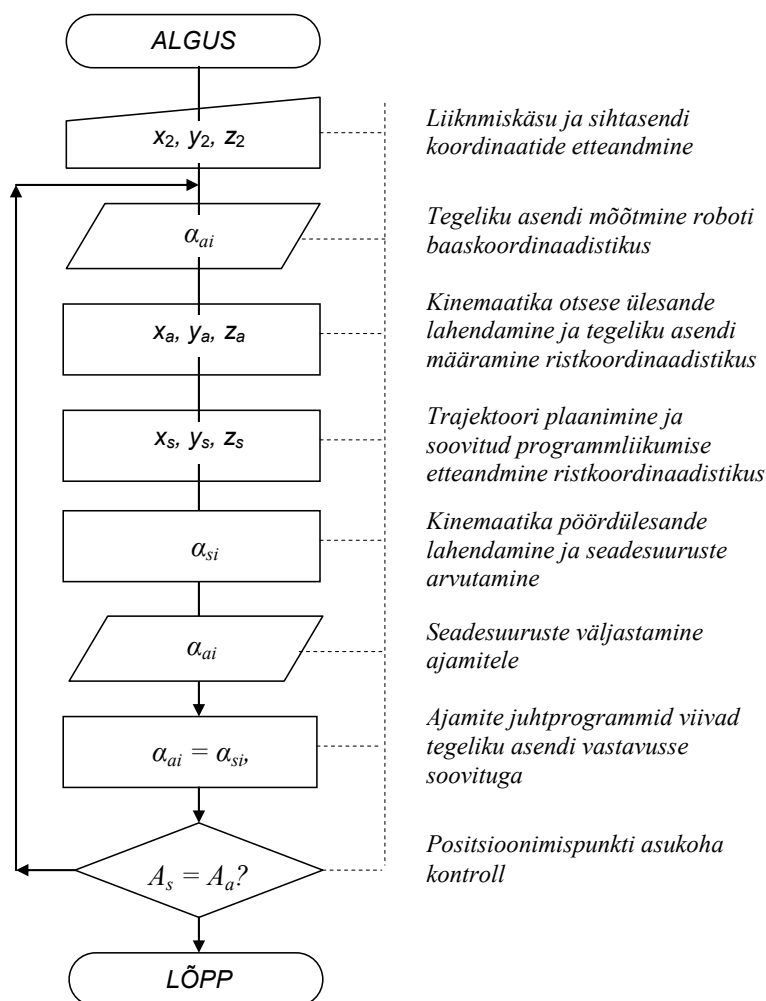
Kinemaatika pöördülesande lahendamise meetodid:

- mitme võimaliku lahendi puhul tuleb määrata manipulaatori poos
- lahendite otsimine kõigi võimalike meetoditega (algebraised, geomeetrilised, numbrilised)

Roboti juhtimisel antakse programmiga ette liikumise siht- ehk positsioonimispunkti koordinaadid, trajektoori soovitatav kuju ning liikumise iseloom ehk kiirusdiagramm. Tööorgani viimiseks algasendist lõppasendisse peab juhtseade lahendama järgmised ülesanded:

1. määrama andurite signaalide järgi robotkäe lülide tegeliku asendi ehk lülide omavahelised suhtelised pöördenurgad ( $\alpha_{ia}$ )
2. arvutama suhteliste pöördenurkade ( $\alpha_{ia}$ ) järgi tööorgani tegeliku asendi ristkoordinaadistikus  $x_a, y_a, z_a$ , s.t lahendama manipulaatori **kinemaatika otsese ülesande**
3. **plaanima trajektoori ning liikumisdiagrammi.** Sirgjoonelise liikumise korral peab juhtseade määrama trajektoori sihi, sellel liikumise suuna ning ajalise seaduspärasuse
4. leidma tööorgani soovitud liikumise jaoks jooksvate asendite projektsioonid ristkoordinaadistikus  $x_s, y_s, z_s$ , vajaduse korral leidma ka kiirusvektori vastavad projektsioonid
5. määrama soovitud liikumise jaoks vajalikud robotkäe lülide asendid ( $\alpha_{is}$ ) ning väljastama need ajamitele seadesignaalidena, s.t lahendama manipulaatori **kinemaatika pöördülesande**
6. teostama kõikide lülide ajamitega võimalikult täpselt soovitud etteantud liikumise
7. kordama eespool loetletud tegevusi kuni positsioonimispunkti jõudmiseni ning seejärel peatama liikumise.

Nendele tegevustele vastav roboti juhtimise algoritmi plokk skeem on joonisel 2.5.



**Joonis 2.5 Manipulaatori liikumise juhtimise algoritmi plokk skeem**

Roboti manipulaator koosneb teisaldus- ja suunistusmehhanismidest.

**Teisaldusmehhanismi** (käe) lülide arv ja kinemaatilise ahela struktuur määravad manipulaatori üldise ehituse ja välisilme. Lülide mõõtmised määravad manipulaatori liikumisulatus ja tõstevõime.

**Suunistusmehhanism** (käelaba) on kompaktne, tema lülide liikumisulatus on väike ning ta mõjutab manipulaatori ehitust ja välisilmet vähem kui teisaldusmehhanism. Käelabas kasutatakse põhiliselt rotatsioonipaaridega sidestatud pöördliikumisega lülisid.

Teisaldusmehhanismi lülisid ühendavad kinemaatilised paarid määravad koordinaadistiku, milles manipulaatori lülid liiguvad. Kolme lineaarliikumise puhul töötab manipulaator ristkoordinaadistikus, kahe lineaarliikumise ja ühe pöördliikumisega manipulaator töötab silindrilises koordinaadistikus. Kahe pöördliikumise ja ühe lineaarliikumisega manipulaator

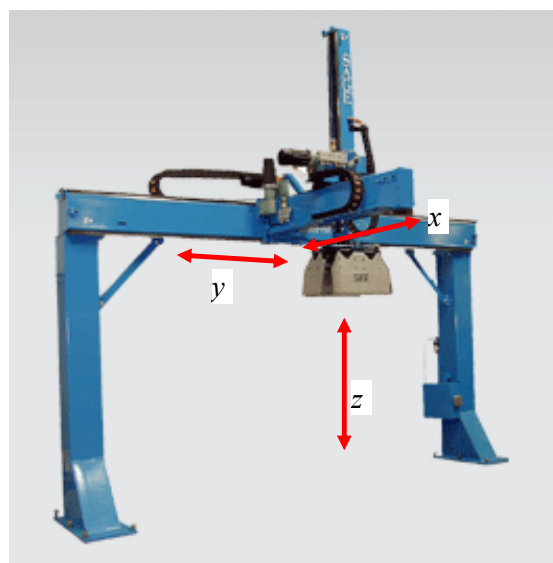
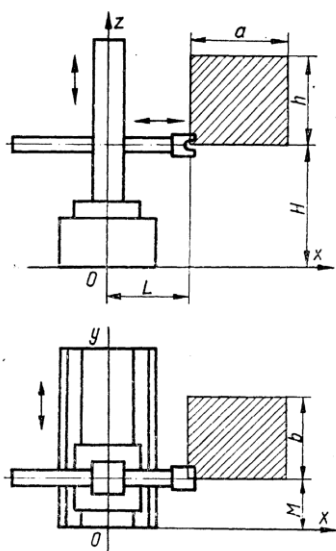
töötab sfäärilises koordinaadistikus. Kui manipulaatoril on liigendkäsi, siis võib see töötada silindrilises või sfäärilises nurkkoordinaadistikus. Mida rohkem on käsivarrel lülide, seda paindlikumalt saab robot töötada, kuid seda keerulisemaks kujuneb manipulaatori konstruktsioon. Seepärast piirduakse manipulaatorite puhul vaid minimaalselt vajalike lülide arvuga. Enamikul manipulaatoritel on 3 käsivarrelüli.

Täiendavate liikumisastmete lisamine annab manipulaatorile parema **manööverdatavuse**. Tänu manööverdatavusele saab robot töötada raskesti ligipääsetavates kohtades seadmete kerde sees, takistuse taga jne.

## 2.2. Manipulaatori töö kirjeldamine erinevates koordinaadistikes

Inimene on harjunud teda ümbritseva kolmemõõtmelise ruumiga, mida kõige enam kujutatakse ette ristkoordinaadistikus. Meid ümbritsevad majad on enamuses risttahuka-kujulised, mille mõõtmeid iseloomustatakse kolmes ristruuas suunas: pikkuse, laiuse ja kõrgusega. Samuti on kõige lihtsam määrata esemete asukohta ruumis kolme ristsuunalise mõõtme abil. Robotil on enamikel juhtudel pöörliikumise lülid, mille asendit määratakse pöördenurga kaudu. Sirg- ja pöörliikumise lülide abil saab roboti tööorganit liigutada ka silindrilises või sfäärilises koordinaadistikus.

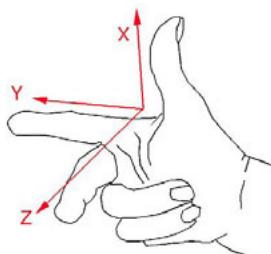
**Ristkoordinaatides kirjeldatav manipulaator.** Kolmelülilist ristuvate translatsioonipaaridega ahelat kasutatakse ristkoordinaadistikus töötava manipulaatori (*gantry robot*) korral (joonis 2.6). Sellise manipulaatori töösooniks on risttahukas, mille külgede pikkused  $a$ ,  $b$ ,  $h$  vastavad tööorgani liikumisulatusele, suurused  $L$ ,  $M$  ja  $H$  aga määravad kindlaks töösooni asukoha ristkoordinaadistikus  $Oxyz$ .



**Joonis 2.6. Ristkoordinaatides kirjeldatav manipulaator**

Ristkoordinaadistikus töötava manipulaatori kinemaatikaülesannet on lihtne lahendada, sest roboti lülide liikumissihhi saab valida piki ruumi ristkoordinaadistiku telgi. Manipulaatori

tööruum on risttahuka kujuline. Teavet ristkoordinaadistikus töötavate robotite tootjate ja kasutusala kohta saab leida veebilehelt: [Ristkoordinaadistikus töötavate robotite tootjad](#). Ristkoordinaadistiku teljed võib paika panna kahel eri viisil: parema või vasaku käe reegi järgi. Parema käe reegel on näidatud joonisel 2.7. Koordinaadistike teisendamisel on oluline jälgida, et kõik roboti kirjeldamiseks kasutatavad koordinaadistikud oleks valitud sama reegli järgi.

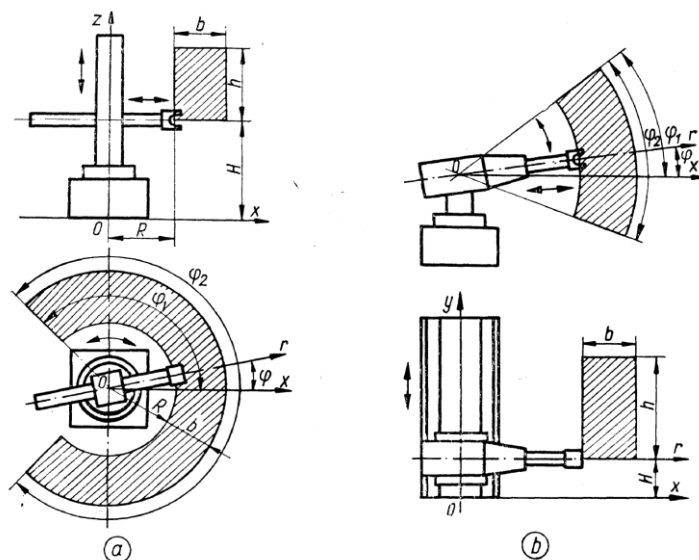


**Joonis 2.7. Koordinaadistiku parema käe reegel**

Koordinaadistike pöörämisel loetakse tavaliselt positiivseks suunaks vastupäeva pööre. Selleks et määrata pöörde suunda, tuleb kujutleda end vaatlejana, kes vaatab koordinaadistikku telje otsast keskpunkti poole.

### 2.3. Silindrilistes koordinaatides kirjeldatav manipulaator

**Silindrilises koordinaadistikus** töötava manipulaatori töösooniks on osa õõnsast silindrist. Silindrilises koordinaadistikus töötava manipulaatori kinemaatika ja tööruumi näited on joonisel 2.8. Manipulaatori paigalseisev alus on seotud baaskoordinaadistikuga. Tööorgani võimalikud asendid moodustavad roboti tööruumi, mis on antud juhul osa õõnsast silindrist. Roboti manipulaatori koordinaadistike kohta saab vaadata näiteid veebilehelt „[Robotite tüübid](#)”.



**Joonis 2.8. Silindrilises koordinaadistikus töötav manipulaator: a püstteljega töösoon, b rõhtteljega töösoon**





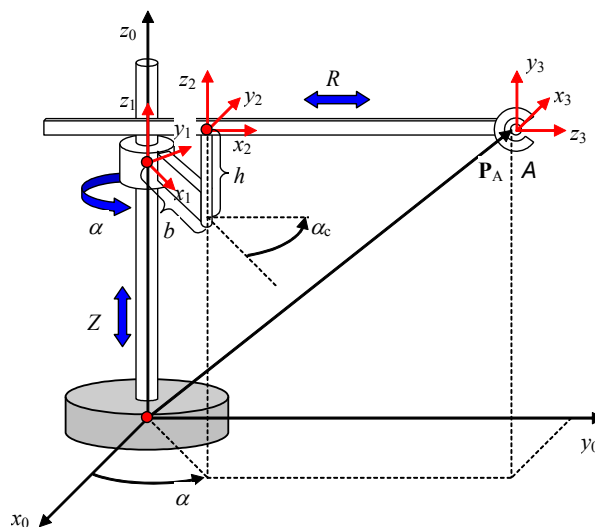
**Joonis 2.9. Silindrilises koordinaadistikus robotid Versatran, Seiko RT3300 ja Fanuc M300**

Silindrilises koordinaadistikus roboti arvutuskeem on joonisel 2.10. Manipulaatori tööorgani asendit kirjeldab vektor:

$$\vec{P}_A = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

kus

$$\begin{aligned} p_x &= b \cos \alpha + R \cos(\alpha + \alpha_c) \\ p_y &= b \sin \alpha + R \sin(\alpha + \alpha_c) \\ p_z &= Z + h \end{aligned} \quad (2.13)$$



**Joonis 2.10. Silindrilises koordinaadistikus töötava manipulaatori kinemaatika arvutuskeem**

Asendivektori komponente kirjeldavaid võrrandeid (2.13) saab kasutada manipulaatori kinemaatikaülesande lahendamiseks. Niisugust lahendusviisi nimetatakse kinemaatikaülesande

geomeetriliseks lahendamiseks, sest võrrandid leitakse geomeetrilise konstruktsiooni põhjal. Võrrandite keerukus sõltub manipulaatori lülide konfiguratsioonist (vastastikusest asetusest). Põhimõtteliselt võib võrrandite põhjal lahendada nii kinemaatika otsese kui ka pöördülesande. Ainsaks raskuseks on asjaolu, et trigonomeetriliste avaldistega võrrandid osutuvad pöördülesande lahendamisel sageli transsendentseks ning ei oma ilmutatud üldlahendeid. See aga ei takista võrrandite arvlahendite leidmist.

Rotatsioonimaatriksid

$${}^0_1R = \begin{vmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad {}^1_2R = \begin{vmatrix} \cos \alpha_c & -\sin \alpha_c & 0 \\ \sin \alpha_c & \cos \alpha_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.14)$$

Teisendusmaatriksid

$${}^0_1T = \begin{vmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad {}^1_2T = \begin{vmatrix} \cos \alpha_c & -\sin \alpha_c & 0 & b \\ \sin \alpha_c & \cos \alpha_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad {}^2_3T = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.15)$$

Manipulaatori otsese kinemaatikaülesande lahendamiseks tuleb leida kõigi kolme teisendusmaatriksi korrutis:

$${}^0_3T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (2.16)$$

Summaarse teisendusmaatriksi abil saab leida tööorgani asukoha roboti baaskoordinaadistikus

$${}^0\vec{P} = {}^0_3T \cdot {}^3\vec{P} \quad (2.17)$$

**Silindrilises nurkkoordinaadistikus** töötava ehk horisontaalse liigendkäega (SCARA-tüüpi) roboti töösooniks on samuti osa õõnsast silindrist. Seejuures võib silindri telg olla horisontaalne või vertikaalne. Vastavad robotid on joonisel 2.11. SCARA-tüüpi roboti kinemaatika on näha joonisel 2.12. Horisontaalse liigendkäe liikumist kirjeldavad suhteliselt lihtsad võrrandid ning kinemaatika otsene ja pöördülesanne on ilmutatud kujul lahendatavad. Manipulaatori tööorgani asendit tähistab punkt A, mille asukoha saab määrata nii ristkoordinaadistikus  $0xyz$  kui ka silindrilises nurkkoordinaadistikus  $0\alpha_1\alpha_2z$ .



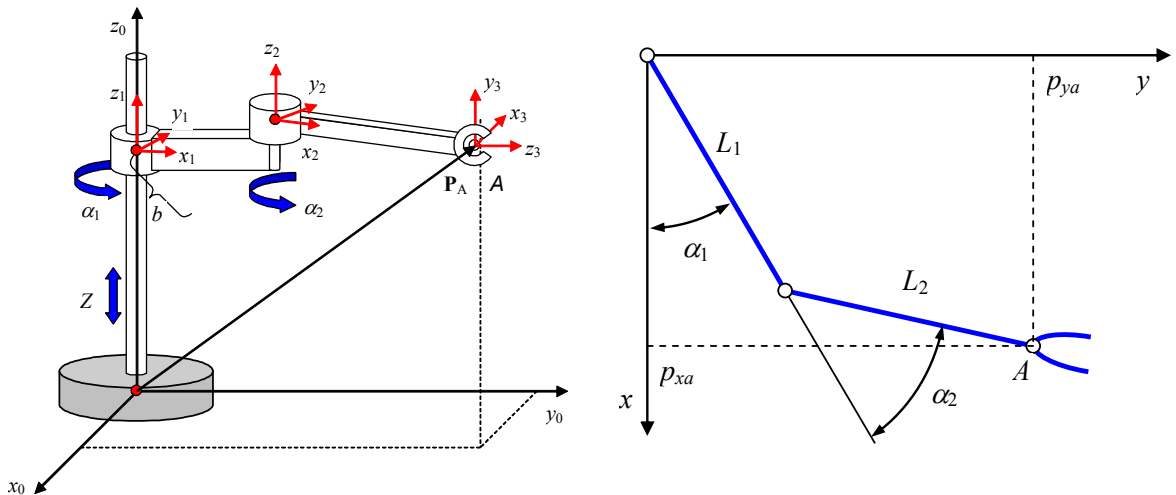
**Joonis 2.11. Liigendkäega horisontaal- ja vertikaalteljega silindrilises nurkkoordinaadistikus töötavad robotid**

Manipulaatori kinemaatika otsene ülesanne lahendatakse järgmise võrrandisüsteemi abil:

$$\vec{P}_A = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

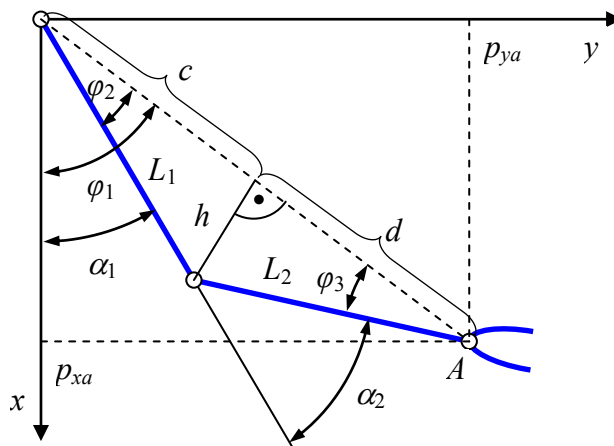
$$\begin{aligned} p_{xa} &= L_1 \cos \alpha_1 + L_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \\ p_{ya} &= L_1 \sin \alpha_1 + L_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$p_{za} = z_A$$



**Joonis 2.12. Liigendkäega silindrilises nurkkoordinaadistikus töötava manipulaatori arvutuskeem**

Võrrandid (2.19) võimaldavad lahendada ka kinemaatika pöördülesande, kuid tuleb arvestada, et nurkade  $\alpha_1$  ja  $\alpha_2$  avaldamine on sealt küllaltki tülikas. Seepärast on kinemaatika pöördülesande lahendamisel otstarbekas lähtuda joonisel 2.13 toodud geomeetrisest konstruktsioonist.



**Joonis 2.13. Kinemaatika pöördülesande geomeetiline lahendamine ning nurkade  $\alpha_{1e}$  ja  $\alpha_{2e}$  leidmine tööorgani soovitud asendi  $A_e(x_e, y_e)$  korral**

Pöördülesande **geomeetrilisel** lahendamisel kirjutatakse joonisel 2.13 näidatud kolmnurkade põhjal järgmised võrrandid:

$$\begin{aligned}
 r &= c + d \\
 r &= \sqrt{x_e^2 + y_e^2} \\
 h &= \sqrt{L_1^2 - c^2} \\
 h &= \sqrt{L_2^2 - d^2}
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Kahest viimasest võrrandist saab avaldada abisuuruse  $c$

$$c = \frac{r^2 + L_1^2 - L_2^2}{2r}
 \tag{2.21}$$

Arvutuste käigus on sobiv leida kõigepealt järgmised nurgad:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 &= \arctan(y_e/x_e), \text{ kui } x_e > 0 \\
 \varphi_1 &= \pi/2, \text{ kui } x_e = 0 \\
 \varphi_1 &= \pi + \arctan(y_e/x_e), \text{ kui } x_e < 0 \\
 \varphi_2 &= \arctan(h/c) \\
 \varphi_3 &= \arctan(h/d)
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

Lülide soovitud pöördenurgad  $\alpha_{1e}$  ja  $\alpha_{2e}$  saab leida järgmiselt:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{1e} &= \varphi_1 - \varphi_2 \\
 \alpha_{2e} &= \varphi_2 + \varphi_3
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

Kinemaatikaülesande **algebraiseks** lahendamiseks kasutatakse manipulaatori lülidega seotud koordinaadistike rotatsiooni- ja teisendusmaatrikseid.

Koordinaadistik 3 on koordinaadistiku 2 suhtes pööratud  $90^\circ$  võrra ümber  $z$ -telje ja seejärel veel  $90^\circ$  võrra ümber  $x$ -telje.

Rotatsioonimaatriksid

$${}^0_1R = \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad {}^1_2R = \begin{vmatrix} \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}
 \tag{2.24}$$

Teisendusmaatriksid

$${}^0_1T = \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad {}^1_2T = \begin{vmatrix} \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 & r_1 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad {}^2_3T = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & r_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}
 \tag{2.25}$$

Manipulaatori otsese kinemaatikaülesande lahendamiseks tuleb leida kõigi kolme teisendusmaatriksi korrutis:

$${}^0_3T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \quad (2.26)$$

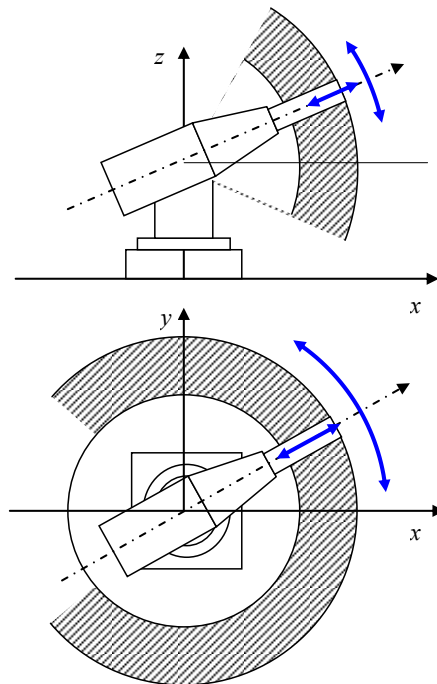
Tööorgani asend roboti baaskoordinaadistikus:

$${}^0\vec{P} = {}^0_3T \cdot {}^3\vec{P} \quad (2.27)$$

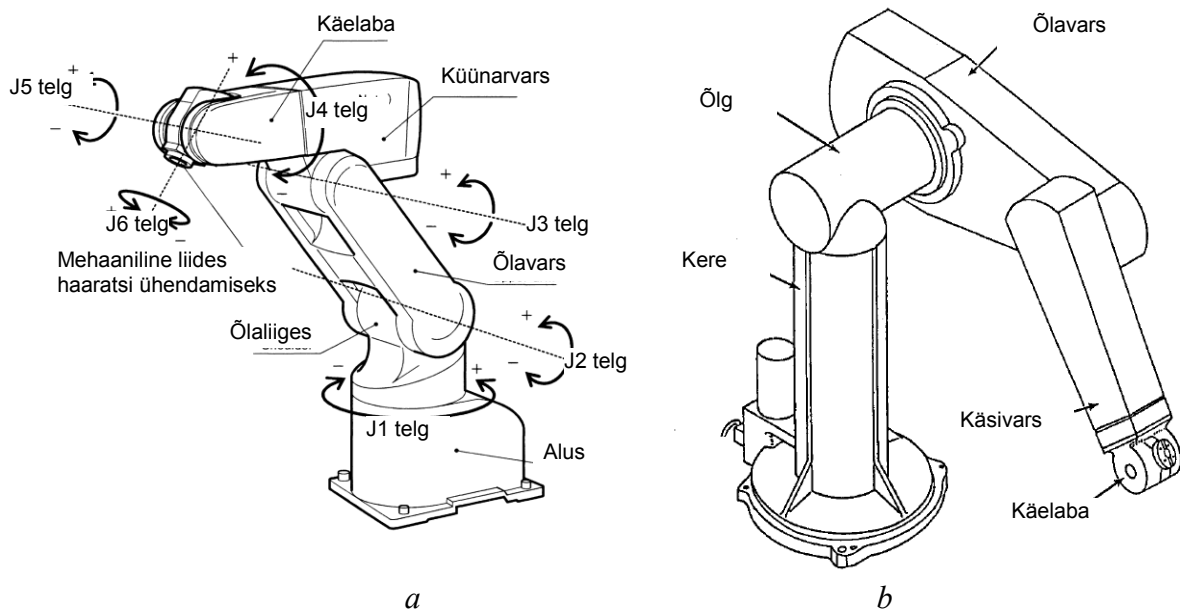
Valemiga 2.26 leitakse roboti summaarne teisendusmaatriks, mille abil saab omakorda lahendada kinemaatika otseülesande ehk määrata lülide pöördenurkade abil tööorgani asukoht roboti baaskoordinaadistikus või ümbritseva ruumi koordinaadistikus.

## 2.4. Sfäärilistes koordinaatides kirjeldatav manipulaator

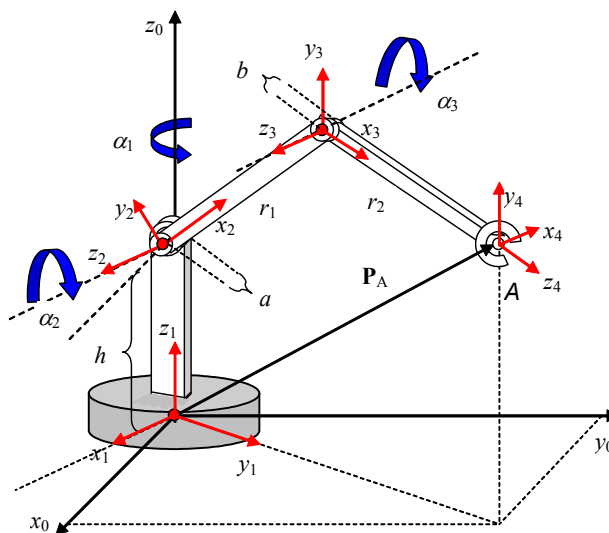
**Sfäärilises koordinaadistikus** (joonis 2.14) ja **sfäärilises nurkkoordinaadistikus** (joonis 2.15) töötava manipulaatori töösooniks on osa õõnsast kerast. Enamik nüüdisaegseid roboteid on vertikaaltasandil liikuva liigendkäega ning töötavad nn sfäärilises nurkkoordinaadistikus. Niisugused robotid kasutavad töötamisel kõige tõhusamalt ümbritsevat ruumi. Nende kokkutõmmatud liigendkäsi võtab vähe ruumi, kuid väljasirutatult ulatub see küllalt kaugele ning roboti efektiivne tööruum on suur.



**Joonis 2.14. Sfäärilises koordinaadistikus töötava manipulaatori töösoon**



**Joonis 2.15. Sfäärilises nurkkoordinaadistikus töötavad liigendkäega robotid:  
*a* firma Mitsubishi 6 liikuvusastmega manipulaator ja  
*b* firma Unimation roboti PUMA 560 manipulaator**



**Joonis 2.16. Sfäärilises nurkkoordinaadistikus töötava liigendkäega manipulaatori arvutuskeem**

Manipulaatori (joonis 2.16) teine teljestik on esimese suhtes pööratud ümber  $z$ -telje  $90^\circ$ , seejärel ümber  $x$ -telje  $90^\circ$  ning ümber  $z$ -telje nurga  $\alpha_2$  võrra.

Koordinaadistike teisendusmaatriksid

$$\begin{aligned}
 {}^0_1T &= \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} & {}^1_2T &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & a \\ \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\
 {}^2_3T &= \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 & r_1 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} & {}^3_4T &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & r_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Teisendusmaatriksis  ${}^1_2T$  sisalduva rotatsioonimaatriksi saab leida korrutisega

$${}^1_2R = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 1 \end{vmatrix} \tag{2.29}$$

Asendivektor 0. koordinaadistikus  ${}^0\bar{P}$  leitakse teisendusmaatriksi  ${}^0_4T$  ja  ${}^4\bar{P}$  korrutisena

Manipulaatori otsese kinemaatikaülesande lahendamiseks tuleb leida kõigi nelja teisendusmaatriksi korrutis:

$${}^0_4T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \tag{2.30}$$

$${}^0\bar{P} = {}^0_4T \cdot {}^4\bar{P} \tag{2.31}$$

Valemiga 2.31 leitakse tööorgani asend roboti baaskoordinaadistikus.

## 2.5. Rööpkinemaatikaga manipulaatorid

Traditsiooniliselt ehitatud manipulaatorite kinemaatika põhineb jadamisi monteeritud lülidel. Seejuures on ahela iga järgmine lüli koos ajamiga selle ahela eelmistele lülidele ja ajamitele koormuseks. Suhteliselt kogukate ajamite paigutamine haaratsi või tööorgani vahetusse lähedusse on aga oluliselt piiranud robotite kinemaatilisi ja dünaamilisi kasutusvõimalusi. Ajamite paigutamisel kinemaatilise ahela algusesse või ahelas mitme lüli võrra ettepoole on seni rakendatud keeruka kinemaatikaga manipulaatormehhanisme. Nende mehhanismide rakendamine võimaldab küll viia elektromehaanilise energiamuunduri, s.o ajami mootorist, haaratsist või tööorganist eemale, kuid manipulaatormehhanismi keerukuse ja suhteliselt suure massi tõttu ei suuda see oluliselt parandada roboti dünaamikat.

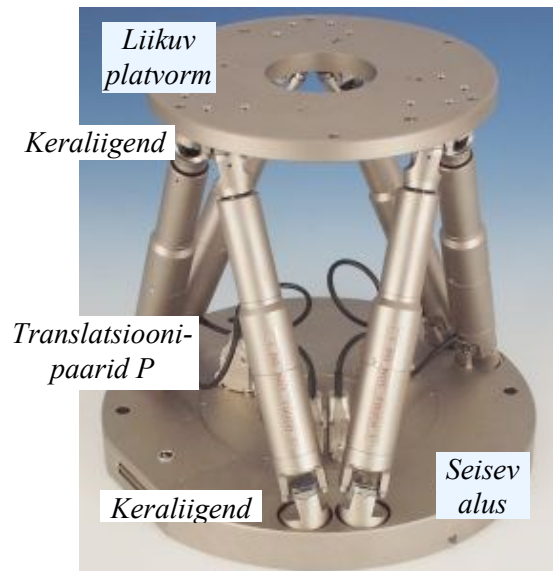
Uueks suunaks robotite mehaanikas on rööplülidega manipulaatorite kasutuselevõtt. Sel alal võib nimetada manipulaatoreid, mis on saanud tuntuks nimetuste *Trepot* või *Hexapot* all, mis eesti keeles tähendavad „kolmjalg” või “kuusjalg”. Samasse manipulaatorite rühma kuulub ka nt firma ABB robot *FlexPicker* (joonis 2.17). Rööpkinemaatikaga robotite kohta vt veebilehte [Rööpkinemaatikaga robotid](#).

Rööpkinemaatikaga roboti eelised:

- kuus ajamit käitavad ühte kergelt lüli, väike inertsimoment, parem dünaamika
- lülide positsioonimisvead ei liitu
- suurem jäikus (mehaaniline täpsus)
- pole liikuvaid ühenduskaableid
- suurem täpsus, parem liikumise korratavus (*repeatability*)
- suurem töökindlus.



Trepod: ABB Flex Picker



Hexapod: Fraunhofer M-840.

### Joonis. 2.17. Rööpkinemaatikaga manipulaatorid

1965. a ilmus M. Stewarti artikkel kuue liikuvusastmega platvormi kohta. Kuusjalgset mehhanismi (*hexapod*) hakati hiljem nimetama ka Stewarti platvormiks. Platvormi hakati laiemalt kasutama lennusimulaatorites ja hiljem robotites.



## 2.7. Liikurroboti kinemaatika

Liikurrobotiks võib olla nii pinnal liikuv, lendav kui vedelikus ujuv robot. Pinnal liikuva roboti liikumismehhanismiks on ratastega veokid ja mitmesugused jalg- või roomikmehhanismid. Veovankritega robotid jagunevad omakorda sõltuvalt rataste arvust ja pöördemehhanismist järgmiselt:

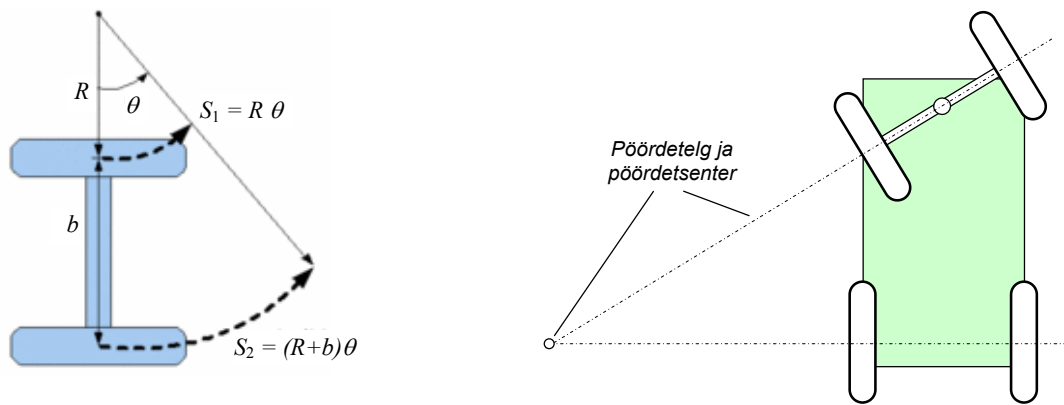
- kahe rattaline (Segway tüüpi) pööratud pendli automaatse tasakaalustussüsteemiga
- kolmerattaline, ühe pööratava juhtrattaga vanker (üks või kaks vedavat ratast)
- rattapaari pöörava teljega vanker
- diferentsiaalmechhanismiga kahe või nelja veorattaga vanker
- mitme sõltumatult juhitava rattaga vanker, mis mõnikord võib ka kohapeal pöörelda
- nelja rattaga Ackermanni pöördemehhanismiga vanker (Ackermanni mehhanism on tuntud auto pöördemehhanismina, mille puhul sisemine ratas pöördub rohkem kui välimine).

Kahe rattalise sõiduki näiteks on **Segway** ehk **Segway PT** (inglise keeles *segue+way personal transporter*). Segway on kahe rattaline isetasakaalustuv (güroskoopsete anduritega) akutoitel töötav elektrisõiduk, mille leiutas 2001. a Dean Kamen. Sõidukeid toodab Segway Inc., mis tegutseb USA-s New Hampshire'i osariigis. Segway sõidukid liiguvad elektrimootori jõul ning võivad arendada kiirust kuni 20,1 km/h (joonis 2.18).



**Joonis 2.18. Kahe rattaline sõiduk Segway, mida saab kasutada ka automaatselt.**

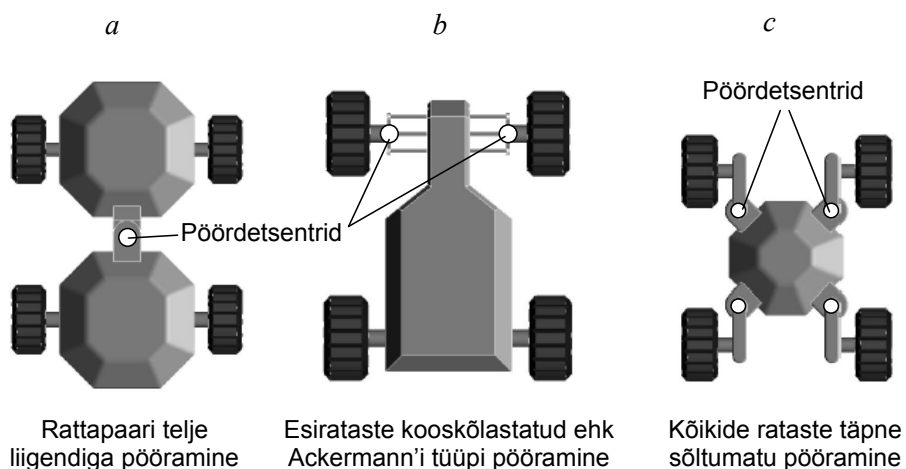
Neljarattalise ratasveoki pööramist iseloomustab joonis 2.19, millelt on näha, et kurvis pööramisel läbivad rattad erineva teepikkuse. Kurvi sisemine ratas liigub vähem ja seetõttu saab kurvi läbida vaid juhul, kui veorattad pöörlevad eri kiirusega või kui üks ratastest kurvis libiseb. Rataste eri kiirusega pöörlemine saavutatakse diferentsiaalmechhanismiga. Jäigalt ühendatud rattapaari puhul hakkab kurvi sisemine ratas kohapeal pöörlema ehk maapinna suhtes libisema vastu liikumissuunda, väline ratas aga kaotab veojõu ning hakkab liikumissuunas maapinnal libisema.



**Joonis 2.19. Rattapaari pööramine**

**Vankri esitelje rattapaari pööramine.** Esitelje pööramine on tuntud hobuvankrite kasutuselevõtu ajast. Põhimõte on lihtsuse tõttu kasutusel ka tänapäeval. Niisugune pöördemehhanism on geomeetriselt täpne. Selle mehhanismi puhul langevad mõlema ratta pöördetsentrid kokku. Puuduseks on mehhanismi kohmakus (vajab pööramiseks palju ruumi). Pööravat telge on väga tülikas vankriga kokku sobitada. Suurema pöördenurga (väiksema pöörderaadiuse) saavutamiseks peab telg pöörduma vankri alla. Seepärast on niisuguse pöördemehhanismiga vankrite esirattad sageli väiksema läbimõõduga (et vanker ei peaks olema liiga kõrge). Põhimõtteliselt saab vankrit pöörata ka tagatelje rattapaari pööramisega, kuid sel juhul halveneb oluliselt vankri juhitavus edasiliikumisel.

Mõnda vankri pööramise mehhanismi on näidatud joonisel 2.20. Sõiduki pööramise teiseks võimaluseks on kereliigend. **Kere keskliigendiga vanker** on joonisel 2.20 a. Kaheosalisel vankril saab kasutada lihtsat pöördemehhanismi, kuid liikuva ja muutuva kujuga kere tõttu on vankrit kasutada tülikas. Kõik pöörava teljega vankrid on kurvis liikumisel ebastabiilsed. Lisaks on joonisel 2.20 nn Ackermann'i tüüpi pöördemehhanismiga ja kõikide rataste pööramisega vankrid.



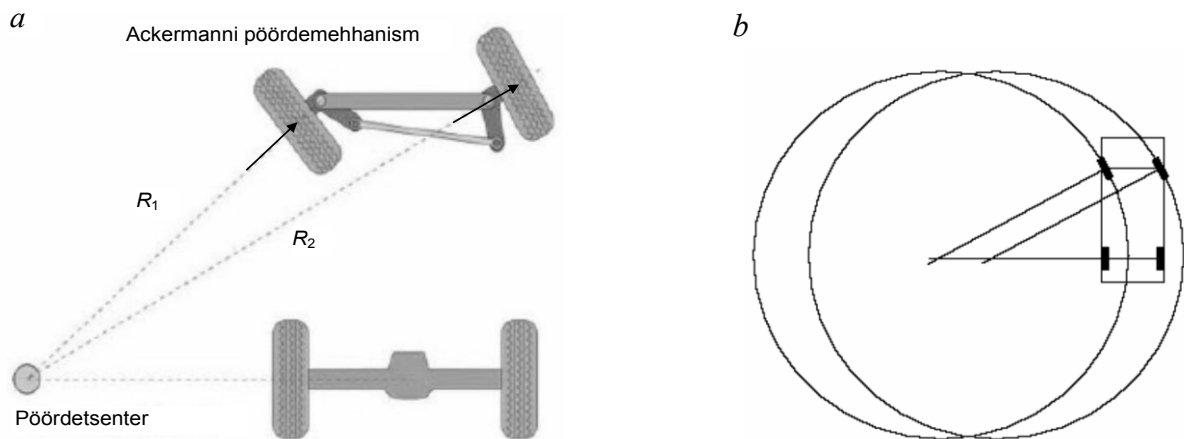
Rattapaari telje liigendiga pööramine

Esirataste kooskõlastatud ehk Ackermann'i tüüpi pööramine

Kõikide rataste täpne sõltumatu pööramine

**Joonis 2.20. Vankri pööramise mehhanisme**

Rudolf Ackermann sõnastas 1816. a. ideaalse pöördemehhanismi talitluse tingimuse - **rataste vertikaaltasandid peavad olema kurvi pööramisraadiusega risti** - ning töötas välja rataste pöördemehhanismi, mis on tänapäeval autode juures laia kasutust leidnud. Joonisel 2.21 *a* näidatud neljalüliline suletud liigendmehhanism (auto roolimehhanism) tagab rataste pöörderaadiuste tsentrite kokkulangevuse. Vastupidisel juhul, kui pööravad rattad on paralleelsed ja pöörderaadiuste tsentrid ei lange kokku (joonis 2.21 *b*), tekib rataste külglisimine, sellest tingitud suurem kulumine ja sõidu ebastabiilsus.

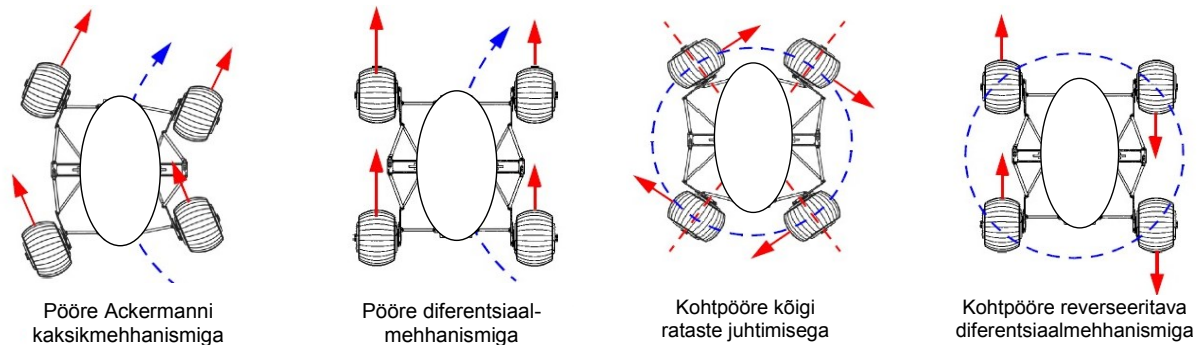


**Joonis 2.21. Ackermanni mehhanism (*a*) ja sobimatu pööramine paralleelsete ratastega (*b*)**

**Neljarattaliste sõidukite kõigi rataste juhtimine.** Kõigi rataste juhtimine tagab sõidukile parima manööverdatavuse. Kõigi rataste sõltumatu juhtimise puhul saab luua väga paindliku pöördemehhanismi, mille abil võib vankri ka kohapeal pöörlema panna. Robotveokite puhul on niisugune juhtimisviis laialt kasutusel. Seejuures eristatakse mitmesuguseid järgnevalt loetletud juhtimisstrateegiaid:

- Proportsionaalne juhtimine Ackermanni kaksikmehhanismiga. Sõiduki esi- ja tagarattaid pööratakse võrdeliselt ratta pöörderaadiusega;
- Mitteproportsionaalne juhtimine viivitusega, mil tagarattaid hakatakse pöörama alates esirataste kindlast pöördenurgast;
- Juhtimine diferentsiaalmeahhanismiga, mil kurvi sise- ja välisrataste eri kiirused tagavad sõiduki pööramise;
- Kohtpööre kõigi rataste juhtimisega, mil esi- ja tagarattaid pööratakse sama nurga võrra, kuid eri suundades;
- Kohtpööre reverseeritava diferentsiaalmeahhanismiga, kui sõiduki sise- ja välisrattad pöörlevad kurvis eri suundades;
- Külg-rööpliikumine (*dog walk steering* ehk koera kõnni juhtimine), mil esi- ja tagarattaid pööratakse samas suunas ja sõiduk liigub külgsuunas.

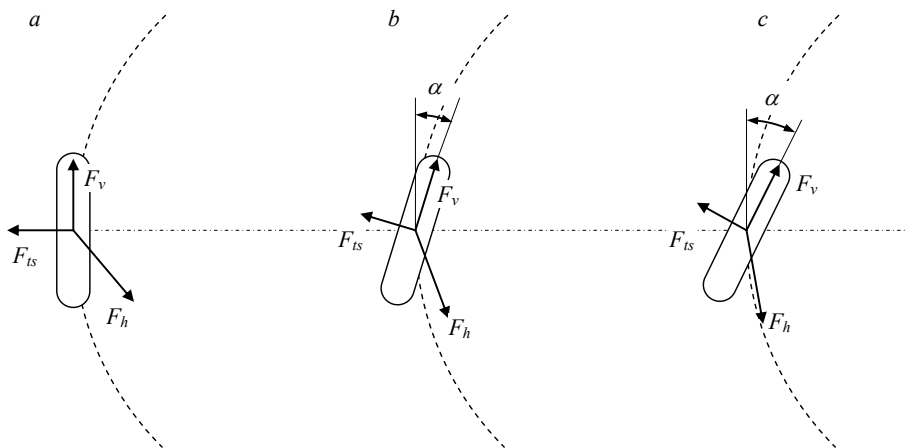
Vankriga liikurrobotite pöördemehhanismide kohta on USA Carnegie Melloni ülikoolis 2001. aastal valminud doktoritöö *Analytical Configuration of Wheeled Robotic Locomotion*. Vankri pööramist erinevate mehhanismidega on näidatud joonisel 2.22. Kui vankri pööramine toimub diferentsiaal-mehhanismiga ning rattaid seejuures ei pöörata, tekkib kurvi läbimisel rataste külglibisemine. Nelja ratta juhtimisega masinateks on paljud põllumajandusmasinad, ehitusmasinad, erisõidukid ja liikurrobotid.



**Joonis 2.22. Sõiduki vankri pööramine erinevate mehhanismidega**

**Dünaamilise juhtimise probleemid.** Kurvis pööramisel mõjuvad sõidukile inertsjõud, mis omakorda põhjustavad ratta külglibisemise. Mida rohkem ratast pöörata, seda suurem on libisemine. Mida suurem on libisemine, seda suurem on libisemisega kaasnev vastujõud, mis kompenseerib pööramisel tekkiva tsentrifugaaljõu. Seejuures on kurvis liikumisel siseratta pöördenurk ja libisemine suuremad kui välisrattal, samas on aga välisratta koormus (jõud) suurem kui siseratta koormus.

Kurvis liikumise probleeme ja jõudude toimet iseloomustab joonis 2.23. Rattale mõjuvad ajami veojõud, sõiduki inertsjõud ja libisemise takistusjõud. Ühtlasel sirgjoonelisel liikumisel on veojõud  $F_v$  ja hõõrdumise takistusjõud  $F_h$  samas sihis.



**Joonis 2.23. Ratta pööramine kurvis liikumisel: ratas on sõidusuunas  $a$ , ratast on pööratud tsentrifugaaljõudude kompenseerimiseks sõidusuunast kõrvale  $b, c$**

Kurvis liikumisel toimib lisaks tsentrifugaaljõud  $F_{ts}$ , mis tõukab sõidukit ratta külje suunas. Kui ratas on pööratud otse sõidusuunda (joonis 2.23, a), siis tõukab veojõu ja tsentrifugaaljõu koostoime sõidukit kurvist välja. Ratta pöördenurga suurendamisel (*b* ja *c*) võib saavutada olukorra, kui summaarne jõud mõjub sõidu sihis. Kuna libisemistingimused sõltuvad teekatte ja ratta hõõrdetegurist (ka teepinna profiilist), mis omakorda on väga muutlik suurus, siis on ka sõiduki veojõudu raske määrata. Seetõttu on jõuvektorite suunad pidevalt muutuvad ning võib tekkida oht sõiduki kurvist väljapaiskumiseks.

Väikeste, lihtsate ja odavate robotite puhul on pööramise ja manööverdamise hõlpsamaks muutmisel mõnikord kasu mitmes suunas veerevatest ratastest (*multi-directional wheel*) (joonis 2.24).



**Joonis 2.24. Mitmes suunas veerevate rataste näiteid**

Ratasveokiga liikurrobotite puhul on probleemiks liikumine pehmel või ebatasasel pinnal, sest ratta erisurve pinnasele on suhteliselt suur. Veoki erisurve vähendamiseks pinnasele kasutatakse roomikmehhanisme. Ebatasasel pinnal liikumiseks sobivad paremini jalgmehhanismid. Ka ratasveokeid saab valmistada ebatasasel pinnal liikumiseks, kuid see eeldab veoki erikonstruktsiooni, mis võimaldab ratastel kopeerida pinna ebatasasusi (joonis 2.25).



**Joonis 2.25. Ebatasasel pinnal liikumiseks ettenähtud ratasveok**

**Roomikmasinate** (*Crawler Vehicles*) **juhtimine**. Roomikmasinaid juhitakse piduritega. Pidurdatakse seda roomikut, mille poole tahetakse pöörata. Pidurdamisel lahutatakse vastavat roomikut vedava ajami sidur. Pidureid kasutatakse ka ratasliikurite pööramiseks, kui nende liikumisvajadus on suhteliselt väike (nt ehitus-, tõstemasinad). Mõnikord rakendatakse roomikuid ja sellist pööramisviisi ka liikurrobotites joonis 2.26. Näidatud on spetsiaalselt ohtliku keskkonna jaoks projekteeritud liikurrobot Versatrax 450™. Lähemat infot roboti kohta saab leida veebilehelt: „[Roomikutega liikurrobot versatrax-450](#)“.



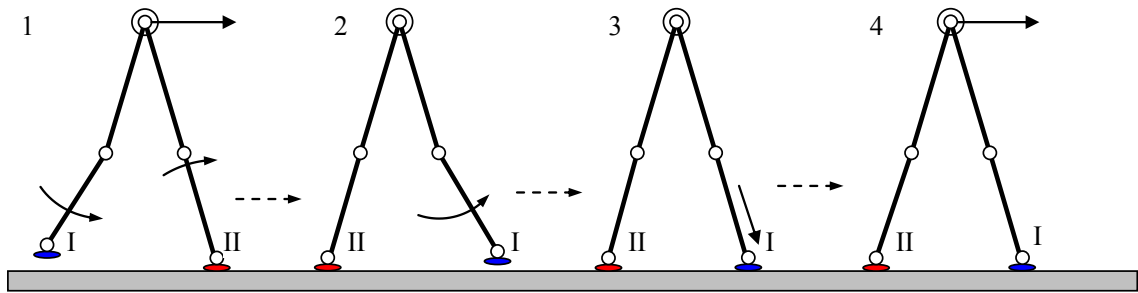
**Joonis 2.26. Roomikveokiga robot**

**Kõndivad robotid ehk jalgadega liikurrobotid.** Niisuguseid roboteid võiks nimetada ka loodusest kopeeritud robotiteks. Seejuures eristatakse roboteid jalgade arvu järgi:

- ühejalgsed ehk keksivad robotid
- kahejalgsed
- kolmejalgsed
- neljajalgsed
- kuuejalgsed
- kaheksajalgsed
- suure jalgade arvuga robotid ehk sajalalgsed robotid.

Ühe- ja kahejalgsed robotite liikumisprobleemidele lisandub tasakaalu probleem. Üldjuhul nõuab nende robotite püstiasendis hoidmine tasakaalu dünaamilist juhtimist. Kolmejalgsed roboteid valmistatakse harva, sest nende jalgade kinemaatika pole edasiliikumiseks sobiv (ühe jala liigutamisel tekkib tasakaaluprobleem). Kolmejalgsed robotid sobivad paremini roomamiseks või ronimiseks.

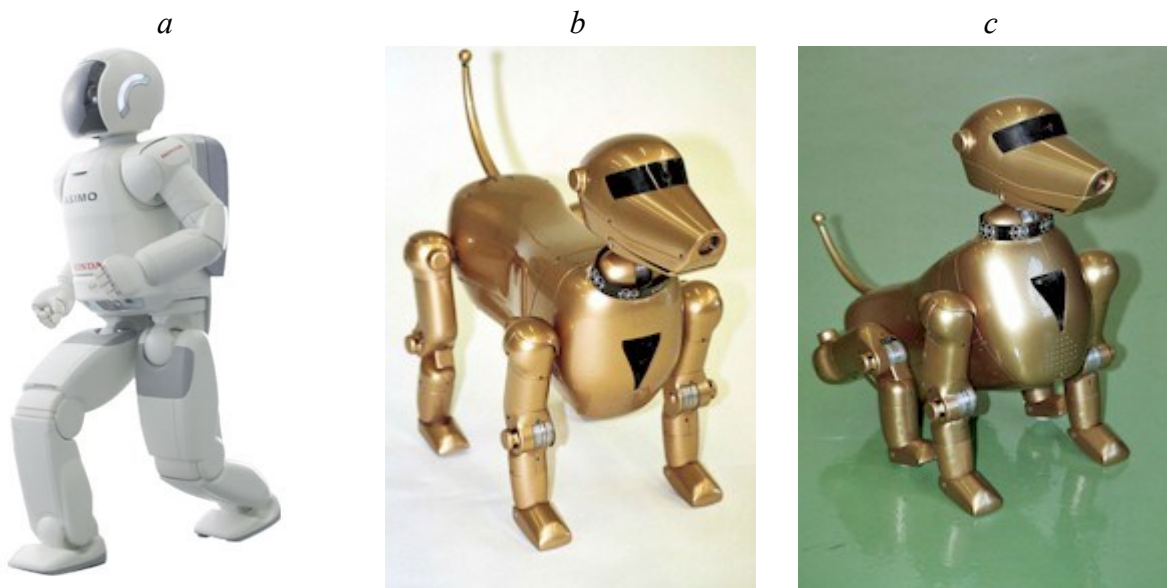
Kahejalgse kõndiva mehhanismi sammufaase näeb joonisel 2.27.



**Joonis 2.27. Kahejalgse kõndiva mehhanismi sammufaasid**

Samm algab keha raskuse ülekandmisega sirgele jalale (II) ning vaba jala liigutamisega kõndimise suunas. Sammu teises faasis on vaba jalg saavutanud oma lõppasendi. Kolmandas faasis toetatakse see maha. Neljandas faasis toimub keha raskuse ülekandmine jalale I. Edasipidi liikumised korduvad ning vaba jalg II alustab liikumist kõndimise suunas.

Kahe- ja neljajalgseid inim- ja loomanäolisi roboteid näeb joonisel 2.28, nende peamine otstarve seisneb inimeste lõbustamises. Mõnikord nähakse niisugustes robotites ka inimese seltsilist, kes vajadusel suudab ka inimest aidata.



Joonis 2.28. Kahe- ja neljajalgsete robotite näited: firma *Honda* kahejalgne (*bipod*) robot *Asimo* (a) ja firma *RoboScience* neljajalgne (*quadruped, tetrapod*) robotkoer *Robodog* (b, c)

Omaette arendussuunaks on kujunenud loomale sarnanevate robotite väljaarendamine sõjanduslikuks otstarbeks. Näites, laskemoona transpordiks ohtlikes oludes või raskesti läbitaval maastikul. Kõige enam tähelepanu on endale tõmmanud nn „Suur koer“, mille kohta on veebis saadaval ka mitmed videod: [Video Suur koer tegutseb](#), [Video Boston Dynamics Suur koer](#), [Video of BigDog in action](#). Vt ka joonis 2.29.

**Suur koer e BigDog** stabiilselt jalgadel püsiv neljajalgne robot, mis loodi 2005. aastal firma [Boston Dynamics](#), NASA [Jet Propulsion Laboratory](#) ja [Harvardi Ülikooli](#) teadlaste poolt. Suur koer on 0.91 m pikkune ja 0.76 m kõrgune kõndiv robot massiga 110 kg. Robot suudab liikuda rasketes maastikuoludes kiirusega 6.4 km/h ja kanda 150 kg koormust. Seejuures suudab ta ronida mööda kallakut kuni 35-kraadise nurga all. Liikumist ja tasakaalu juhib pardaarvuti, mis võtab vastu infot paljudelt keskkonda seiravatelt anduritelt.



**Joonis 2.29.** „Suured koerad“ katsetustel

Omapäraseks kõndiva roboti näiteks on ka merepõhjas liikuv suur krabi (*Crabster*) (joonis 2.30).



**Joonis 2.30.** Suur krabi

Suur krabi on 2,4 m pikk, 2,4 m lai ja 1,3 m kõrge (püsti seistes kuni 1,8 m kõrge). Koos kantava koormusega on krabi mass u 650 kg. Krabi kuue jala liikumapanemiseks kasutatakse 30 mootorit (vt [Kuuejalgne robot-krabi](#)). Krabi suudab ronida veekogu põhjas kuni 200 m sügavusel,



skaneerib sonari abil ümbruskonda ja edastab skaneeritud kujutised ja kaameratega tehtud fotod teda teenindavale veesõidukile.

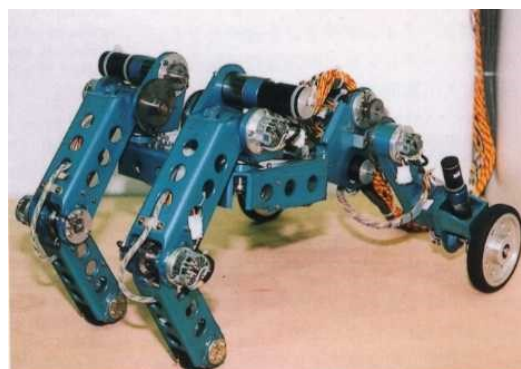
Asukoha tuvastamiseks kasutab robot-krabi akustilise positsioonimise USBL (*ultra-short baseline*) meetodit, mida mõnikord tuntakse ka SSBL (*super short baseline*) meetodina. Täielik USBL süsteem koosneb tugilaeva põhja alla paigaldatud saatjast (*transceiver*) ja robot-krabile paigaldatud saatjast-vastuvõtjast (*transponder or responder*). Asukoha määrab tugilaevale paigaldatud arvuti. Kaugust mõõdetakse saadetud ja tagasipeegeldunud akustiliste impulsside ajavahemiku kaudu, arvestades heli levimiskiirust vees.

Suurem jalgade arv tagab veokile parema stabiilsuse ja suuremad võimalused ebatasasel pinnal liikumiseks. 8-jalgne sarnaneb 6-jalgse robotiga. Enam kui 8 jalaga roboteid kasutatakse harva ja üksnes eriotstarbel. Nende liikumine sarnaneb aga rohkem roomajate kui jalgadel kõndivate imetajate liikumisega. Jalapaaride pööramisega 10-jalgset robotit (vrd vankri telje pööramisega) näeb joonisel 2.31.



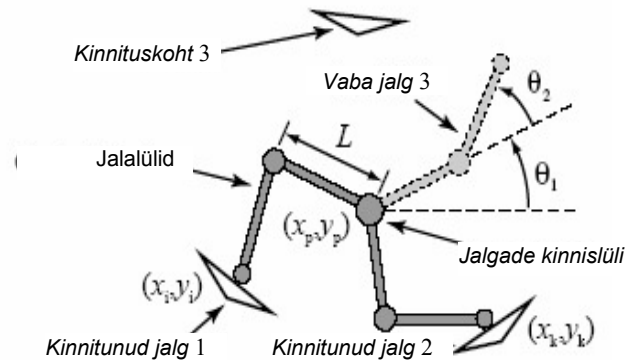
**Joonis 2.31. 10-jalgne jalapaaride pööramisega robot**

**Jalgadega ja ratastega hübriidveok.** Mõnikord on otstarbekas omavahel kombineerida nii rattaid kui jalgu. Jalad võimaldavad paremini ületada takistusi. Rataste ehitus ja käitamine on lihtsam. Näited taolistest veokitest on joonisel 2.32.



**Joonis 2.32. Jalgade ja ratastega hübriidveokid**

**Kolmejalgne roniv robot.** Kolmejalgse ronimismehhanismi kinemaatikat näeb joonisel 2.33. Mehhanismi kaks jalga hoiavad mehhanismi kinni, samal ajal liigub kolmas jalg uude kinnituspunkti. Jalgade liikumine tagatakse jalalülide pööramisega.



**Joonis 2.33. Ronimismehhanism**

Paljudel arendamisel olevatel robotitel puudub praegu praktiline mõte. Tööd tehakse eelkõige selleks, et arendada robotitel välja inimeste ja loomadega võrreldavaid võimekusi. Niisugused ülesanded köidavad paljude leiutajate tähelepanu. Vastav teadusharu on tuntud bioonika nime all.

### Kordamisküsimused

1. Mitut koordinaati on vaja roboti tööorgani asendi ja suunistuse määramiseks?
2. Millega on määratud asendivektor ristkoordinaatides?
3. Millega on määratud keskpunkti suhtes pööratud koordinaadistik algkoordinaadistiku suhtes?
4. Millega on määratud lükatud koordinaadistik algkoordinaadistiku suhtes?
5. Millega on määratud lükatud ja pööratud koordinaadistik algkoordinaadistiku suhtes?
6. Mis on roboti otsene kinemaatikaülesanne?
7. Mis on roboti kinemaatika pöördülesanne?
8. Kuidas liigitatakse roboteid nende käe (teisaldusmehhanismi) kinemaatikaskeemi järgi?
9. Missuguseid kinemaatilisi paare kasutatakse roboti manipulaatori lülide ühendamiseks?
10. Nimetage rööpkinemaatikaga robotite eeliseid võrreldes jadakinemaatikaga.

### 3. ROBOTI MEHAANIKA

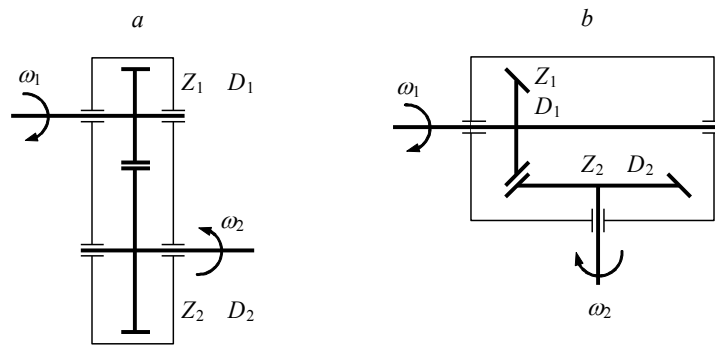
Roboti mehaanika all mõeldakse liikumiseks ja töötamiseks ettenähtud mehhanisme ja nendes toimivate jõudude ja momentide arvutamist. Roboti peamine mehhanism on tema **manipulaator**, mis koosneb mitmelülilisest käest ehk teisaldusmehhanismist ja käelabast ehk suunistusmehhanismist. Manipulaatori lülisid käitavad mootoritest ja ülekandemehhanismidest koosnevad ajamid. Manipulaatorilt nõutakse suhteliselt suurt liikumisulatust ja töökiirust. Manipulaatori konstruktsioon peab olema võimalikult kerge, kompaktne ja koormuse tõstmiseks piisavalt tugev. Lisaks peab manipulaatori konstruktsioon olema ka piisavalt jäik, et võimaldada täpset positsioonimist. Manipulaatori külge ühendatakse roboti poolt tehtavale tööle vastav tööorgan: haarats või tööriist. Haaratsite ja tööriistade valik võib olla väga suur. Mingi erilise töö jaoks võib olla vajalik ka erikonstruktsiooniga haaratsi või tööriista kasutamine.

Selles peatükis vaadeldakse manipulaatori ja haaratsite põhilisi mehhanisme, nende ehitust ja omadusi. Manipulaatori teisaldusmehhanismi lülide paigutusest ja sidemetest andis ülevaate eelmine manipulaatori kinemaatika käsitlev peatükk. Siinkohal vaadeldakse põhjalikumalt jõudude ja momentide edastamiseks kasutatavaid ülekandemehhanisme. Mitmesuguste hammasmehhanismide abil saab luua roboti käelaba suunistusmehhanismi. Samuti on siin esitatud manipulaatori mehaanika lihtsamad arvutusvalemid.

#### 3.1. Ülekandemehhanismid

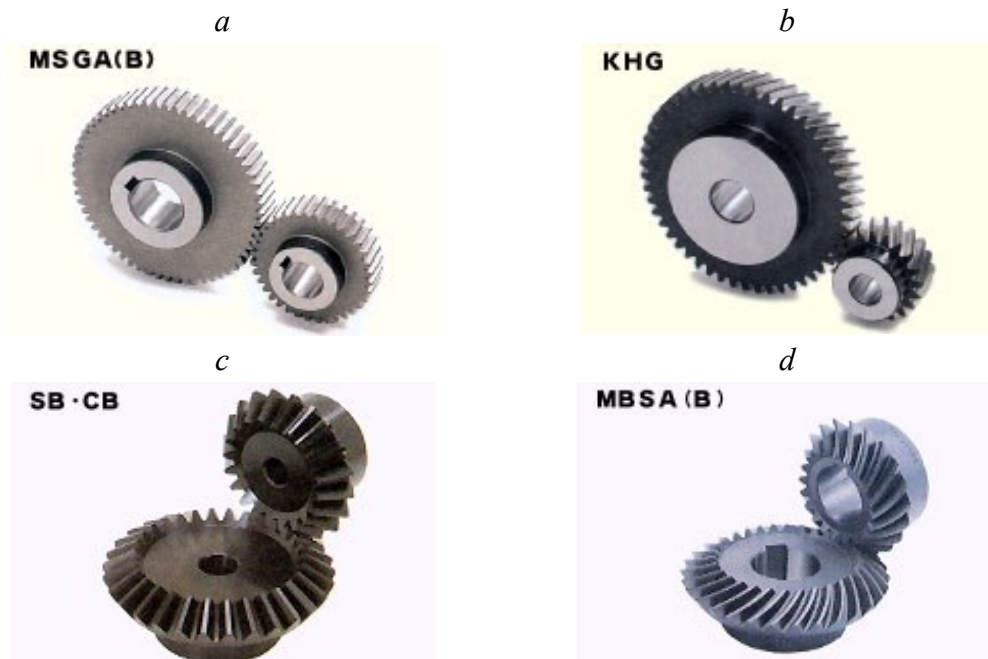
Mootori võlli pöörlev liikumine edastatakse töömasinale ühendussiduri ja ülekandemehhanismi kaudu, mida vajatakse juhul, kui mootori võlli pöörlemiskiirus ja liikumise iseloom ei sobi töömasina tööorgani liikumisega. Ülekanne võib toimuda kas rööpsete võllide, samal tasandil ristuvate võllide või eri tasanditel asuvate ristuvate võllide vahel. Sõltuvalt sisend- ja väljundvõllide asetusest tuleb valida ka sobiva ehitusega ülekandemehhanism.

Ülekandemehhanismi iseloomustab sisend- ja väljundkiiruste suhe, mida nimetatakse ülekandesuhteks ehk ülekandearvuks  $u = \omega_1/\omega_2$ . Hammasarastel põhinevaid pöörlemiskiirust vähendavaid ja pöördemomenti suurendavaid ülekandemehhanisme nimetatakse hammasreduktoriteks. Lihtsa üheastmelise hammasreduktori kinemaatikaskeem on joonisel 3.1. Eristatakse silinder- ja koonusratastega reduktoreid. Silinderratastega ehk silinderreduktorid on (*silinder and helical gear*) ette nähtud liikumise (momendi) ülekandeks rööpsete võllide vahel. Koonusratastega ehk koonusreduktoritega (*bevel gear and helical bevel gear*) edastatakse liikumist (momenti) mitterööpsete sisend-väljundvõllide korral.



**Joonis 3.1. Üheastmeline silinderreduktor (a) ja koonusreduktor (b)**

Kõige enam kasutatakse ristuvate võllidega koonusreduktoreid. Nii silinder- kui ka koonushammasrattad võivad olla sirg- või kaldhammastega. Eri tüüpi hammasrattastega ülekandemehhanisme - sirghammastega *a* ja kaldhammastega *b* silinderülekanemehhanismi ning sirghammastega *c* ja kaldhammastega *d* koonusülekanemehhanismi on näidatud joonisel 3.2. Nihutatud ehk mitteristuvate võllidega (*shafts offset*) koonusülekanne nimetatakse hüpidülekaneks.



**Joonis 3.2. Hammasülekannete näiteid: sirghammastega *a*, kaldhammastega *b* silinderülekanne ning sirghammastega *c* ja kaldhammastega *d* koonusülekanne**

Sõltuvalt hambuvate hammasrattapaaride arvust liigitatakse reduktoreid ühe- ja mitmeastmelisteks. Reduktiori ülekandearvu saab leida nurkkiiruste, rataste läbimõõtude või hammaste arvu suhtena

$$u = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (3.1)$$

kus

$\omega_1$  - sisendkiirus

$\omega_2$  - väljundkiirus

$D_1$  - sisendratta läbimõõt

$D_2$  - väljundratta läbimõõt

$Z_1$  - sisendratta hammaste arv

$Z_2$  - väljundratta hammaste arv. Üheastmelise reduktori ülekandearv on kuni kaheksa, kaheastmelisel kuni 60 ja kolmeastmelisel kuni 250.

Silindrilist hambumist, mis on moodustatud hammasrattast ja hammaslatist, nimetatakse silindriliseks latthambumiseks ja vastavat ülekannet **hammas(ratas)lattülekandeks** (*rack and pinion, rack and gear transmission*). Niisugust ülekandemehhanismi kasutatakse pöördliikumise muutmisel sirgliikumiseks.

Sirgliikumise taandamisel pöördliikumiseks kasutatakse taandamisraadiust  $\rho$ , mis leitakse joonkiiruse ja nurkkiiruse suhtena. Sama tulemuse annab ka läbitud teepikkuse  $l$  ja pöördenurga  $\varphi$  suhe. Hammaslatt- ja kruviülekanded on joonisel 3.3.

$$\rho_{hl} = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{l}{\varphi} = \frac{\pi D}{2\pi} = \frac{D}{2} \quad (3.2)$$

kus  $D$  on hammasratta  $Z$  läbimõõt.

Pöördliikumise muutmiseks sirgliikumiseks sobib ka kruviülekanne (*screw transmission*).

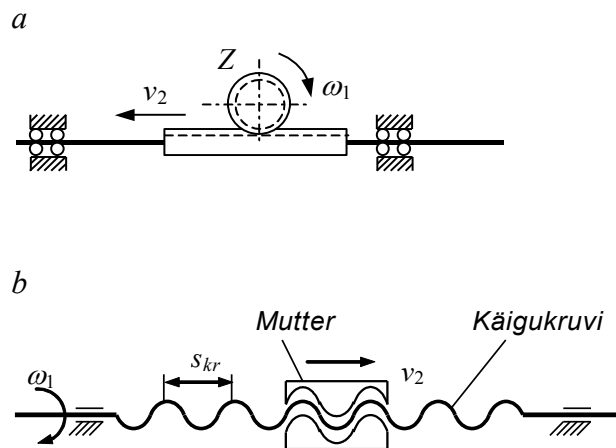
**Kruviülekanne** (*screw-nut screw transmission coupling*) puhul liigub mutter sirgjooneliselt piki pöörlevat kruvi (käigukruvi). Mutri sirgjoonelise liikumise ja käigukruvi pöördliikumise kiiruste suhe on määratud kruvisammuga  $s_{kr}$ . Mutri ja kruvi vahelise hõõrdetakistuse vähendamiseks kasutatakse veerehõõrdel põhinevaid kuulkrvivimutreid (*ball-screw nuts*), mille puhul kuulid veerevad piki kruvisoont ning nende lõputu veeremisteed on sulgub läbi mutri kuulikanali. Tänu sellele on kuulkruviülekanne kasutegur kuni 90%. Kruvi ja mutri vahelise lõtku vähendamiseks kasutatakse lõhestatud eelpingestatud mutreid (*anti-backlash nuts, preload ball screw assemblies*). Hammaslatt- ja kruviülekanne näited on esitatud joonisel 3.4. Lõhestatud eelpingestatud mutriga **kuulkruviülekanne** on joonisel 3.4, *b, e*.

Kruviülekanne taandamisraadius

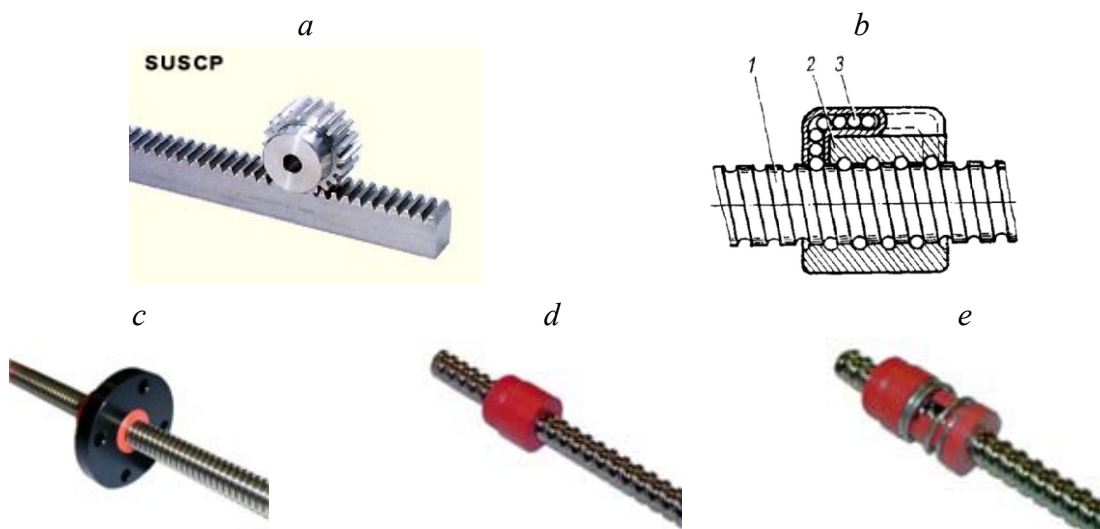
$$\rho_{kruvi} = \frac{v_2}{\omega_1} = \frac{l}{\varphi} = \frac{s_{kr}}{2\pi} \quad (3.3)$$

kus  $s_{kr}$  on kruvi samm.

Kruviülekanne valmistatakse ka koos vabajooksu lõpplülitiga. Kruvi käigu lõpul mutter peatub ja lülitub vabajooksule nii, et kruvi pöörleb paigalseisva mutriga edasi.



Joonis 3.3. Sirg-pöördliikumise ülekandeid: hammaslattuülekanne *a* ja kruviülekanne *b*

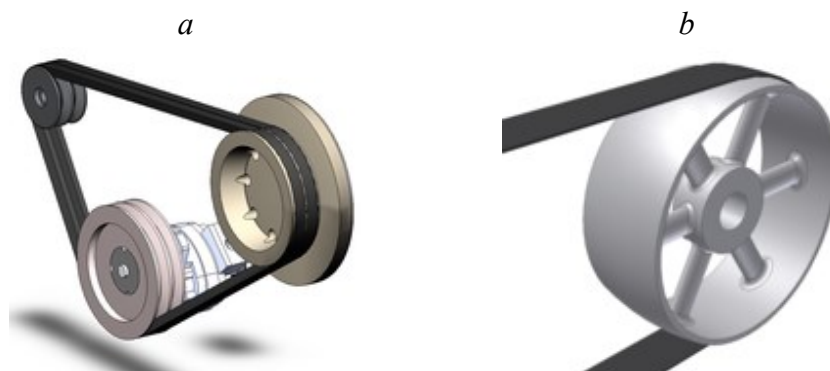


Joonis 3.4. Hammaslattuülekanne *a* ja kruviülekanded *b*, *c*, *d*, *e*

**Rihmülekanne.** Lihtsate ajamite puhul kasutatakse sageli hõõrdumisel põhinevaid rihmülekandeid (*belt and pulley transmission*), mis kuuluvad friktsioonmehhanismide hulka. Eristatakse kiil- ja lintrihmülekandeid (*V-belt and flat belt transmissions*). Wikipedia andmetel leiutas ja võttis kiilrihmülekande 1917. a kasutusele John Gates.

Rihmülekanne edastab ajami liikumist ühelt rihmarattalt teisele. Ideaalsel juhul arvutatakse ülekandetegur rihmarataste nurkkiiruste või diameetrite suhtena. Momendi ülekandmisel tekib rihmaratta ja rihma vahel libisemine, mistõttu rihmarataste nurkkiiruste suhe ei võrdu täpselt nende läbimõõtude suhtega. Suurem moment põhjustab ka suuremat libisemist ja suuremaid hõõrdekadusid ülekandes. Lisaks libisemisele on ajami seisukohalt tähtis rihma elastsus (rihm venib). Elastsel rihmal on energia salvestamise võime. Muutlikul koormusel võib rihma elastsus põhjustada ajamis kiiruse ja momendi võnkumisi. Libisemise tõttu ei sobi rihmülekanded manipulaatori lülide käitamiseks, kui asendi mõõtmine toimub mootori võllile kinnitatud

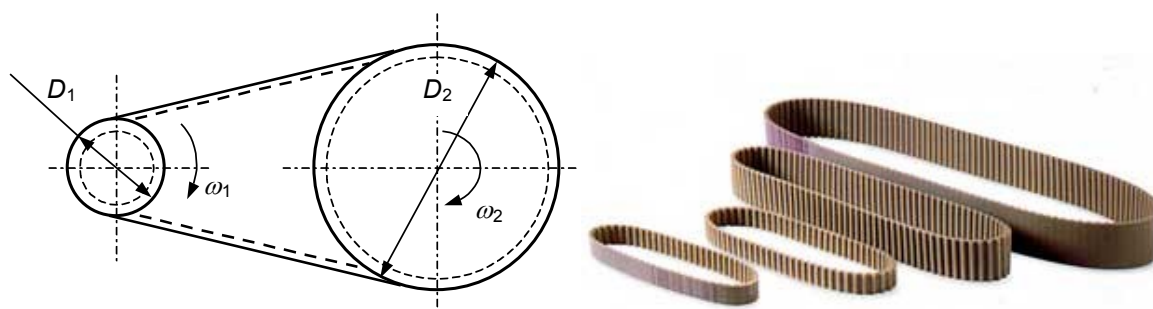
anduritega. Lihtsa ja töökindla ehituse tõttu võib neid kasutada liikurroboti veoki ajamis, kus asend määratakse ümbrust tuvastavate andurite abil.



**Joonis 3.5. Kiil- ja lintrihmülekannete näiteid: a kiilrihmülekanne, b lintrihmülekanne**

**Variaator** ehk muutuva läbimõõduga rihmaratastega rihmülekanne. Rihmülekannet tehakse ka pidevalt muudetava ülekandearvuga (*continuous variable transmission*). Sel juhul valmistatakse kiilrihmülekande rihmarattad kahest koonilise pinnaga poolest. Kooniliste pindade lähenemisel surutakse kiilrihm väljapoole ning ratta veodiameeter suureneb. Kooniliste pindade eemaldamisel vajub aga rihtm ratta teljele lähemale ning ratta veodiameeter väheneb. Rattapoolte edasi-tagasi liigutamiseks võib kasutada eraldi servoajamit.

**Hammasrihmülekanne** (*toothed belt, timing belt, synchronous belt*) on rihmülekande eriliik, mille puhul rihma siseküljel olevad hambad on hambumises vedava ja veetava hammasrattaga (joonis 3.6). Hambumise tõttu ülekandes libisemist ei teki. Rihma elastsusega seotud probleemid on aga samad mis tavaliste siledate rihmade puhul. Hammasrihmülekande eeliseks võrreldes muude ülekannetega on rihma väike mass ning võimalus edastada momenti suhteliselt kaugel asuvate rataste vahel.



**Joonis 3.6. Hammasrihmülekanne ja hammasrihmad**

**Tiguülekannetel** (*worm gear*) on suur jäikus ja teo väikese läbimõõdu ning tiguratta väikese pöörlemissageduse tõttu väike inertsimoment (joonis 3.7). Nad on konstruktsioonilt lihtsad ja töötavad vaikselt. Ühe astme ülekandearv küünib 100-ni. Tiguülekanded on isepidurduvad, mis soodustab manipulaatori positsioonimist.

Tiguülekannete puuduseks on väike kasutegur ( $\eta = 0,4 \dots 0,5$ ) ning raskused lõtkude kõrvaldamisel. Lõtku kõrvaldamiseks täiendavate kinemaatiliste ahelate lisamine vähendab kasutegurit veelgi. Tiguülekandeid soovitatakse kasutada mitmeastmelise ülekanne esimeses astmes, kuna suure ülekandearvu tõttu võib manipulaatori lülile taandatud lõtk osutada tühiseks. Tiguülekanne kasutatakse näiteks manipulaatori pöördemehhanismi ajamis, mille korral liigutatav mass on kõige suurem.

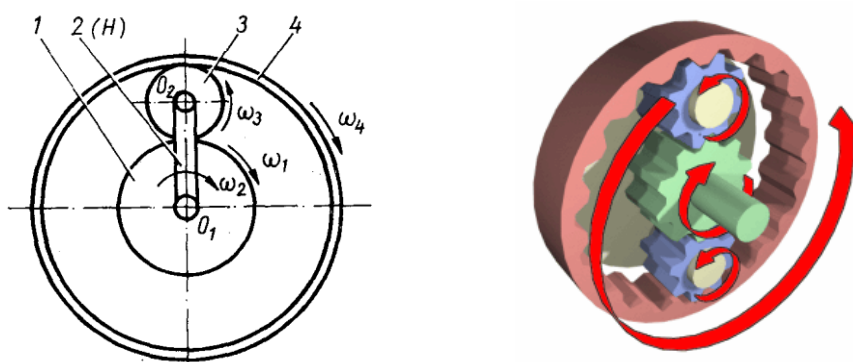


**Joonis 3.7. Tiguülekanne ja tigureduktor**

**Diferentsiaalülekanne** on mitu liikuvusastet, mis võimaldab pöördliikumisi liita ning pöördemomenti üle kanda mitme liikuva lülige kinemaatilisele ahelale. Lisaks on selle abil võimalik ehitada suure ülekandega mehhanisme.

Lihtne diferentsiaalmehhanism (joonis 3.8) koosneb peateljel  $O_1$  paiknevast **kesk- ehk päikeserattast** 1, **satelliitide raamist** 2 (või hoovast  $H$ ), mis saab vabalt pöörlema ümber peatelje, raami külge kinnitatud telgedel vabalt pöörlevatest ning keskrattaga hambuvatest **satelliitidest** 3 (joonisel näidatud ainult üks) ja **sisehambumisega hammasrattast** 4.

Rattad 1 ja 4 pöörlevad ümber liikumatu telje  $O_1$ . Nende nurkkiirused on  $\omega_1$  ja  $\omega_4$ . Satelliitide raam 2 pöörleb nurkkiirusega  $\omega_2$  samuti ümber telje  $O_1$  ja seda sõltumatult ratas 1 ja 4 liikumisest. Seega võtab ratas 3 osa kahest liikumisest. Üheks on tiirlemine ümber telje  $O_1$  nurkkiirusega  $\omega_2$  ja teiseks pöörlemine ümber telje  $O_2$  nurkkiirusega  $\omega_3$ .



**Joonis 3.8. Lihtne diferentsiaalmehhanism** [en.wikipedia.org/planetaarülekanne](https://en.wikipedia.org/planetaarülekanne)

Kui seisata satelliitide raam ( $\omega_2 = 0$ ), saab diferentsiaalmehhanismist tavaline hammasülekanne. Juhul kui panna seisma üks hammasrattastest (näiteks ratas 4), siis nurkkiirus  $\omega_4$  muutub nulliks.



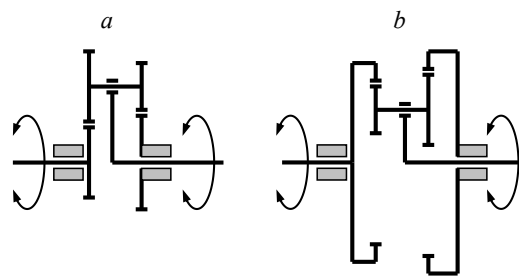
Sel juhul nimetatakse vastavat diferentsiaalülekande põhimõttel loodud mehhanismi planetaarmehhanismiks ning selle alusel loodud ülekandeid ka planetaarülekanneteks (*hub gear, planetary gear, sun gear*). Nende mehhanismide tööd selgitavad Internetist leitavad interaktiivsed animatsioonid:

[www.mekanizmalar.com/transmission.html](http://www.mekanizmalar.com/transmission.html) (*Animation of Epicyclic gearing*)

**Planetaarülekannetel** (joonised 3.9, 3.10) on üks vedav ja üks veetav lüli. Nad on kompaktsed ja väikese massiga, neil on koaksiaalsed võllid ning võimalus saada suuri ülekanandesuhteid väikese astmete arvu korral. Kui ülekanandesuhe  $u_{14}$  läheneb ühele, on planetaarmehhanismi abil võimalik saada väga suuri ülekanandesuhte  $u_{21}$  väärtusi.



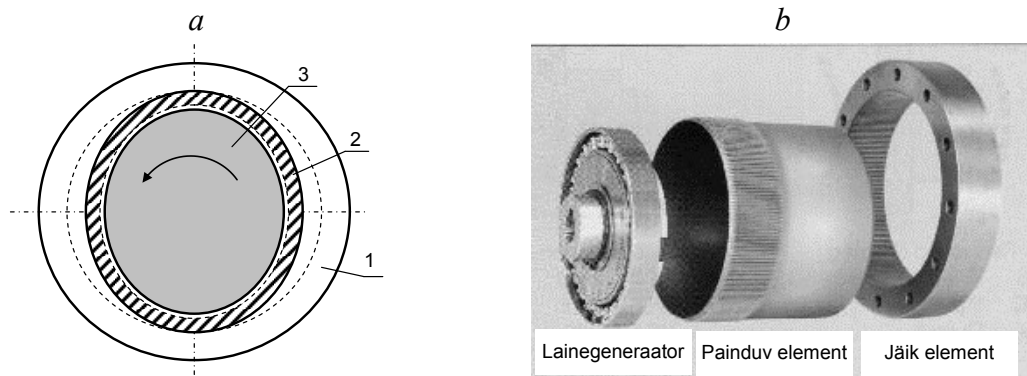
**Joonis 3.9. Planetaarmehhanism**



**Joonis 3.10. Kahe keskrattaga välis- *a* ja sisehambumisega *b* planetaarmehhanismid**

**Laineülekanne** (*wave gear, harmonic drive*) leiutati 1955. a ja arendati välja lennunduse, hiljem ka kosmosetehnika vajadusteks. LaineülekanDES edastavad pöördemomenti painduva elemendi deformatsioonilained. Ülekanne koosneb jäigast ja painduvast elemendist ning deformatsioonilainete generaatorist. Kasutatavaim on hammaslaineülekanne (joonis 3.11), mille jäik element 1 (*circular spline*) on harilikult sisehammastega hammasratas, mis on jäigalt kinnitatud kere külge. Painduvaks elemendiks (*flexspline*) on sel juhul silindriline õhukeseseinaline välishammastega hammasratas 2, mille hammaste arv on väiksem jäiga ratta omast, ja deformatsioonilainete generaatoriks (*wave generator*) ovaalne nuk 3. Nuki pöörlemisel vastupäeva pöörleb painduv hammasratas 2 jäiga hammasratta 1 suhtes päripäeva.

Viimasega on ühendatud ülekande vedav (kiirelt pöörlev) võll. Aeglaselt pöörlev veetav võll on ühendatud painduva hammasrattaga 2. HammaslaineülekanDE ratastel on harilikult üle 200 hamba, ülekandearv on 100 või suurem. Väikeste mõõtmetega laineülekanDEga saab edastada suurt pöördemomenti.



**Joonis 3.11. Laineülekande tööpõhimõte *a*, ülekande väliskuju *b* ja komponendid *c***

Laineülekande peamine eelis on võimalus saada ühes astmes suuri ülekandearve. Laineülekannetes lõtk praktiliselt puudub, sest hammaste väikeste moodulite tõttu hambub korraga mitu hambapaari. Nende kasutegur on üle 0,8. Neil põhjustel on laineülekandeid järjest rohkem hakatud kasutama manipulaatorite mehhanismides. Laineülekannete puuduseks on väike jäikus, valmistamise keerukus ja lühike tööiga.

### 3.2. Manipulaatormehhanismid

**Manipulaatormehhanismide** iseärasus on see, et nende lülid võivad olla ühtlasi manipulaatori teisaldus- või suunistusmehhanismi lülideks. Piirjuhul, kui kõik manipulaatori mootorid paiknevad seisval alusel, võib manipulaatormehhanism moodustada terve manipulaatori. Sellest tuleneb ka tema nimetus.

Lühendatult nimetatakse neid **M-mehhanismideks**, kusjuures tähe M juurde lisatakse mehhanismi liikuvusastmete arv. Nii võimaldab **2M-mehhanism** liikuda kahe koordinaadi, **3M-mehhanism** aga kolme koordinaadi suhtes.

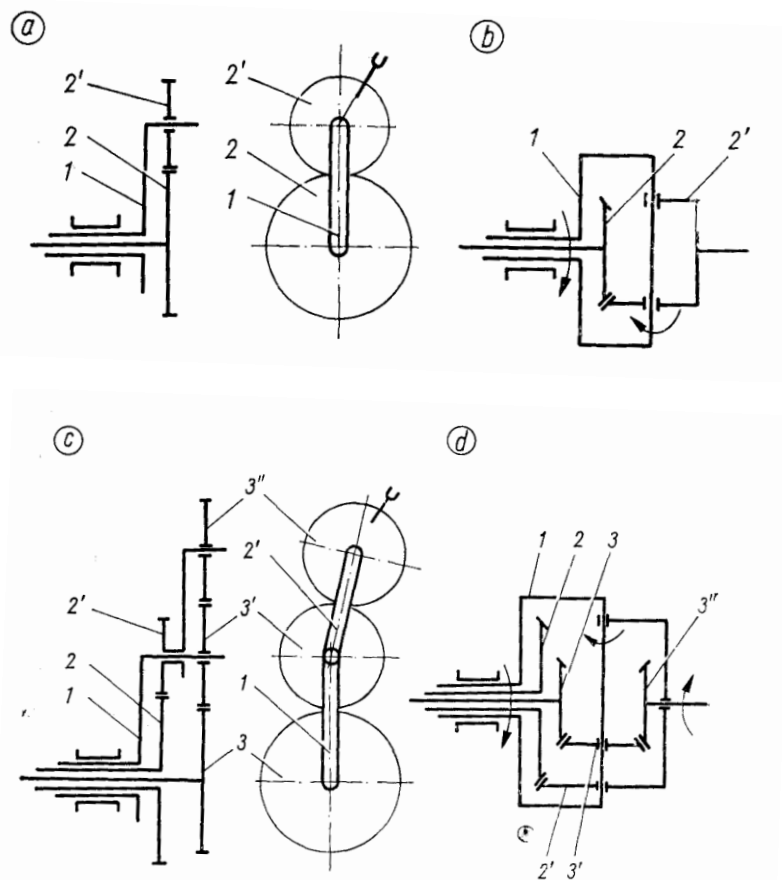
M-mehhanisme rakendatakse juhul, kui mootorid paiknevad rühmiti mõnel manipulaatori kinemaatilise ahela lülil. Seega käitatakse teatud lülisid mootoritega, mis asuvad kinemaatilises ahelas mitu lüli eespool ja momendi ülekanne toimub läbi liikuvate lülide. Neid mehhanisme saab kasutada näiteks manipulaatori käelaba või mitmelülilise liigendkää konstruktsioonis.

Tööpõhimõttelt on manipulaatormehhanismid sarnased diferentsiaal- ja planetaar-mehhanismidega. Neil on mitu vedavat lüli ja niisama palju veetavaid lülisid. Mõni lihtsam M-mehhanism on joonisel 3.12. Nende valmistamisel saab kasutada nii **silinder- kui ka koonusrattaid**. Silinderrattastega M-mehhanismid on märksa ülevaatlikumad ja neid on lihtsam analüüsida. Leitud matemaatilised seosed on rakendatavad ka koonusrattastega M-mehhanismide puhul.

Silinderrattastega M-mehhanisme saab kasutada manipulaatori liigendkää konstruktsioonis esemete teisaldamiseks. Koonusrattastega M-mehhanismid sobivad manipulaatori käelaba

valmistamiseks, mis peab olema kompaktne ning võimaldama esemeid mitme koordinaadi suhtes suunistada. Esemete teisaldamiseks mõeldud käe lülide pöörlemisteljed asuvad üksteisest küllalt kaugel (see on määratud lülide pikkusega) ning seetõttu pole alati võimalik lülisid hammasratta abil ühendada. Lülide väikese pöörderaadiuse tõttu saab osa hammasülekannetest asendada hoobmehhanismidega. Mehhanismi tööpõhimõte seejuures ei muutu.

Joonisel 3.12 kujutatud mehhanismide vedavateks lülideks (ratasteks) on lülid 1, 2 ja 3. Rataste 2 ja 3 satelliitideks on lüli 2' ja ratas 3', mille satelliidiks on omakorda ratas 3''. Nii on mehhanismis sisalduvatel satelliitidel omakorda satelliidid. (üldjuhul on  $n$  liikuvusastmega  $M$ -mehhanismidel  $(n - 1)$ -järku satelliidid.



**Joonis 3.12. Manipulaatormehhanismid: a silinderratastega 2M-mehhanism, b koonusratastega 2M-mehhanism, c silinderratastega 3M-mehhanism, d koonusratastega 3M-mehhanism**

$M$ -mehhanismides on lülid omavahel seotud ja lüli liikumine sõltub samaaegselt mitme mootori tööst. Näiteks lüli 1 liikumine on vahetult määratud teda käitava mootori liikumisega, kuid ülejäänud lülide 2' ja 3'' liikumine on märksa keerukam. Näiteks, lüli 2' liikumine sõltub kahe vedava lüli 1 ja 2 liikumisest, lüli 3'' liikumine aga kõigi kolme vedava lüli 1, 2 ja 3 liikumisest. Lülide liikumise vastastikune sõltuvus raskendab märgatavalt manipulaatori juhtimist. Seepärast on  $M$ -mehhanismidega manipulaatorites sageli kasutusel täiendavad kinemaatilised ahelad,

tagamaks lülide liikumise vastastikust sõltumatust. Vastavaid meetmeid nimetatakse lülide liikumise eraldamiseks.

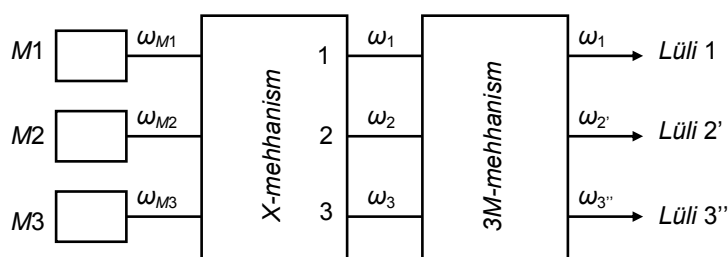
Mõnikord on M-mehhanismide projekteerijate ees ka teistsugused ülesanded. Näiteks liigendkäega töötamisel peavad ühe lüli liikumisel käe teised lülid säilitama oma suunistuse või määratakse lülide liikumine mingite teiste etteantud kinemaatiliste tingimustega. Kõigi selliste ülesannete lahendamine eeldab teatud kinemaatilisi tingimusi rahuldava mehhanismi sünteesi, kusjuures osa sellest on tavalise M-mehhanismi näol olemas. Tuleb leida mingi X-mehhanism, mille lisamisel olemasolevale M-mehhanismile saadakse soovitud omadustega mehhanism. Sageli piisab lisatingimuse täitmiseks üsna lihtsatest täiendustest mehhanismi kinemaatilises ahelas, kuid sobivate lisaahelate leidmine on M-mehhanismide keerukuse tõttu küllalt raske. Järgnevalt vaadeldaksegi mõningaid kinemaatiliste lisatingimustega M-mehhanisme.

**Kinemaatiliste lisatingimustega mehhanismid ja lülide liikumise eraldamine.** Kinemaatilisteks lisatingimusteks võivad M-mehhanismide korral olla veetavate lülide liikumiste eraldamine või vastupidi, mõne lüli omavahelise suhtelise liikumise kindla seaduspärasuse tagamine, suletud kinemaatiliste ahelate moodustamine jm. Mitme liikuvusastmega mehhanismi veetavate lülide liikumiste eraldamiseks on vaja, et neist igaühe kindlat liikumist käitaks ainult üks mootor. Sel juhul on M-mehhanismi veetavate lülide liikumine kirjeldatav lihtsa kinemaatikavõrrandiga

$$\omega_i = \frac{1}{u_i} \omega_{mi} \quad (3.4)$$

kus  $\omega_i$  -  $i$ -nda veetava lüli nurkkiirus  
 $\omega_{mi}$  -  $i$ -ndat lüli käitava mootori nurkkiirus ja  
 $u_i$  - ülekandesuhe mootorilt lülile.

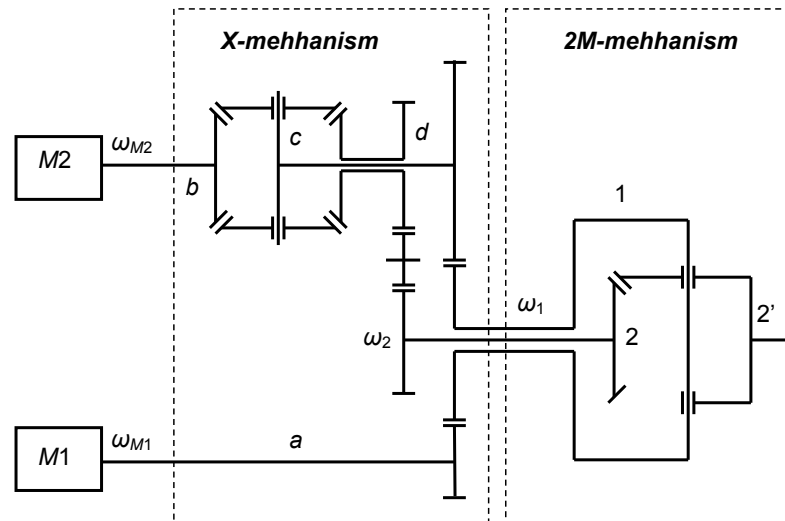
Joonisel 3.13 on näidatud 3M-mehhanism koos täiendava X-mehhanismiga, mis võimaldab muuta lülide liikumise üksteisest sõltumatuks ja juhtida iga mootoriga ühe kindla lüli liikumist eraldi.



**Joonis 3.13. Kinemaatilisi lisatingimusi rahuldava mehhanismi süntees olemasoleva 3M-mehhanismi ja otsitava X-mehhanismi kaudu**

Etteantud ülekandearvu (-suhte) järgi vajalikku mehhanismi luua pole sugugi lihtne. Eriti juhul kui erinevate lülide nurkkiirusi tuleb lahutada või liita. Selleks otstarbeks sobivad diferentsiaalmechhanismid, mida vastavalt vajadusele kasutatakse ka liikumiste eraldamiseks.

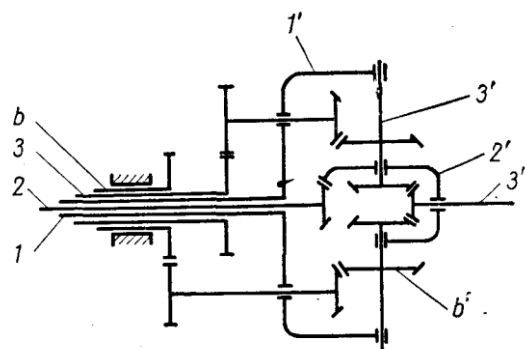
2M-mehhanismi **lülide liikumiste eraldamiseks** mõeldud X-mehhanismi näeb joonisel 3.14.



**Joonis 3.14. Lülide liikumise eraldamine 2M-mehhanismi puhul**

Joonisel 3.14 kujutatud mehhanismi saab kasutada liikumiste eraldamiseks 2M-mehhanismides. Sarnaseid, kuid mitme diferentsiaalülekanne abil moodustatud mehhanisme, kasutatakse ka 3M-mehhanismide lülide liikumiste eraldamiseks.

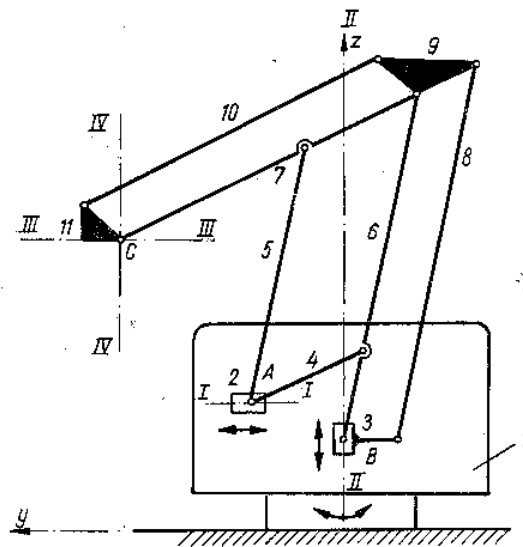
Huvitavaid võimalusi **manipulaatori käelaba lülide juhtimiseks** pakub joonisel 3.15 kujutatud 3M-mehhanism. Mehhanism erineb joonisel 3.12 toodust selle poolest, et siin kasutatakse lüliga 3'' ühendatud kinemaatilist lisaahelat  $bb'$ . Mehhanismi ülekandesuhted on valitud selliselt, et  $u_{22'} = -u_{33'} = u_{bb'} = u_{3b'}$  ja  $u_{33''} = u_{33'}$ .



**Joonis 3.15. Kinemaatiliste lisasidemetega manipulaatori käelaba 3M-mehhanism**

Nendest järeldub, et lülide 2' ja 3'' käitamiseks piisab, kui võtta vedavateks lülideks 3 ja *b*. Lüli 2 osutub mehhanismi käitamise seisukohalt mittevajalikuks, kuid teda saab kasutada lõtkude kõrvaldamiseks vajalike suletud kinemaatiliste ahelate moodustamisel. Veel järeldub võrranditest, et lülide 3 ja 6 ühesuunalisel pöörlemisel pöörleb lüli 3'', kuid lülide 3 ja *b* vastassuunalisel pöörlemisel pöörleb lüli 2'. Sellist M-mehhanismi kasutatakse mitme roboti käelaba konstruktsioonis.

Manipulaatori tõstemehhanismis kasutatakse mõningatel juhtudel liigendrööpkülilikuid (joonis 3.16). Sõltuvalt järjestikku asetsevate lülide arvust võib saada mitmesuguse püstliikumisulatus, kuid tuleb arvestada, et lülide arvu suurenedes väheneb mehhanismi jäikus.



**Joonis 3.16. Manipulaatori käe rööpmehhanism lülide liikumiseks ristkoordinaadistikus**

Liigendkäe lülid seondatakse sageli lisarööpmehhanismi lülidega, et kergemini saada soovitud trajektoori (eriti liikumist rõht- või püstsihis) [9]. Joonisel 3.16 kujutatud mehhanism on ette nähtud laadimistöodeks, kuid seda võib edukalt rakendada ka roboti manipulaatoris. Selles kasutatakse kahte omavahel ühendatud rööpmehhanismi, mis tagavad paralleelsed liikumised nii rõht- kui ka püsttasandis. Mehhanismi käitavad mootorid on ühendatud lülidega 2 ja 3 ning punktid A ja B liiguvad piki ristuvaid telgi I-I ja II-II. Kui punkt B seisab paigal, siis koos punkti A liikumisega piki telge I-I liigub punkt C piki telge III-III. Vastupidisel juhul (punkt A on paigal ja punkt B liigub piki telge II-II) liigub punkt C piki telge IV-IV. Lülide 2 ja 11 ning 3 ja 11 paralleelse liikumise tagavad lülidest 4, 5, 6, 7 ja 7, 9, 10, 11 moodustuvad kaks rööpmehhanismi ning lisahoob 8.

Vajaduse korral võivad mõlemad liikumised toimuda ka ühel ajal. Lisaks võib kere 1 pöörduda ümber püsttelje. See mehhanism võimaldab nurkkoordinaadistikus töötava manipulaatori muuta silindrilises koordinaadistikus töötavaks, kusjuures säilib liigendkäe eelisenälgitud kompaktsus.

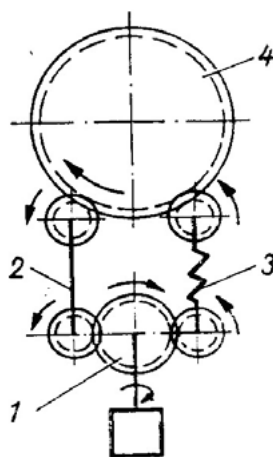
### 3.3. Lõtkuvabad mehhanismid

Lõtkud vähendavad manipulaatori liikumistäpsust ning võivad mõjutada ajamite töö stabiilsust. Lõtkude suurus sõltub mehhanismi kinemaatiliste paaride valmistamistäpsusest. Järelikult saab lõtke vähendada täpsuse suurendamisega, kuid seejuures suureneb järsult mehhanismi hind. Lõtku saab kõrvaldada ka teisiti, nimelt kui kasutada mehaaniliselt eelpingestatud suletud kinemaatilist ahelat. Sellise ahela saamiseks tuleb esialgset avatud ahelat täiendada sulgeva lisaahelaga. Suletud kinemaatilise ahela tunnuseks on see, et selle kõik lülid kuuluvad vähemalt kahte kinemaatilisse paari.

Kruviülekannetes, nt **kuulkruviülekande** korral, kõrvaldatakse lõtkud kaksikmutri mehaanilise eelpingestamisega. Kruvi ja kaksikmutri poolte vahel moodustub sel juhul samuti suletud kinemaatiline ahel.

Näitena on joonisel 3.17 toodud roboti pöördemehhanism, milles mootori pöördemoment kantakse manipulaatori lülile 4 kahe paralleelse ahela kaudu. Suletud ahela moodustavad selles lülid 1, 2, 4 ja 3. Viimane nendest koosneb kahest hammasrattast ning neid ühendavast torsioonvõllist. Enne ahela sulgemist väänatakse torsioonvõlli nii, et ahel osutub võlli elastsusjõudude toimele mehaaniliselt eelpingestatuks. Tulemusena kaovad ülekanDES olevad lõtkud.

Suletud kinemaatilise ahelaga mehhanismide analüüsil selgub, et need saavad töötada ainult juhul, kui suletud ahela ülekandearv on +1.



**Joonis 3.17. Manipulaatori pöördemehhanism, mille lõtku kõrvaldamiseks kasutatakse kahte paralleelset ülekandeahelat: 1 vedav hammasratas, 2 jäik võll, 3 mehaaniliselt eelpingestatud torsioonvõll, 4 veetav hammasratas**

Niisugune mehhanism üldjuhul töötada ei saa, välja arvatud erijuhul, kui sulgeva ahela ülekandesuhe võrdub esialgse ahela ülekandesuhtega ja

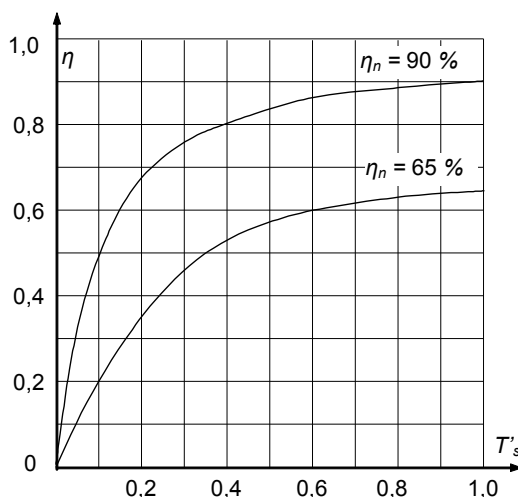
$$u_{sulet.} = u_{12}u_{24}u_{43}u_{31} = +1 \quad (3.5)$$

Lõtkude kõrvaldamiseks ettenähtud suletud kinemaatilistes ahelates moodustuvad passiivsed sidemed. Üldiselt nimetatakse kinemaatilise paari sidemeks lülide suhtelist liikumist piiravaid kitsendusi. Enamik sidemetest mõjutab aktiivselt mehhanismi liikumise iseloomu, kuid on ka selliseid sidemeid, mis ei avalda mehhanismi liikumisele mingit mõju. Need ongi passiivsed sidemed.

Lõtkude kõrvaldamiseks (järelkult ka passiivse sideme moodustamiseks) kahe liikuvusastmega mehhanismi korral peab olema kaks suletud kinemaatilist ahelat. Üldjuhul on  $n$  liikuvusastmega mehhanismi korral, aga  $n$  suletud kontuuri, mille igäühe ülekandesuhe  $u_{sulet.} = +1$ .

### 3.4. Kaod ülekandemehhanismides

Kaod ülekandemehhanismis sõltuvad mehhanismi tüübist. Hammasülekannete puhul on reduktori ühe astme kasutegur sõltuv nii ülekandearvust kui ka koormusest. Ülekandemehhanismide kasuteguri väärtused nimikoormusel on esitatud kataloogides või mehhanismi tehnilistes dokumentides. Muutuva koormuse puhul tuleb arvestada ka kasuteguri muutumisega (joonis 3.18). Kuna kasuliku koormuse vähenemisel hakkab mehhanismi kasutegur vähenema, tuleb ajamites energia säästmiseks võimaluse korral vältida mehhanismide alakoormatud talitlust.



Joonis 3.18. Ülekandemehhanismi kasuteguri sõltuvus suhtelisest koormusest



Ülekandemehhanismi kasutegur on eriti oluline energia regenereerimisega ning piduritaltluses töötavate ajamite puhul. Võimsuste tasakaaluvõrrandid mootori- ja piduritaltluses

$$\begin{aligned} T_s^> \omega &= T_m \omega_m \eta_{\dot{u}k} \\ T_s^< \omega \eta_{\dot{u}k} &= T_m \omega_m \end{aligned} \quad (3.6)$$

kus

$T_s^>$  - staatiline moment mootoritaltluses

$T_s^<$  - staatiline moment piduritaltluses

$\omega$  - töomasina pöörlemiskiirus

$\eta_{\dot{u}k}$  - ülekandemehhanismi kasutegur

$T_m$  - mootori moment

$\omega_m$  - mootori pöörlemiskiirus. Ülekande summaarne kasutegur  $\eta_{\dot{u}k}$  arvestab reduktori kasutegurit  $\eta_{red}$  ja muude ülekandemehhanismide (nt siduri) kasutegureid  $\eta_{muud}$

$$\eta_{\dot{u}k} = \eta_{red} \cdot \eta_{muud} \quad (3.7)$$

**Kaldhammasreduktori ja koonusreduktori** kasutegur on eeldatavalt  $\eta = 0,98$  iga reduktori hammasülekandestme kohta, s.t kolmeastmelise reduktori kasutegur  $\eta = 0,94$ . Ka tigureduktori kasuteguri väärtus sõltub reduktori ülekandetegurist, kuid on hammasreduktori omast tunduvalt väiksem.

Muude reduktorile järgnevate ülekandemehhanismide, nagu kett-, rihm-, tross- jt mehhanismide kasutegurid leitakse kataloogidest või käsiraamatutest. Kettülekande kasutegur  $\eta = 0,90 \dots 0,96$ . Üksikasjaliku informatsiooni puudumisel tuleb arvestada kasuteguri võimaliku väikseima väärtusega (antud juhul  $\eta = 0,90$ ). Ülekandeahela summaarne kasutegur võrdub selle ahela elementide kasutegurite korrutisega.

Näiteks  $\eta_{sum} = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,95 \cdot 0,90 = 0,85$ .

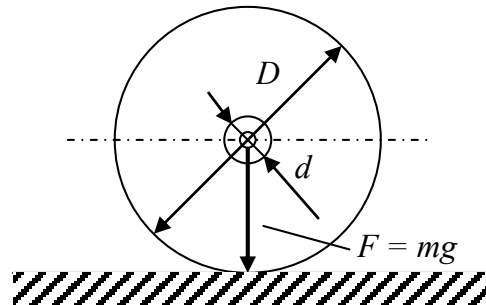
Rekuperatiivtaltluses (energia regenereerimisel) ajami kasutegur arvutatakse valemiga

$$\eta' = 2 - \frac{1}{\eta} \quad (3.8)$$

Valemist jäeldub, et juhul kui reduktori kasutegur  $\eta = 50\%$  (0,5) või alla selle, siis on rekuperatiivtaltluses ajami kasutegur null ning energia regenereerimine pole võimalik. Niisugust reduktorit loetakse isepidurduvaks. Tigureduktorid on tavaliselt isepidurduvad.

### Ratta liikumise veeretakistusjõud

Liikurroboti puhul tuleb arvestada kadusid, mis tekivad roboti veomehhanismi liikumisel. Ratasveoki puhul tekivad hõõrdekaod ratta veeremisel. Joonisel 3.20 näidatud ratas veereb teljel olevatel laagritel, mille läbimõõt on  $d$ . Ratta enda läbimõõt on  $D$  ja mass  $m$ . Ratta massist tingitud raskusjõud  $F = mg$ , kus  $g$  on raskuskiirendus. Veeretakistusjõud sõltub suurel määral ratta veeremise keskkonnast ehk veerehõõrdetegurist  $f$ . Ratta ja veeremispinna hõõrdele lisandub hõõre laagris, mida iseloomustab tegur  $\mu_L$ .



Joonis 3.19. Ratta veeremisel tekkiv veeretakistusjõud

Veeretakistusjõud arvutatakse valemiga

$$F_{veere} = m g \left( \frac{2}{D} \left( \mu_L \frac{d}{2} + f \right) \right) \quad (3.9)$$

kus  $m$  on ratta mass,  $g$  - raskuskiirendus. Ratta veerehõõret arvestav tegur  $f$  on ühtlasi ratta minimaalne veeremist võimaldav raadius. Sulgudes olev avaldis tervikuna kujutab summaarset hõõrdetegurit. Veerehõõrdetegur (teras terasel) on nt  $f = 0,5$  mm. Maapinnal veeremisel sõltub veerehõõrdetegur ratta ja pinnase omadustest ning on kümneid või sadu kordi suurem. Veerelaagrite hõõrdetegur on nt  $\mu_L = 0,005$ .

Liikurroboti puhul tuleb **liikumise summaarse takistusjõu** määramisel arvestada peale veerehõõrde veoki kõikides ratastes ka tee kallakust ja õhutakistusest tingitud koormust

$$F_s = F_h + F_k + F_{\delta hk}, \quad (3.10)$$

kus

$F_h$  - hõõrdetakistus

$F_k$  - tee kallaku takistus

$F_{\delta hk}$  - õhutakistus.

Kiirendusega liikumisel lisanduvad dünaamilised jõud

$$F_d = m \frac{dv}{dt} = m \cdot a, \quad (3.11)$$

kus  $m$  on liikuv mass  $dv/dt = a$  kiiruse tuletis aja järgi ehk kiirendus.

**Staatiline võimsus** arvestab kõiki jõude, mis toimivad kiirenduseta liikuvas ajamis, näiteks

$$P_s = \frac{F_s \cdot v}{\eta_{meh}}. \quad (3.12)$$

**Dünaamiline võimsus** arvestab lisaks staatilistele jõududele ka dünaamilist jõudu, s.t kiirendamisel või aeglustamisel tekkivat lisakoormust.

### 3.5. Robotiajami mehaanika arvutusvalemid

Roboti manipulaatori lülide ajamina kasutatakse enamikul juhtudel elektriajamat. Elektriajam on **elektromehaaniline süsteem**, milles ühel ajal toimuvad energia muundamise elektrilised ja mehaanilised protsessid. Mehaanilise koormuse muutumisel muutuvad mootori tarbitav vool ja võimsus ning vastupidi, mootori pinge, sageduse või mõne muu elektrilise parameetri (nt takistuse) muutumisel, muutub töömasina kiirus või pöördemoment.

Mootori tarbitav elektrienergia muundatakse mootori võlli pöörlemise mehaaniliseks energiaks, lisaks kulub osa sellest ka muundamisel esinevateks kadudeks. Mootori mehaanilist võimsust kasutatakse töömasina käitamiseks, s.t hoomasside kiirendamiseks ning staatiliste hõõrde- ja takistusjõudude ületamiseks. Siinkohal vaadeldakse ajami mehaanikaga seotud dünaamilisi protsesse ja neid kirjeldavaid võrrandeid.

Kõik põhilised ajami mehaanikat kirjeldavad võrrandid saab tuletada mehaanilise võimsuse tasakaaluvõrrandist. Pöördliikumise puhul lähtutakse võimsuste tasakaalu võrrandist

$$P_m - P_s = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt} \quad (3.13)$$

kus  $P_m$  - mootori võimsus

$P_s$  - staatiline koormusvõimsus

$J\omega \frac{d\omega}{dt}$  - kiiruse muutumisest tingitud kineetilise energia muutumine ajaühikus

$\frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}$  - inertsimomendi muutumisest tingitud kineetilise energia muutumine ajaühikus.

Kiirendamisel  $\frac{d\omega}{dt} > 0$  ning pidurdamisel  $\frac{d\omega}{dt} < 0$ .

Joonliikumise puhul saab kasutada joonkiirust võimsuste tasakaalu võrrandist

$$P_m - P_s = mv \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt} \quad (3.14)$$

Samalaadseid tasakaaluvõrrandeid saab kirjutada ka momentide ja jõudude kohta ajamis (tabel 3.1). Lihtsamatel juhtudel saab liikumise ajal hoomassi või inertsimomendi lugeda konstantseks.

**Inertsimoment.** Omaette probleem on määrata pöörlevate kehade inertsimomenti. Punktmassi inertsimoment arvutatakse valemiga

$$J = mr^2 \quad (3.15)$$


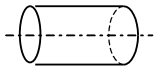
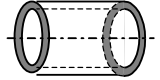
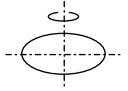
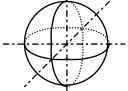
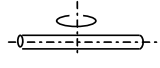
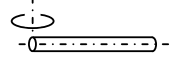
kus  $m$  on mass ja  $r$  pöörlemisraadius. Keha pöörlemisel on mass ruumis jaotatud ning igal massipunktil on oma pöörlemisraadius. Seepärast tuleb keha inertsimoment arvutada korduva integreerimisega kogu keha ruumala ulatuses (tabel 3.2).

Tabel 3.1

Ajame mehaanika põhivõrrandid

Pöördliikumine	Sirgliikumine
Võimsuste võrrand $P_m - P_s = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}$	Võimsuste võrrand $P_m - P_s = mv \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt}$
Nurkkiirus $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$	Joonkiirus $v = \frac{ds}{dt}$
Momentide võrrand $T_m - T_s = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}$	Jõudude võrrand $F_m - F_s = m \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{ds}$
Dünaamiline moment $T_d = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}$	Dünaamiline jõud $F_d = m \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm}{ds}$
Lihtsustatud võrrand $J = const.$ $T_m - T_s = J \frac{d\omega}{dt}$	Lihtsustatud võrrand $m = const.$ $F_m - F_s = m \frac{dv}{dt}$
$T_m$ mootori moment $T_s$ staatiline koormusmoment $T_d$ dünaamiline moment $J$ inertsimoment	$F_m$ motoorne jõud $F_s$ staatiline vastujõud $F_d$ dünaamiline jõud $m$ mass

**Tabel 3.2. Tüüpiliste pöördkehade inertsimomentide arvutus**

Pöördkeha	Pöörlemistelg	Pöördkeha kuju	Inertsimoment
Rõngas, seib, õõnessilinder (õhukeseseinaline)	Rõnga telg		$J = m \cdot r^2$
Täissilinder	Silindri pikitelg		$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$
Õõnessilinder (paksuseinaline)	Õõnessilindri pikitelg		$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_1^2 + r_2^2)$
Ketas	Ketta telg		$J = \frac{1}{4} \cdot m \cdot r^2$
Kera	Keskpunkti läbiv telg		$J = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2$
Varras (pikkusega $l$ )	Varda keskpunkti läbiv risttelg		$J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$
Varras (pikkusega $l$ )	Varda otspunkti läbiv risttelg		$J = \frac{1}{3} \cdot m \cdot l^2$

### 3.6. Robotiajami koormus

Elektriajamis kasutatakse elektrimootorit elektrienergia muundamiseks mehaaniliseks energiaks, et käitada sellega manipulaatori lüli, roboti tööorgan või panna liikuma liikurroboti veok. Liikumine võib toimuda

- pidevalt ühtlase kiirusega pööreldes (*continuous constant speed rotation*)
- muutuva kiirusega pööreldes (*variable speed rotation*)
- muutuva kiiruse ja pöörlemissuunaga (*variable speed rotation in both direction*)
- ühtlaselt lineaarselt (*continuous constant speed linear movement*)
- perioodiliselt edasi-tagasi (*cyclic reciprocal movement*)
- mitteperioodiliselt edasi-tagasi (*non-cyclic reciprocal movement*).

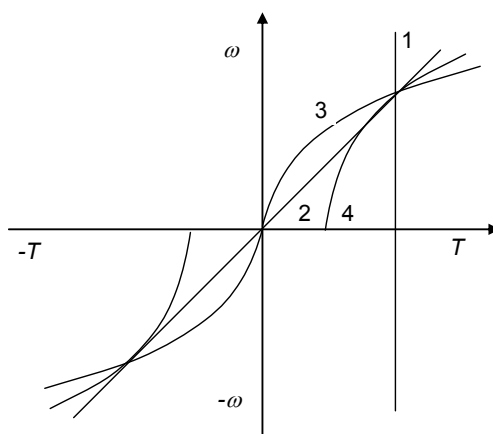
Roboti manipulaatori lülid liiguvad perioodiliselt või mitteperioodiliselt edasi-tagasi. Liikurroboti veok võib liikuda ühtlaselt või muutuva kiirusega, manööverdamisel ka edasi- ja tagasisuunas. Roboti tööorgan, nt lihvketas, mutrikeerik vms, võib töötada mitmesuguse koormuse ja kiirusega. Vastavalt veoki, manipulaatori lüli või tööorgani liikumisele tuleb valida ajami mootor ning mootorit ja töömasinat ühendav ülekandemehhanism (reduktor). Mootoreid valmistatakse erineva nimivõimsusega, -momendiga ja -kiirusega. Sama nimivõimsuse puhul on suurema nimikiiruse ja väiksema nimimomendiga mootorite mass väiksem kui väiksema nimikiiruse ja suurema nimimomendiga mootoritel. See on suurema nimikiirusega mootorite eelis. Teisalt on manipulaatori lüli pöörlemiskiirus suhteliselt väike ning selle käitamiseks tuleks

eelistada väiksema kiirusega mootoreid või kasutada mootori ja töömasina kiiruste sobitamiseks reduktoreid. Reduktor omakorda suurendab aga nii ajami massi kui ka hinda. Mootori ja reduktori valiku optimaalse lahenduse leidmine on ajami mehaanilise osa projekteerimise tähtsaim ülesanne.

**Staatiline ja dünaamiline koormus.** Ajameid võib liigitada vastavalt sellele, kas nende koormus on valdavalt staatiline või dünaamiline. Staatiline koormus võib

- olla konstantne (*constant torque*) või sõltuda kiirusest
- sõltuda asendist või läbitud tee pikkusest
- sõltuda ajast.

Konstantset või kiirusest sõltuvat staatilist koormust iseloomustavad ajami koormustunnusjooned (joonis 3.20).



**Joonis 3.20. Töömasinate tüüpilised koormustunnusjooned momendi-kiiruse tasandil:**  
**1 – koormus on konstantne, 2 – koormus on kiirusest lineaarselt sõltuv,**  
**3 – koormus muutub võrdeliselt kiiruse ruuduga (õhutakistus, voolamine),**  
**4 – koormuse konstantsele komponendile lisandub kiirusest sõltuv komponent**

**Momendi kiirusekõverad  $T(\omega)$  ja kiiruse momendikõverad  $\omega(T)$ .** Töömasina seisukohalt on primaarne kiirus, mis põhjustab koormusmomendi. Mootori seisukohalt on primaarne moment, mis tekitab pöörlemise ning järelkult ka kiiruse. Nendest eelistustest lähtudes valitakse ka tunnusjoonte esitusviis.

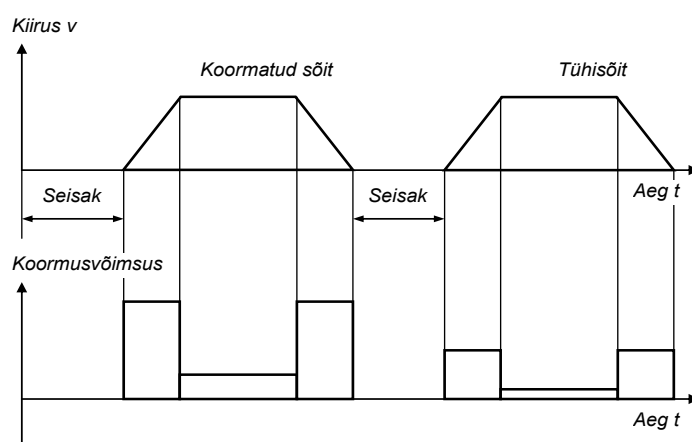
Dünaamilise koormuse puhul eristatakse konstantse ( $J = const$ ) ja muutuva ( $J = var$ ) inertsimomendiga koormust, kusjuures viimasel juhul võib inertsimoment olla nii kiiruse, mehhanismi asendi kui ka aja funktsioon.

**Ajami talitlustersükliid.** Ajami talitlustersükkel on joonisel 3.21. Sõltuvalt üksikutest etappidest toimib ajamile erinev koormus. Ajami mootor ja muud jõuahela komponendid soojenevad või jahtuvad sõltuvalt koormuse suuruselt. Kui ajami tööaeg on küllalt lühike, et ajam ei jõua selle kestel oluliselt soojeneda ning seisakuajad on piisavalt suured selleks, et ajam jõuab täielikult

maha jahtuda, algab järgmisel töötüklil temperatuuri tõus ümbruse temperatuuri tasemelt. Niisugust talitlust nimetatakse **lühiajaliseks talitluseks**. Kui seisaku ajad on lühikesed ja ajam ei jõua nende kestel maha jahtuda, tõuseb temperatuur iga järgneva tööetapi kestel järjest kõrgemale ning stabiliseerub alles pärast korduvaid töötükleid. Niisugust ajami talitlust nimetatakse **vaheajaliseks talitluseks**. Kui koormatud talitus kestab pikka aega ning ajami temperatuur saavutab selle kestel oma püsiväärtuse, on tegemist ajami **pidevtalitlusega**.

Robotite puhul on valdavalt tegemist vaheajalises talitluses töötavate ajamitega, mille koormusest moodustab suure osa dünaamiline, s.t kiirendus- ja aeglustusprotsesside koormus.

Ajami erinevad talitlused on määratud standarditega. Ajami mootori ja muude komponentide keskmine koormus, võimsus, elektrilised kaod ning temperatuur sõltuvad talitluse iseloomust.



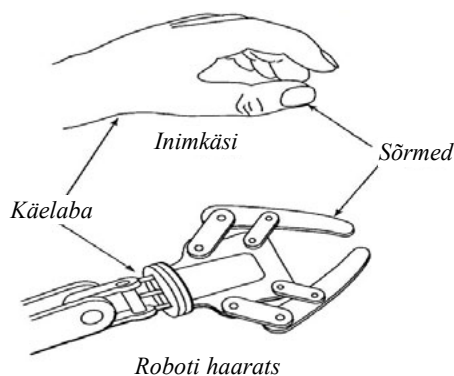
**Joonis 3.21. Ajami tsükliline talitus**

**Ajami mootori ja reduktori valik vastavalt koormuse ja talitlustsükli iseloomule on üks ajamitehnika põhiülesandeid.**

### 3.7. Roboti haaratsid ja tööriistad

Manipulaatorid varustatakse sõltuvalt nende töö iseloomust ja kasutusalaast kas haaratsi või tööriistaga. **Haarats** (*gripper*) on manipulaatori tööorgan (*end effector*), mille abil teisaldatavaid esemeid haaratakse, hoitakse kinni või vabastatakse. **Tööriistad** (*robot tools*) on ette nähtud kindla tehnoloogilise operatsiooni sooritamiseks ning nendeks võivad olla värvipihustid, keevituspõletid, punktkeevitustangid, mutrikeerikud jms.

Inimkäe ja roboti haaratsi võrdlus on joonisel 3.26. Esimene rauast tehiskäsi loodi Saksa rüütlite jaoks juba aastal 1509.



**Joonis 3.22. Inimkäe ja roboti haaratsi võrdlus**

Haarats on vahetus kontaktis teisaldatava esemega, seetõttu sõltub tööoperatsioonide edukus suurel määral haaratsist. Teisaldatavad esemed võivad olla erinevate mõõtmetega, mitmesuguse kujuga ja massiga. Haaratsi sõrmede pikkus ja kuju peavad vastama teisaldatava eseme mõõtmetele ja kujule. Et teisaldatavate esemete materjal, pinnatemperatuur ja muud füüsikalised omadused mõjutavad otseselt haaratsi konstruktsiooni, siis on loodud palju erineva tööpõhimõtte ja ehitusega haaratseid. Ülevaate nendest annab tabelis 3.3 toodud haaratsite liigitus.

**Tabel 3.3. Haaratsite liigitus**

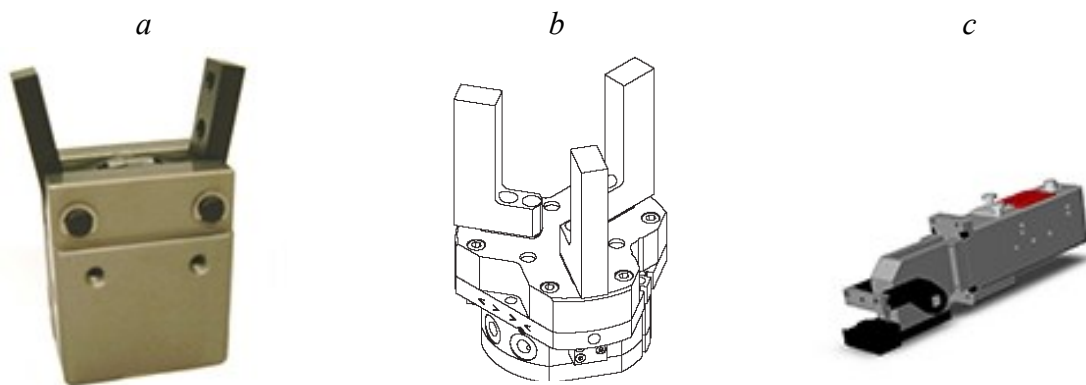
Haaratsi omadus	Haaratsite liigid
Seadistatavus	Mitteseadistatavad, seadistatavad, vahetatavad
Tööpõhimõte	Mehaanilised, elektromagnetilised, vaakumtoimega, täispuhutavad
Järeleandvus	Jäigad, elastsed, viga korrigeerivad
Ajami tüüp (energiaallikas)	Pneumaatilised, hüdraulilised, elektrilised
Tundlikkus	Tundetud, survetundlikud, libisemistundlikud, ümbrusetajuga
Sõrmede arv	Kahe-, kolme-, nelja- ja enamasõrmelised
Haarde iseloom	Hõõrdejõul põhinev, eset ümbritsev haarats

Sõltuvalt kujust ja tööpõhimõttest võivad haaratsid olla kas spetsiaalsed või universaalsed, s.t võimelised haarama erinevaid esemeid. Kuid ka kõige universaalsem haarats sobib ainult piiratud hulga esemete jaoks. Seepärast valmistatakse peale mitteseadistatavate ka seadistatavaid ja vahetatavaid haaratseid. Mitteseadistatavate haaratsite universaalsust saab tõsta, kinnitades sõrmedele erinevaid vahetükke, mille mõõtmed sobitatakse teisaldatava esemega. Vahetatavad haaratsid jagunevad automaatselt ja käsitsi vahetatavateks. Täielikult võimaldavad tootmise automatiseerida vaid automaatselt vahetatavate haaratsitega robotid.



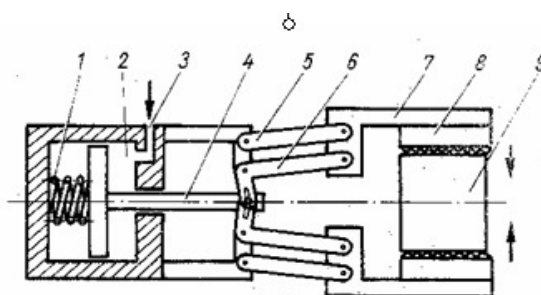
Tööpõhimõtte järgi võib haaratsid jaotada kolme liiki: mehaanilised, elektromagnetilised ja vaakumhaaratsid. Tulevikus võidakse kasutusele võtta mõnel muul põhimõttel töötavad haaratsid. Näiteks on võimalik luua õhukeste kiletaoliste dielektriliste materjalide (paberi, plastlehtede jms) haaramiseks elektrostaatilisid haaratseid.

Kõige enam kasutatakse mehaanilisi haaratseid, mille töö põhineb mehaaniliselt kokkusurutavate sõrmede ja teisaldatava eseme vahelisel hõõrdejõul, mis fikseerib eseme asendi haaratsi suhtes. Mehaanilised haaratsid koosnevad kerest, ajamist ja sõrmedest. Neid liigitatakse konstruktsiooni, ajami tüübi ning jõuülekande järgi. Näiteks on olemas pneumo-, hüdro- ja elektrijamiga haaratseid, mida käitavad kas tõmbeelektromagnetid või elektrimootorid. Sõrmede liikuma panemiseks kasutatakse mitmesuguseid hoob-, hammas- ja nukkmehhanisme ning trossülekandeid. Sõrmede liikumise iseloomu järgi liigitatakse haaratseid rööpsõrmedega (*parallel gripper*) ja pöörduvate sõrmedega (*angular gripper*) haaratsiteks (joonis 3.23).



**Joonis 3.23. Haaratsite näiteid: a – kahesõrmeline pöörduvate sõrmedega, b – kolmesõrmeline rööpsõrmedega ja c lehtmaterjali tõstmiseks ettenähtud haarats**

Haaratsi rööpmehhanism koos ühepoolse pneumosilindriga on joonisel 3.24. Haaratsi sõrmed 7 tagastatakse vedruga 1. Sõrmede kokkusurumiseks juhitakse õhukanali 3 kaudu silindrisse 2 suruõhk, mis paneb kolviga ühendatud varda 4 abil liikuma rööpmehhanismi 5, 6. Viimane on ühendatud sõrmedega 7. Varras 4 võib olla hoobadega 6 ühendatud otse või ülekandemehhanismi kaudu.



**Joonis 3.24. Haaratsi rööpmehhanism koos ühepoolse pneumosilindriga**

Haaratsi **hoidejõu** saab arvutada valemiga

$$F_g n_f \mu = m \cdot (g + a) \cdot k_{varu} \quad (3.16)$$

kus

$F_g$  - sõrme survejõud

$n_f$  – sõrmede arv

$\mu$  - hõõrdetegur

$m$  - teisaldatav mass

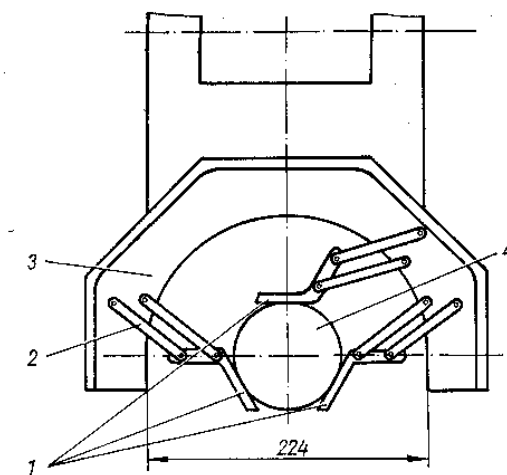
$g$  – raskuskiirendus

$a$  - massi maksimaalne kiirendus teisaldamisel

$k_{varu}$  - varutegur ohutuse tagamiseks (2...3).

Haardeoperatsioonide õnnestumise tõenäosuse suurendamiseks peab haaratsi sõrmedel olema küllaldane liikumisulatus. See võimaldab haarata ka mitte väga täpses kohas paiknevaid detaile ning suurendada haaratsi universaalsust (haarata mitmesuguse suurusega detaile). Näitena on joonisel 3.25 kujutatud suure haardeulatusega haaratsi konstruktsioon. Haaratsi kolm sõrme 1 on ühendatud kolme rööpmehhanismiga 2, mille lülide pöörlemisteljed asuvad poolringikujulisel raamil 3. Teisaldatav ese hoitakse täpselt haaratsi teljel, mis on vajalik eseme täpselt paigaldamiseks. Selline haarats võimaldab haarata esemeid, mille läbimõõdud erinevad üle 10 korra.

Omaette rühma moodustavad täispuhutavad haaratsid. Nende tööpõhimõte sarnaneb mehaaniliste haaratsite omaga, kuid sõrmed on valmistatud elastsest materjalist ning täispuhumisel nende mõõtmed ja kuju muutuvad. Seega satub ese elastsete sõrmede vahele ning fikseeritakse elastsusjõududest tingitud hõõrdejõudude toimele.



**Joonis 3.25. Tsentreeriv suure haardeulatusega haarats**

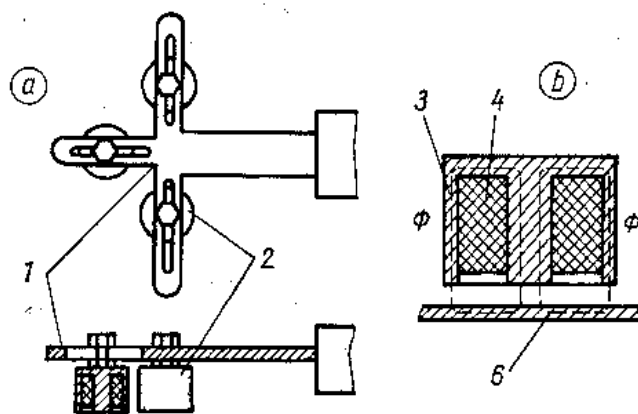
Elektromagnetilisi haaratseid kasutatakse magnetilisest või elektrit juhtivast materjalist esemete haaramiseks. Nende töö põhineb elektrivoolu toimele tekkivatel elektromagnetilistel jõududel.

Näiteks võimaldavad alalis- ja vahelduvvoolumagnetid haarata ferromagnetilisest materjalist esemeid. Eelistatumad on vahelduvvoolumagnetid, millel puudub jääkmagnetism (esemed ei kleepu vabastamisel magneti külge) ning mis konstantse magnetvoo tõttu võimaldavad arendada küllaldast haardejõudu ka suure õhupilu korral. Lisaks sellele ei põhjusta nad teisaldatavate esemete magneetumist.

Ferromagnetilisest materjalist esemeid saab haarata ka püsomagnetitega haaratsite abil. Nende korral on probleemiks eseme vabastamine, mida tehakse eraldi tõukuriga. Elektromagnetiga haaratsi (joonis 3.31, a) raami 1 külge on kinnitatud üks või mitu elektromagnetit 2, mille asend raami küljes on reguleeritav, mis võimaldab neid seadistada vastavalt haaratava eseme kujule. Elektromagnet (joonis 3.31, b) koosneb avatud magnetahelaga südamikust 3, mille mähise 4 tekitatud magnetvoog  $\Phi$  saab sulguda läbi õhu või läbi ferromagnetilisest materjalist detaili 6. Viimasel juhul tekitab elektromagnet tõmbejõu, haarates kaasa detaili 6. Detaili vabastamiseks tuleb elektromagneti vooluahel katkestada. Alalisvoolumagneteid demagneeditakse ka vastassuunalise vooluimpulsiga.

**Magnetiliste haaratsite** eelised on järgmised:

- tõstetava eseme mõõtmed võivad erineda
- tõstetavates metallesemetes võivad olla avad
- haaramine toimub kiiresti
- haaramiseks on vaja ainult ühte pinda, mistõttu saab pealt haarata salves olevaid esemeid.



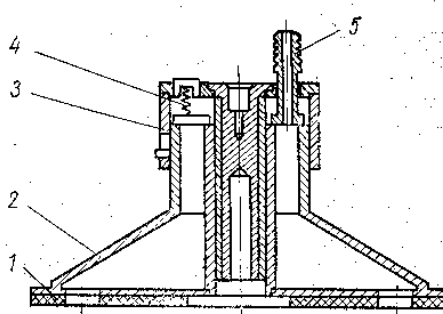
**Joonis 3.26. Elektromagnetitega haarats: a haaratsi ehitus ja b elektromagnet**

Elektromagnetilisi haaratseid on võimalik ehitada ka nii, et kasutatakse ära põhimagnetvoo ja induksioonivoolude tekitatud elektromagnetilised jõud. See võimaldaks teisaldada mittemagnetilisest elektrit juhtivast materjalist detaile. Üheks sellise haaratsi alaliigiks on magnetihüdrodünaamiline ammuti elektrit juhtivate vedelike ammutamiseks.

**Vaakumhaaratsi** töö põhineb õhurõhkude erinevusest tingitud haardejõul. Jõu suurus oleneb rõhkude vahest ning haaratsi kontaktpinna suurusest. Eriti sobivad sellised haaratsid lamedate,

siledapinnaliste ja suuremõõtmeliste esemete haaramiseks. Näiteks kasutatakse neid klaasi- ja plekitahvlite, kineskoopide jms teisaldamisel. Vaakumhaaratsid võib jaotada kahte rühma: iminapaga ja vaakumtorustikuga haaratsid. Esimesel juhul tekitatakse vaakum haaratsi iminapaga, kui see surutakse vastu eset, teisel juhul kasutatakse selleks vaakumpumpa.

Vaakumhaarats (joonis 3.27) koosneb vaakumkambrist 2, mille tööpinna servad on tihendatud elastsest materjalist (kummist) tihendiga 1. Kamber 2 on elastselt ühendatud manipulaatori käelaba külge kinnituva kerega 3. Elastsus (mis on vajalik õrnade esemete, nt klaasi tõstmisel) saavutatakse vedru 4 abil, mis võimaldab ühtlasi kompenseerida manipulaatori positsioonimisel tehtud viga. Õhk pumbatakse kambrist 2 välja toru 5 kaudu, mis ühendatakse vooliku abil vaakumpumbaga.



**Joonis 3.27. Vaakumhaarats**

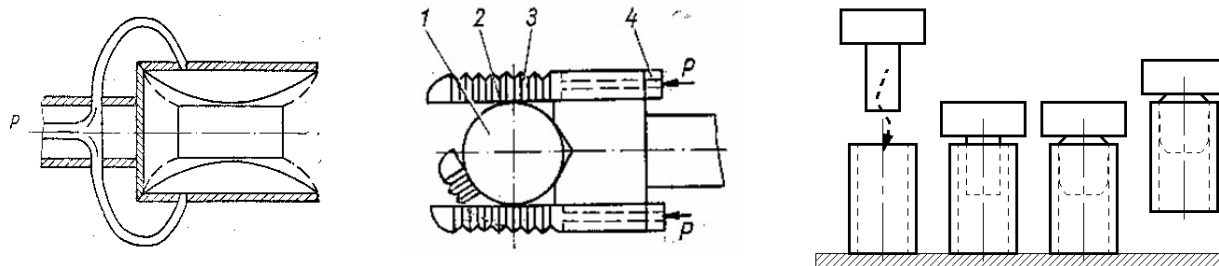
Haarats on kerge ning seda saab kasutada eri materjalist esemete teisaldamiseks. Vaakumi tekitamine võtab aega, mis vähendab roboti jõudlust. Vaakumhaaratsi haardejõud arvutatakse valemiga

$$F = p \cdot S \quad (3.17)$$

kus  $p$  on vaakumkambrist rõhu ja õhurõhu vahe ja  $S$  haaratsi efektiivne pindala.

Kõik haaratsid saab liigitada **jäikadeks ja järeleandvateks**. Need mõisted on suhtelised. Esimesel juhul on sõrmede survejõud määratud haaratsi ajami poolt arendatava jõuga vastavalt selle võimsusele, teisel juhul elastsete elementide deformatsioonijõuga või juhtimissüsteemi poolt etteantud suurusega. Ajamitest on kõige pehmema karakteristikuga (kõige järeleandvam) pneumoajam, mis on leidnud ka kõige enam kasutamist. Haaratsi jäikust tuleb arvestada haprate ja kergesti deformeeritavate esemete teisaldamisel, sest liiga jäik haarats võib eseme rikkuda.

Täispuhutavaid haaratseid ja nende kasutamist näeb joonisel 3.28. Täispuhutavate sõrmedega haarats sobib õrnade või ebatasase pinnaga esemete haaramiseks. Täispuhutavaid paisuvaid sõrmi kasutatakse ka õõnsate esemete haaramiseks sisepinnalt.



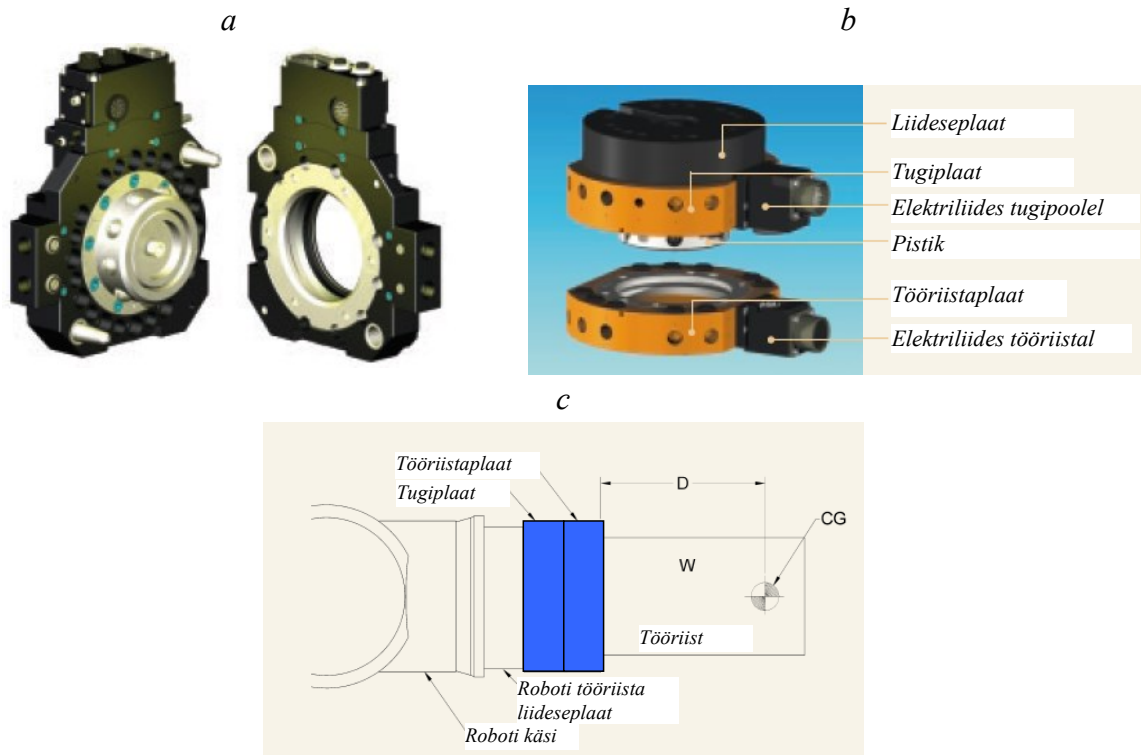
**Joonis 3.28. Täispuhutavate sõrmedega haaratsid ja täispuhutava sõrme kasutamine esemete haaramiseks sisepinnalt**

Haarats on manipulaatori kinemaatilise ahela viimane lüli, seepärast sõltub tema konstruktsioonist kogu manipulaatori töö täpsus. Eriti suur positsioonimistäpsus peab olema koosterobotitel, mis koostavad nt puksi ja ava (*peg in hole*) tüüpi liiteid. Jäiga haaratsi korral teeks juba sajandikmillimeetriline kohaleasetuse ebatäpsus liite koostamise võimatuks. Järeleandvad haaratsid võimaldavad korrigeerida väiksemaid positsioonimisvigu ning suurendada sellega koosteoperatsiooni õnnestumise tõenäosust. Sellisteks koosteoperatsioonideks ette nähtud spetsiaalsed isetsentreerivad järeleandvad haaratsid, mis reageerivad detailide kokkupuutumisel tekkivale jõule ning korrigeerivad vastavalt vajadusele detaili asendit. Nii on tagatud koostamise edukus juhul, kui puks satub ava ülaserava lõigatud koonilisse faasi.

Sõrmede või sõrmpaaride arv võib haaratsitel erineda, kusjuures enamik manipulaatoreid on varustatud siiski vaid kahesõrmelise haaratsiga. Suurte (pikkade) detailide tõstmisel kasutatakse kahte paari teineteisest eemal asuvaid sõrmi. Selline sõrmede asetus võimaldab vähendada haaratsile mõjuvaid eseme raskusjõust tingitud väände- ja paindemomente. Keerulise kujuga haprate esemete (elektrilambid, klaas, keraamika) haaramiseks sobivad täispuhutavad mitme sõrmeega haaratsid (joonis 3.28), millega saab haaratsi survet esemele ühtlasemalt jaotada.

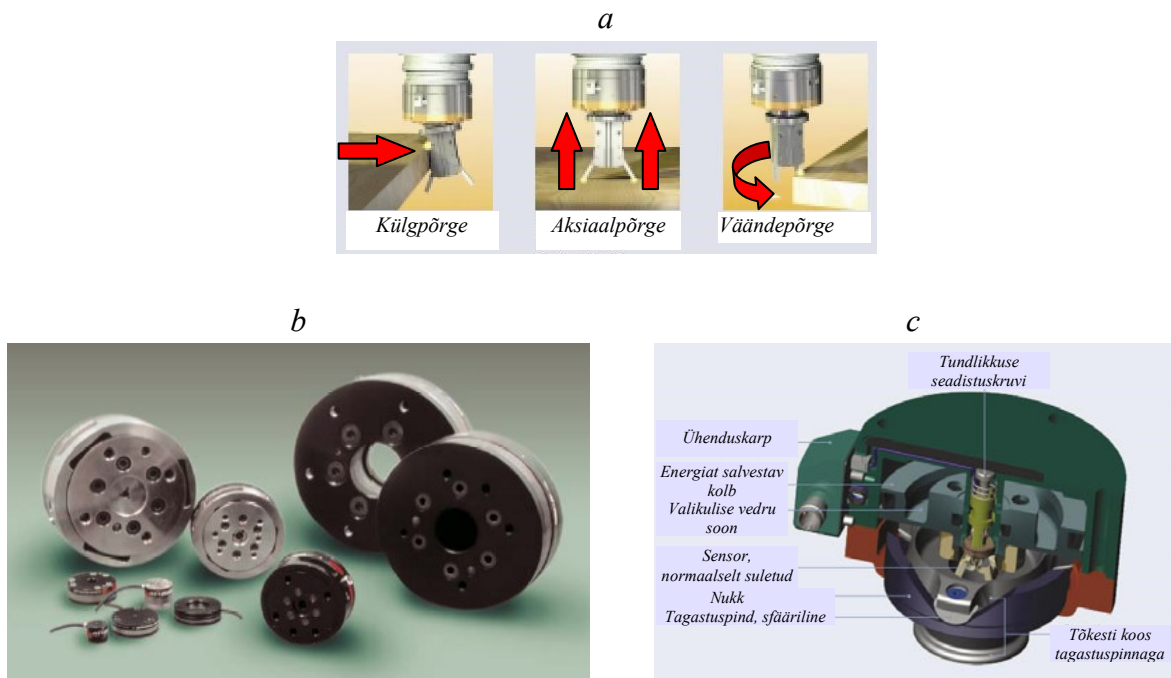
Täiuslikud haaratsid varustatakse anduritega, mille abil saadakse informatsiooni teisaldatava eseme ning seda ümbritseva keskkonna kohta. Nii kasutatakse survetundlikke, libisemistundlikke ning ümbrusetajuga andureid. Esimesed kaks on nn taktiilsed andurid, mis töötavad vaid haaratsi sõrmede ja detaili kokkupuutel. Nende abil on võimalik reguleerida haardetugevust, fikseerida detaili haaratsis jm. Ümbrusetajuga andurid ei puutu esemega vahetult kokku. Sellised on eelkõige masinnägemisseadmed, kuid ka induktiiv-, mahtuvus-, fotoelektrilised jm andurid.

**Roboti tööriistad.** Robot võib töötada mitmesuguste tööriistadega, nt punktkeevitustangide, nutri- või kruvikeerikute, kaarkeevitusseadmete, värvipihustite või liimpüstolitega. Tööriistade vahetamiseks on robotitele välja töötatud tööriistaliidesed (*tool changers*), mis ühendatakse roboti käe külge haaratsi või tööriista kinnituskohta. Haarats või tööriist ühendatakse omakorda tööriistaliidesega. Liidese spetsiaalne ehitus võimaldab tööriista vahetada automaatselt. Roboti tööriista vahetajaid on näidatud joonisel 3.29.



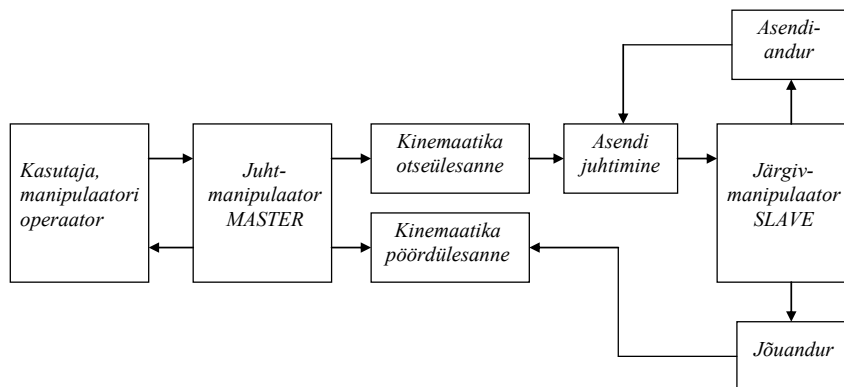
**Joonis 3.29. Roboti tööriistaliidesed: a raskete tööriistade liides, b kergete tööriistade liides, c liidese asukoht roboti käel**

Roboti tööriistaliideste hulka kuuluvad ka kokkupõrke- ja jõuandurid (joonis 3.30). Kokkupõrkeandurid on vajalikud tööriista kaitsmiseks juhusliku kokkupõrke korral robotit ümbritsevate esemetega.



**Joonis 3.30. Roboti tööriistaliideselega ühendatavad andurid: kokkupõrkeandurid a, jõuandurid b, jõuanduri ehitus c**

Jõuandurite abil saab robotis rakendada jõutagasisidet (*haptic feedback*) ja vastavat jõu või momendi juhtimissüsteemi (joonis 3.31). Jõutagasiside olemasolu on eriti oluline järgivmanipulaatoriga töötamisel, kui operaator juhib juhthoova või juhtmanipulaatori abil järgivmanipulaatori tööd. Töö õnnestumiseks on oluline, et operaator saaks vahetut infot tööprotsessist ja tunnetaks tööriista ja detaili kokkupuutel tekkivaid jõudusid. Roboti tööriista näiteks on ka joonisel 3.32 näidatud puhastushari, mille kasutamisel võib jõu tunnetamine olla samuti oluline.



**Joonis 3.31. Järgivmanipulaatori juhtimine jõutagasisidega**



**Joonis 3.32. Roboti tööriist töödeldavate detailide pindade puhastamiseks**

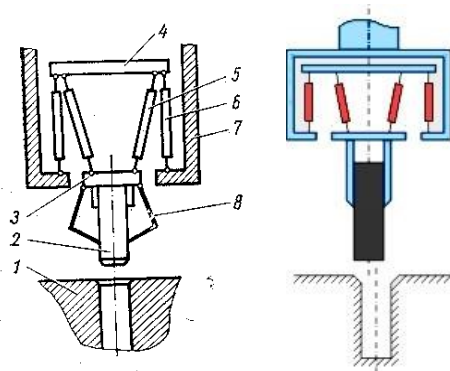
Tööriistade kohta vt ka veebilehti

[www.ati-ia.com/](http://www.ati-ia.com/) (ATI Industrial Automation)

[www.ati-ia.com/products/deburr/deburring\\_home.aspx](http://www.ati-ia.com/products/deburr/deburring_home.aspx)

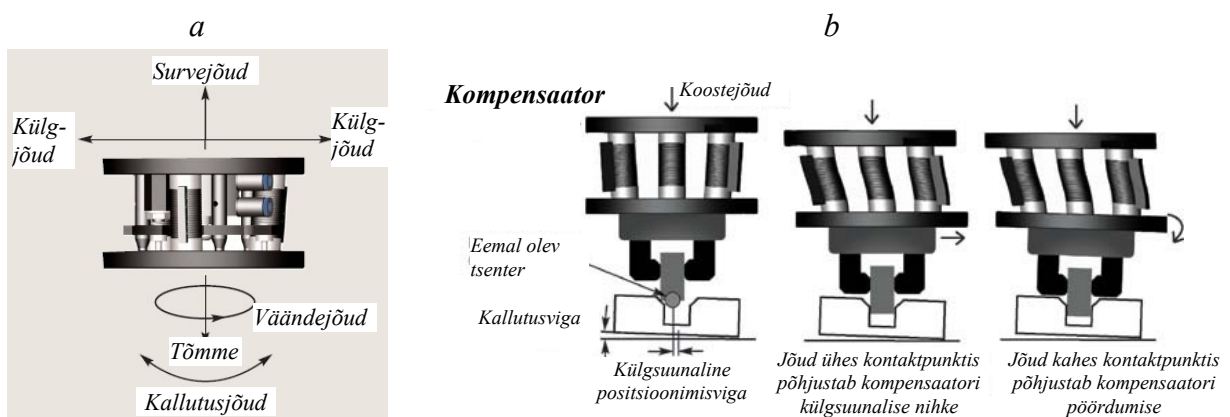
Eriti oluline on haaratsi järeleandvus detailide täpset kohaleasetust nõudvate koosteoperatsioonide puhul. Üks tüüpilisem neist on võlli või puksi paigutamine avasse. Arvestades tolerantsi suurust peaks operatsiooni õnnestumiseks haaratsi positsioonimisviga olema väga väike ( $\delta = 0001...0,01$  mm). Lisaks peavad ava ning võlli teljed olema täpselt samasihilised. Järeleandva konstruktsiooniga haaratsi korral on detailide koostamine märgatavalt hõlpsam, sest ava servad on faasitud ning need juhivad detaili kohale ka siis, kui positsioonimine polnud päris täpne.

Võlli asendit korrigeeritakse haaratsi mehhanismi reaktsioonijõudude abil. Varraste 4, 5 ja 6 süsteem saab teatud ulatuses liikuda ning korrigeerib haaratsi asendit. Manipulaatori käelabaga ühendatud katte 7 külge on kinnitatud elastsed püstvardad 6, mis seovad kere raamiga 4, mille külge kinnituvad omakorda kaldvardad 5. Nende abil ühendatakse haaratsi sõrmi 8 ühendav raam 3 raamiga 4. Varraste 5 ja 6 süsteem (viimased on paigutatud horisontaaltasapinnas  $\approx 20^\circ$  nurga all) lubab raamil 3 kere suhtes teatud ulatuses liikuda nii kulgevvalt kui ka pöörlevalt. See võimaldab nihutada võlli telje ja detailis 1 oleva ava telje kohakuti ning vajaduse korral võlli telje pöörata. Et koosteoperatsioon õnnestuks, peab võll sattuma ava ülaservas olevasse koonilisse faasi, sest võlli asendi korrigeerimine toimub reaktsioonijõudude abil. Juhul, kui detailide vahel puudub hõõrdejõud ja koostamisel satub võll ava servale, jaguneb võllile mõjuv reaktsioonijõud  $F$  kaheks: püst- ja rõhtsuunaliseks komponendiks  $F_v$  ja  $F_h$ . Rõhtsuunaline komponent  $F_h$  nihutab võlli telje ava telje suunas ning järelikult soodustab koostamist.



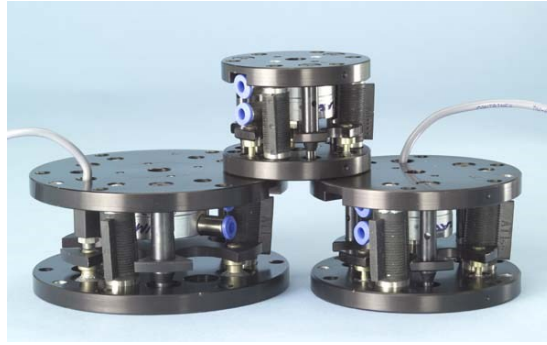
**Joonis 3.40. Passiivne järeleandev haarats**

Haaratsi järeleandvuse saavutamiseks on välja töötatud spetsiaalne kompensator, mis ühendab nii aktiivse kui ka passiivse järeleandvuse ning võimaldab korrigeerida detaili asendit koosteoperatsiooni ajal. Kompensatori tööpõhimõtet näeb joonisel 3.41 ja ehitust joonisel 3.42.



**Joonis 3.41. Haaratsi järeleandvuse saavutamiseks ette nähtud kompensator: kompensaaatori järeleandvus erinevatele jõududele a ja tööpõhimõtte b**





**Joonis 3.42. Kompensaatori ehitus**

**Haaratsi valikul tuleb arvestada, et**

- haarats on tööstusroboti üks kõige enam probleeme tekitav mehhanism (vajab projekteerimisel erilist tähelepanu)
- haaratsi järeleandvus hõlbustab koostetööd
- haaratsi anduritega saab kindlaks teha eseme olemasolu
- haarats peab suutma haarata eri asendis, eri mõõtmetega ja eri kujuga esemeid
- roboti universaalsuse suurendamiseks tuleb kasutada vahetatavaid haaratseid
- multifunktsionaalse haaratsiga saab tõsta erinevaid esemeid haaratsit vahetamata
- haaratsi asemel võib vahetada tööriista (mutrikeerik, kruvikeeraja vms)
- haaratsi vahetamiseks tuleks kasutada fikseerivaid kinnitustarvikuid
- võimaluse korral tuleks kasutada üht ja sama tüüpi kinnitusi (vahetatavuse tagamiseks)
- haaratsil ei tohiks olla teravaid servi esemete, voolikute, juhtmete kahjustamise vältimiseks
- kasutada tuleks kergeid materjale ja tugevaid pinnakatteid.

Teemaga seonduvad veebilehed:

kataloog: <http://www.ati-ia.com/Library/documents/ATI%20Compensator%20Catalog.pdf>  
[www.ati-ia.com/products/compliance/Compensator\\_Catalog\\_and\\_Manual.aspx](http://www.ati-ia.com/products/compliance/Compensator_Catalog_and_Manual.aspx)  
[www.parallemic.org/Reviews/Review003.html](http://www.parallemic.org/Reviews/Review003.html)

**Kordamisküsimused.**

Missuguseid ülekandemehhanisme kasutatakse robotites?

Mis on laineülekanne ja kuidas see töötab?

Mis on diferentsiaalmehhanism?

Missuguseid mehhanisme nimetatakse manipulaatormehhanismideks?

Missuguseid põhimõtteid kasutatakse lõtkuvabades mehhanismides?

Miks on vaja kasutada manipulaatori lülide liikumise kinemaatilist eraldamist?

Missugused nähtused tekitavad robotiajamile lisakoormuse peale tõstejõu?

Missuguseid haaratseid kasutatakse manipulaatoritel? Nimetage nende tööpõhimõtteid.

## 4. ROBOTI JUHTIMINE JA PROGRAMMEERIMINE

### 4.1. Raja- ja trajektoori plaanimise üldprobleemid

Roboti liikumine ruumis või maastikul tähendab nii manipulaatori tööorgani liikumist kui ka manipulaatorit või muud koormat vedava vankri liikumist. Liikumine võib olla pidev, kuid vajadusel võib robot teha ka vahepeatusi või manöövreid, sh liikuda ajutiselt vastassuunas. Kahe punkti vahel liikumisel tuleb lahendada roboti liikumise juhtimise probleem vältimaks kokkupõrkeid ning arvestamiseks mitmesuguseid füüsikalisi piiranguid. Roboti liikumise juhtimisel eristatakse **rajaleidmise** (*path finding*) või **rajaplaanimise** (*path planning*) ülesandeid ja trajektoori plaanimise ülesandeid. Trajektoor on raja osa ja **trajektoori plaanimisega** (*trajectory planning*) on tegemist juhul, kui teatud raja osa läbitakse vahepeatuseeta.

On olemas kahte liiki piirangud, mida rajaplaanimisel tuleb arvestada. Ühelt poolt võivad liikumist takistada tõkked, siis on tegemist **tõkkepiirangutega** (*obstacle constraint*), ja teiselt poolt võivad olla ette antud piiravad tingimused raja kohta ehk **rajapiirangud** (*path constraint*). Tõkkepiirangu puhul eeldatakse, et mõned punktid ruumis on hõivatud ning neid ei saa vabalt roboti rajaplaanimisel kasutada. Tõkked ja rajapiirangud võivad olla enne roboti töö algust teada ja neid saab rajaplaanimisel arvesse võtta. Kui on tegemist kindlate punktidega, mida rada peab tingimata läbima, siis toimub nn **märkrajaläbimine**.

Tundmatus keskkonnas töötamisel võivad aga tõkked ja piirangud ilmnedas alles liikumise ajal, seetõttu on ka kokkupõrked võimalikud. Juhul kui roboti liikumisraja saab programmeerida enne töö algust, on tegemist *off-line* talitlusega ehk vallasrajaplaanimisega. Kui robot töötab tundmatus keskkonnas ja liikumisrada eelnevalt ette plaanida ei saa, on tegemist *on-line* ehk sidustalitlusega, sh sidustõkkesuvastuse ja sidusrajaplaanimisega. Sisuliselt tähendab see seda, et robot tuvastab tõkkeid ja plaanib liikumist oma töö käigus.

Manipulaatori puhul eeldatakse tavaliselt tööorgani pidevat liikumist teatud positsioonimispunktide vahel või liikumist mööda kindlat trajektoori (nt kaarkeevituse puhul). Esimesel juhtumil on tegemist **positsioonjuhtimisega**, teisel juhul **kontuurjuhtimisega**.

Roboti rajaplaanimise tüüpülesanded on järgmised:

- esemete haaramis- ja vabastamiskohtade määramine
- punktist punkti liikumine
- etteantud raja järgimine
- liikuvate objektide järgimine
- koostöö teiste robotite või liikuvate masinatega

- toimejõu või -momendi tekitamine (nt tõmbamine, lükkamine, väänamine, hoidmine)
- andmehõive
- tööriista kasutamine.

**Roboti piiratud mehaanilised võimalused.** Robotid on masinad, mille kohta kehtivad kõik masinaehituse tavapärased piirangutingimused. Tuleb arvestada lülide ja tööorgani asendi, kiiruse, kiirenduse ja tõuke liikumispiiranguid. Roboti iga liigutuse, kiirenduse, pidurduse või esemete hoidmise jaoks vajatakse energiat.

Roboti olulisteks tehnilisteks näitajateks on

- trajektoori või raja läbimise aeg
- manipulaatori lülide või tööorgani liikumise kiirus
- liikumiseks kasutatav energia
- manipulaatori tõstevõime, rakendatav jõud või moment
- tōkete lähedus.

Roboti manipulaatori mehaanilisteks piiranguteks on

- lülide piiratud asendid, kiirused, kiirendused ja tõuked
- piirangud staatilistele ja dünaamilistele jõududele
- manipulaatori kinemaatilised piirangud (sh singulaarsused)
- piirangud tōkete kokkupõrke vältimiseks
- reageerimisaeg juhul, kui töö toimub liikuvate tōkete keskkonnas.

Roboti trajektoori või raja läbimise iseärasused:

- trajektoori ruumiline mõõde ehk dimensioon (tasapind ehk 2D, osaliselt piiratud ruum 2.5D, ruum 3D)
- kokkupõrgete vältimise funktsioon. Selle olemasolu sõltub konkreetsest juhtseadmest, on teostatud kas kontaktivastuse abil või mudeli järgi lähedusarvutusega
- manipulaatori lülide arv
- teistsaldatava koormuse või mobiilse roboti pōōramise vajadus
- tööruumis liikuva takistuse olemasolu
- mitme roboti töö koordineerimine (*Multi Robot Coordination*)
- automatiseerituse tase (käsitsi või automaatne rajaplaanimine).

Lähteinformatsiooni allikas:

- informatsiooni allikas (eelteadmistepõhine, anduripõhine)
- ümbruse või keskkonna modelleerimine (maailma mudel).

Juhtimismeetodid ja nende hindamine:

- rajaplaanimise või trajektoori plaanimise strateegia (nt hierarhiline)
- rajaplaanimise või trajektoori plaanimise meetod (trajektoori plaanimise algoritmid)
- raja või trajektoori robotisisene esitusviis

- minimeerimine, optimeerimine, optimeerimiskriteerium (hinnangufunktsioon)
- piirangud (missuguseid piiranguid arvestatakse?)
- lahendi liik (roboti baaskoordinaadistik, lülide koordinaadistik, ruumi ristkoordinaadistik, sirgliikumine, liikumine läbi vahepunktide (*via points*) koos pööretega, splineiga kirjeldatud trajektoor või rada).

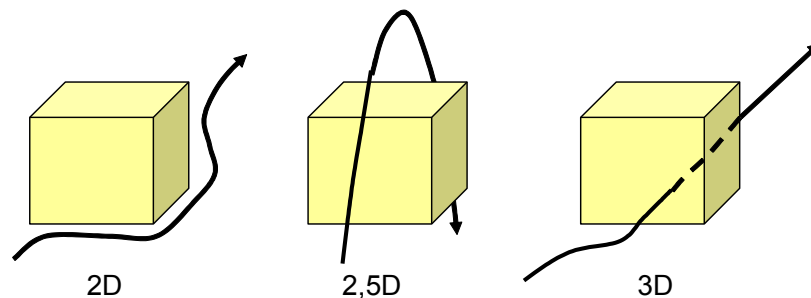
Rakendamise seotud probleemide hindamine:

- rakendamiseks kuluv aeg, roboti tüüp, programmeerimiskeel
- kontrollimine, testimine (missugused on katse tulemused?).

**Tõkked ja nende vältimine.** Roboti töökeskkonnas esinevad peaaegu alati teised seadmed, masinad, konstruktsioonid, mida üldjuhul võib lugeda tõketeks ja mis muudavad roboti liikumise plaanimise tülikaks. Kui robot liigub tasandil ja tõkete mõõtmed on määratud kahe mõõtmega, siis on tegemist 2-mõõtmelise tõkkega ja vastava rajaplaanimisega. Üldjuhul võib tõkkeid liigitada tõkete dimensioonide järgi.

- 2D – liikumine tasandil ümber tõkke (tavaülesanne, mille jaoks lahendid enamikul juhtudel on olemas)
- 2,5D – liikumine ruumis üle etteantud kõrgusega tõkke (2D tavaülesande edasiarendus)
- 3D – liikumine läbi tõketes olevate avade (uut liiki ülesanne, mis nõuab mitme lisatingimuse arvestamist nagu roboti ja avade mõõtmete ja kuju vastavus, pööramine avades).

Tõkkeid on illustreeritud joonisel 4.1.



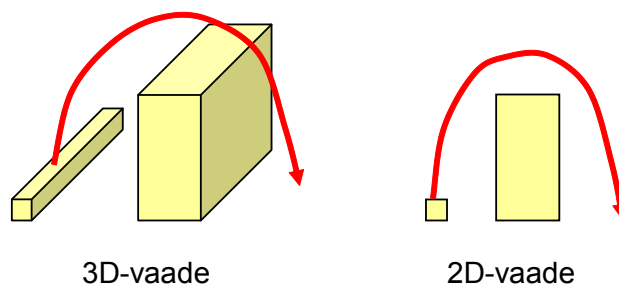
**Joonis 4.1. Tõkete dimensioonid**

**Tõkete vältimine 2D- ja 2,5D-ruumis.** Tõkete vältimisel on tuntud nn *klaveriteisaldajate probleem* ehk kuidas teisaldada suurte mõõtmetega objekti kitsastes oludes ilma klaverit maast lahti tõstmata. Ülesande lihtsustatud lahendamisel loetakse **tõkked** lõpmata kõrgeks, kuigi neist võib üle näha. Meetod sobib roboti manipulaatori jaoks, kui robot töötab vabas tööruumis (*clear workspace*) ja täidab **võta ja pane** (*pick and place*) tüüpi operatsioone. Niisugune **2D-rajaleidmise** (*path finding*) meetod annab suhteliselt kiire lahenduse.

Kui **tõkke kõrgus on teada**, siis on tegemist 2,5D-ruumiga ehk juhtumiga, kui tõkked nähtavad nurga all. On võimalik leida algoritme tõkete ületamiseks või tõketest möödumiseks. **Võta ja pane** tüüpi ülesannete puhul tuleb tagada, et teisaldatav ese ja manipulaatori lülid oleksid

üalpool võimaliku kokkupõrke kõrgust. Seda meetodit kasutab (eelistab) tavaliselt ka inimene. (Nt esemete tõstmine laudade kohal, selle asemel et otsida läbipääsu laudade vahel).

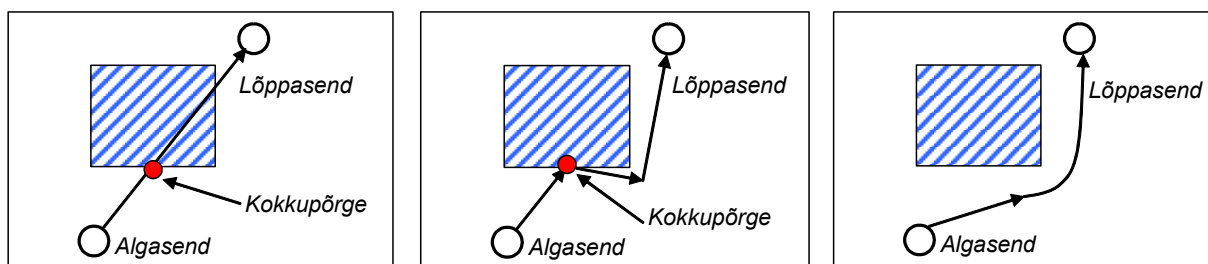
**Tõkete vältimine 3D-ruumis.** Mõnikord saab 3D-vaate asemel rakendada 2D-vaadet ja 2D-rajaleidmise meetodit. Kui tööruumis 2D-vaade näitab rajaleidmise võimalust, võib see tegelikult eksisteerida ka 3D-ruumis. Võimaluse kasutamine aitab vältida keerukaid 3D-rajaleidmise arvutusi. Mõnikord saab liikuvat objekti kujutada kasti või silindrina ning jätta nende ümber kokkupõrgete vältimiseks vajalik vaba ruum.



**Joonis 4.2. Tõkete vältimine 3D-ruumis 2D-vaate järgi**

**Kokkupõrke vältimine (collision avoidance).** Kokkupõrke vältimine on rajaplaanimise oluline osa (joonis 4.3). Ilma kokkupõrgete automaatse vältimiseta peab roboti töökoht (*workcell*) olema kokkupõrkevaba või peab operaator kõik trajektooriid eelnevalt programmeerima. Kokkupõrke lokaalne vältimine on oluline töötamisel tundmatus keskkonnas või liikumisel läbi tundmatu keskkonna. Andurid annavad rajaplaanijale tagasisidesignaale tõkete kohta. Globaalset kokkupõrgete vältimist kasutatakse juhul, kui ohutuse tagamiseks on vajalik küllalt suur vahemaa liikuva objekti ja tõkke vahel.

Roboti lülide suur arv (liikuvusastmete arv), lülide erinev paiknemine (poos) ja teisaldatavate esemete erinevadujud muudavad ülesande keerukaks. Kui manipulaatoril on kuus liikuvusastet, jõuab ta igasse ruumipunkti igas võimalikus asendis. **Tehnoloogilist ülesannet** saab sageli lihtsustada nii, et on vaja ainult kolm või neli liikuvusastet (esemete eelneva suunistamisega). Sel juhul on rajaplaanimine lihtsam ja vähem aeganõudev.



Kokkupõrke vältimine puudub

Kokkupõrke **lokaalne** vältimine

Kokkupõrke **globaalne** vältimine

**Joonis 4.3. Kokkupõrke vältimine**

Kui **ümbrus on risustatud** (sihtkohale ligipääs raskendatud), võib keskkonnas esemele läbipääsuks vaja minna enam kui kuut liikuvusastet. Et enamiku algoritmide keerukus suureneb astmeliselt koos liikuvusastmete arvuga, on soovitatav valida roboti liikuvusastmete arv täpselt vastavalt sooritatavale ülesandele.

Probleemi keerukust aitab lihtsustada **liikumisraja taandamine ühele tasandile**. Teisaldatavat eset võib rajaplaanimisel mitte arvestada või lugeda selle eseme asend muutumatuks (haaratsis fikseerituks). Kõik see aitab lihtsustada rajaplaanimist.

Teiseks võimaluseks on jätta roboti ümber kokkupõrgete vältimiseks piisavalt vaba ruumi. Teisaldatava eseme (kui see on väike ja sümmeetriline) võib lugeda roboti osaks. Sellega väheneb süsteemi liikuvusastmete arv ning probleemi lahendamine lihtsustub.

Paljulülilistel manipulaatoritel on palju eri konfiguratsioone. Igale robotile sobib kindel koordinaadistik, milles on rajaleidmise ülesannet optimaalne lahendada

- ristkoordinaadistikus (s.t  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -koordinaadistikus)
- silindrilises koordinaadistikus
- sfäärilises koordinaadistikus (*Stanford Manipulator*)
- sfäärilises nurkkoordinaadistikus (liigendkäega manipulaator)
- silindrilises nurkkoordinaadistikus (SCARA).

Robotite konfiguratsioonid on erinevad. Töökoht tuleb korraldada vastavalt roboti koordinaadistikule, et roboti liikumine oleks võimalikult lihtne. Rajad ja trajektoorid peaksid olema manipulaatorile vastavad (*manipulator specific*). See tagab rajaleidmise ülesande kiireima lahenduse. Ülesannet võib lahendada lülide koordinaadistikus (*joint space, manipulator space*), ruumi ristkoordinaadistikus (*cartesian space, task space*) või neis mõlemas.

**Pööramise probleemid.** Robot liigub tškete vahel ühest kohast teise kolmel eri viisil (vt joonis 4.4):

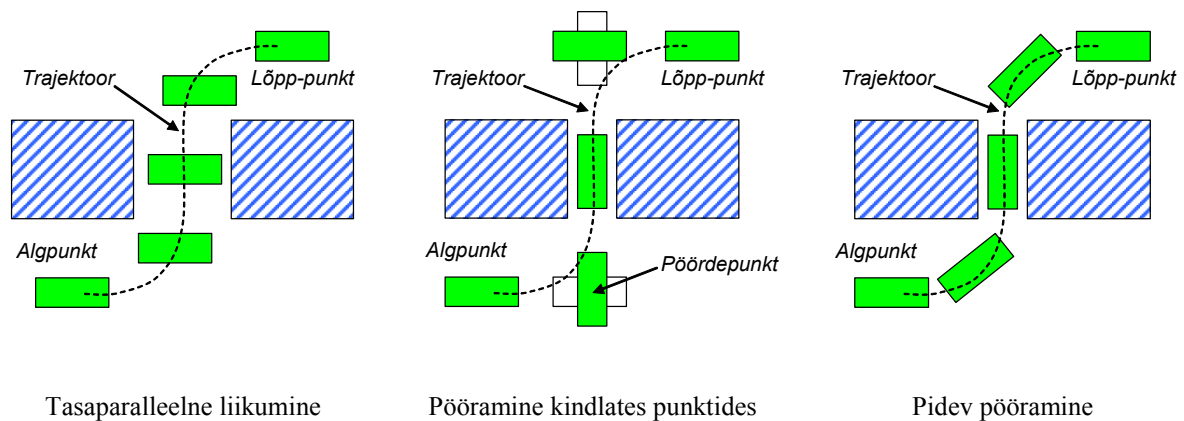
- pööramata, s.t tasaparalleelselt
- pööramisega diskreetses pöördepunktides
- pideva pööramisega.

Neist kolmest võimalusest on viimane kõige paindlikum, kuid eeldab ka täiuslikumat juhtimist.

**Tškete liikumine.** Omaette probleem on roboti töö keskkonnas, kus on liikuvaid tškkeid. Sõltuvalt tškete liikumise iseloomust saab eristada järgmisi juhtumeid:

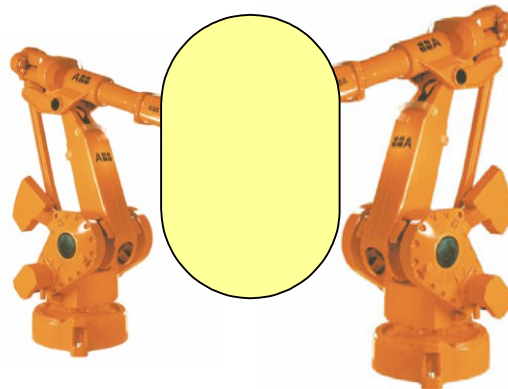
- tškkes ei liigu
- tškete liikumine on varem plaanitud (nt konveier, teine robot)
- tškete liikumine on juhuslik (nt inimene või loom roboti töötsoonis).

Liikumata või plaanitud liikumisega tškete puhul saab roboti tööd juhtida eelnevalt koostatud programmi järgi. Juhuslikult liikuvate tškete puhul peab robotil olema teatav ümbrusetaju, mis võimaldab tškke tuvastamisel korrigeerida tema liikumist.



**Joonis 4.4. Roboti pööramisega seotud liikumise iseärasused**

**Robotite töö koordineerimine** on vajalik, kui robotite **töötsoonid lõikuvad** (kahel või enamal robotil on ühine töötsoon). Kui kaks robotit on teineteisele väga lähedal, siis peavad nad vältima ka omavahelist kokkupõrget. Kahe roboti koostöö korral on vajalik nende **ühine liikumis- ja koostööstrateegia**. Selleks on omakorda vajalik nende ühise olekumälu ehk olekulingi (*status link*) olemasolu.



**Joonis 4.5. Robotite ühine tööruum**

Teise roboti oleku tundmiseks peab olema teada ka selle rajaplaanimise strateegia determineeritud ümbruses. Vastava algoritmiga realiseeritakse esmalt liikuva takistuse rajaplaanimine ja seda arvestades ka roboti enda liikumine.

Roboti töökeskkonna korrastamisel (juhuslikkuse kõrvaldamisel) saab vältida keerukaid koordineerimisalgoritme. Kui kahel või enamal robotil on ühine töötsoon, rakendatakse

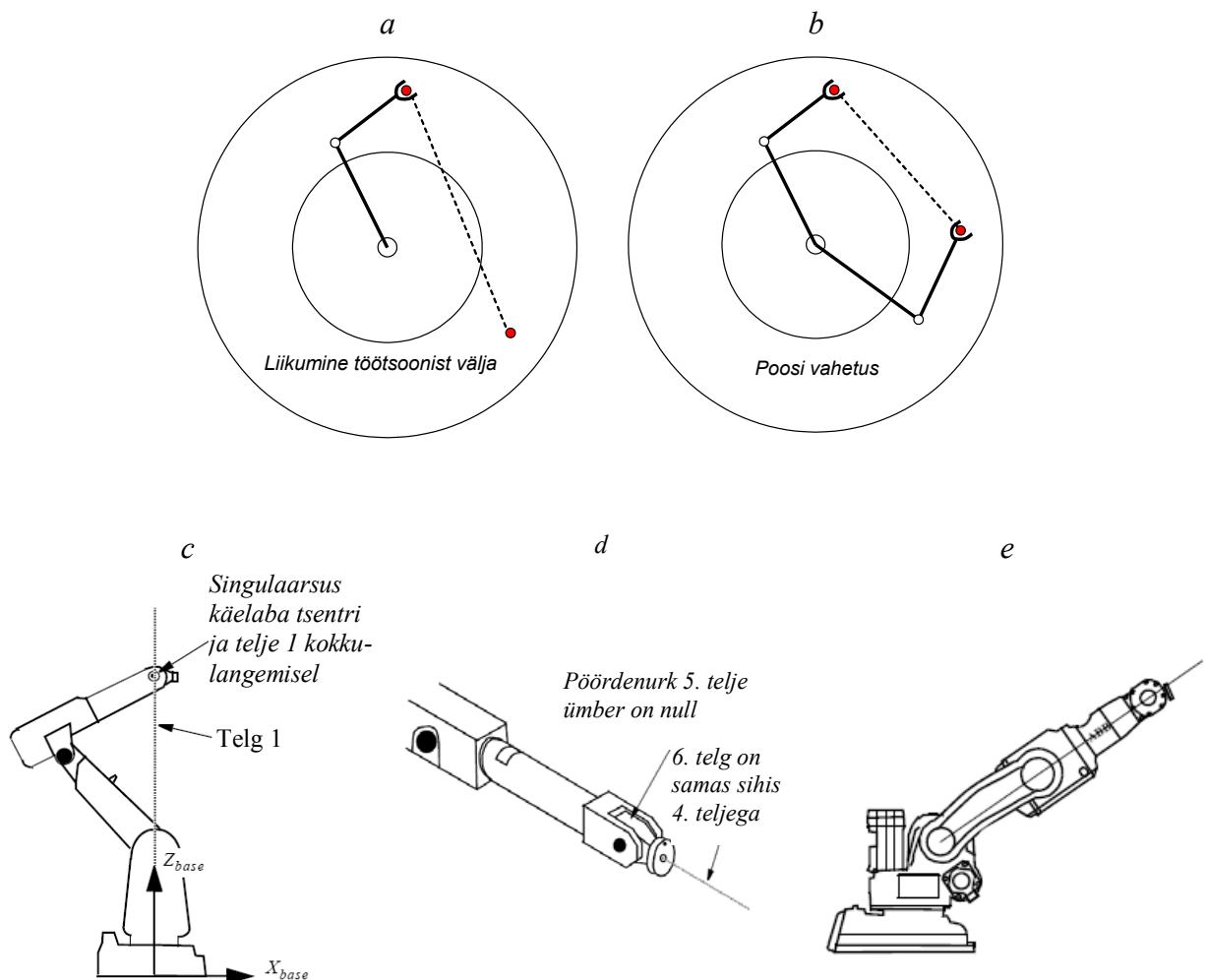
- liikumiste koordineerimist
- ühist olekumälu
- ühist rajaplaanimise strateegiat, mis arvestab teist robotit.

Robotite koostöö (kooseksisteerimise) probleemi on eriti keerukas lahendada juhul, kui robotid on vastandlike huvidega, s.t toimub robotite võistlus.

## 4.2. Manipulaatori tööorgani liikumise plaanimine

Manipulaatori tööorgani liikumise plaanimisel võivad esineda mitmesugused **liikumispiirangud**. Trajektoori etteantud alg- ja lõpp-punktide ning trajektoori kuju (nt sirgjoonelise liikumise) korral võib tekkida olukord, kui trajektoor väljub roboti töösoonist (joonis 4.6, *a*). Niisugust trajektoori realiseerida pole võimalik. Samuti võib etteantud trajektoori (nt sirgjoonelise liikumise) puhul tekkida olukord, mil tõkete olemasolul või mõnel muul põhjusel tuleb lõpp-punkti jõudmiseks vahetada manipulaatori poosi (joonis 4.6, *b*). Ka sel juhul ei saa trajektoori realiseerida, sest pideva liikumise ajal pole poosi vahetada võimalik. Teatud ehitusega manipulaatoril võib kinemaatika pöördülesande lahendamisel olla mitu vastust, mis tähendab, et manipulaatori tööorgan võib olla ühes ja samas asendis, kui manipulaator on samal ajal eri poosides.

Manipulaatori liikumise plaanimisel tuleb arvestada ka võimalusega, et liikumise matemaatilisel kirjeldamisel võivad tekkida olukorrad, mida lisatingimusi sätestamata osutub võimatuks praktiliselt realiseerida.



Joonis 4.6. Manipulaatori liikumispiirangud ja singulaarsused



**Singulaarsused.** Mõned kohad roboti tööruumis on niisugused, kus roboti manipulaatori käsi ja tööorgan võivad olla lõpmatul arvul eri poosides. Neid kohti nimetatakse singulaarsuskohtadeks (*singularities*).

Üldiselt võttes on robotil kahte tüüpi singulaarsusi: käe ja käelaba singulaarsused (*arm and wrist singularities*). Roboti (nt IRB 140) käelaba singulaarsusteks on kõik käe poosid (konfiguratsioonid), mille puhul käelaba tsenter (telgede 4, 5 ja 6 lõikepunkt) langeb käe esimese lüli teljele 1 (joonis 4.6, *c*). Käelaba singulaarsusteks on käelaba poosid, mille puhul teljed 4 ja 6 on samal sirgjoonel, s.t pöördenurk telje 5 ümber võrdub nulliga (joonis 4.6, *d*).

Erijuhul, nt robotil IRB140 ja mitmel muul robotil, on veel kolmandat liiki singulaarsus. See ilmneb roboti käe poosi puhul, kui käelaba tsenter ja käe lülide 2 ja 3 pöörlemistsentrid asuvad ühel sirgjoonel (joonis 4.6, *e*).

Singulaarsuskohad tekitavad probleemi manipulaatori kinemaatika pöördülesande lahendamisel. Pöördülesande lahendusi võib olla lõpmata palju. Mõnel juhul võivad lülide liikumise arvutuslikud kiirused või lülidele mõjuvad jõud osutada lõpmata suureks.

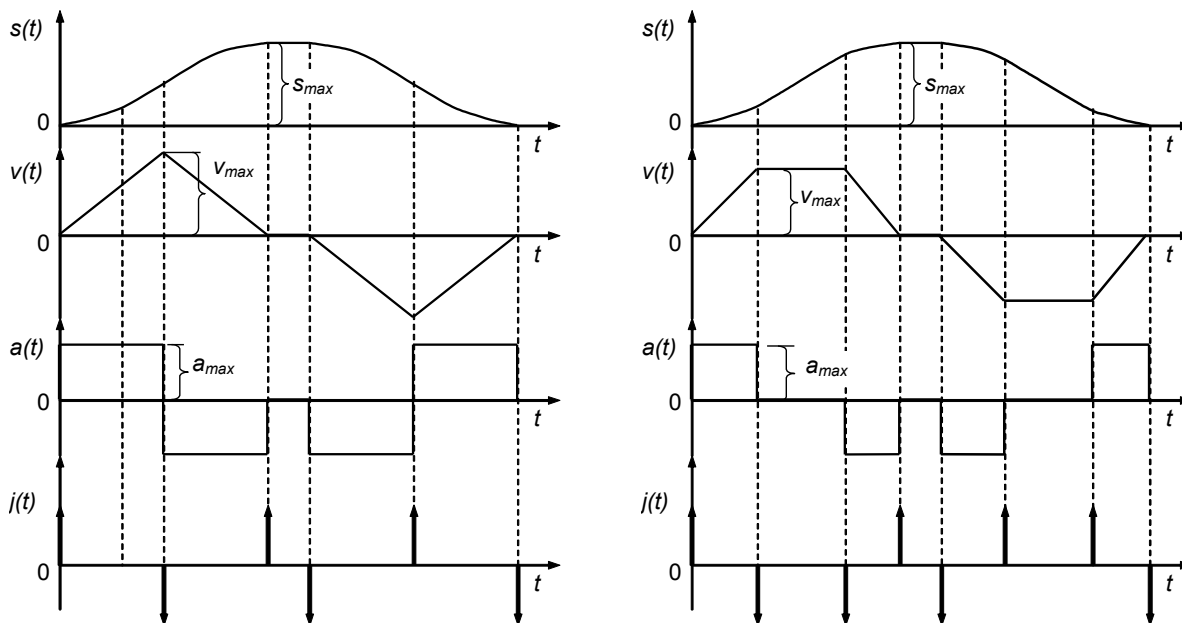
Manipulaatori haaratsi või tööorgani liikumise asendi, kiiruse, kiirenduse ja tõuke ajafunktsioone nimetatakse liikumisfunktsioonideks või graafilise esituse korral **liikumisdiagrammideks**. Põhimõtteliselt saab neid funktsioone matemaatiliselt kirjeldada väga mitmesuguste funktsioonidega. Kõige mugavam on seda teha **polünomiaalsete funktsioonidega**, sest polünoomi puhul on matemaatiliselt lihtne leida selle tuletisi. Samas on teada, et kiirus on läbitud teepikkuse tuletis, kiirendus aga kiiruse tuletis.

Manipulaatori liikumist saab kirjeldada nii ümbritseva ruumi ristkoordinaadistikus kui ka manipulaatori lülide koordinaadistikus (silindrilises, sfäärilises või nurkkoordinaadistikus). Liikumist plaanitakse esmalt ümbritseva ruumi ristkoordinaadistikus. Selles ruumis kirjeldatakse ka tööd, mida robot teeb, seejärel teisendab roboti juhtseade plaanitud liikumise manipulaatori lülide koordinaadistikku ning realiseerib selle lülisid käitavate ajamitega.

Lihtsamatel juhtudel valitakse trajektoori plaanimisel kiirusdiagrammiks kas kolmnurk või trapets (joonis 4.7). Sel juhul kirjeldab asendi muutumise ajafunktsiooni ruutpolünoomidest koostatud funktsioon. Tükati lineaarseid ja tükati polünomiaalseid funktsioone nimetatakse **splainideks**. Splainidega kirjeldatavaid liikumisdiagramme näeb joonisel 4.7.

Vasakpoolne liikumisdiagramm vastab maksimaalse toimekiirusega liikumisele, kui kiiruse muutumist kirjeldab kolmnurkdiagramm. See tähendab liikumise alustamist maksimaalse võimaliku (lubatud) kiirendusega ning sellele järgnevat aeglustamist maksimaalse võimaliku (lubatud) aeglustusega. Sel juhul püsikiirustalitlus puudub. Parempoolsel joonisel on kiirusdiagrammiks trapets. Pärast kiirendamist omandab ajam kuni pidurdamise alguseni püsikiiruse. Kuna tõuke suurus pole piiratud, saab asendifunktsiooni kirjeldada teist järku ehk ruutpolünoomiga.

Edasi-tagasi liikumisel toimub esmalt liikumine punktist A punkti B ning seejärel punktist B tagasi punkti A. Ühe liikumistsükli jooksul toimivad ajamis korduvad määramata suurusega tõuked (ideaalse nelinurkse kiirendusfunktsiooni puhul on tõuge lõpmatu). Niisugused edasi-tagasi liikumist kirjeldavad diagrammid on tüüpilised robotite, kraanade, tööpinkide jt masinate puhul.



**Joonis 4.7. Trajektoori plaanimine kolmnurkse ja trapetsikujulise kiirusdiagrammi korral**

Läbitud tee pikkus kahe punkti  $A$  ja  $B$  vahel  $s_{max}$  arvutatakse valemiga

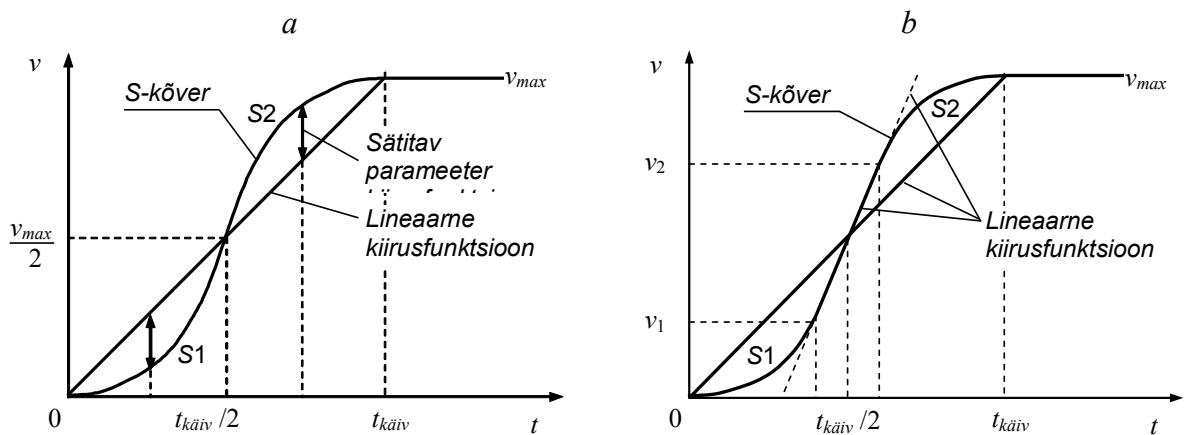
$$s_{max} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}, \quad (4.1)$$

kus punktid  $A$  ja  $B$  on määratud vektoriga

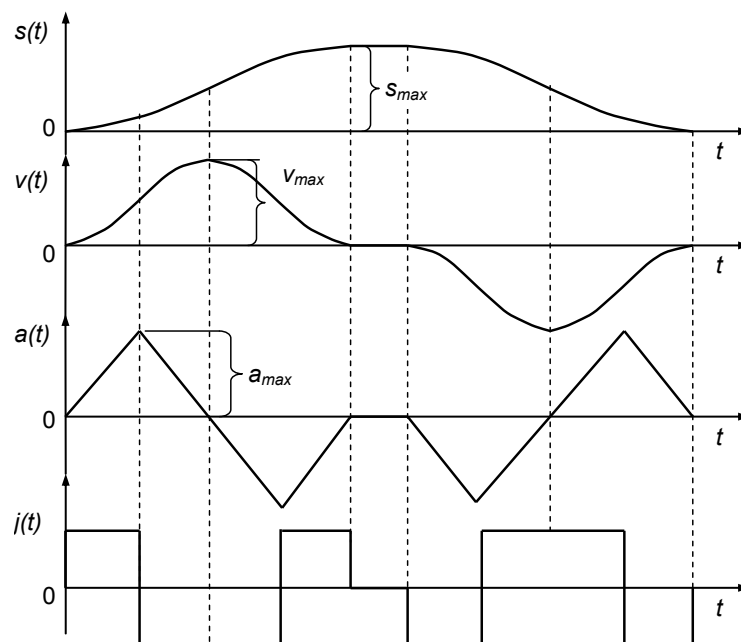
$$A = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

**Liikumise pidevus.** Manipulaatori asend ja kiirus ei saa hetkeliselt muutuda, s.t ka läbitud teepikkuse ja kiiruse funktsioonid peavad olema pidevad. Trajektoorilõikude ühendamisel tuleb jälgida, et eelmise lõigu lõpp-punkti asend ja kiirus vastaksid järgmise lõigu alguspunkti asendile ja kiirusele. Sujuva liikumise tagamiseks lisandub veel kiirenduse pidevuse nõue, s.t ühenduspunkti peavad olema eelmise lõigu lõpp-punkti ja järgmise lõigu alguspunkti kiirendused võrdsed.

**S-kõver.** Manipulaatori tööorgani või liikurroboti sujuva liikumise tagamiseks kasutatakse ajami käivitus- ja pidurdusprotsesside määramiseks lõpliku tõukega programmeeritud kiirusdiagramme, mida nende kuju järgi nimetatakse S-kõverateks. S-kõverate (joonis 4.8) järgi ajami käivitamine ja pidurdamine on enamiku nüüdisaegsete ajamite ja sagedusmuundurite tarkvarasse sisse programmeeritud. Ajami seadistaja ülesandeks on valida parameetrite sättimisega kõvera õige kuju, seejuures saab eristada täieliku ja osalise S-kõveraga liikumisdiagramme. Täieliku S-kõvera puhul ulatuvad mõlemad kaared omavahel kokku. Osalise S-kõvera puhul (joonis 4.8, b) on kaared S1 ja S2 eraldatud sirglõiguga. S-kõvera järgi muutuva kiiruse korral on kiirendusfunktsioonid lineaarsed ning tõuge on lõpliku väärtusega. Asendi muutumist kirjeldab aga kuuppolünoomidest koostatud spline. S-kõveral põhineva kiirendusega ja aeglustusega liikumisdiagrammid on joonisel 4.9.



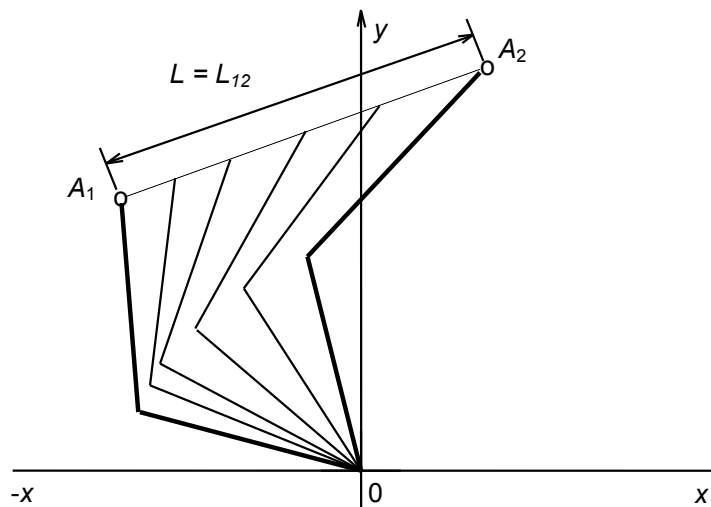
**Joonis 4.8. Sujuva liikumise plaanimine: täieliku a ja osalise S-kõveraga b**



**Joonis 4.9. S-kõvera kujulise kiirusdiagrammiga liikumine**

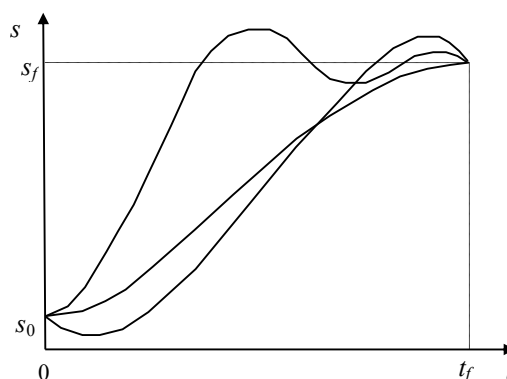
Eespool kirjeldatud liikumisdiagrammid iseloomustavad roboti tööorgani liikumist ruumis punktist A punkti B mingis suvalises tööprotsessiga määratud sihis. Manipulaatori lülide liikumise projektsioon mingil tasandil (nt  $xy$ -tasandil) on joonisel 4.10. Tööorgani ühtlase kiirusega liikumisel võib manipulaatori lülide liikumine olla vägagi muutliku kiirusega.

Selleks et robot saaks plaanitud liikumise kohaselt juhtida lülide ajameid, tuleb suvalises sihis kirjeldatud liikumine teisendada ruumi ristkoordinaadistikku. Sisuliselt tähendab see tööorgani asendipunkti liikumise kirjeldamist tema  $x$ -,  $y$ - ja  $z$ -projektsioonide kaudu. Pärast seda saab roboti juhtseade lahendada manipulaatori kinemaatika pöördülesande ning leida manipulaatori lülide pöördenurgad vastavalt igale etteantud trajektoori punktile.



**Joonis 4.10. Manipulaatori lülide liikumine tööorgani sirgjoonelise liikumise puhul**

**Trajektoori plaanimisülesannet on üldkujul** otstarbekas lahendada lähenduspolünoomide abil. Seda võib teha nii manipulaatori lülide nurkkoordinaadistikus kui ka ristkoordinaadistikus. Liikumine mingist algpunktist  $s_0$  kuni lõpppunkti  $s_f$  võib toimuda mööda erinevaid trajektoore (joonis 4.11), mida kõiki saab esitada polünoomina.



**Joonis 4.11. Algpunktist lõpp-punkti liikumise erinevad trajektoorid**

**Liikumise positsioonjuhtimisel** kehtivad järgmised piirangud:

$$s(0) = s_0 \text{ (algasend ajahetkel } t = 0)$$

$$s(t_f) = s_f \text{ (lõppasend)}$$

$$\dot{s}(0) = 0 \text{ (algkiirus on null)}$$

$$\dot{s}(t_f) = 0 \text{ (lõppkiirus on null)}$$

Neid piiranguid rahuldab vähemalt kolmanda järgu polünoom

$$s(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3, \quad (4.3)$$

mille järgi võib leida kiiruse ja kiirenduse avaldised

$$v(t) = \dot{s}(t) = c_1 + 2c_2 t + 3c_3 t^2, \quad (4.4)$$

$$a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{s}(t) = 2c_2 + 6c_3 t. \quad (4.5)$$

Piirangute viimiselega võrranditesse (4.3), (4.4) ja (4.5) saab avaldada seosed tegurite  $c_0 \dots c_3$  leidmiseks

$$s_0 = c_0,$$

$$s_f = c_0 + c_1 t_f + c_2 t_f^2 + c_3 t_f^3, \quad (4.6)$$

$$0 = c_1,$$

$$0 = c_1 + 2c_2 t_f + 3c_3 t_f^2.$$

Võrrandisüsteemi lahendamisel leitakse  $c_i$  avaldised

$$c_0 = s_0,$$

$$c_1 = 0,$$

$$c_2 = \frac{3}{t_f^2} (s_f - s_0), \quad (4.7)$$

$$c_3 = -\frac{2}{t_f^3} (s_f - s_0).$$

Kuuppölmünoomiga kirjeldatud trajektoori korral kujuneb kiirusdiagrammiks ruutparabool ning kiirendusdiagrammiks sirge (joonis 4.17).

**Kontuurjuhtimisel** tuleb üldjuhul vaadelda liikumist kahe rajapunkti vahel eeldusel, et kiirus neis punktides ei võrdu nulliga, s.t

$$\dot{s}(0) = v(0) = v_0,$$

$$\dot{s}(t_f) = v(t_f) = v_f. \quad (4.8)$$

Sel juhul kirjeldavad liikumist võrrandid

$$\begin{aligned}
 s_0 &= a_0, \\
 s_f &= c_0 + c_1 t_f + c_2 t_f^2 + c_3 t_f^3, \\
 v_0 &= c_1, \\
 v_f &= c_1 + 2c_2 t_f + 3c_3 t_f^2,
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

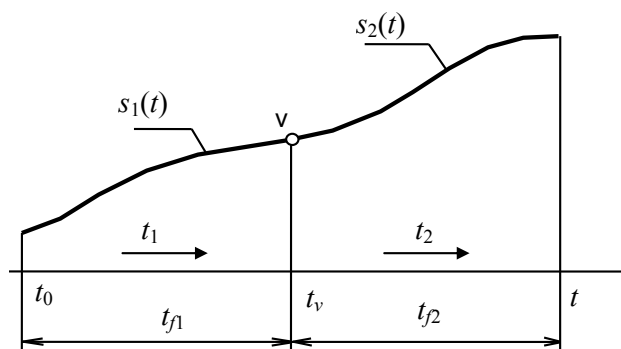
millest

$$\begin{aligned}
 c_0 &= s_0, \\
 c_1 &= v_0, \\
 c_2 &= \frac{3}{t_f^2}(s_f - s_0) - \frac{2}{t_f}v_0 - \frac{1}{t_f}v_f, \\
 c_3 &= -\frac{2}{t_f^3}(s_f - s_0) + \frac{1}{t_f^2}(v_f - v_0).
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Kui kontuurjuhtimise soovitud rada on antud teatud rajapunktide reana  $s_i(t_i)$ , saab seda plaanida nt tükiti polünoomide ehk splaini abil. Kiirust saab rajapunktides määrata kolmel erineval viisil: 1) kiiruse etteandmisega kasutaja poolt, 2) kiiruse automaatvalikuga mingite etteantud reeglite järgi või 3) kiiruse automaatvalikuga eeldusel, et kiirendus rajapunktides on pidev.

Kiiruse määramiseks rajapunktides tuleb leida suhteliselt lihtsad ning arvutis kergesti rakendatavad reeglid, näiteks on loogiline lugeda kiirus teekonna märgi muutumisel nulliks. Kuna trajektoori tõusunurga tangens võrdub kiiruse hetkväärtusega, võib rajapunktis arvutada näiteks trajektoori lõikude tõusunurgaga tangensite keskvaartuse ning omistada selle väärtus rajapunkti kiirusele. Muidugi võib välja mõelda ka teisi heuristilisi reegleid rajapunkti kiiruse automaatseks määramiseks.

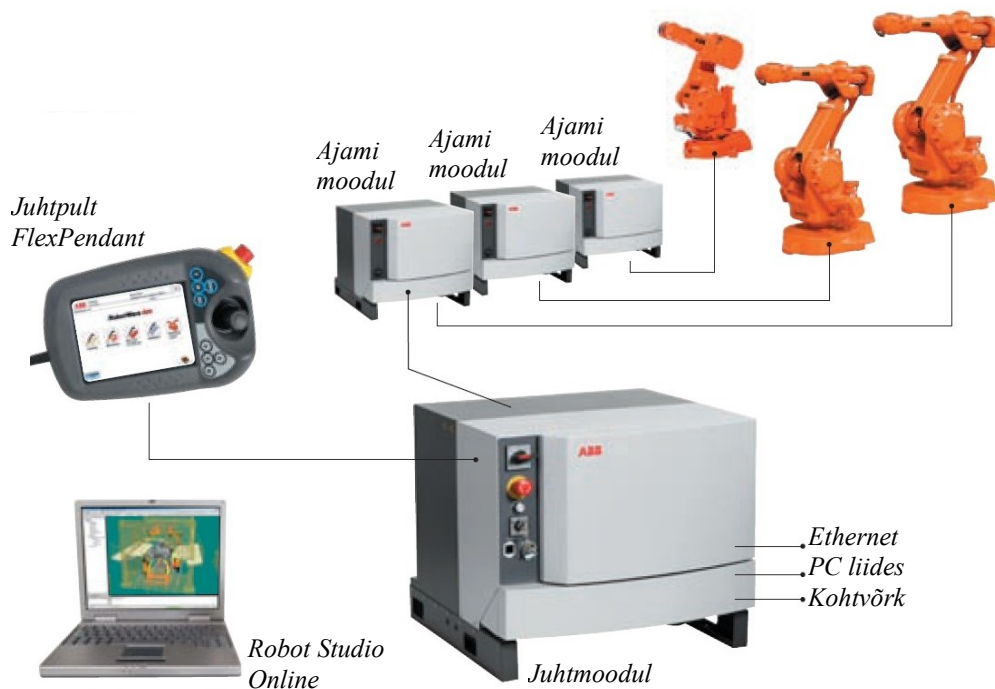
Enam huvi pakub kiiruse määramine tingimusel, et kiirendus rajapunktides on pidev. Ühtlasi tagab see tingimus rajapunktis (joonis 4.12) ka tükiti polünoomiaalse funktsiooni diferentseeritavuse.



**Joonis 4.12. Trajektoori lõikude ühendamise pideva kiirenduse korral**



manipulaatorist koosnev robotsüsteem, mille juhtimiseks kasutatakse ühte juhtmoodulit ja kolme ajamimoodulit. Joonisel 6.3 on juhtmoodul koos punktkeevitusplokiaga.



**Joonis 4.14. Kolme manipulaatoriga robotsüsteem**



**Joonis 4.15. Roboti juhtmoodul koos punktkeevitusplokiaga**



**Juhtmoodulis** (*Control Module*) asuvad robotsüsteemi elektroonilised juhtplokid ehk roboti juhtkontroller (juhtarvuti).

**Ajamimoodulis** (*Drive Module*) asuvad robotsüsteemi ajamite jõuelektroonikalülitused. Kui robotsüsteemis on mitu koordineeritud tegevusega manipulaatorit ja kasutatakse mitut ajamimoodulit, on tegemist multimanipulaatorsüsteemiga (*MultiMove system*).

**RobotWare** CD-plaadil sisaldab roboti juhtimiseks, hooldamiseks ja seadistamiseks vajalikku tarkvara.

**Roboti dokumentatsioon** CD-plaadil sisaldab roboti elektrooniliselt salvestatud paigaldus-, kasutus- ja ohutusjuhiseid.

**Robotsüsteemi tarkvara** (*Robot system software*) asub roboti juhtkontrolleri mälus ning selle abil juhitakse robotsüsteemi talitlust. Tarkvara laetakse juhtkontrollerisse serverarvutist kohtvõrgu (*local area network, LAN*) kaudu.

**Juhtpult** (*FlexPendant*) ühendatakse roboti juhtkontrolleriga ning seda kasutatakse roboti juhtimiseks. Juhtpuldil on värviline puuteekraan, juhthoob ning ainult 8 riistvaralist juhtnuppu.

**RobotStudio** on personaalarvutile ette nähtud mitmeotstarbeline baastarkvarapakett, mida kasutatakse robotiga töötamiseks ning mis täiendab roboti juhtimist juhtpuldilt (*FlexPendant*). Selle saab installeerida tavalisse arvutisse, mis võimaldab töötada *Windows* operatsioonisüsteemis. Tavaliselt installeeritakse see esmalt sülearvutisse. Sülearvutist laaditakse see edasi serverarvutisse ja kasutatakse robotsüsteemi konfigureerimiseks ning kõigi tarkvarakomponentide laadimiseks roboti juhtkontrollerisse. *RobotStudio* on eelkõige mõeldud tekstipõhiseks programmeerimiseks ja robotsüsteemi juhtimisega seotud ülesannete täitmiseks. Sellega saab koostada programme, milles on palju loogilisi või muid keerukaid struktuure.

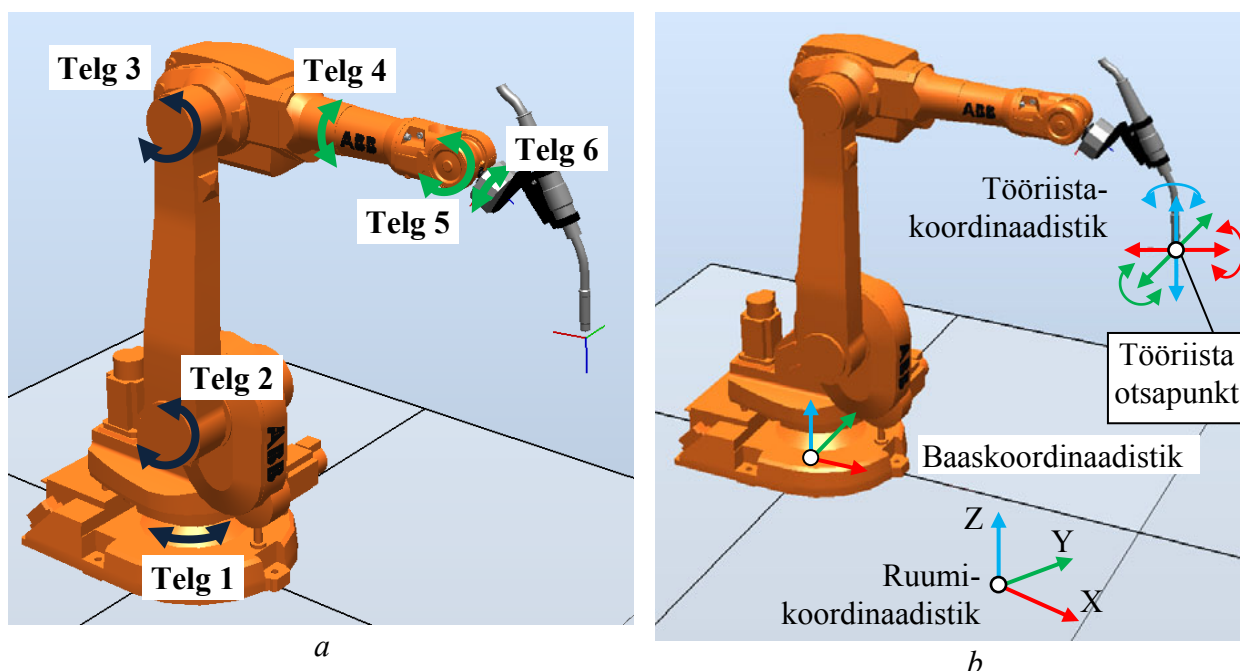
**Kalibreerimisandmed** on salvestatud välisele andmekandjale ning neid kasutatakse süsteemi ja manipulaatori absoluutasendi täpseks seadistamiseks tehnoloogiliste valikute puhul (*absolute accuracy option only*).

**Võrguserverit** kasutatakse robotsüsteemi tarkvara- (nt *RobotWare*) ja dokumendifailide salvestamiseks ja säilitamiseks. Server dubleerib sülearvuti funktsioone ning mõnel juhul võib selleks kasutada üht ja sama arvutit. Serveri võib ära jätta, kui serveri ja juhtkontrolleri vahel pole andmevahetust ette nähtud. Arvuti ühendatakse Ethernet-võrgu kaudu ühe või mitme juhtkontrolleri liidesega. Robotsüsteemi tarkvara hoidmiseks ja roboti programmeerimiseks saab kasutada nii sülearvutit kui ka serverarvutit.

**Roboti tarkvara litsentsi võti** (*RobotWare license key*) on tootja kood, milleta robotit kasutada pole võimalik.

#### 4.4. Roboti liikumise kirjeldamine

Roboti manipulaatorit juhitakse kas käsitsi, õpetamispuldiga (nt programmeerimisel õpetamise abil) või varem koostatud roboti juhtimisprogrammi abil automaatselt (nt toodete pakendamisel). Manipulaatori liigutamisel õpetamispuldiga on võimalik valida kahe liikumismeetodi vahel: 1) juhtida igat **telge/liigendit** eraldi lülide koordinaadistikes või 2) juhtida terve **manipulaatori liigutamist ristkoordinaadistikus**. Esimese puhul pööratakse manipulaatori ühte või mitut liigendit ümber oma pöörlemistelje (vt joonis 4.16 a). Pöörlevate lülide asemel võivad mõnel manipulaatoril olla ka lineaarselt (edasi-tagasi) liikuvad lülid.



**Joonis 4.16. Manipulaatori juhtimine õpetamispuldiga (a) lülide koordinaadistikes ja (b) ristkoordinaadistikus**

Ristkoordinaadistikus liigutatakse roboti manipulaatorit ja selle küljes olevat tööriista otsapunkti mööda teatud ristkoordinaadistiku telgi või pööratakse tööorganit nende telgede ümber (vt joonis 4.16 b). Nendeks koordinaadistikeks võivad olla kas roboti, ruumi-, baas- või tööriista koordinaadistikud. Joonisel 4.16 on näidatud tööriista koordinaadistik tööriista otsapunkti liigutamiseks x, y ja z telgede sihis. Tööriista otspunkti saab samuti pöörata ümber x-, y- ja z-telgede. Sõltuvalt manipulaatori ehitusest saab selle liigutamiseks kasutada ka silindrilist, sfäärilist jm koordinaatsüsteemi.

Joonisel 4.17 on näidatud ABB roboti õpetamispuldi ekraanipilt manipulaatori juhtimisel õpetamispuldiga. Pildil olevate virtuaalsete nuppude otstarve on järgmine:

1. Tööriista valik robotis määratud tööriistade nimekirjast. Valitud tööriista koordinaatsüsteemi arvestatakse manipulaatori liigutamisel ja positsioonide (punktide) õpetamisel. Kui seal on *tool0*, siis on valitud manipulaatori otsapunkt ja tööriista koordinaatsüsteemi valikul arvestatakse seal oleva koordinaatsüsteemiga.

2. Tööobjekti valik robotis määratud tööobjektide nimekirjast. Valitud tööobjekti koordinaatsüsteemi võetakse arvesse manipulaatori liigutamisel ja positsioonide õpetamisel. Kui seal on *wobj0*, siis tööobjekti pole valitud.
3. Roboti manipulaatori liikumise kiiruse muutmine käsijuhtimisel.
4. Manipulaatori sammlikumise aktiveerimine. Määratakse liikumissammu pikkus.
5. Koordinaatsüsteemi valik.



Ruumi koordinaadistik



Tööriista koordinaadistik



Baaskoordinaadistik



Tööobjekti koordinaadistik

6. Roboti manipulaatori liikumisviisi valik.



Esimese kolme lüli liikumine



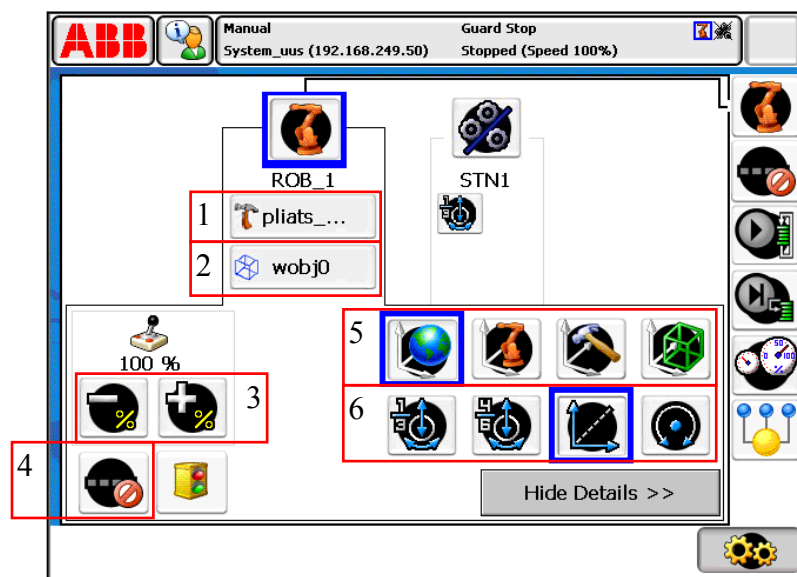
Liikumine ristkoordinaadistikus



4...6 lüli liikumine



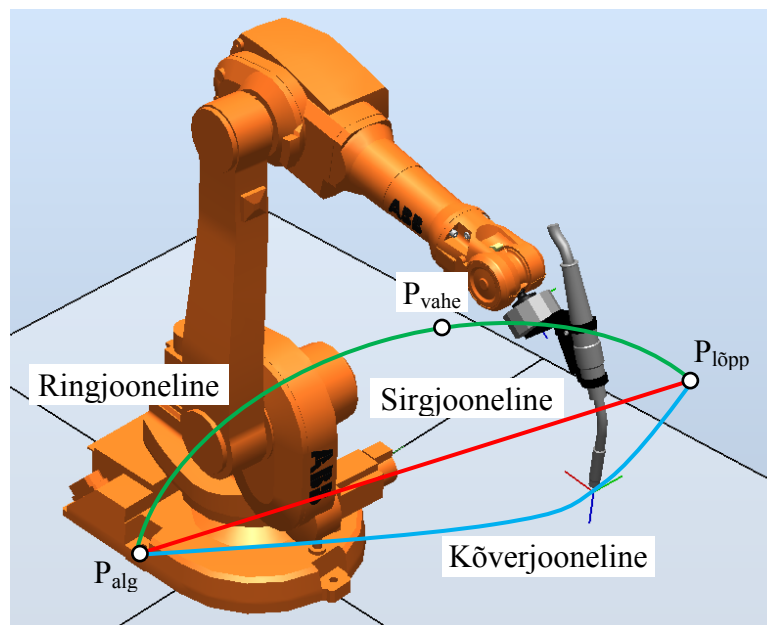
Pööramine ümber tööriista otsapunkti



Joonis 4.17. ABB roboti õpetamise puldi ekraan manipulaatori käsijuhtimise korral

Roboti programmjuhtimisel saab manipulaatori otsapunkti (tööriista või liigutatavat detaili) liigutada kolmel erineval viisil: mööda kõverjoont, mööda sirgjoont ja mööda ringjoont. **Kõverjoonelisel liikumisel** liigub manipulaator või tööriistaots kahe punkti vahel mööda suvalist trajektoori (vt joonis 4.18). Selle liikumise puhul ei teata roboti manipulaatori liikumistrajektoori ja manipulaatori liikumisaegseid asendeid enne koostatud programmi testimist. Testimise käigus võib juhtuda, et reaalne robot liigub mingi tõkke (seadme, pinna, detaili jne) vastu ja lõpetab töötamise. Selle vältimiseks tuleb võtta kasutusele trajektoori lisapunktid, mis ei luba roboti manipulaatoril liikuda vastu tõket.

Kõverjoonelise liikumise võib liigitada mõne tööstusroboti puhul kaheks: asünkroonseks ja sünkroonseks kõverjooneliseks liikumiseks. Esimese puhul liiguvad roboti manipulaatori lülid üksteisest sõltumata. See tähendab, et kui üks lüli jõuab oma soovitud asendisse enne manipulaatori jõudmist lõpp-punkti, siis see lüli lõpetab liikumise. Teised lülid liiguvad edasi kuni ka need jõuavad soovitud lõppasenditesse. Sünkroonse kõverjoonelise liikumise puhul alustavad kõik manipulaatori lülid liikumist üheaegselt ja ka lõpetavad liikumise korraga. Sel juhul liiguvad mõned manipulaatori lülid aeglasemalt kui teised. Niisugune tööviis vähendab roboti mehaanilist kulumist ja tagab manipulaatori mehhanismi pikema eluea. Enamikel juhtudel on manipulaatori trajektoor kõverjoon.



**Joonis 4.18. Roboti manipulaatori liikumisemeetodid programmi täitmisel**

Kõverjoonelist liikumist võidakse kutsuda erinevates roboti kasutusjuhendites järgmiselt:

- lülide koordinaadistikes interpoleeritud liikumine – *motion with joint interpolation*;
- lülide liikumine – *joint movement*;
- punktist punkti liikumine – *point to point movement*.

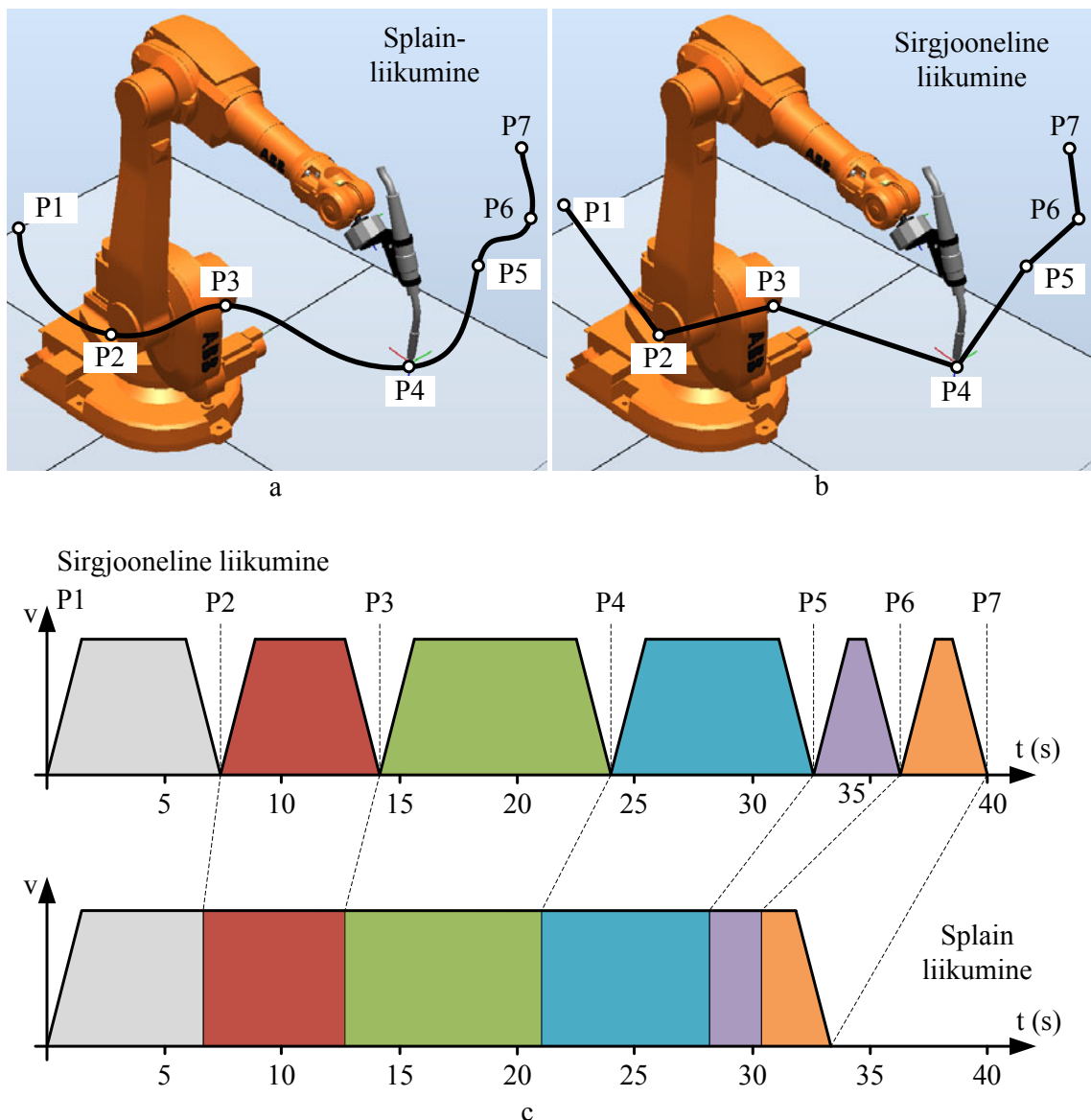
Teine liikumisviis on **sirgjooneline liikumine**, kui roboti manipulaator või tööriistaots liigub kahe punkti vahel mööda sirgjoont e lühimat trajektoori (vt joonis 4.18). Sellise liikumise puuduseks on see, et pika tee läbimisel võib mingi manipulaatori lüli jõuda piirasendisse ja robot lõpetab liikumise. Robot lõpetab liikumise ka siis, kui sirgjooneline trajektoor läheb roboti töötsoonist välja. Seda liikumisviisi on otstarbekas kasutada lühemate vahemaade läbimiseks või siis manipulaatori töötsooni keskosas, kus seda liikumist on lihtsam teostada.

Sirgjoonelist liikumist võidakse nimetada erinevates roboti kasutusjuhendites järgmiselt:

- lineaarselt interpoleeritud liikumine - *motion with linear interpolation*,

- tööriista sirgjooneline liikumine – *tool centre point moves along a linear path*,
- lineaarne liikumine – *linear movement*.

Kolmas liikumisviis on **ringjooneline liikumine** ehk ringliikumine, kus roboti manipulaatori või tööriistaots liigub mööda mingit ringjoone kaart (vt joonis 4.18). Ringjoonelise liikumise suund ja trajektoor määratakse kolme punkti abil:  $P_{alg}$  – alguspunkt (algab liikumine),  $P_{vahe}$  – vahepunkt (mille manipulaator läbib);  $P_{lõpp}$  – lõpp-punkt (liikumine lõppeb). Neid punkte ei ole vaja täpselt mõõta ehk määrata ruumis, kuna robot suudab suvalise kolme punkti järgi arvutada vastava ringi raadiuse. Selle alusel plaanib robot liikumiseks kaare, mida mööda liigutatakse manipulaatorit või tööriista otsa.



Joonis 4.19. Spline liikumise (a) ja sirgjoonelise liikumise võrdlus (b)

Mõne roboti puhul saab määratleda ringjoonelise liikumise ka siis, kui robot ei läbi vahepunkti, punkt ise tuleb siiski ette anda. Ringjoonelise liikumise juures esinevad robotil samad tõrked nagu sirgjoonelise liikumise juures. Robot lõpetab liikumise, kui mingi roboti manipulaatori lüli

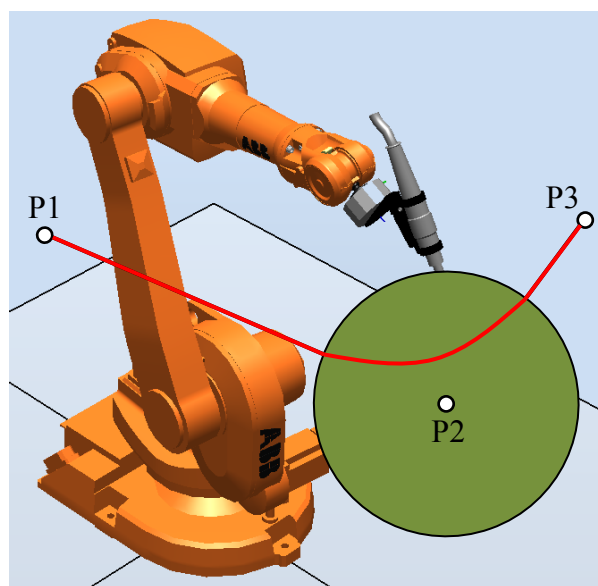
jõuab lõppasendisse või trajektoor läheb roboti tööalast välja. Ringjoonelist liikumist on soovitatav kasutada roboti tööala keskosas.

Ringjoonelist liikumist nimetatakse robotialases kirjanduses ka järgmiselt:

- ringjooneliselt interpoleeritud liikumine – *motion with circular interpolation*;
- tööriistatsentri ringjooneline liikumine – *tool centre point moves along a circular path*;
- ringjooneline liikumine – *circular movement*.

Kõverjoonelist liikumist kasutatakse punktkeevituse ja käitlemise (asjade tõstmine ühest kohast teise) ülesannete juures. Sirg- ja ringjoonelist liikumist kasutatakse enamasti lakkimis-, värvimis-, monteerimis-, laserlõikamis- jm tööde juures.

Robotites kasutatakse ka **splainliikumist** ehk polünoomidega interpoleeritud pidevliikumist, mil roboti manipulaatori või tööriista tsester liigub mööda keerukat kõverat (vt joonis 4.19 a). Robotile õpetatakse selgeks vahepunktid, mille alusel moodustatakse liikumistrajektoor, mille manipulaator läbib seisakuteta. Splainliikumine võimaldab robotil läbida trajektoori kiiremini ning säästab roboti manipulaatori mehhanismi. Vahepunktide juures ei esine liikumise pidurdamist ega kiirendamist, seda on näidatud joonisel 4.19 c.



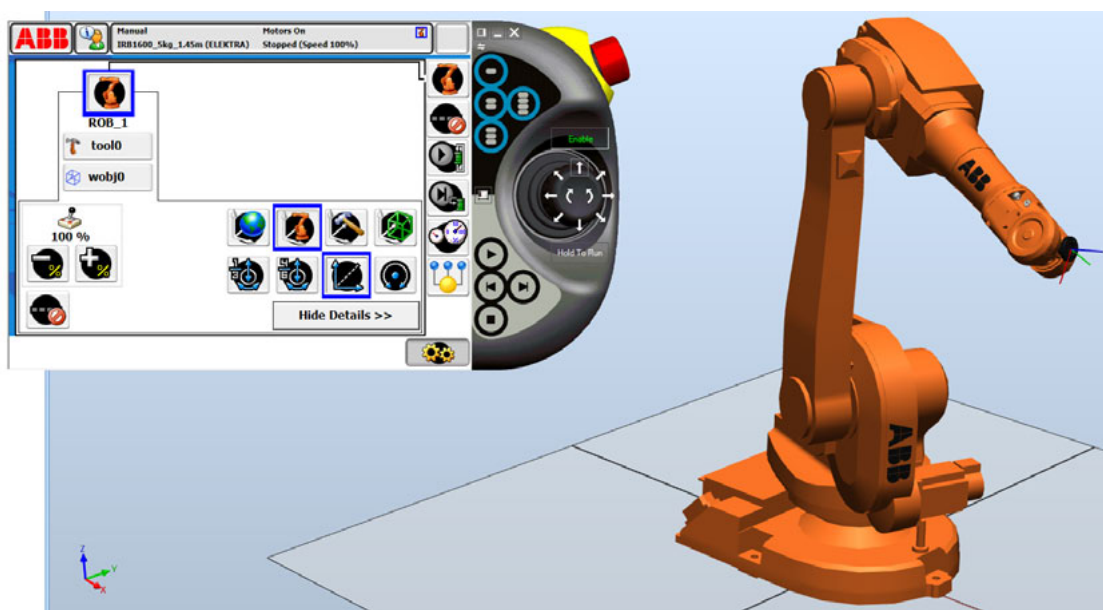
**Joonis 4.20. Manipulaatori liikumise trajektoor vahepunktis peatumata**

Splainliikumist saab teostada ka järjestikuliste kõver-, sirg- ja/või ringliikumistega. Sel puhul ei jää manipulaator iga liikumisetapi lõpp-punkti seisma, vaid liigub kohe edasi järgmise punkti. Seetõttu ei toimu manipulaatori liikumisel vahepealset pidurdamist ja kiirendamist. Uut liikumisetappi alustatakse juba enne, kui eelmine lõpetatakse. Sel juhul manipulaator ei läbi eelmise liikumisetapi lõpp-punkti P2, mis on ka järgmise etapi alguspunkt (vt joonis 4.20). Programmis määratakse ära kaugus (joonisel 4.20 näidatud ringi raadius), millest alates saab robot alustada uut liikumisetappi. Trajektoori niisuguse interpoleerimise puuduseks võrreldes

splainliikumisega on see, et manipulaatori trajektoori ei saa otseselt määrata punktidega, mida manipulaator peab läbima.

#### 4.5. Robotsüsteemide arenduskeskkond ehk virtuaalne robotitehnika

Virtuaalse robotitehnika all mõistetakse roboti manipulaatori liikumise (vaata peatükki 4.4) animeerimist arvuti virtuaalses 3D-keskkonnas. Animatsioon näib sedavõrd realistlikuna, et niisugust manipulaatori näivliikumist 3D-keskkonnas saab kasutada reaalse roboti programmeerimiseks. Manipulaatorit saab virtuaalses keskkonnas juhtida nii hiire, klaviatuuri (vastavad klahvi kombinatsioonid), virtuaalse õpetamispuldi (vt joonis 4.21) kui ka programmi abil. Viimase kahe jaoks on loodud eraldi virtuaalne roboti kontroller, mis töötab samadel põhimõtetel kui reaalse roboti kontroller. Programmi täitmisel saadab virtuaalne kontroller vajalikud juhtsignaalid roboti manipulaatorile. Selle peale muudab manipulaator oma asendit 3D-keskkonnas. Programm koostatakse samas programmeerimiskeeles, millega programmeeritakse ka reaalselt robotit.

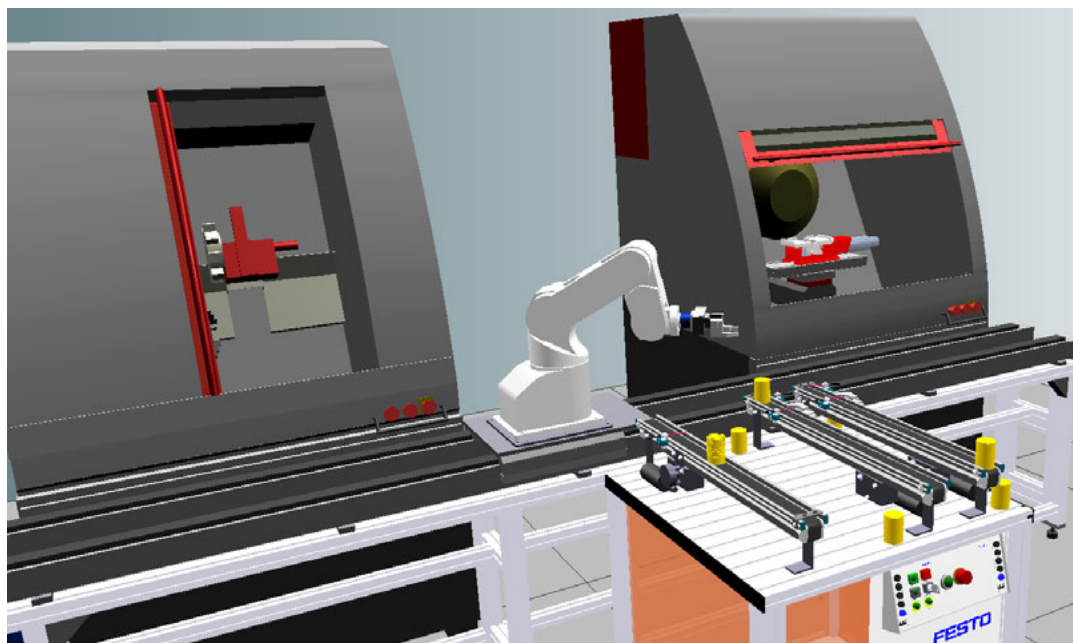


Joonis 4.21. ABB roboti juhtimine arvutis virtuaalse õpetamispuldi abil

Peale roboti võib virtuaalses 3D-keskkonnas olla muid esemeid ja juhitavaid seadmeid nagu teisaldatav detail, konveier, detaili tuvastav optiline andur, pneumaatiline haarats, CNC freespink jne (vt joonis 4.22). Nende 3D-mudelid saab koostada 3D-joonistustarkvara abil ning üle kanda robotsüsteemi arendustarkvarasse. Samuti saab kasutada andmebaasis juba olemasolevaid mudeleid. Kõigi eespool loetletud seadmete tööd saab ka arendustarkvaras animeerida, nt haaratsi avamist ja sulgemist. Kui on vaja, siis võivad seadmed vahetada juhtinfot virtuaalse roboti kontrolleriga. See võimaldab luua virtuaalse tootmisliini, kus robot võtab konveierilt detaili ja viib selle töötlemiseks CNC freespink. Kui CNC freespink on oma töö lõpetanud,

võtab robot sealt detaili ja viib selle järgmisele konveierile. Peale seda võtab robot uue detaili ning viib CNC-freespinkki ning kogu tootmisprotsess algab otsast peale.

Nii võib panna kokku veel keerulisemaid tootmisliine (sisaldab rohkem kui kahte robotit) või isegi tehase ning animeerida selle tööd arvutis enne reaalsel valmistamist.



**Joonis 4.22. 3D mudel CNC-pinke teenindavast robotsüsteemist**

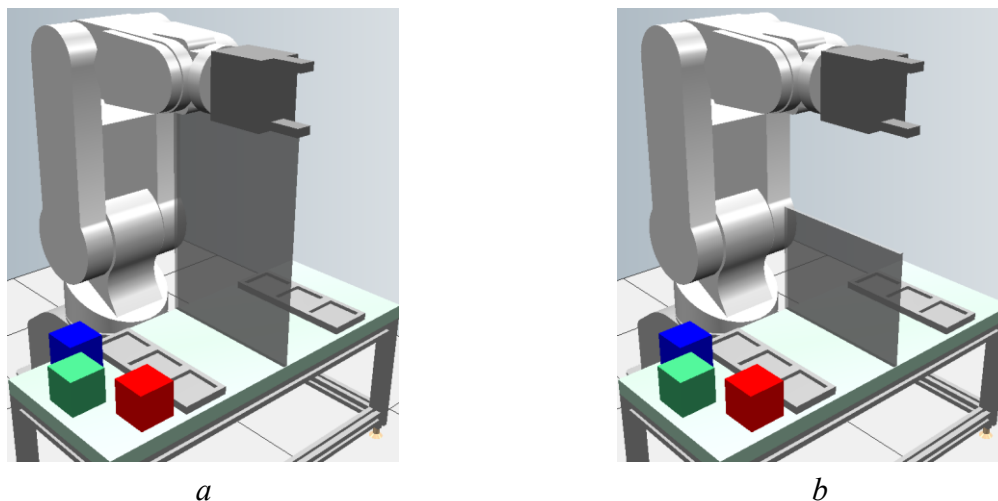
Arendustarkvaras koostatud virtuaalse 3D-süsteemiga saab testida roboti juhtimisprogramme ning vigade ilmnemisel neid korrigeerida. Testimise käigus võivad ilmneda ka riistvara puudujäägid, nt on vaja lisada mõni andur, et parandada teatud operatsiooni või tegevust. Samuti võib ilmneda, et mõni konstruktsioon või seade segab roboti tööd. Selle olukorra parandamiseks tuleb tõsta robot teise kohta või projekteerida tööd segav konstruktsioon uuesti (vt joonis 4.23). Kokkuvõtteks võib öelda, et virtuaalsete tootmissüsteemide kokkupanemine ja robotsüsteemide töö simuleerimine vähendab tootmisliini või tehase käikulaskmiseks kuluvat aega ning suurendab nende töökindlust.

Tehase käikulaskmise kiirendamiseks ja töökindluse suurendamiseks on enamus robotitootjaid arendanud välja oma robotsüsteemide arendustarkvara. Järgnevalt on loetletud mõnede robotitootjate arendustarkvarad:

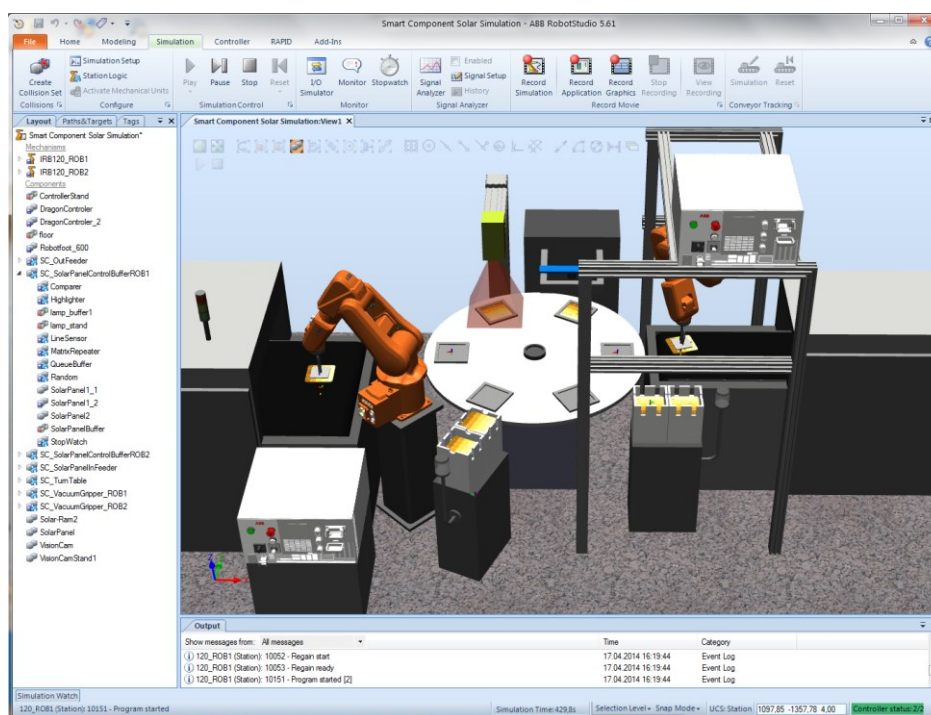
- ABB RobotStudio – Tarkvara on ette nähtud ABB robotite jaoks ja seda saab ABB kodulehelt tasuta 30. päevaks alla laadida (vt joonis 4.24);
- KUKA.Sim – KUKA robotite jaoks. Töötamiseks on vaja veel ka KUKA.OfficeLighte, mis simuleerib virtuaalset robotit kontrolleri arvutis;
- ROBOGUIDE – FANUC robotite jaoks;



- MotoSim EG – YASKAWA MOTOMAN robotite jaoks;
- MotoSim EG VRC – YASKAWA MOTOMAN robotite jaoks;
- MELFA WORKS – lisapakett, mis võimaldab SolidWorks tarkvaras koostada MITSUBISHI robotitega tootmisliinide mudeleid ja simuleerida nende tööd.



Joonis 4.23. Robotisüsteem (a) enne vaheseina kõrguse reguleerimist ja (b) pärast



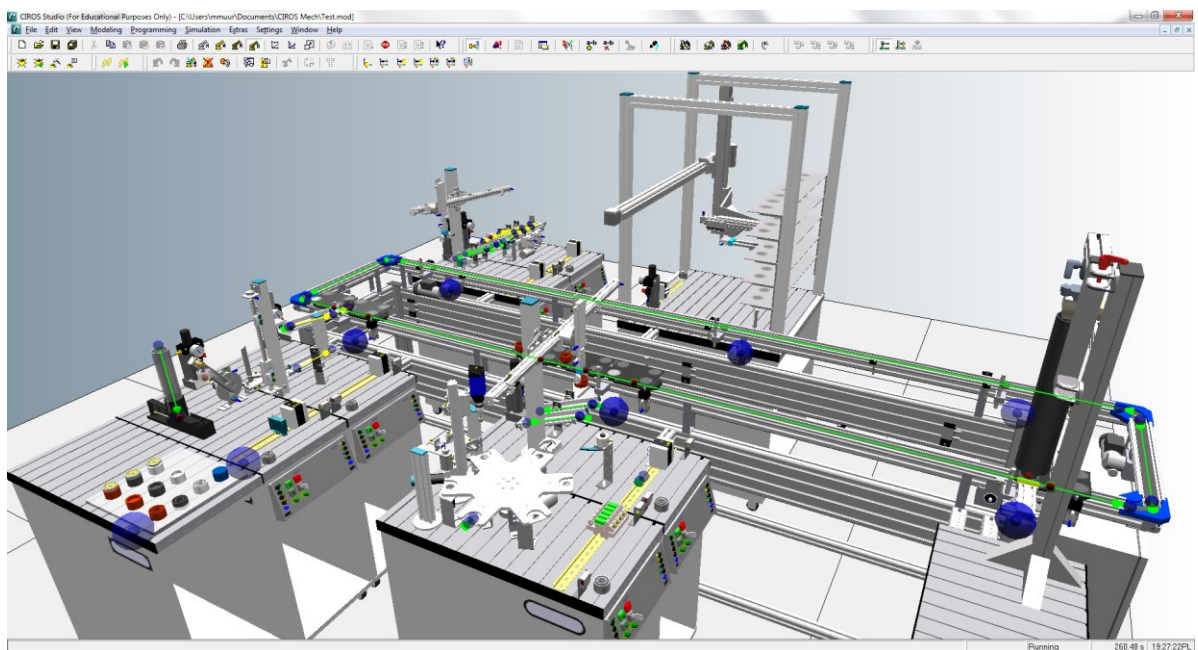
Joonis 4.24. Robotsüsteemi arendustarkvara *ABB RobotStudio* näidiskuva

Peale põhiarendustarkvara pakuvad mitmed robotitootjad lisapakette, mis hõlbustavad vastava firma roboti kasutamist eri rakenduste (keevitamine, värvimine, pakkimine, koostamine jne) juures. Näiteks, ABB pakub tarkvara *Machine Tending Software*, mis võimaldab rakendada ABB

roboteid erinevate masinate teenindamiseks (CNC-pingid). Tarkvara sisaldab ka mitmeid seadmete 3D-mudeleid (haaratsid, CNC- ja muud masinad), valmis programmilõike ning spetsiaalseid programmikäske. Näiteks, *SoftMove* reguleerib roboti poolt arendatavat jõudu või tagab roboti käele teatud järeleandvuse. Märkigem, et käe liigne jäikus võib lõhkuda nii roboti kui ka töödeldava detaili. Need täiendavad võimalused hõlbustavad 3D-mudelite ning roboti juhtimisprogrammide koostamist, robotsüsteemi teenindamist ning kogu süsteemi töö testimist arvutis.

Robotitootjate poolt pakutavad robotisüsteemide arenduskeskkonnad on tavaliselt kasutatavad ainult nende endi robotitega. Lisaks robotitootjatele pakuvad robotisüsteemide arendustarkvarasid ka muud firmad. Need arendustarkvarad võimaldavad sobitada eri firmade roboteid virtuaalsete süsteemide loomisel ja nende töö simuleerimisel.

CIROS Studio – Arendustarkvara on mõeldud virtuaalsete süsteemide loomiseks, programmi koostamiseks ja testimiseks, kus kasutatakse firmade MITSUBISHI, ABB, FANUC, KUKA, REIS ja STÄUBLE roboteid. Mitsubishi roboti puhul saab kasutada roboti enda programmeerimiskeelt, teiste robotite puhul aga ainult tööstusroboti programmeerimiskeelt (*Industrial Robot Language – IRL*).



**Joonis 4.25. CIROS Studio arenduskeskkonnas koostatud virtuaalne toomisliin**

CIROS Studio arendustarkvara võimaldab koostada ka virtuaalseid tootmissüsteeme, mis ei sisalda ühtegi robotit (vt joonis 4.25). Nende süsteemide juhtimiseks kasutatakse programmeeritavaid loogikakontrollereid (PLC). Arendustarkvaraga loodud süsteemid võimaldavad testida tööstuskontrollerite programme enne, kui vastav tootmisliin on realselt ehitatud. Samuti kasutatakse CIROS Studio mudeleid tulevaste liinitööliste ja hooldajate koolitamiseks.

CIROS Studio kõrval on veel teisi robotisüsteemi arenduskeskkondasid, mis võimaldavad programmeerida ja testida erinevate robotitootjate robotisüsteeme:

- RobotExpert – Firma SIEMENS poolt loodud robotisüsteemide arendustarkvara eri firmade robotite jaoks;
- Webots – Tarkvara on ette nähtud mobiilsete robotite mudelite koostamiseks, simuleerimiseks ja programmeerimise arenduskeskkonnaks;
- RoKiSim – tasuta tarkvara robotisüsteemide koostamiseks 6-teljelist robotitega (nt ABB, KUKA, FANUC, MOTOMAN, STÄUBLE). Sellega saab testida ainult roboti juhtimisalgoritme, kuid see tarkvara ei võimalda testida konkreetse roboti juhtimisprogrammi.

Kokkuvõtteks võib öelda, et virtuaalne robotitehnika ei piirdu ainult manipulaatori liikumise animeerimisega. Robotsüsteemide arendustarkvara võimaldab luua väga suurte ja keerukate tootmissüsteemide mudeleid. Loodud virtuaalseid mudeleid kasutatakse juhtimisprogrammide ja süsteemi töö testimiseks, tulevaste liinitööliste väljaõppeks ning välmitud tehniliste lahenduste demonstreerimiseks klientidele. Samuti kasutatakse neid reaalsete robotite programmeerimiseks.

## 4.6. Robotite programmeerimine ja programmeerimiskeeled

### 4.6.1. Roboti programmeerimismeetodid

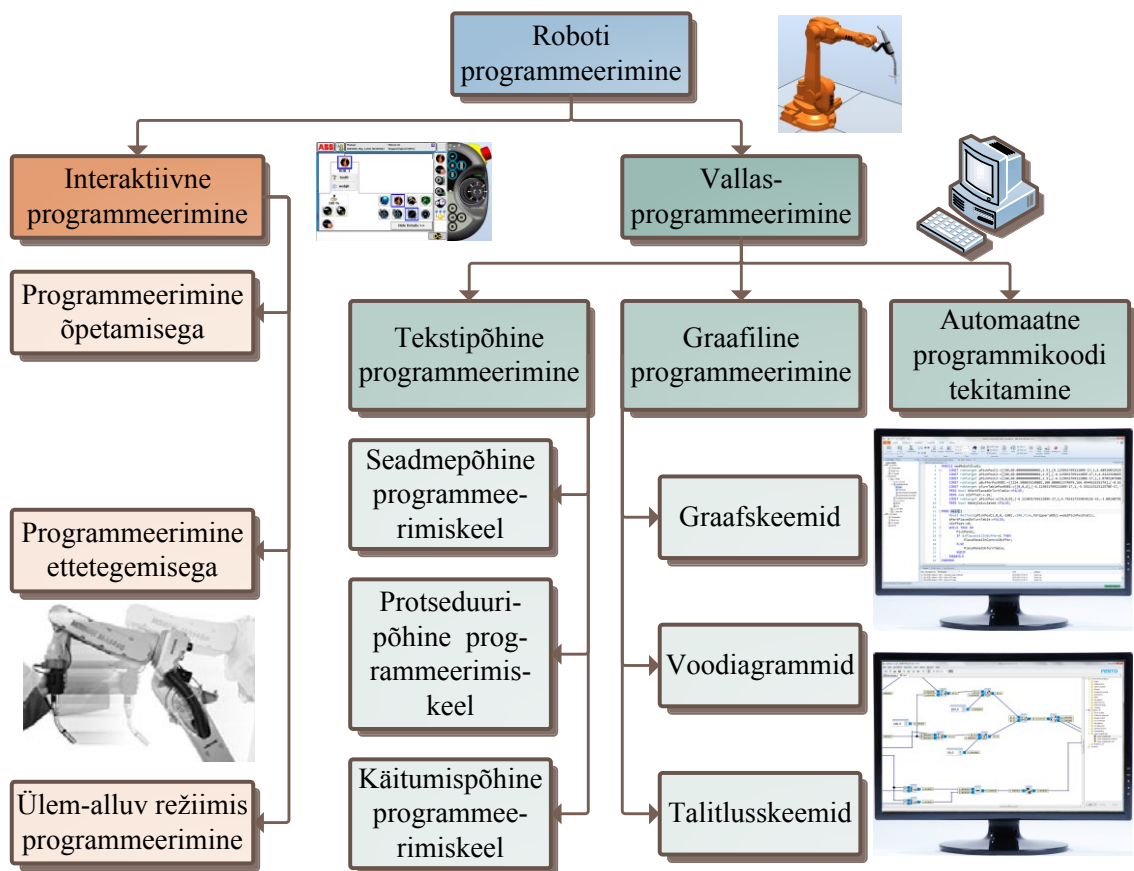
Roboti programmeerimine jaguneb kaheks (vt joonis 4.26): **interaktiivseks** (*on-line*) ja **vallasprogrammeerimiseks** (*off-line*). Interaktiivse programmeerimise puhul toimub roboti programmeerimine tööstusroboti rakendamiskohas tootmisprotsessis. Selleks kasutatakse õpetamisega (*Teach-In*), ettetegemisega (*Play-Back*) või ülem-alluv talitlusega (*Master-Slave*) programmeerimist. **Õpetamisega programmeerimisel** juhitakse roboti manipulaatorit õpetamispuldi abil vajalikesse positsioonimispunktidesse, mis salvestatakse roboti juhtseadme mälli. Mõne firma (nt ABB, KUKA) robotite korral salvestatakse positsioonimispunktid koos vajalike liikumiskäskudega. Sel juhul koostatakse roboti juhtimisprogramm juba õpetamise ajal. Mõnede teiste firmade (nt Mitsubishi) robotite puhul tuleb roboti juhtimisprogramm koostada eraldi.

Manipulaatori liigutamist saab peale õpetamispuldi teha ka käsitsi, s.t inimkäega. Roboti manipulaatorile lisatakse seade, mis tunnetab inimese poolt eri suundades arendatavat jõudu. Seadmest tulevate juhtsignaalide abil liigutatakse roboti manipulaatorit sinna, kuhu inimene soovib. Manipulaatorit juhib sel juhul järgivsüsteem, mis toimib jõuvõimendina. Kui manipulaator on jõudnud soovitud asendisse, siis salvestatakse positsioonimispunkti andmed koos vastava liikumiskäsuga. Liikumiskäsud ja ka muud programmeerimiskeele käsud on puldil näidatud enamasti graafiliste elementidena (ikoonid). Ikooni peale vajutades lisatakse see roboti juhtimisprogrammi. Niisuguse lahenduse nimeks on firmal YASKAWA MOTOMAN *Kinetiq Teaching* ja firmal ABB *Force Control*.

**Ettetegemisega ja ülem-alluv talitlusega programmeerimine** on eelmisega sarnane. Nagu õpetamisega programmeerimisel, liigutatakse ka sel juhul roboti manipulaatorit ruumis nii nagu

töö ajal. Programmeerimisel salvestab robot automaatselt manipulaatori positsioonid koos määratud liikumisviisiga. Hiljem jäljendab robot samu liikumisi, mis tehti ettetegemisega programmeerimise ajal. Nii saab nt maaler õpetada robotile selgeks autokere värvimise. Nende kahe programmeerimismeetodi erinevuseks on see, et ühe puhul kasutatakse õpetamispuhti manipulaatori liikumiste ettenäitamiseks ning teise puhul väiksemat manipulaatori mudelit. Väike manipulaatori mudel sarnaneb oma ehituselt reaalse roboti manipulaatorile ning seda on kergem liigutada kui reaalselt manipulaatorit. Ülem-alluv-talitluses programmeerimisel töötab väike manipulaator ülemseadmena, mille liigutamine kantakse üle reaalse tööstusroboti manipulaatorile (jäljendab mudeli liigutamist). Viimane töötab alluvseadmena.

Vallasprogrammeerimine jaguneb tekstipõhiseks, graafiliseks ja programmikoodi automaatse genereerimisega programmeerimiseks (vt joonis 4.26).



**Joonis 4.26. Roboti programmeerimismeetodid**

**Tekstipõhise programmeerimise** alla kuulub roboti programmeerimine mingis tekstiredaktoris (nt Notepad, Word jne) või robotsüsteemi arendustarkvaras roboti programmeerimiskeele abil. Tekstiredaktori kasutamisel tuleb meeles pidada, et mõned robotifirmad (nt KUKA ja Mitsubishi) näevad ette roboti positsioonide ja juhtimisprogrammi salvestamise eraldi failidesse, samas teised firmad (nt ABB) salvestavad need ühte ja samasse faili. Roboti programmeerimiskeeled jaotatakse keeles kasutatavate käskude olemuse järgi seadmepõhisteks

(*device based*), protseduuripõhisteks (*procedure based*) ja käitumispõhisteks (*behavior based*) keelteks.

**Graafiline programmeerimine** võimaldab tööstusrobotit programmeerida ka liinitöölisel. Graafiline programmeerimine on ülevaatlik ja inimene suudab seda omandada kiiremini kui tekstipõhist programmeerimist. Graafilisel programmeerimisel saab roboti juhtimisprogrammi esitada graafiskeemide, voodiagrammide või talitlusskeemide abil.

**Programmikoodi automaatse genereerimise** all mõeldakse juhtprogrammi loomist automaatselt mingi 3D-kujundi järgi. Sellist juhtimisprogrammi loomist kasutatakse CNC-pinkide puhul, kuid üha enam ka tööstusrobotite juures, nt kui robot peab detaili järeltöötlema (puhastuslihvimine). Detaili 3D-joonise järgi genereeritakse roboti juhtimisprogramm automaatselt.

#### 4.6.2. Roboti programmeerimiskeeled

Robotite programmeerimiskeeli on mitmeid ja erinevaid. Peaaegu iga robotitootja on arendanud oma robotite jaoks välja programmeerimiskeele, kuid on ka programmeerimiskeeli, mis on kasutatavad eri firmade robotitega. Järgnevalt on loetletud mõned robotite programmeerimiskeeled:

- *Industrial Robot language* (IRL) – Standardile DIN 66312 vastav roboti programmeerimiskeel, mida peaks saama kasutada enamike tööstusrobotite juures. Praktikas kahjuks seda eriti tihti ei kasutata;
- *Movemaster Command* (MRL) – Mitsubishi robotite programmeerimiskeele vanem variant;
- *MELFA-BASEC* – Mitsubishi robotite programmeerimiskeele uuemad versioonid;
- *RAPID* – ABB robotite programmeerimiskeel;
- *KUKA Robot Language* (KRL) – KUKA robotite programmeerimiskeel;
- *KAREL* – FANUC robotite programmeerimiskeel, mis sarnaneb PASCAL programmeerimiskeelele;
- *INFORM* - YASKAWA MOTOMAN robotite programmeerimiskeel.

Robotite juhtimisprogramm koosneb roboti poolt ükshaaval täidetavate programmeerimiskeele käskude jadast. Juhtprogrammi koostamisel kasutatavad käsud jagunevad järgmiselt:

- **Roboti juhtkäsud** – käsud roboti manipulaatori trajektoori, kiiruse, kiirenduse, aeglustuse, liikumise täpsuse määramiseks, tööriista juhtimiseks.
- **Programmi juhtkäsud** – käsud programmi/alamprogrammi käivitamiseks ja peatamiseks, programmi hargnemiseks, mingi signaali või ajalise viivituse ootamiseks, programmi lõigu kordamiseks, programmi täitmise katkestamiseks.
- **Sisendite ja väljundite juhtkäsud** – käsud roboti juhtimisseadme sisendite ja väljundite (nt selleks, et detaili võtmiskohas aktiveerida konveier) juhtimiseks.

- **Andmeside käsud** – käsud andmeside seadistamiseks ja pidamiseks teiste seadmetega. Seadmeteks võivad olla arvuti, programmeeritav loogikakontroller, keevitusseade jne.
- **Matemaatiliste tehete ja võrdluste käsud** – käsud matemaatilisteks teheteks (nt detailide loendamiseks), positsioonide arvutamiseks (nt kahe positsiooni kokkuliitmine), võrdluste tegemiseks jms.
- **Muud käsud** – spetsiaalsed roboti rakendamise seonduvad käsud (nt detailide paigutamine alustele ehk paletile), käsud roboti parameetrite sättimiseks, käsud veateadete ennistamiseks jne.

Järgnevalt on esitatud programmilõigud kõverjoonelise liikumise teostamiseks ABB, Mitsubishi ja KUKA robotiga.

#### **ABB roboti programm**

```
MoveJ P_10, v1000, z100, Pliats1\WObj:=PaberA4_1;
```

ABB robot liigub kiirusega kuni 1000 mm/s (*v1000*) kõverjoonelise liikumisega punkti P\_10. Liikumisel võetakse arvesse tööriista otsapunkti (*Pliats1*) ja tööobjekti (*PaberA4\_1*) koordinaatsüsteemid. Liikumisel punkti P\_10 on samuti määratud täpsus *z100*. See tähendab, et punkti ei jääda seisma, vaid 100 mm kaugusel alustatakse liikumist uue punktini.

#### **Mitsubishi roboti programm**

```
30 OvrD 50
31 Tool (0,0,95,0,0,0)
32 Cnt 1, 100, 100
33 Mov P10
```

Mitsubishi robot liigub kõverjooneliselte punkti P10. Enne liikumise alustamist punkti P10 seatakse järgmised tingimused. Roboti manipulaatori liikumiskiiruseks määratakse 50% maksimaalkiirusest (*OvrD 50*). Samuti määratakse tööriista tsentri kaugus manipulaatori viimasest lülist. Tööriista tsenter on nihutatud 95 mm pikki z-telge (*Tool (0,0,95,0,0,0)*). Enne liikumiskäsku aktiveeritakse ka manipulaatori pidevliikumine ehk siis 100 mm enne punktini P10 jõudmist alustab robot järgmise liikumiskäsu täitmist (*Cnt 1, 100, 100*).

#### **KUKA roboti programm**

```
PTP PUNKT1 CONT Vel=50% TOOL[2]:Gripper BASE[4]
```

KUKA robot liigub 50% maksimaalkiirusega (*Vel=50%*) punktini PUNKT1. Liikumisel punktini PUNKT1 arvestatakse tööriistaotsa (*Tool[2]:Gripper*) ja tööobjekti (*Base[4]*) koordinaatsüsteemi, mis on salvestatud vastavate numbritega roboti mälu pesadesse. Enne manipulaatori jõudmist punkti PUNKT1 aktiveeritakse liikumine järgmise punkti (*CONT*).

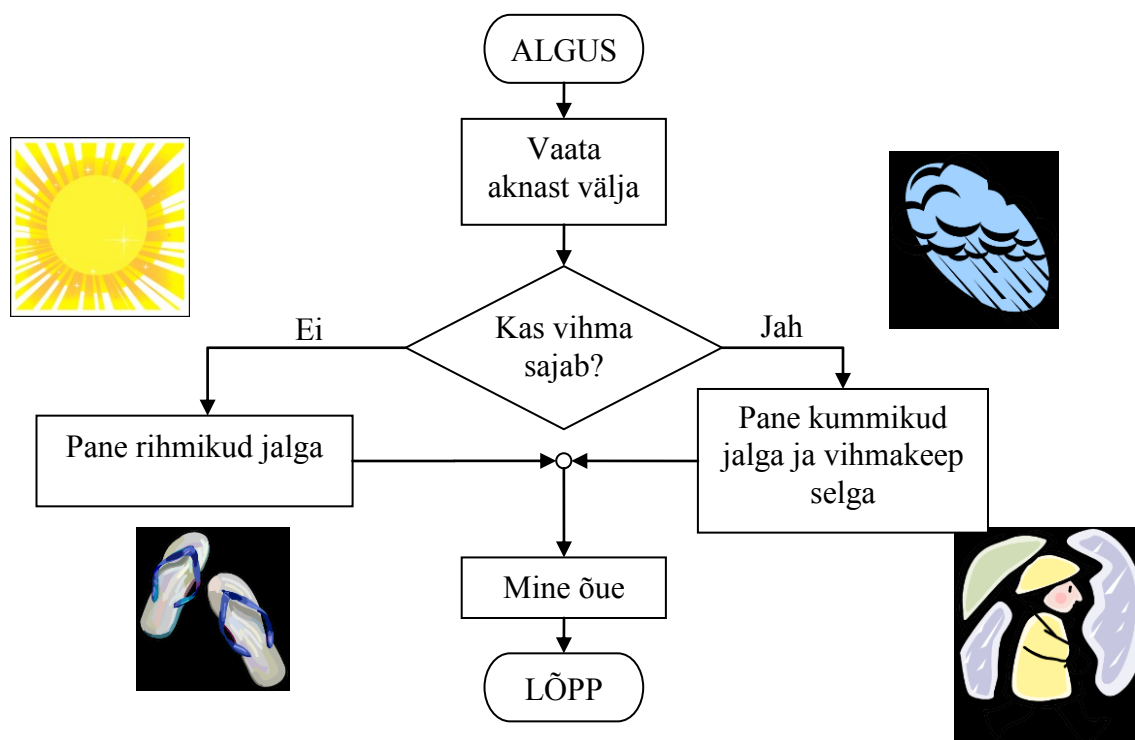
### 4.6.3. Roboti juhtimisprogrammi kirjeldamine

Enne juhtimisprogrammi loomist tuleb üksikasjalikult kirjeldada roboti tegevusi konkreetse rakenduse korral. Programmeerimisülesande paremaks mõistmiseks on abiks algoritmi plokk skeemid, mille abil kirjeldatakse sammhaaval roboti tegevuse üksikasju. Algoritmi plokk skeem annab ka esialgse ettekujutuse juhtimisprogrammi ülesehitusest. Samuti annab see ülevaate alamprogrammide vajadusest. Programmi jagamine alamprogrammideks aitab saada paremat ülevaadet roboti juhtimisprogrammist ning võimaldab testida üksikuid programmi osi eraldi. Algoritmi plokk skeemilt selgub ka mingi programmi osa kordumine (nt detailide olemasolu kontrollimine vahelaos), programmi hargnemised (nt viia detail järeletootlusesse või väljastada), hüpped ühest programmi osist teise (nt kasutada sama liikumiste järjestust erinevates kohtades, üles ja alla liikumine), sisendite ja väljundite kasutamine (detail on võtmiseks olemas ning luba seda haarata) jne. Tabelis 4.1 on esitatud algoritmi plokk skeemi põhielemendid.

**Tabel 4.1. Plokk skeemi põhielemendid**

Sümbol	Kirjeldus
	Kasutatakse plokk skeemis algoritmi alguse ja lõpu tähistamiseks. Sõna “ALGUS” märgib plokk skeemi algust ja “LÕPP” lõppu.
	Kasutatakse plokk skeemis sümbolite sidumiseks. Joontele märgitakse peale ka nooled, mis näitavad programmi täitmise liikumissuunda.
	Kasutatakse plokk skeemis mingi tegevuse või ülesande tähistamiseks. Tegevus või ülesanne kirjutatakse kasti sisse.
	Kasutatakse plokk skeemis mingi tingimuse või hargnemise tähistamiseks. Igal tingimusel on kaks või rohkem tulemust. Enamasti on selleks “Jah” ja “Ei” või “Õige” ja “Vale”. Tulemused kirjutatakse tingimusest väljuvate joonte juurde.
	Kasutatakse plokk skeemis mingi roboti juhtimisseadme sisendväärtuse lugemiseks või väljundväärtuse seadmiseks.
	Kasutatakse plokk skeemis mingi alamprogrammi tähistamiseks. Enamasti on alamprogramm kirjeldatud teise plokk skeemiga.
	Kasutatakse plokk skeemis hüpete tähistamiseks, kui algoritm ei mahu ühele lehele või skeemis on liiga palju jooni. Ühesugused hüpped tähistatakse sama numbri või tähe kombinatsiooniga.
	Kasutatakse plokk skeemis algoritmi hargnemiste ühendamiseks.

Algoritmi plokkskeemi näitena on joonisel 4.27 esitatud otsustuskeem õue minemise kohta. Enne õue minekut vaadatakse aknast välja, kas õues sajab vihma või ei. Kui õues sajab, siis pannakse kummikud jalga ja vihmakeep selga. Seejärel minnakse õue. Kui aga õues ei saja ja ilm on ilus, siis pannakse jalga rihmikud ning minnakse nendega.



**Joonis 4.27. Algoritm õue minemise kohta**

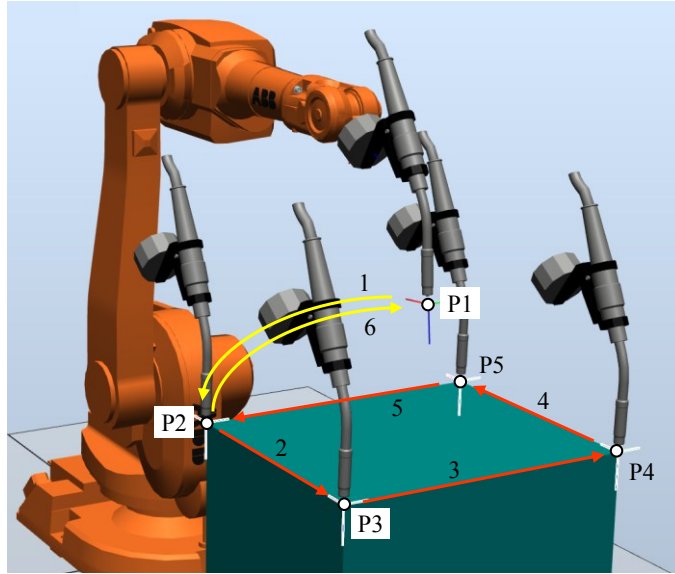
Roboti juhtimisprogrammi paremaks mõistmiseks tuleks välja joonistada ka roboti liikumised ruumis eri punktide vahel. Joonisel 4.28 on kujutatud roboti liikumine eri punktide vahel, kus nooled näitavad liikumissuunda. Number joonel näitab manipulaatori liikumist ja punktide läbimise järjekorda. Jooned 1 ja 6 kujutavad kõverjoonelist liikumist ning jooned 2, 3, 4, ja 5 sirgjoonelist liikumist. Joonisel 4.28 on näha ka seda, missugused punktid tuleb robotile selgeks õpetada.

#### 4.6.4. Roboti juhtimisprogrammide näited

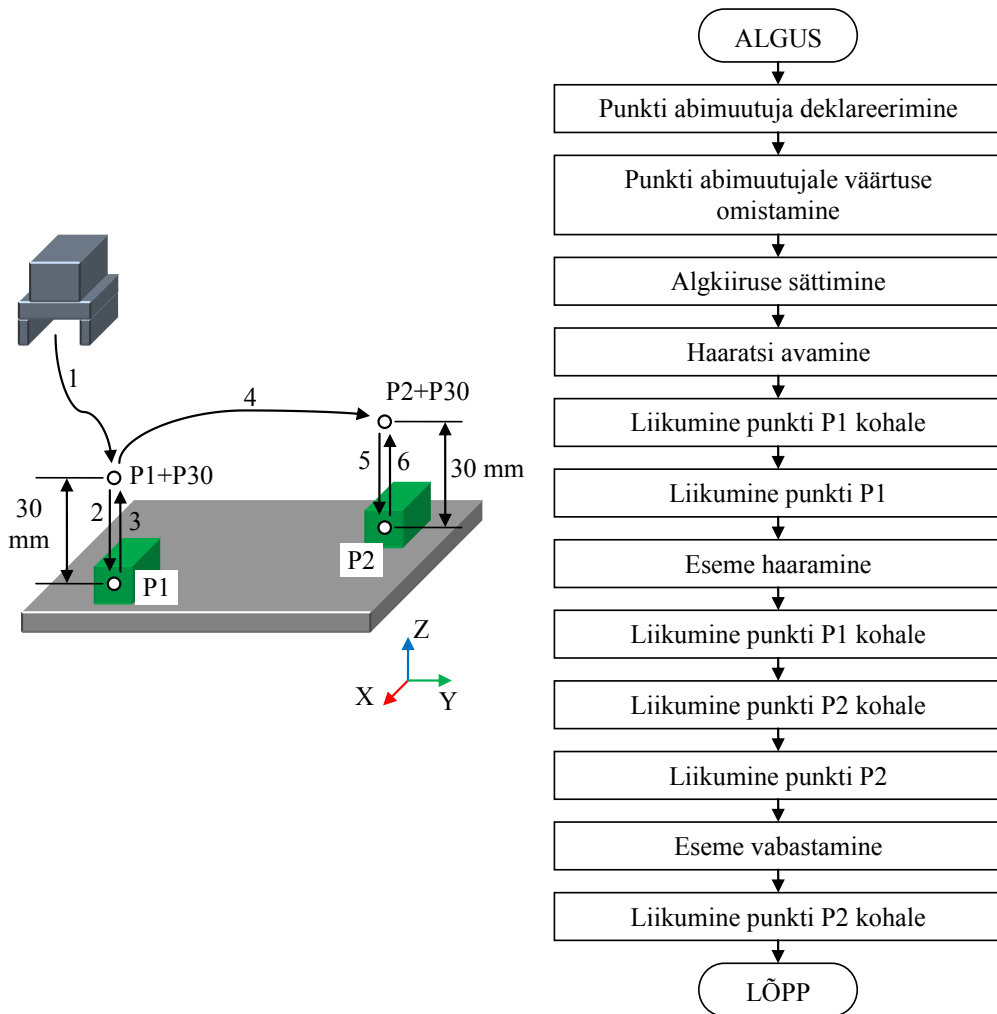
Järgmised robotiprogrammide näited on koostatud võta-ja-pane-tüüpi (*pick and place*) ülesannete jaoks. Programmid on esitatud Mitsubishi roboti programmeerimiskeeles MELFA-BASIC V.

Joonisel 4.29 on näidatud **eseme ümbertõstmise ülesanne** ja sellele vastav roboti algoritmi plokkskeem. Roboti juhtimisprogramm on esitatud tabelis 4.2. Robot kasutab nelja positsioonimispunkti, millest kaks on õpetatud (P1 ja P2) ning kaks arvutatakse programmis.





Joonis 4.28. Roboti manipulaatori liikumise kujutamine ruumis



Joonis 4.29. Võta-ja-pane-tüüpi eseme ümbertõstmise ülesanne koos algoritmiga

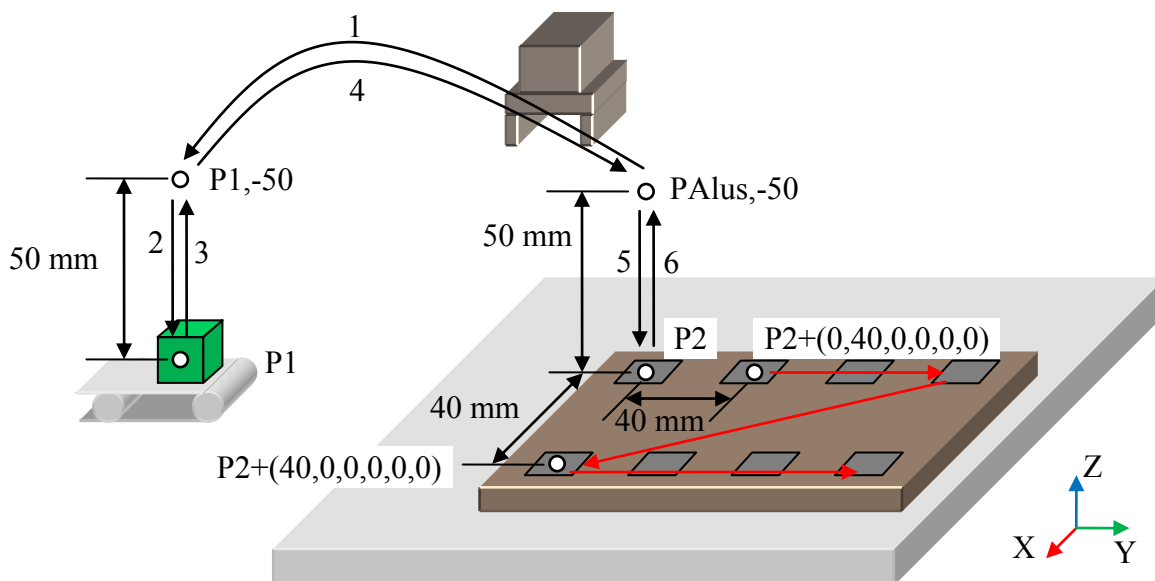
Programmi täitmise alguses deklareeritakse positsioonimispunkti abimuutuja P30, millele omistatakse väärtus (0,0,30,0,0,0)(0,0). Järgnevalt sätitakse manipulaatori liikumiskiiruseks 50% roboti maksimaalkiirusest. Seejärel avatakse roboti haarats ja manipulaator liigub kõverjooneliselt (liikumine 1) eseme haaramispunkti kohale (P1+P30). Siis liigub manipulaator sirgjooneliselt (liikumine 2) eseme juurde (P1) ja sulgeb haaratsi. Seejärel tõstetakse ese sirgjooneliselt (liikumine 3) üles, manipulaator liigub kõverjooneliselt (liikumine 4) eseme sihtpunkti kohale (P2+P30) ja siis edasi sirgelt (liikumine 5) eseme sihtpunkti (P2). Haarats avatakse, ese vabastatakse ja manipulaator liigub sirgjooneliselt (liikumine 6) eseme kohale. Sellega programmi täitmine lõpeb. Seda programmi saab täita tsükliliselt, mis võimaldab robotil tõsta jätkuvalt detaile ühelt transpordiliinilt teisele.

**Tabel 4.2. Roboti juhtimisprogramm eseme ümbertõstmiseks**

<b>Programmi rida</b>	<b>Kommentaar</b>
10 Def Pos P30	'Punkti abimuutuja deklareerimine ristkoordinaadistikus
20 P30=(0,0,30,0,0,0)(0,0)	'Punkti abimuutujale antakse väärtus, mis on nihutatud pikki Z-telge 30 mm ülespoole
30 Ovrđ 50	'Manipulaatori liikumiskiiruseks määratakse 50% roboti maksimumkiirusest
40 HOpen 1	'Avatakse roboti haarats
50 Mov P1+P30	'Manipulaator liigub kõverjooneliselt punktini, mis saadakse kahe punkti P1 ja P30 koordinaatide liitmise tulemusel ehk liigub eseme võtmiskoha lähedale
60 Mvs P1	'Manipulaator liigub sirgjooneliselt punkti P1 ehk eseme võtmiskohta
70 HClose 1	'Esemest võetakse kinni ja roboti haarats suletakse
80 Mvs P1+P30	'Manipulaator liigub sirgjooneliselt punktini, mis saadakse kahe punkti P1 ja P30 koordinaatide liitmise tulemusel
90 Mov P2+P30	'Manipulaator liigub kõverjooneliselt punktini, mis saadakse kahe punkti P2 ja P30 koordinaatide liitmise tulemusel ehk liigub eseme mahapanemiskoha lähedale
100 Mvs P2	'Manipulaator liigub sirgjooneliselt punktini P2 ehk eseme mahapanemiskohta
110 HOpen 1	'Roboti haarats avatakse ning ese vabastatakse
120 Mvs P2+P30	'Manipulaator liigub sirgelt punktini, mis saadakse kahe punkti P2 ja P30 koordinaatide liitmise tulemusel
130 End	'Programmi lõpp

Joonisel 4.30 on esitatud **alusele esemete ladustamise ülesanne** ehk paletiseerimine, kus esemed võetakse nt konveierilt ning paigutatakse alusele või karpi. Alus koosneb kahest reast ning iga rida mahutab neli eset (kokku 8 eset). Alusel olevate esemete pesad on jaotatud sümmeetriliselt kogu aluse ulatuses. See tähendab, et iga järgmise pesa keskpunkt on nihutatud eelmise pesa keskpunkti suhtes 40 mm pikki X- ja Y-telge. Ühe alusel õpetatud eseme pesa

asukoha (e positsiooni) järgi saab arvutada ülejäänute esemete pesade positsioonid. Seega on vaja antud ülesande täitmiseks õpetada robotile selgeks ainult kaks positsioonimispunkt. Nendeks on eseme võtmispunkt P1 ja eseme mahapanekupunkt P2.



**Joonis 4.30. Alusele esemete ladustamine**

Joonisel 4.31 on esitatud ülesande täitmiseks koostatud algoritm ning tabelis 4.3 sellele vastav roboti juhtimisprogramm. Programmi alguses deklareeritakse kaks arvu muutujat, millest ühte RNum kasutatakse alusel olevate ridade (kaks rida) loendamiseks ning teist VNum veergude loendamiseks (neli veergu) (vt joonis 4.30). Seejärel deklareeritakse positsioonimispunktide abimuutujad, mida kasutatakse alusel olevate pesade positsioonimispunktide arvutamiseks. Neile omistatakse algväärtused. Punkt PALusX on nihutatud mööda X-telge 40 mm edasi. Punkt PALusY on nihutatud mööda Y-telge 40 mm edasi. Jooksvale tööpunktile PALus omistatakse alusel oleva esimese pesa positsioon. Programmis kasutatakse punkti PALus alusel olevate pesade jooksvate positsioonimispunktide määramiseks ja nendesse liikumiseks.

Järgnevalt sätitakse manipulaatori liikumiskiiruseks 50% roboti maksimaalkiirusest ja avatakse roboti haarats. Programmireaga 80 määratakse ära alusel olevate ridade arv ning 90 juures veergude arv alusel. Nendel programmiridadel määratud kordus võimaldab täita kõik alusel olevad pesad esemetega. Algul üks rida, siis teine rida (vt joonisel 4.30 punase värviga kujutatud noolte suunad).

Järgmisena ootab robot juhtimisseadme sisendi 1 aktiveerumist. See ütleb, kas ese on võtmiskohas olemas või ei ole. Kui ese on olemas, siis roboti manipulaator liigub selle kohale (liikumine 1), siis alla (liikumine 2) ja haarab eseme. Peale seda tõstab eseme 50 mm üles (liikumine 3) ning liigub eseme mahapaneku kohale (liikumine 4) alusel. Manipulaator liigub alla (liikumine 5) ja vabastab eseme haardest. Seejärel liigub manipulaator 50 mm üles (liikumine 6). Nüüd arvutatakse uus tühja pesa asukoht reas. Kui rida pole veel täis pandud

(VNum on väiksem kui 4), siis jätkab robot programmi täitmist realt nr 90 (hüppab sinna). Kui üks rida on täis (VNum on suurem kui 3), siis arvutatakse esimese pesa positsioon uuel real ning robot jätkab programmi täitmist realt nr 80. Aga kui kõik read on täidetud esemetega (alus on täis, RNum on suurem kui 2), siis lõpetab robot töötamise.

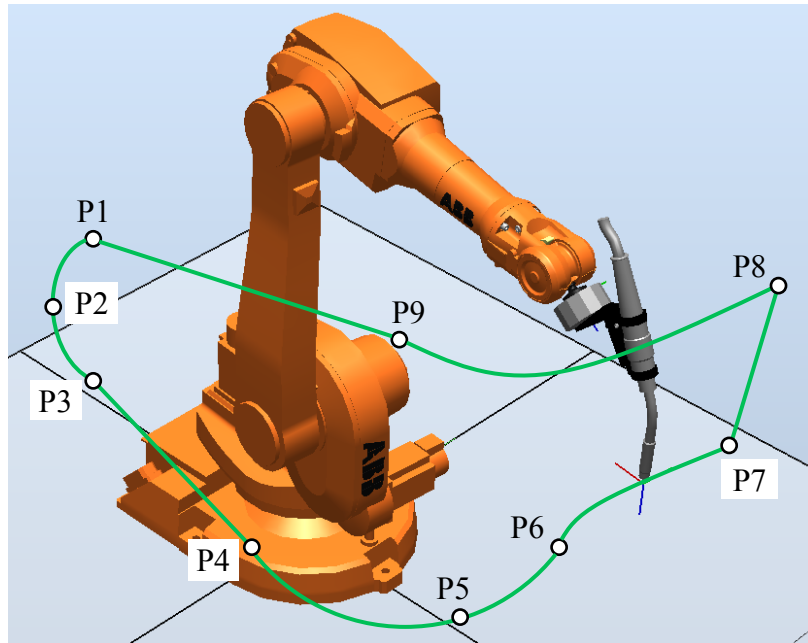


**Joonis4.31. Roboti juhtimisprogrammi algoritm esemete ladustamiseks alusele**

**Tabel 4.3. Roboti juhtimisprogramm esemete ladustamiseks alusele**

<b>Programmi rida</b>	<b>Kommentaar</b>
10 Def Inte RNum, VNum	'Deklareeritakse täisarv muutujad
20 Def Pos PAlus, PAlusX, PAlusY	'Deklareeritakse punkti abimuutujad ristkoordinaadistikus
30 PAlusX=(40,0,0,0,0,0)(0,0)	'Punkti abimuutujale antakse pikki X-telge 40 mm ettepoole nihutatud koordinaadi väärtus
40 PAlusY=(0,40,0,0,0,0)(0,0)	'Punkti abimuutujale antakse pikki Y-telge 40 mm paremale poole nihutatud koordinaadi väärtus
50 PAlus=P2	'Positsiooni abimuutujale antakse punkti P2 koordinaatide väärtus
60 Ovrđ 50	'Manipulaatori liikumiskiiruseks määratakse 50 % roboti maksimumkiirusest
70 HOpen 1	'Roboti haarats avatakse
80 For RNum=1 To 2	'Kordus aluse ridade täitmiseks
90 For VNum=1 To 4	'Kordus aluse veergude täitmiseks
100 Wait M_In(1)= 1	'Oodatakse, kuni ese on võtmiskohas olemas
110 Mov P1,-50	'Manipulaator liigub kõverjooneliselt punkti P1 kohale, mis on nihutatud 50 mm ülespoole
120 Mvs P1	'Manipulaator liigub sirgelt punkti P1 ehk eseme võtmiskohta
130 HClose 1	'Roboti haarats suletakse ning esemest haaratakse kinni
140 Mvs P1,-50	'Manipulaator liigub sirgelt punkti P1 kohale
150 Mov PAlus,-50	'Manipulaator liigub kõverjooneliselt punkti P2 kohale, mis on nihutatud 50 mm ülespoole
160 Mvs PAlus	'Manipulaator liigub sirgelt punkti PAlus ehk eseme mahapanemiskohta
170 HOpen 1	'Roboti haarats avatakse ning ese vabastatakse
180 Mvs PAlus,-50	'Manipulaator liigub sirgelt punkti PAlus kohale
190 Palus=PAlus+PAlusY	'Aluse uue pesa positsiooni arvutamine. Punkti nihutatakse Y-telge pidi mööda edasi
200 Next VNum	'Hüpe reale nr 90, kuni ühte ritta pole pandud nelja eset
210 Palus=P2+PAlusX	'Aluse uue rea esimese pesa positsiooni arvutamine. Punkti nihutatakse X-telge mööda edasi
220 Next RNum	'Hüpe reale nr 80, kuni kõik read pole esemetega täis
230 End	'Programmi lõpp

## 4.7. Kordamisharjutused



Joonis4.32. Roboti liikumine erinevate positsioonide vahel

1. Joonisel 4.32 on näidatud manipulaatori mitmest liikumisetapist koosnev liikumistrajektor. Kirjutada iga liikumisetapi juurde punktid, mille vahel võib antud liikumine toimuda. Näiteks, sirgjooneline liikumine punktide  $P1 \rightarrow P2$  vahel.

Kõverjooneline liikumine:

Sirgjooneline liikumine:

Ringjooneline liikumine:

2. Kirjutada iga pildi juurde sellele vastav koordinaatsüsteem, mida saab valida ABB roboti õpetamispuldil.



3. Täienda lauseid nii, et nendega esitatavad väited robotisüsteemide arendustarkvarade kohta oleksid tõesed.

- Ühe robotifirma poolt pakutavas robotisüsteemi arendustarkvaras ..... kasutada teise robotifirma robotit.
- Robotisüsteemide arendustarkvara võimaldab kirjutada ja testida roboti programme ..... ja ..... robotsüsteemide peal.
- Tootmisliinide virtuaalseid mudeleid saab kasutada nii ..... ja ..... kui ka robotsüsteemi töö ..... klientidele, kui reaalset süsteemi pole veel valmis ehitatud.

- Virtuaalne robotsüsteemi mudel võib koosneda ka enda joonistatud seadmete, detailide jne .....
4. Koostada kohvi valmistamise kohta algoritm plokkskeemi abil. Kohvi valmistamisel saab kasutada järgmisi seadmeid ja komponente:
    - kraanivesi,
    - pudelivesi,
    - veekeedukann,
    - kohvifilter tassi peal,
    - kohvipulber,
    - suhkur,
    - mesi,
    - piim,
    - kohvikoor.
  5. Koostada järgnevalt MELFA-BASIC V käskudega esitatud roboti juhtimisprogrammi lõigu järgi algoritmi plokkskeem ning näidata manipulaatori liikumine ruumis. Ülakoma tähistab kommentaari algust programmireas.

30 Mov P1,-40	'liigutakse P1 kohale, mis on 40 mm ülevalpool
40 Wait M_In(8)=1	'detaili pole ees
50 Mvs P1	
60 HOpen 1	
70 Mvs P1,-40	
80 Mov P5	
90 Mov P6,-50	
100 Wait M_In(12)=0	'detail on olemas
110 Mvs P6	
120 HClose 1	

#### 4.8. Ülesanded virtuaalsete robotitega

Ülesannete eesmärgiks on tutvustada robotisüsteemide arendustarkvara kasutamise võimalusi. Ülesanded põhinevad ABB robotite arendustarkvaral ABB RobotStudio.

ABB RobotStudio saab alla laadida ABB kodulehelt ning paigaldada arvutisse ilma piiranguteta. Arendustarkvara (kas koos lisamoodulitega või ilma) töötab täisversioonina kuni 30 päeva. Pärast seda töötab tarkvara edasi piiratud võimalustega (nt lisamoodulid ei tööta) või vastavalt ABB-lt saadud litsentsi võimalustele.

Ülesannete lahendamisel eeldatakse, et ABB RobotStudio on paigaldatud arvutisse ning see töötab täisversioonina. Juhendite koostamisel kasutati ABB RobotStudio versiooni 5.61.

#### 4.8.1. Virtuaalse roboti liigutamine õpetamispuldi abil

##### Ülesande lahendamiseks vajalikud seadmed:

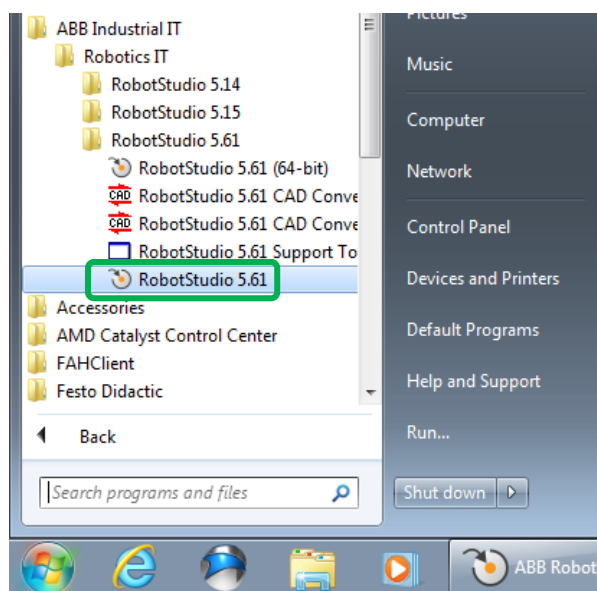
Arvuti, millele on paigaldatud ABB RobotStudio täisversioon.

##### Ülesande eesmärk:

Eesmärgiks on õppida tundma roboti manipulaatori juhtimist õpetamispuldi abil, erinevate liikumisviiside rakendamist manipulaatoril ning luua arvutis lihtne, ühe robotiga virtuaalne robotisüsteem.

##### Töö käik:

1. Käivitada ABB RobotStudio menüü *Start* või töölaual oleva ikooni abil (vt joonis 4.33).



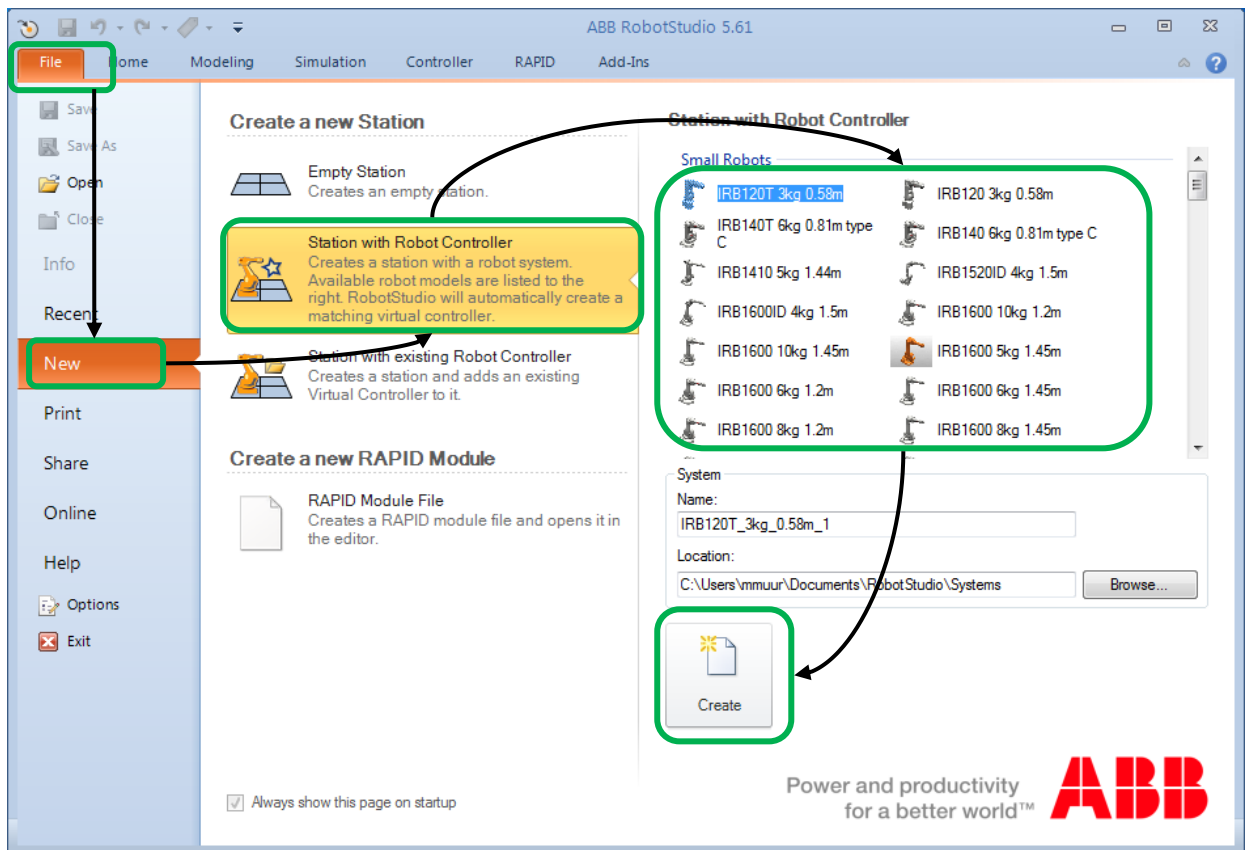
Icoon

Menüü *Start*

**Joonis 4.33. ABB RobotStudio käivitamine menüü *Start* või töölaual oleva ikooni abil**

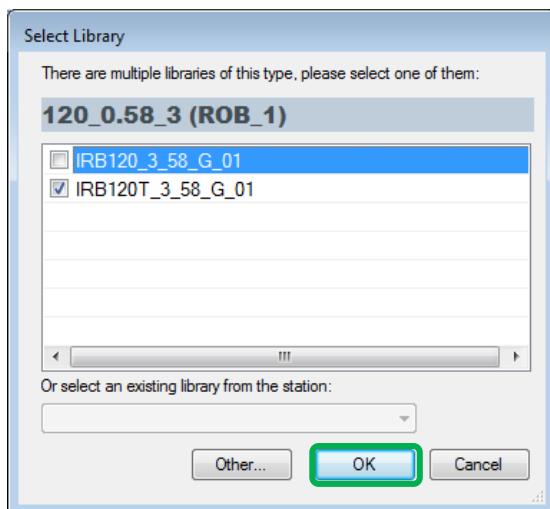
Seepeale avaneb joonisel 4.36 näidatud ABB RobotStudio.





**Joonis 4.34. Robotisüsteemi arendustarkvara ABB RobotStudio**

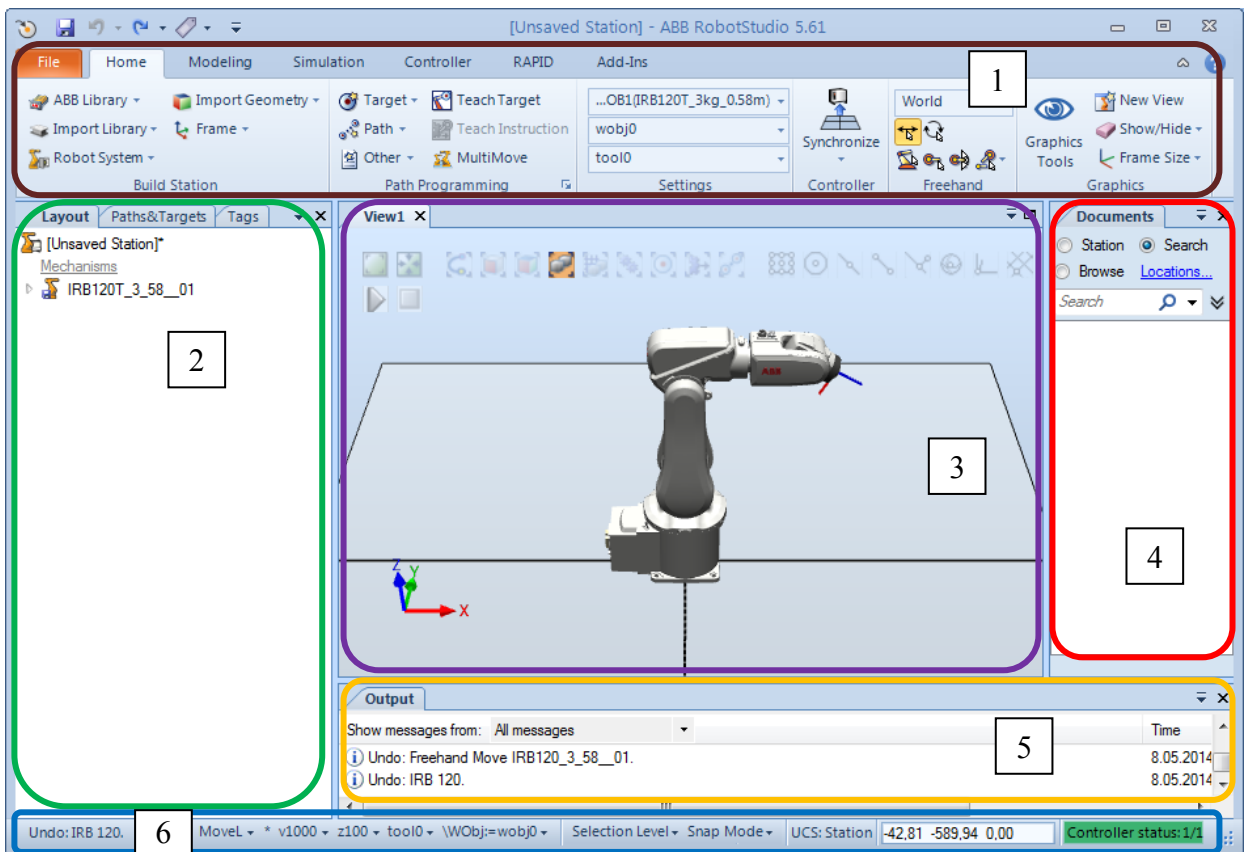
2. Luua uus virtuaalne robotisüsteem. Selleks valida menüüst *File* järgmine tee:  
*New* → *Station with Robot Controller*.



**Joonis 4.35. ABB Roboti tüübi valik**

Sealt edasi tuleb valida suvaline ABB roboti mudel ning vajutada siis nupule *Create*. Antud näites on valitud robot IRB120T tõstejõuga 3 kg ja haardeulatuslega 0,58 m (vt joonis 4.34). Seejärel avaneb joonisel 4.35 kujutatud roboti tüübi valiku aken (selle avanemisega võib kuluda aega, kuna VC käivitub arvutis). Sealt valida sobiv mudel. Mudelite erinevuseks võib olla see, et ühe roboti manipulaatorile on pandud peale ABB logo ja teisel ei ole, või midagi muud. Valiku kinnitamiseks vajutada nupule *OK*.

Seepeale avaneb joonisel 4.36 kujutatud robotirakendus. ABB RobotStudio ülesehitus ja selle akende tähendus on lahti seletatud tabelis 4.4







**Joonis 4.36. Robotisüsteem ABB RobotStudios**

**Tabel 4.4. Arendustarkvara ABB RobotStudio akende nimekiri**

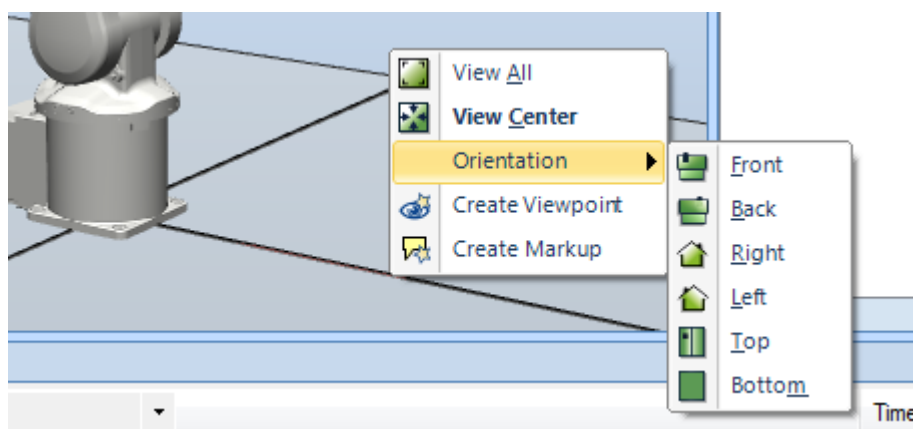
Number	Nimi	Kirjeldus
1	Menüü	Akna osa menüüde valimiseks ja nendes liikumine
2	Brauser	Näitab robotirakenduse füüsiliste ( <i>Layout</i> ) esemete (nt robot, tööriist), mitte füüsiliste ( <i>Paths&amp;Targets</i> ) esemete (nt positsioonid, programm) või muutujate ( <i>Tag</i> ) vahelisi hierarhilisi seoseid puuna.
3	Erinevad kasutaja aknad	Siin kuvatakse robotirakenduse ülesehitust 3D-aknas, roboti programmi teksti kujul ( <i>RAPID editor</i> ), kontrolleri seadistust jne.
4	Dokumentide haldamisaken	Võimaldab sirvida RobotStudio dokumente (faile) nagu roboti mudelid, kujundid jne. Siia võib lisada dokumente (kasutusjuhend, elektriskeem jne), mis on vajalikud ja seotud antud robotisüsteemiga.
5	Väljundite aken	Kuvab infot loodud robotirakenduses esinevate sündmuste kohta. Selleks võivad olla veateated, simulatsiooni alustamine või lõpetamine jne.
6	Olekuriba	Annab üldinfot robotirakenduse kohta tarkvaras. Selleks on nt roboti manipulaatori liigutamise käskude ülesehitus, valikud 3D aknas, koordinaatsüsteemid, virtuaalse roboti kontrolleri (VC – virtual controller) olek jne.

3. Vaate muutmine 3D-aknas. See on vajalik selleks, et näha kuidas manipulaator liigub robotisüsteemis (kas liigub mingist asjast läbi), kas detailid/esemed paiknevad õiges kohas, jne. Vaate asendi muutmiseks rakendatakse hiire ja klahvide kombinatsiooni klaviatuuril. Tabelis 4.5 on esitatud vastavad kombinatsioonid vaate muutmiseks.

**Tabel 4.5. Vaate muutmise võimalused 3D aknas**

Nimetus	Klaviatuuri ja hiire kombinatsioon	Kirjeldus
Vaate nihutamine	CTRL + 	Nende kooskasutamisel ja hiire nihutamisel üles-alla/vasakule- paremale nihutatakse vaade 3D-aknas teise kohta.
Vaate nurga muutmine	CTRL + SHIFT + 	Nende kooskasutamisel ja hiire nihutamisel üles-alla/vasakule- paremale muudetakse vaate nurka 3D-aknas.
Suumimine	CTRL + 	Nende kooskasutamisel ja hiire nihutamisel vasakule- paremale suunitakse vaadet 3D-aknas sisse või välja. Sama on tehtav hiire rulliga.
Suurendamine	SHIFT + 	Need koos hiire liigutamisega valivad ala, mida tahetakse suurendada 3D-aknas.

Tarkvaras on määratud vaated, mida saab valida joonisel 4.37 kujutatud rippmenüüst. Menüü avaneb, kui teha parem hiireklikk 3D-aknas. Vaadete tähendused on lahti seletatud tabelis 4.6.

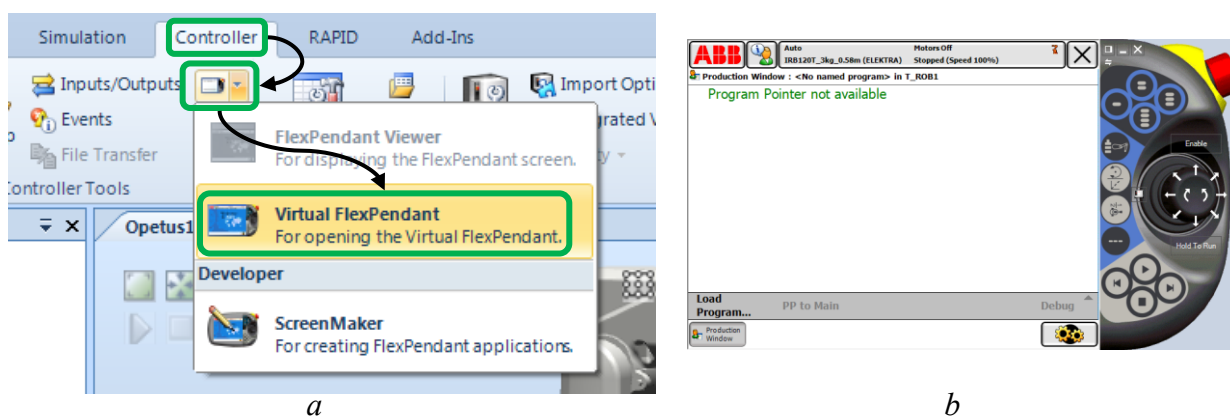


**Joonis 4.37. Määratud vaadete valik 3D-aknas**

**Tabel 4.1. Määratud vaadete tähendused**

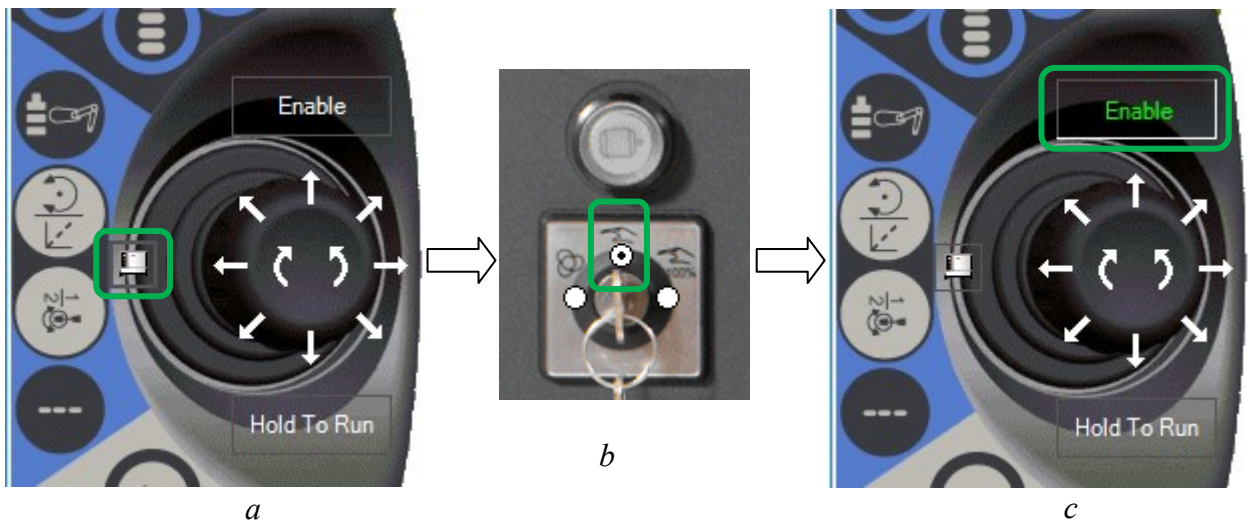
Nimi	Kirjeldus
<i>View All</i>	Näitab kogu ulatuses robotisüsteemi 3D-aknas. Kasutada ka siis, kui robotisüsteemi ollakse liiga palju sisse suumitud.
<i>View Center</i>	Liigutab 3D-aknas valitud koha akna keskele. Valiku tegemiseks vajutada soovitud kohas hiire vasakut nuppu ning siis valida rippmenüüst <i>View Center</i> .
<i>Front</i>	Eestvaade robotisüsteemile 3D-aknas.
<i>Back</i>	Tagantvaade robotisüsteemile 3D-aknas.
<i>Right</i>	Vaade paremalt robotisüsteemile 3D-aknas.
<i>Left</i>	Vaade vasakult robotisüsteemile 3D-aknas.
<i>Top</i>	Vaade ülalt robotisüsteemile 3D-aknas.
<i>Bottom</i>	Altvaade robotisüsteemile 3D-aknas.

4. Aktiveerida/avada arvutis töötav virtuaalne õpetamispuul. Selleks valida menüüst järgmine tee: *Controller FlexPendant* → *Virtual FlexPendant* (vt joonis 4.38 a). Selle peale avaneb joonisel 4.38 b kujutatud virtuaalne õpetamispuul.

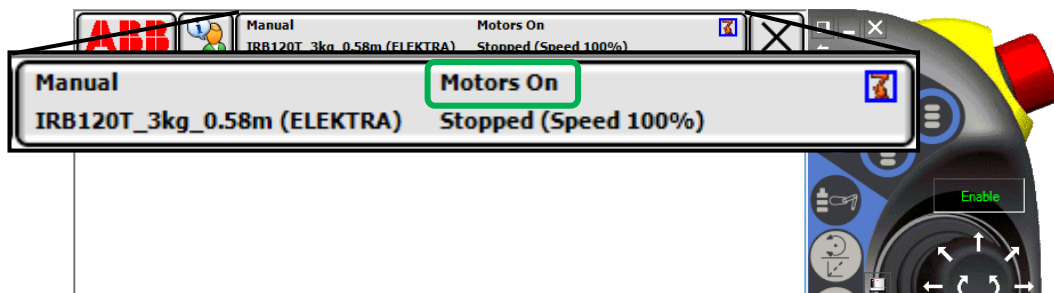


**Joonis 4.38. Virtuaalne õpetamispuul (a)ja selle avamine menüüst *Controller* (b)**

5. Anda roboti manipulaatori juhtimisõigused üle õpetamispuuldile. Selleks vajutada õpetamispuuldil kujutatud robot juhtimiseseadme ikoonile (vt joonis 4.39 a) ning valida avanenud aknas tavaline käsijuhtimine (vt joonis 4.39 b). Seejärel vajutada nupule *Enable* (vt joonis 4.39 c) ning oodata, kuni mootorid on sisse lülitatud. Teave mootorite aktiveerimisest kuvatakse virtuaalse õpetamispuuldi ekraanile (vt joonis 4.40).



**Joonis 4.39. Manipulaatori juhtimisülesande andmine õpetamispuldile**



**Joonis 4.40. Manipulaatorite mootorite aktiveerimisteave virtuaalsel õpetamispuldil**

- Liigutada roboti manipulaatorit arvutis virtuaalse õpetamispuldi abil. Selleks kasutatakse õpetamispuldil olevat juhthooba (vt joonis 4.41). Manipulaator hakkab liikuma ABB RobotStudio 3D aknas, kui vajutada juhthoova juures olevate noolte peale (üks neist) ning hoida hiire vasakut nuppu teatud aja all. Erinevate noolte kasutamisel peaks liikuma roboti manipulaatori kolm esimest lüli. Kui liikumisel tekivad veateated, siis tuleb need kinnitada vajutades tekstile *Acknowledge*, vastasel juhul ei saa manipulaatorit edasi liigutada.

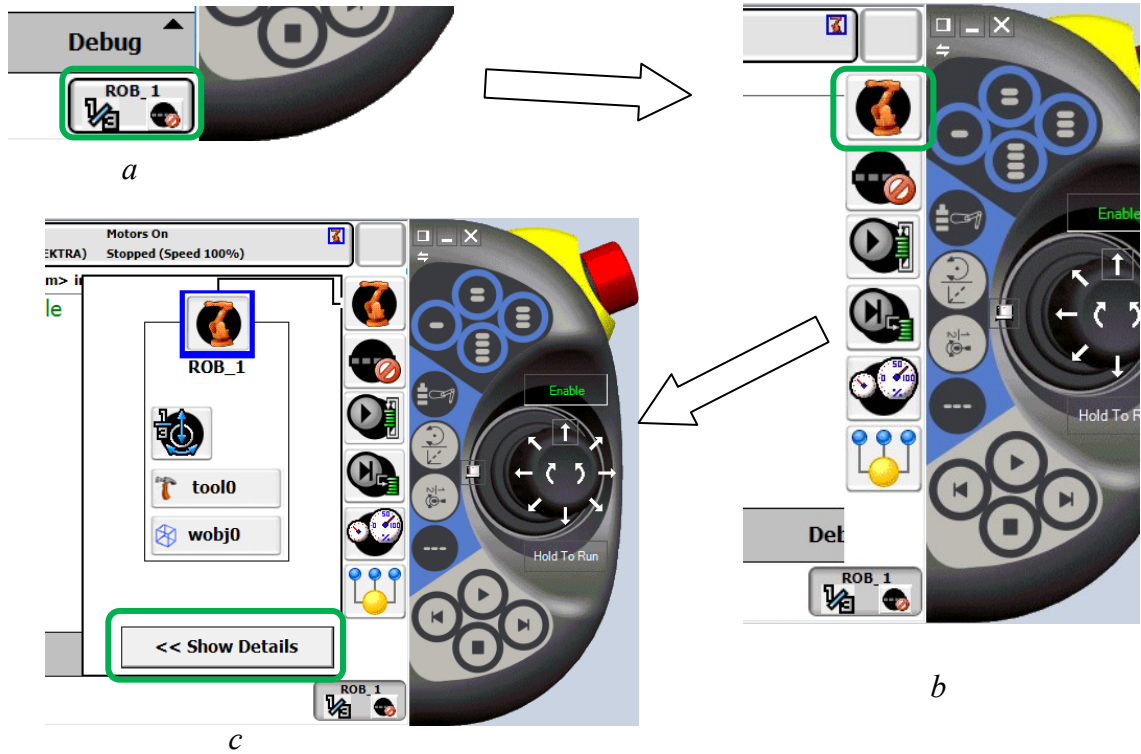


**Joonis 4.41. Juhthoob virtuaalsel õpetamispuldil**

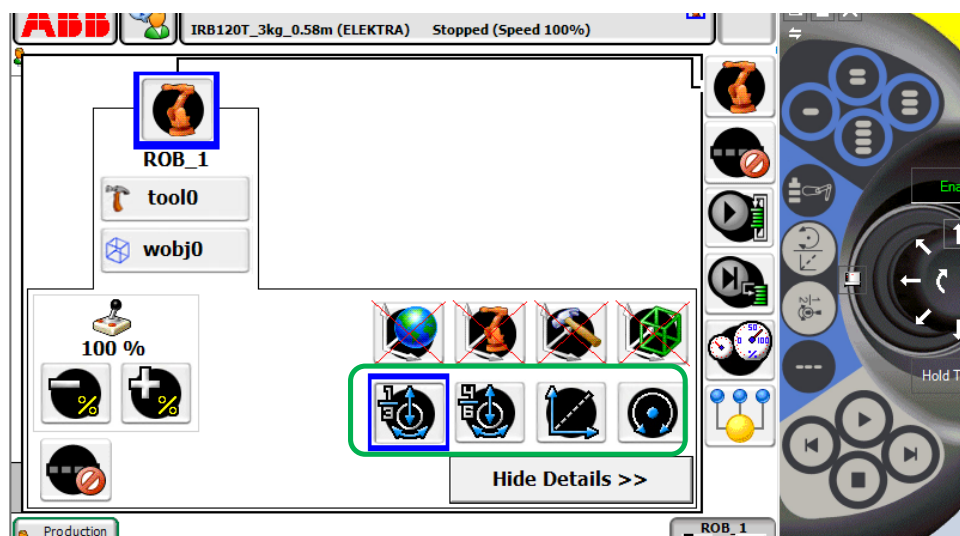
- Kasutada erinevaid manipulaatori liigutamisiise. Selleks vajutada joonisel 4.42 *a* näidatud virtuaalse õpetamispuldi ikoonile. Valida manipulaatori ikoon (vt joonis 4.42 *b*) ning vajutada nupule *Show Details*. Avanenud koval (vt joonis 4.43) valida vastav liikumisviis

ning vajutada juhthoova juures olevatele nooltele. Jälgida kuidas roboti manipulaator liigub 3D-aknas. Liikumisviisi valikut näitab selle ümber olev sinine kast.

8. Kirjeldada roboti manipulaatori talitlust järgmiste liikumisviiside korral (vt pt 4.4) : a) lülide koordinaadistikus liikumine, b) ristkoordinaadistikus liikumine ja c) tööriista tsentri pööramine ümber telje.



Joonis 4.42. Liikumisviiside valiku avamine virtuaalse õpetamispuhli ekraanil



Joonis 4.43. Liikumisviiside valik virtuaalse õpetamispuhli ekraanil

## 4.8.2 Roboti juhtimisprogrammi koostamine õpetamispuldiga

### Ülesande lahendamiseks on vajalik:

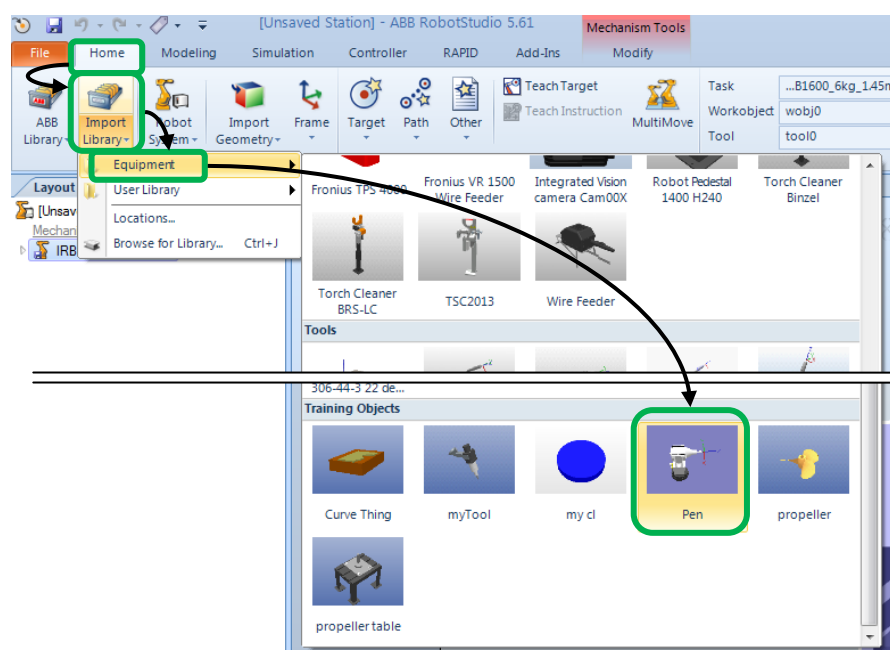
arvuti, millele on paigaldatud ABB RobotStudio täisversioon.

### Ülesande eesmärk:

Õppida virtuaalses robotisüsteemis tundma roboti programmeerimist õpetamispuldiga, objektide lisamist süsteemi ning tööriista sidumist roboti manipulaatoriga.

### Töö käik tööetappide kaupa:

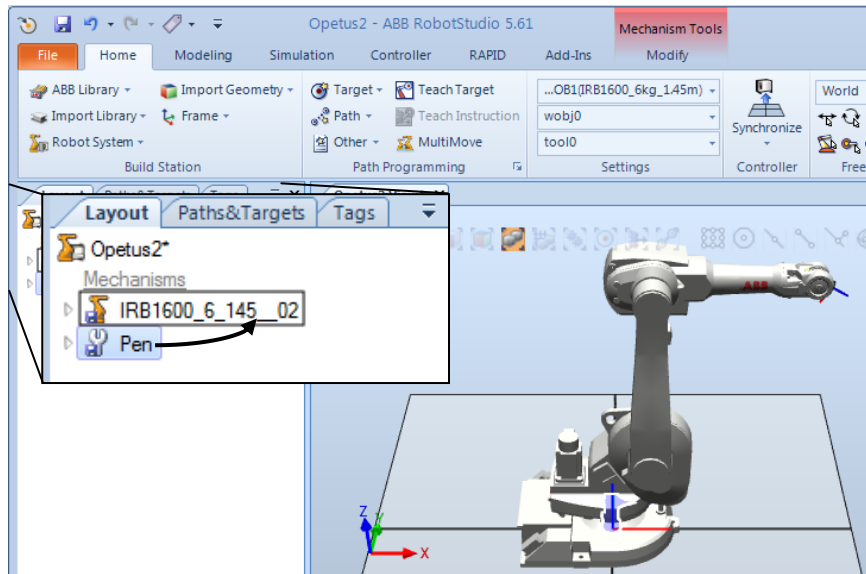
1. Käivitada ABB RobotStudio (vt pt 4.8.1 tööetapp 1).
2. Luua uus virtuaalne robotisüsteem (vt pt 4.8.1 tööetapp 2). Valitav robot on 6 kg tõstejõu ja 1,45 m haardeulatusega IRB1600.
3. Lisada tööriist ja siduda see roboti manipulaatoriga. ABB RobotStudios on olemas roboti standardtööriistad, mida saab kasutada robotisüsteemi koostamisel. Need saab leida menüüst *Home* mööda järgmist otsingurada: *Import Librtrary* → *Equipment*. Pildile vajutamisel valitakse ja lisatakse sealt nt tööriist nimega *Pen* (vt joonis 4.44). Tööriist ilmub nii 3D-aknasse (paikneb enamasti roboti sees) kui ka brauserisse *Layout* uue kaustana, nt nimega *Pen* (vt joonis 4.45).



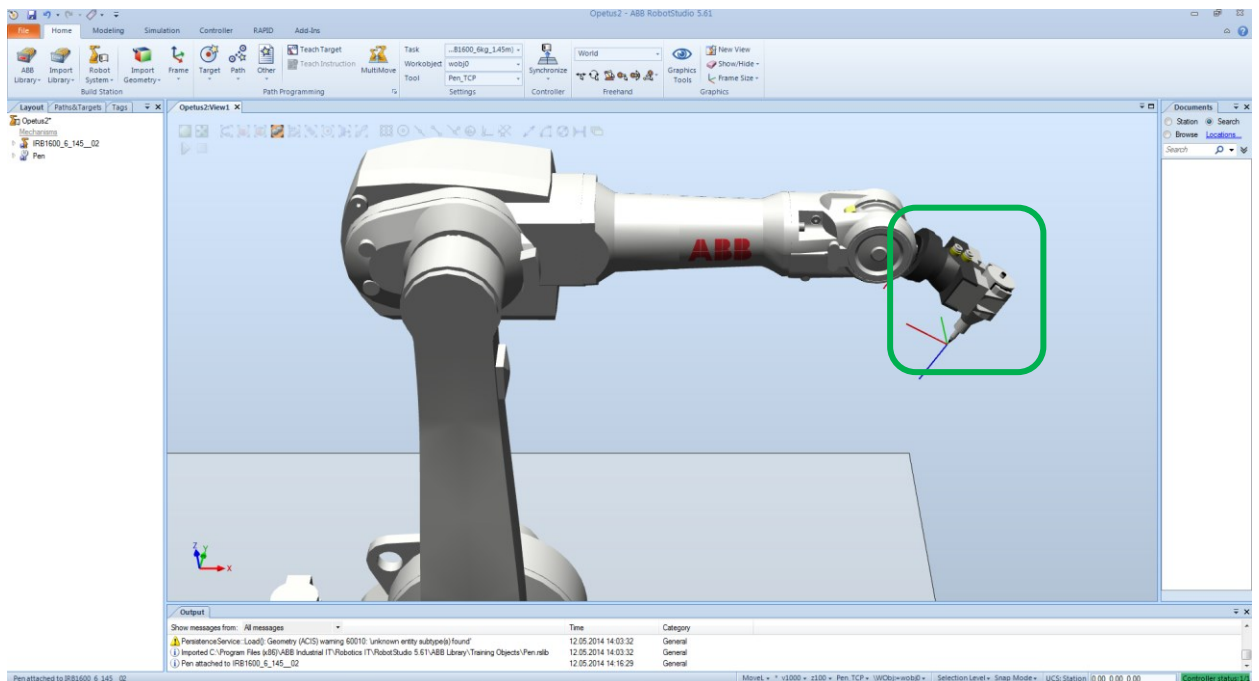
Joonis 4.44. *Pen* tööriista lisamine robotisüsteemi

Tööriista sidumiseks roboti manipulaatoriga valitakse brauseris *Layout* tööriistakaust ja veetakse see roboti kausta (nimi on IRB1600\_6\_145\_\_02). Seepeale avaneb aken, kus küsitakse, kas soovite värskendada tööriista positsiooni („Do you want to update the position of Pen“). Sellele

tuleb vastata jaatavalt (vajutada nupule *Yes*). Pärast seda on tööriist seotud roboti manipulaatoriga (vt joonis 4.46).



**Joonis4.45. Tööriista sidumine roboti manipulaatoriga**



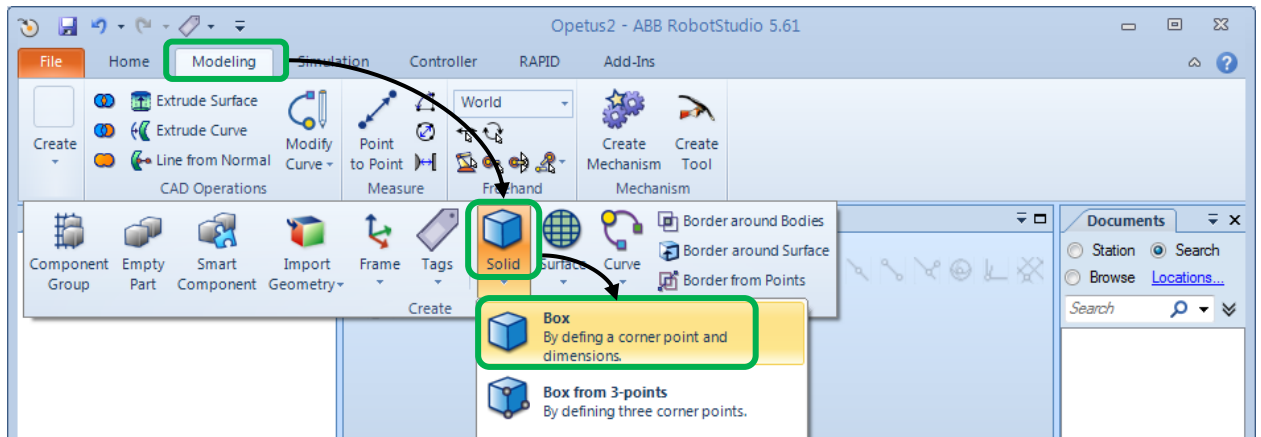
**Joonis 4.46. Manipulaatoriga seotud tööriist 3D-aknas**

4. Lisada töödeldav objekt, mille ülemise osa ümber hakkab robot tööriista liigutama. Objektiks on kast, mis lisatakse menüüst *Modeling* valikuga *Solid* → *Box* (vt joonis 4.47). Seejärel avaneb paneel *Create Box*, kus tuleb sisestada kasti alguspunkt (*Corner Point*) ja tema mõõtmed (*Length* – sügavus, *Width* – laius, *Height* - kõrgus). Antud näite arvvaartused on

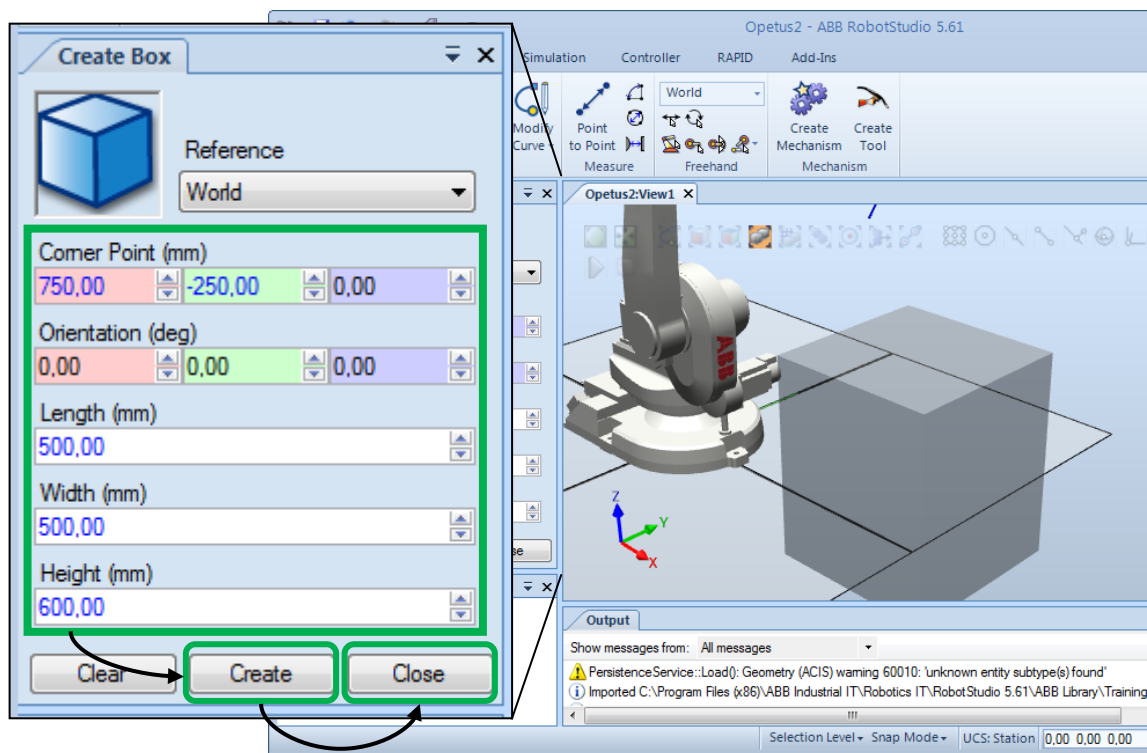


esitatud joonisel 4.48. Juba enne kasti loomist on tema asukoht ja suurus näha 3D-aknas. Kui kõik väärtused on sisestatud, siis tuleb vajutada nupule *Create* ning seejärel nupule *Close*.

5. Aktiveerida/avada virtuaalne õpetamispult ja anda sellele manipulaatori juhtimisõigused (vt pt 4.8.1 tööetapid 4 ja 5).



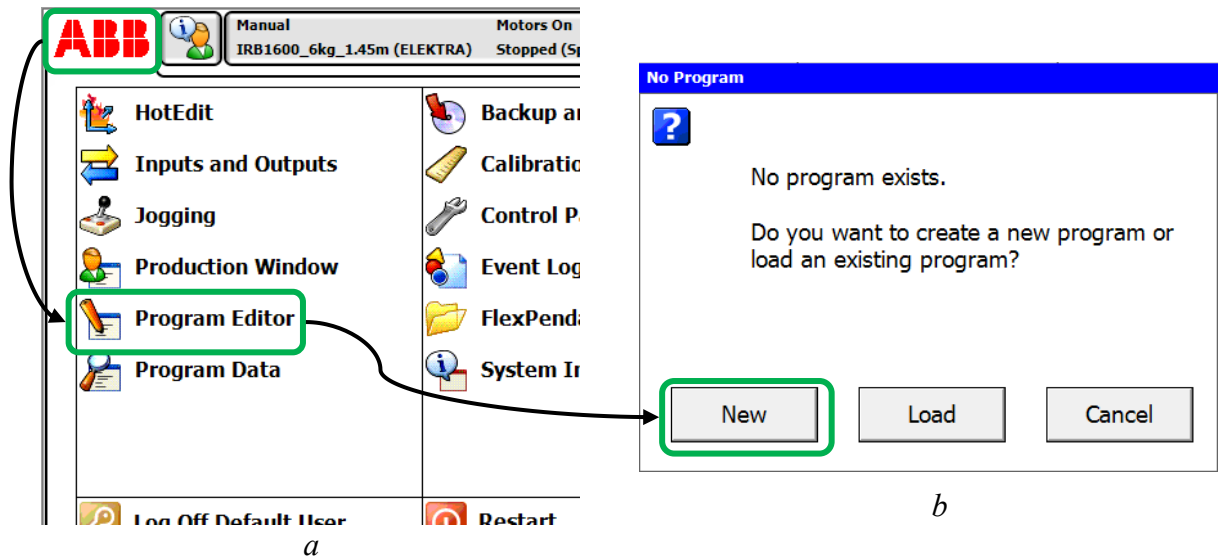
**Joonis 4.47. Kasti loomise alustamine ABB RobotStudios**



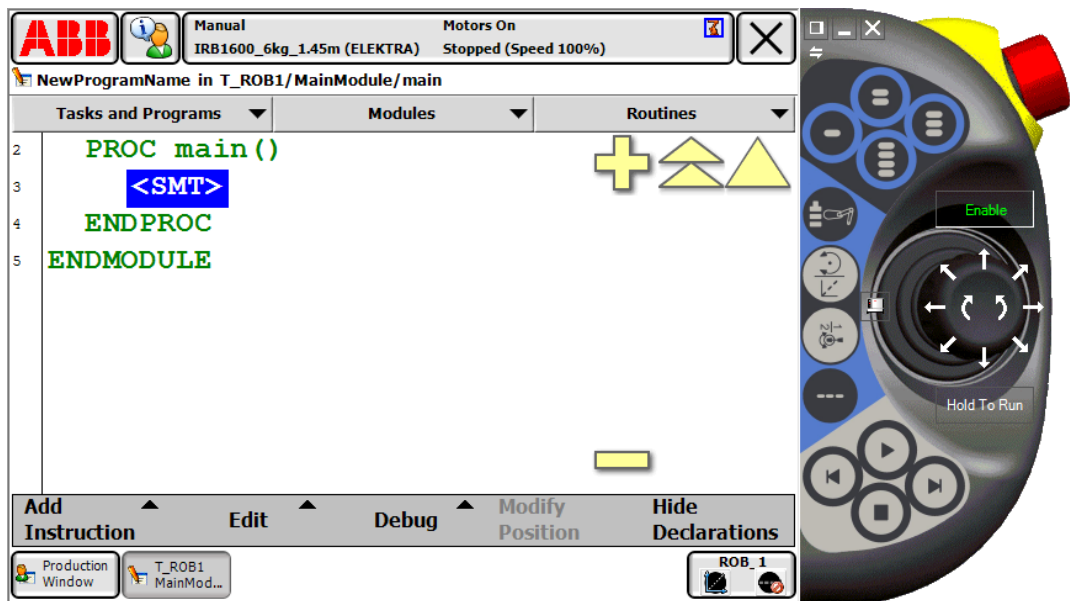
**Joonis 4.48. Kasti parameetrite sisestamine ja selle loomine**

6. Luua roboti uus juhtimisprogramm. Selleks tuleb vajutada virtuaalse õpetamispuldi ekraanil *ABB* ikoonile ja sealt valida edasi *Program Editor* (vt joonis 4.49 a). Seejärel küsitakse, kas te soovite luua uue programmi või avada olemasoleva programmi (vt joonis 4.49 b).

Vastuseks tuleb vajutada nupule *New*. Seepeale avaneb joonisel 4.50 näidatud kuva programmi loomiseks.

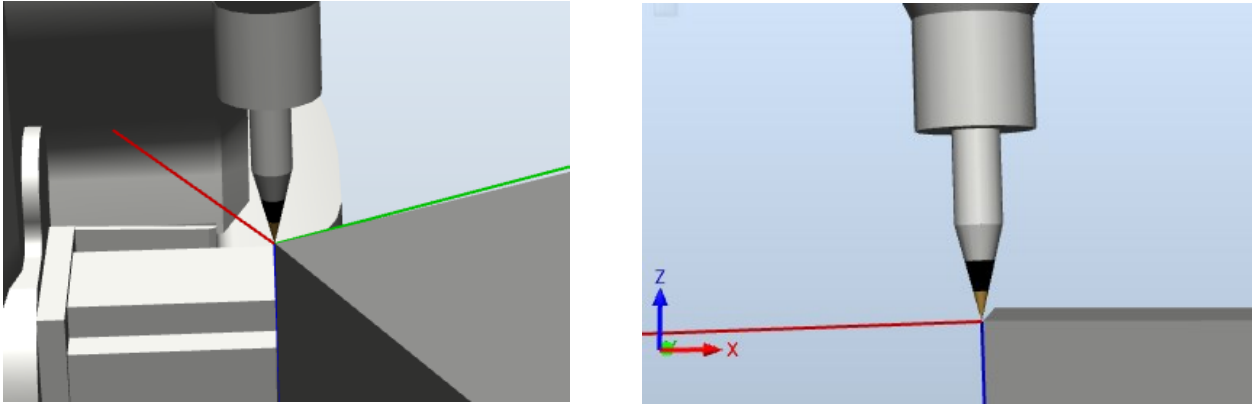


Joonis 4.49. Uue programmi loomine virtuaalses õpetamispuldil



Joonis 4.50. Virtuaalses õpetamispuldi kuva programmi kirjutamiseks

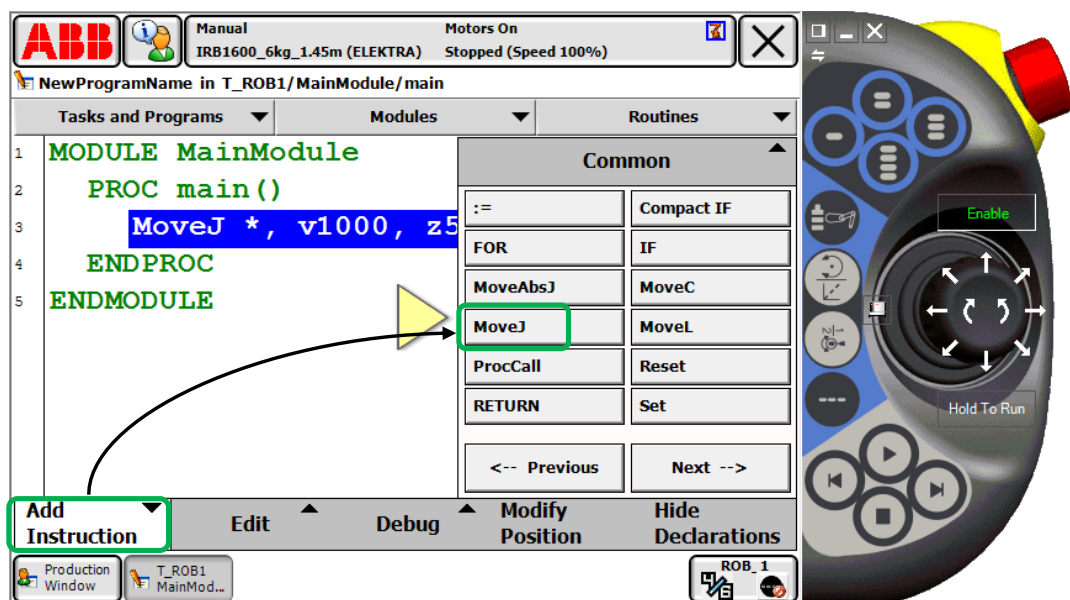
- Liigutada tööriista tšenter kasti ühe ülemise nurga juurde nagu on näha joonisel 4.51 (vt p 0 töötapid 6 ja 7). Otstarbekas on vaadata tööriista asukohta eri nurkade alt ning liikuda aeglasema kiirusega võimalikult täpselt soovitud punkti. Kiirust saab puldil muuta protsentväärtuse +/- nuppudega (vt joonis 4.43).



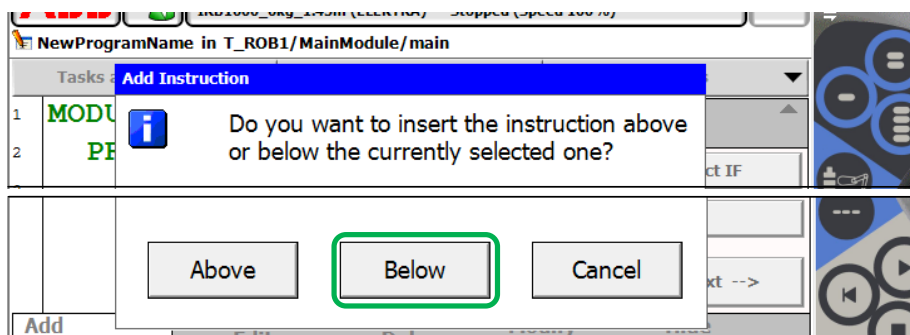
**Joonis 4.51. Tööriista paiknemine kasti ühe nurga juures erinevate vaatenurkade alt**

8. Salvestada manipulaatori positsioon koos käsuga. Selleks valida programmi kirjutamise ekraanil *Add Instruction* ja sealt edasi vajutada käsule *MoveJ* (vt joonis 4.52). Sedasi lisatakse liikumiskäsk koos positsiooniga roboti juhtimisprogrammi.
9. Käia läbi kõik kasti ülemised nurgad ja salvestada need koos liikumiskäsuga. Korrata töötappe 7 ja 8 kuni kõik neli positsiooni on salvestatud. Joonisel 4.54 on näidatud info kõigi nelja nurga kohta eraldi neljal programmireal.

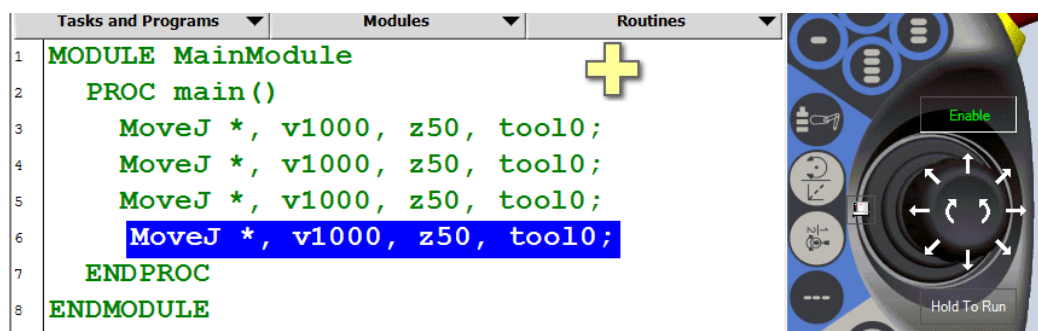
Kui uue käsu sisestamisel küsitakse, kas lisada see olemasoleva rea ette või järgi, siis vajutada nupule *Below* (vt joonis 4.53).



**Joonis 4.52. Positsiooni salvestamine koos liikumiskäsuga virtuaalse õpetamispuldi abil**



**Joonis 4.53. Uue programmirea lisamise valik**



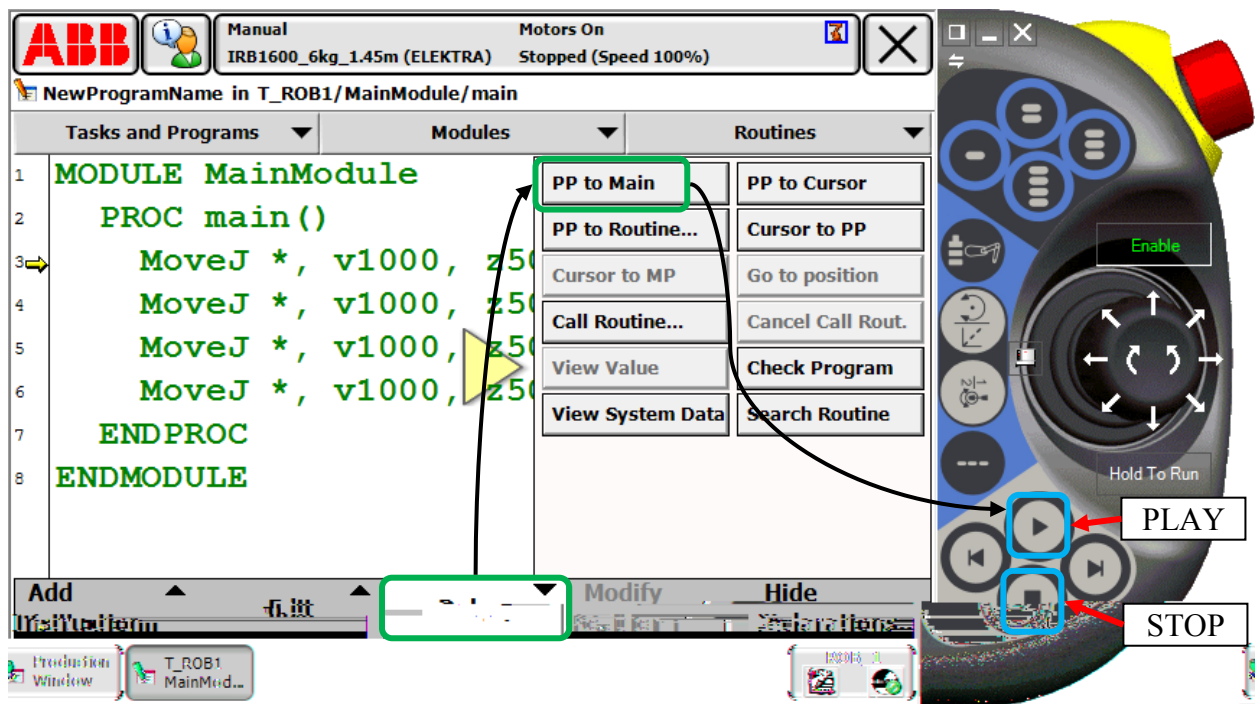
**Joonis 4.54. Valmiskirjutatud programm virtuaalse õpetamispuldi ekraanil**

10. Testida koostatud programmi. Kontrollida, kas juhthoova juures olev nupp *Enable* on aktiivne (vt joonis 4.39 c). Seejärel valida virtuaalse õpetamispuldi ekraanil *Debug* → *PP to Main* (vt joonis 4.55). Selle peale peab tekkima kollane nool esimese liikumiskäsu ette. See näitab, millist programmirida robot hakkab täitma. Järgmisena vajutada nupule *PLAY* (vt joonis 4.55).

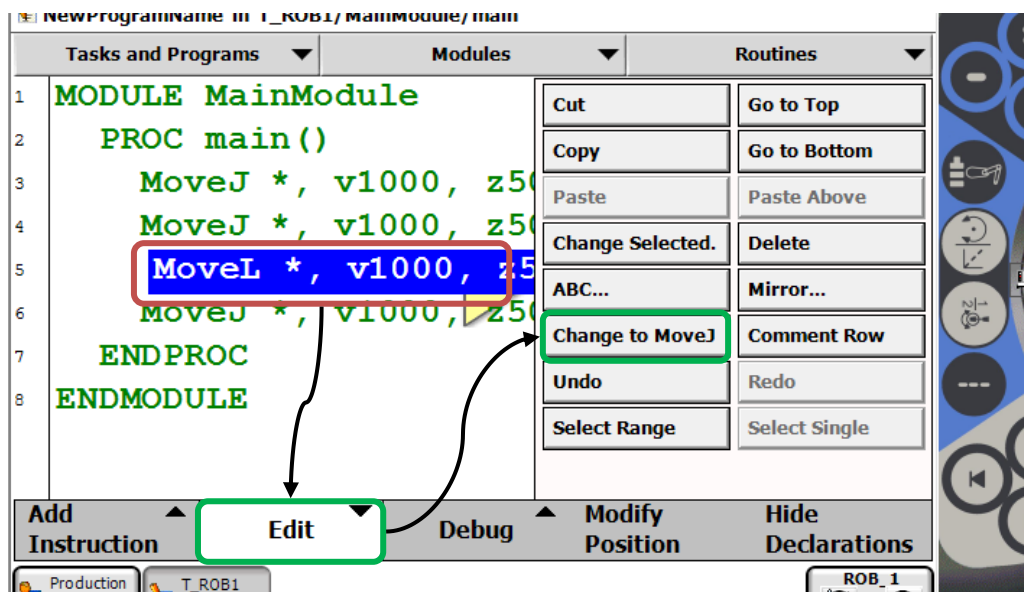
Nüüd peaks roboti manipulaator liikuma 3D-aknas seni, kuni vajutatakse virtuaalsel õpetamispuldil nupule *STOP*. Kui roboti liikumist pole ABB RobotStudios näha, siis tuleb teha kogu robotisüsteem 3D-aknas nähtavaks (vt pt 4.8.1 tööetapp 3) (välja suurendada).

Kui roboti manipulaator ei liigu üldse, siis tuleb kontrollida, kas õpetamispuldile on antud manipulaatori juhtimisõigus (vt tööetapp 5).

Kui manipulaator katkestab liikumise, siis on põhjuseks kaks võimalikku viga. Esimene põhjus võib olla sisestatud vale liikumiskäsk. Kogu programmis peab olema kasutatud käsku *MoveJ* (vt joonis 4.56). Parandamiseks tuleb valida vigane programmirida virtuaalse õpetamispuldi aknas (hiire vasak klikk vastava rea peal). Seejärel tuleb valida ekraanil *Edit* → *Change to MoveJ* (vt joonis 4.56). Kui muutmise käigus ilmub kuvale mingi teade, siis tuleb vastata sellele jaatavalt. Korrata programmi testimist.

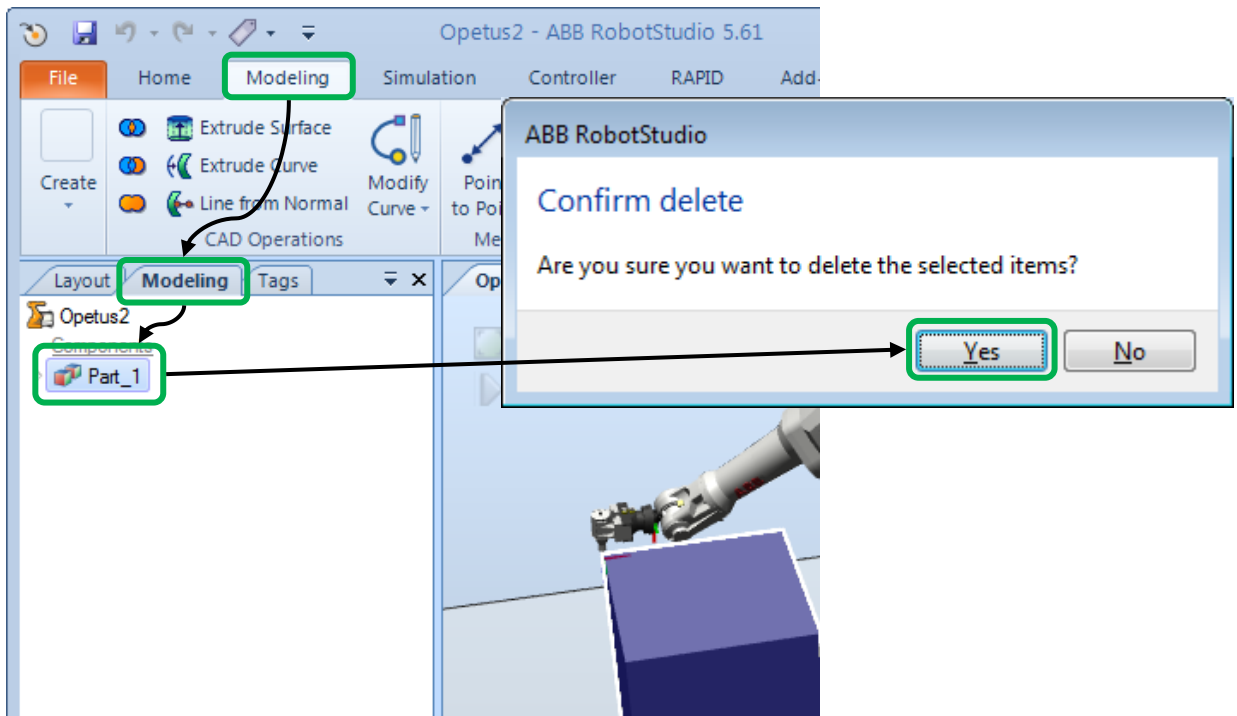


Joonis 4.55. Programmi testimine virtuaalse õpetamispuuldiga



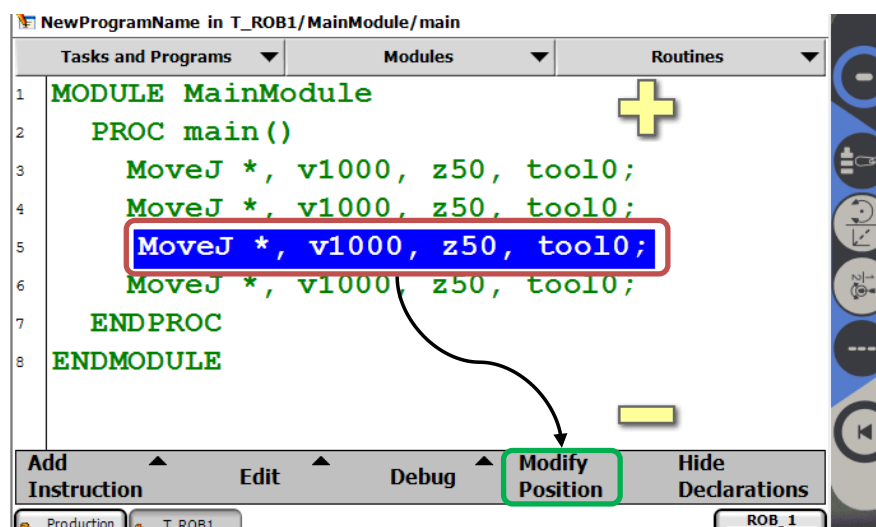
Joonis 4.56. Programmirea käsu muutmine virtuaalse õpetamispuuldiga

Teiseks võimalikuks veaks võib-olla see, et sisestatud kasti väärtused ei vasta joonisel 4.48 esitatule. Parandamiseks tuleb kast kustutada ja uuesti lisada. Kustutamiseks tuleb ABB RobotStudio menüüs *Modeling* brauserist *Modeling* valida kasti kaust (vt joonis 4.57), mille nimeks antud näites on „Part\_1“. Valikust annab märku kasti värvi muutumine 3D-aknas. Kustutamiseks vajutada *Delete* nuppu. Seepeale küsitakse, kas tahetakse kasti kustutada (vt joonis 4.57), vastuseks vajutada nuppu *Yes*. Kasti lisamiseks tuleb korrata tööetappi 4.

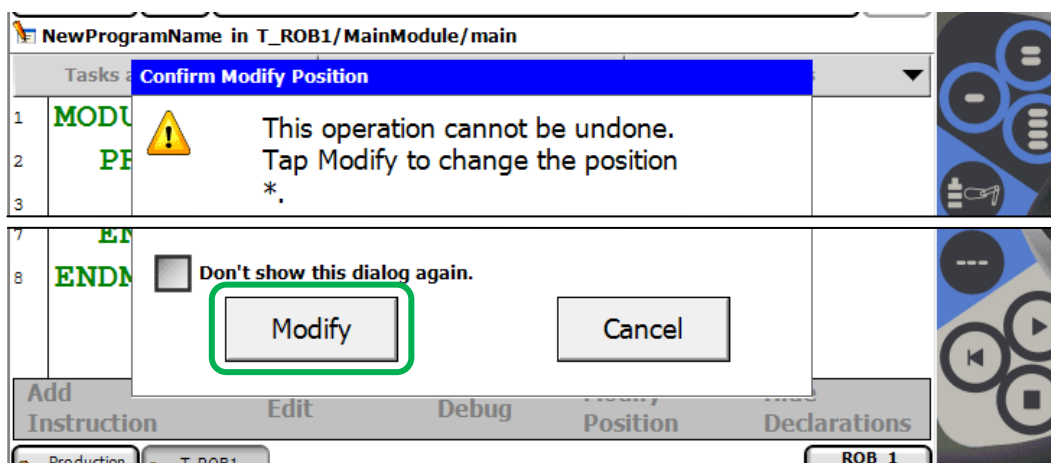


**Joonis 4.57. Kasti kustutamine ABB RobotStudio's**

Peale kasti lisamist tuleb kõik positsioonimispunktid programmis uuesti õpetada. Selleks liigutada tööriista otsapunkt kasti nurka (vt töö käiku 7), peale seda valida virtuaalse õpetamispuldi ekraanil programmirida, mille positsioonimispunkti tahetakse uuesti õpetada. Vajutada virtuaalse õpetamispuldi ekraanil *Modify Position* peale (vt joonis 4.58). Avanenud ekraanipildil (vt joonis 4.59) vajutada nuppu *Modify*. Korrata tegevust kuni kõik neli nurka on uuesti õpetatud. Seejärel testida programmi (vt antud töö käigu algust).



**Joonis 4.58. Positsiooni muutmine virtuaalse õpetamispuldi abiga**

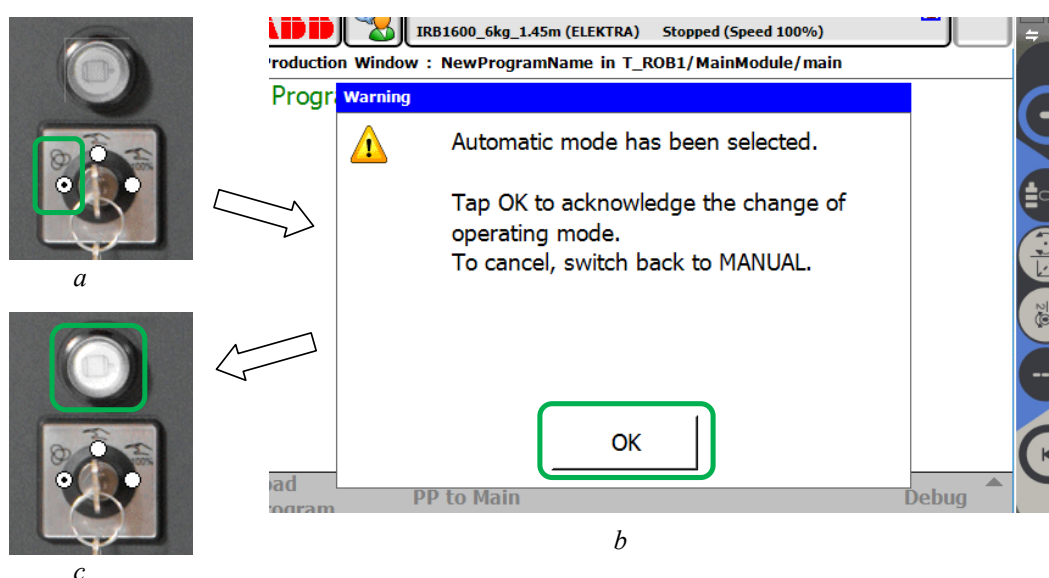


**Joonis 4.59. Positsiooni muutmise kinnitamine virtuaalsel õpetamispuldil**

Kui sellest polnud abi, tuleb kogu robotisüsteem luua uuesti alustades tööetapist 2.

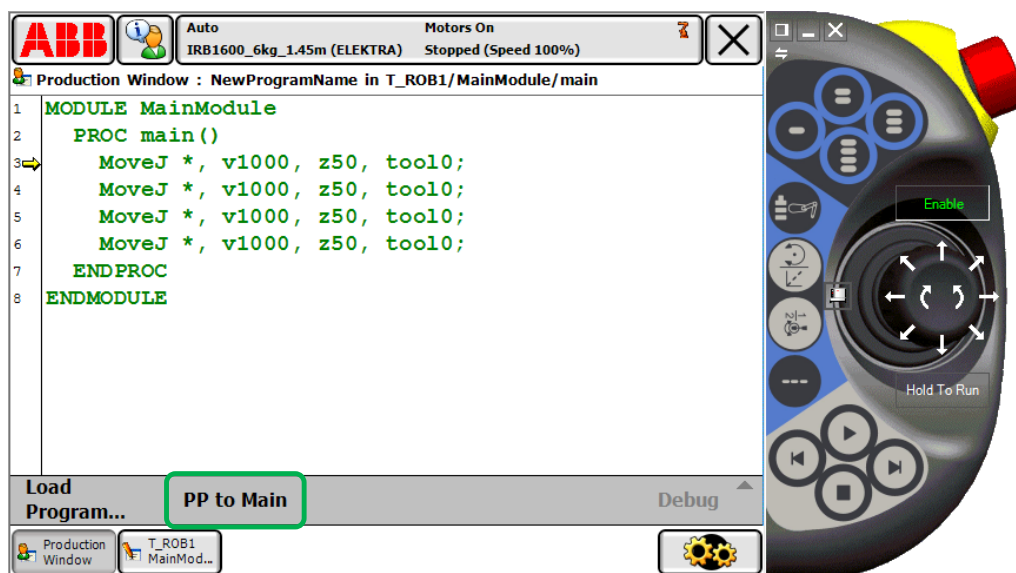
11. Käivitada programm automaatrežiimis. Selleks tuleb anda juhtimisõigus üle roboti virtuaalsele kontrolleri. Vajutada õpetamispuldil kujutatud robot juhtimisseadme ikoonile (vt joonis 4.39 a) ning valida avanenud aknas automaatjuhtimine (vt joonis 4.60 a). Seejärel kinnitada valik vajutamise nupule *OK* (vt joonis 4.60 b).

Aktiveerida roboti manipulaatori mootorid vajutades joonisel 4.60 c näidatud nupule. Mootorite aktiveerimisel muutub nupp tumedast värvist heledamaks (vt joonis 4.60 a ja c) ning virtuaalse õpetamispuldi ekraanil kuvatakse vastav teade (vt joonis 4.40).

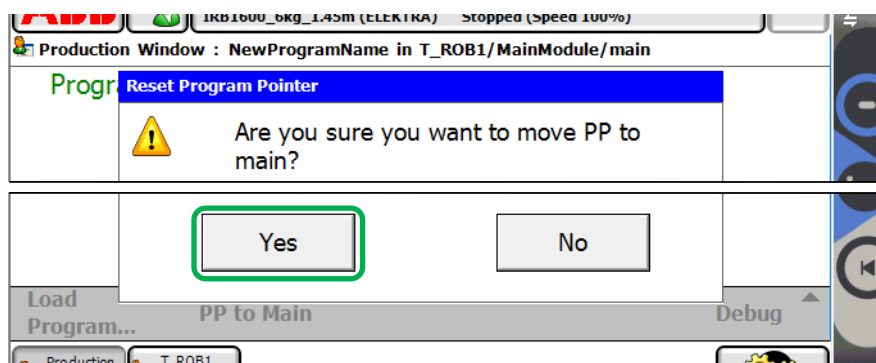


**Joonis 4.60. Roboti manipulaatori juhtimisõiguse üleandmine roboti virtuaalsele kontrolleri ja mootorite aktiveerimine virtuaalse õpetamispuldi abil.**

Järgmisena tuleb virtuaalse õpetamispuldi ekraanil vajutada *PP to Main* peale (vt joonis 4.61). Seepeale küsitakse, kas tahetakse viia programmirea näitaja põhiprogrammi. Vastuseks vajutada nuppu *Yes* (vt joonis 4.62). Seejärel kuvatakse joonisel 4.61 näidatud ekraanipilt virtuaalses õpetamispuldil.



Joonis 4.61. Aktiveeritud programm virtuaalses õpetamispuldil automaatrežiimis



Joonis 4.62. Virtuaalsel õpetamispuldil programmirea näitaja viimine põhiprogrammi

Lõpuks tuleb robot automaatrežiimis töölepanekuks vajutada virtuaalsel õpetamispuldil nupule *PLAY* (vt joonis 4.55). Roboti manipulaatori liikumist saab jälgida ABB RobotStudio 3D aknas. Sealt on näha, et manipulaator liigub kiiremini, kui ta tegi seda programmi testimise ajal.

12. Kirjeldada, kuidas roboti manipulaator liigub erinevate kastinurkade vahel ABB RobotStudio 3D-aknas.

Palju õnne! Sellega olete koostanud ja testinud edukalt oma esimest roboti juhtimisprogrammi ABB robotiga.



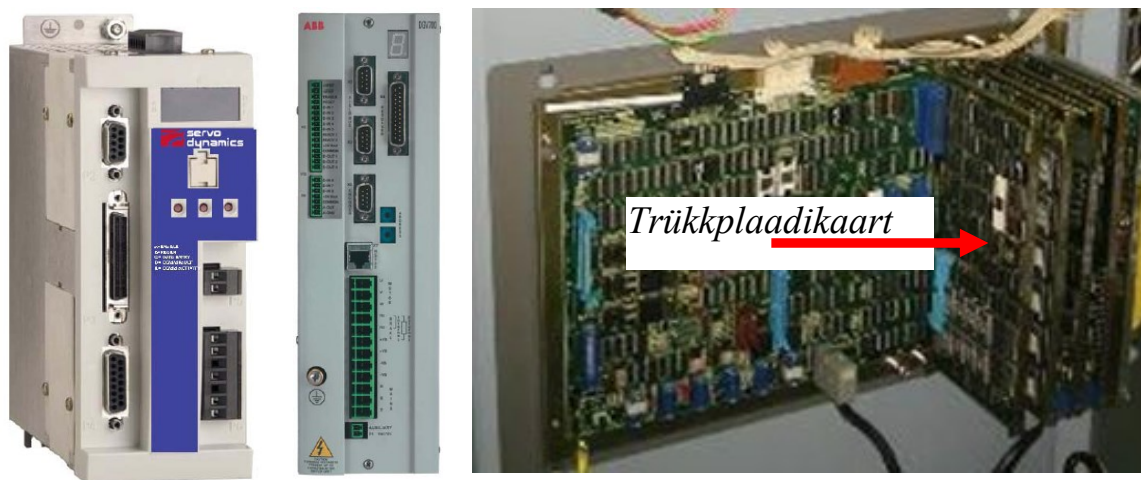
## 5. ROBOTI AJAMID

### 5.1. Servoajam ja servomootor

Roboti ajameid nimetatakse sageli servoajamiteks. Servoajam on suhteliselt väikese võimsusega ajam, mida kasutatakse tööpinkide või automaatliinide etteandemehhanismides ning ka robotite manipulaatorite tööorgani juhtimiseks. Seega on servoajami puhul esmatähtis ajami liikumistrajektoori ja kiirusdiagrammi järgimine ning täpne peatumine.

Servoajami toitemuundur on kokku ehitatud juhtseadmega ning võib asetseda kas eraldi keres (joonis 5.1) või eraldi trükkplaadikaardil. Neist esimene on universaalsete, teine spetsialiseeritud funktsioonidega. Roboti servoajami muundurid ja juhtseadmed on tavaliselt trükkplaadikaardil ning paigutatakse eraldi kappi trükkplaadikooste raamis olevatesse pesadesse või ühisesse kappi koos roboti üldjuhtseadmega. Servoajamil on ühe- või kolmefaasiline toide. Juhtimiseks vajalik info saadakse andurilt, mis on kokku ehitatud servomootoriga või asetsevad juhitaval mehhanismil. Näiteks saadakse asendiinfo mootorisse sisseehitatud Halli andurilt või eraldi asendiandurilt, nt resolverilt. Servoajami juhtsignaalid võivad tulla analoogallikatelt, sisendväljundliidestest, RS485-liidestest või andmevõrkude *CAN open*, *Profibus-DP*, *DeviceNet*, *Modbus* jt kaudu.

Servoajamiga juhitakse servomootori momenti, kiirust ja asendit. Sisuliselt antakse servoajamile ette asendi, kiiruse ja kiirenduse muutumise ajadiagramm, mida servoajam püüab võimalikult täpselt järgida.



Joonis 5.1. Eraldi keres (a, b) ja trükkplaadikaardil (c) paiknevad servoajami juhtseadmed

Ajamis kasutatakse erinevaid juhtimismooduseid nagu asendi absoluutset ja suhtelist digitaalset positsioonjuhtimist, kiiruse analoog- ja digitaaljuhtimist, momendi analoog- ja digitaaljuhtimist ning mitme ajami kiiruste ja asendite sünkroniseerimist, mille tõttu saab mitme ajamiga realiseerida ruumis etteantud trajektoore (nt roboti liikumist). Ajamis on kasutusel järgmised juhtimismoodused:

- momendi juhtimine analoogsisendi seadesuuruste järgi (*analog torque mode*);
- kiiruse juhtimine analoogsisendsignaali järgi (*analog speed mode*);
- asendi juhtimine sihtasendi digitaalsignaali järgi (*profile position mode*). Asendi juhtimine võib toimuda punktist punkti (*point to point*) liikumise põhimõttel, kus kontrollitakse ainult tegeliku ja sihtasendi erinevust või trajektoori pideva järgimise põhimõttel;
- kiiruse juhtimine digitaalsignaali järgi (*profile velocity mode*);
- momendi juhtimine digitaalsignaali järgi (*profile torque mode*);
- positsioonimeetodite valikumoodus (*homing mode*);
- väikese ulatusega roomeliikumismoodus (*jogging Mode*). Roomeliikumist kasutatakse nt ajami seadistamisel või trajektoori programmeerimisel etteegemisega;
- kahe mehaanilise süsteemi (koordinaattelje) kiiruse või asendi sünkroniseerimine (*synchronization mode*). Mitme ajami puhul töötab üks ajamitest ülemseadmena MASTER, teine aga alluvseadmena SLAVE;
- trajektoori interpoleerimine (*interpolated position mode*).

Kõiki loetletud juhtimismooduseid saab servoajami seadistamisel programmiliselt valida.

## Servomootor

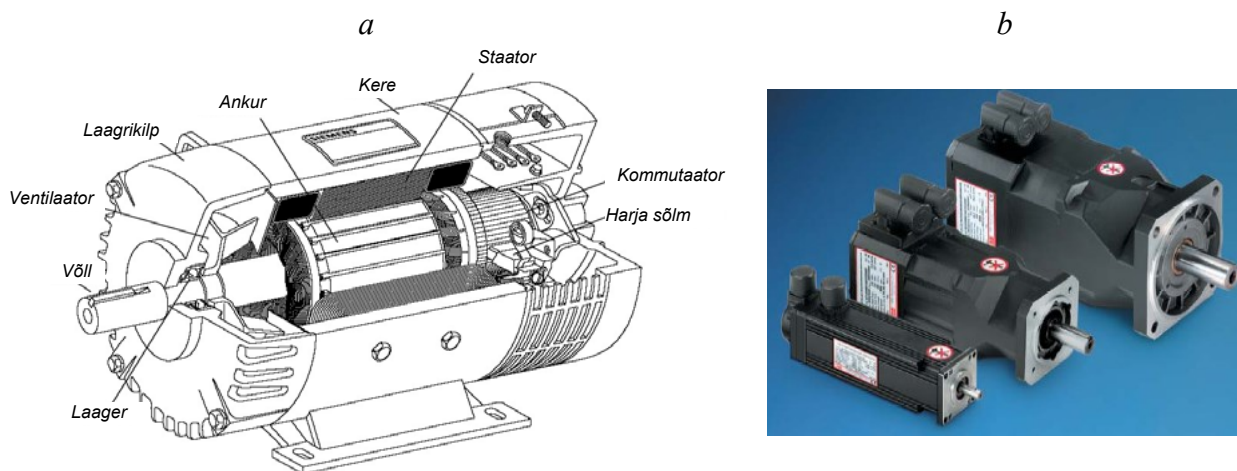
Servoajamis kasutatakse peamiselt kolme liiki elektrimasinaid: tavalisi ehk harikommutaatoriga alalisvoolumasinaid, püsिमagnetergutusega sünkroonmasinaid (*permanent magnet synchronous motor, PMSM*) ja asünkroonmasinaid (*induction motor, IM*). Püsिमagnetergutusega sünkroonmasinat saab juhtida kahel viisil - sünkroonmasina moodi ja alalisvoolumasina moodi. Viimasel juhul nimetatakse masinat ka harjadeta alalisvoolumasinaks (*brushless DC motor* ehk *BLDC motor*). Kui loetletud elektrimasinad on suhteliselt väikese võimsusega ning neid kasutatakse servoajamis, siis nimetatakse neid servomootoriteks.

Tavalise ehk **harjadega alalisvoolumasina** ergutusväli tekitatakse staatoril olevate ergutusmähiste või püsिमagnetitega. Rotoril (ankrul) paiknevaid mähiseid toidetakse läbi kommutaatori. Vool juhitakse ankrumähisesse harjadega, mis libisevad ankrumähisega ühendatud kommutaatori lestadel (lamellidel). Ankru pöörlemisel liiguvad harjad ühelt lestalt teisele, muutes sellega voolu suunda masina neutraalteljel olevas ankrumähises.

**Harjadeta alalisvoolumasina** puhul asuvad kommuteeritavad mähised staatoril ning ergutusvoo tekitavad rotoril paiknevad püsिमagnetid. Staatori mähiseid kommuteeritakse pooljuhtlülititega (pooljuhtmuunduriga). Sünkroonmasin ja alalisvoolumasin erinevad oma tööpõhimõttelt

teineteisest vaid selle poolest, et sünkroonmasinas kommuteeritakse mähiseid toitevõrgu vahelduvvoolu konstantse sagedusega, alalisvoolumasinas aga vastavalt rootori asendile staatori suhtes. Koormusmomendi suurenemisel kasvab sünkroonmasina koormusnurk, s.o rootori mahajäämus staatori pöörlevast väljast, kuid välja kommuteerimise sagedus ja pöörlemiskiirus jäävad konstantseks. Alalisvoolumasinas põhjustab koormusmoment samuti rootori mahajäämuse staatori pöörlevast väljast, kuid ühtlasi väheneb staatori mähiste kommuteerimise sagedus ning koos sellega hakkab aeglustuma ka rootori pöörlemine.

Harjadega alalisvoolumootori ehitus on joonisel 5.2 a. Masin koosneb paigalseisvast staatorist (*stator*) ja pöörlevast rootorist (*rotor*). Servomootori puhul tekitatakse pooluste magnetväli staatoril olevate püsimagnetite abil. Poolused on kinnitatud masina terasest ikke külge, mis on ühtlasi masina kere ja magnetahela osa. Üldjuhul nimetatakse elektrimasina osa, milles luuakse magnetväli, induktoriks. Induktori magnetväljas liiguvad vooluga juhtmed. Et saavutada masina pidevat pöörlemist, tuleb juhtme liikumisel ühe pooluse (*N*, *north*) alt teise (*S*, *south*) alla muuta voolu suunda. Masinaosa, mis koosneb vooluga juhtmetest ja voolu suunda muutvast kommutaatorist (*commutator*), nimetatakse alalisvoolumasina ankruks (*armature*). Traditsioonilistes alalisvoolumasinates kasutatakse mehaanilist kommutaatorit, mis koosneb lestadest (lamellidest), mille külge on ühendatud ankrumähise harud, ja lestadel libisevatest harjadest. Harjad ja lestad moodustavad liikuva elektrilise kontaktsõlme, mille kaudu elektrivool juhatakse ankrumähisesse. Rotor (ankur) pöörleb laagritele toetuvall võllil. Võlli veotapp (nimetatakse ka võlli A-tapiks) ulatub mootori kerest välja ning selle külge ühendatakse liistu abil mootoriga käitav mehhanism.

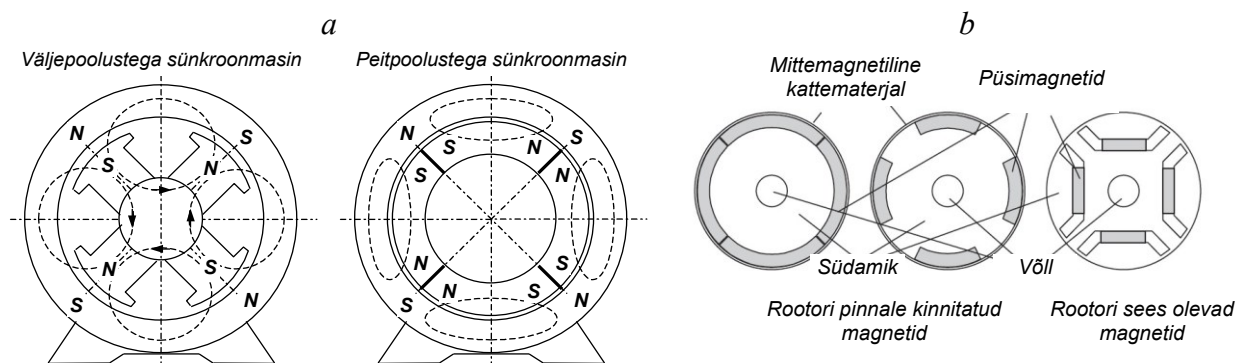


**Joonis 5.2. Alalisvoolumasina ehitus: harjadega alalisvoolumootor *a* ja püsimagnetergutusega masinad *b***

Alalisvoolumasina puhul hakkab koormuse suurenemisel kiirus pidevalt vähenema ning masina vool suurenema. Ülekoormatud mootor arendab vaatamata kiiruse vähenemisele üha suuremat momenti. Seega talub alalisvoolumootor lühiajalisi ülekoormusi ning sobib hästi ka tsüklilise koormusega töötavatesse ajamitesse.

**Püsimagnetergutusega (harjadeta) sünkroonmootoril** on 3-faasiline staatorimähis (joonis 5.3), mis tekitab pöörleva magnetvälja. Mootori rootoris tekitatakse aga püsimagnetergutusega veel teine magnetvoog (ergutusvoog), mis magnetahela kaudu aheldub staatorimähise magnetvooga. Selle tulemusena haarab staatori pöörlev magnetväli rootori endaga kaasa, s.t staatorivälja N-poolused tõmbuvad rootori S-poolustega ja vastupidi, ning rootor hakkab pöörlema staatorivälja sünkroonkiirusel.

Sõltuvalt sünkroonmasina rootori kujust ja pooluste asetusest eristatakse väljepoolustega (*salient pole*) ja peitpoolustega (*non-salient* või *consequent pole*) masinaid (joonis 5.3). Esimesel juhul on rootori poolused selgesti eristatavad ning õhupilu on minimaalne pooluse kohal. Teisel juhul on rootori pind sile ning õhupilu on ühtlane kogu ulatuses. Väljepoolustega masin töötab ka ilma ergutusväljata, s.t ilma ergutuseks kasutatavate püsimagnetiteta. Sel juhul on tegemist nn reaktiivse sünkroonmootori ehk reluktantsmootoriga (*reluctance motor*), mille töö põhineb õhupilu magnetilise takistuse (ehk reluktantsi) muutumisel sõltuvalt rootori asendist. Niisuguste sünkroonmasinate eriliigiks on ka samm-mootorid. Sünkroonmasin säilitab koormuse suurenemisel kuni teatud piirini konstantse kiiruse. Liigkoormuse korral on oht, et masin langeb sünkronismist välja ning seiskub täiskiiruselt.



**Joonis 5.3. Püsimagnetergutusega mootori tööpõhimõte: masina tüübid a ja püsimagnetite paigutus rootoril b**

Elektrimasina konstruktsioon määrab ära genereeritava vastuelektromotoorjõu lainekuju. Püsimagnetergutusega sünkroonmasinate puhul saab eristada kahte tüüpilist konstruktsiooni. **Püsimagnetergutusega sünkroonmasin PMSM** ja **harjadeta alalisvoolumootor BLDC** on küll sarnased, kuid nende rootori ehitus on mõneti erinev. Esimesel juhul tagab masina magnetahela ja mähiste ehitus siinuslainekujulise (*sinusoidal back-emf*), teisel juhul aga trapetslainekujulise (*trapezoidal back-emf*) vastuelektromotoorjõu. Sellest tulenevalt on erinevad ka muundurist mootorile antavad pinged. PMSMi juhitakse siinuslainega ja BLDCd trapetslainega. PMSM töötab vaikselt ning tema momendi värelus on väiksem. Püsimagnetid võivad paikneda rootori pinnal või sees. Rotori sees olevate magnetite puhul on masina mähiste induktiivsus suurem. Suurema induktiivsuse puhul hilineb voolu tekkimine mähises ning masina juhtimine alalisvoolumootori põhimõttel muutub keerukamaks. Järelikult peab harjadeta alalisvoolumootori puhul masina mähiste induktiivsus olema väiksem ja paremini sobib pinnale

paigutatud magnetitega rootor. Sünkroonmasina puhul võimaldab aga sisseehitatud magnetitega rootor saada u 15% suuremat momenti.

Sünkroonmootor arendab momenti ainult sünkroontalitluses. Sünkroonmasina kiirust reguleeritakse toitepinge sageduse reguleerimisega

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \text{ p/min, millest nurkkiirus } \omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \text{ s}^{-1} \quad (5.1)$$

kus  $f_1$  on toitepinge sagedus ja  $p$  masina pooluspaaride arv.

Sünkroonmasina elektriline võimsus ja elektromagnetiline moment

$$P_{el} = 3 \cdot U_S I \cos \varphi \quad (5.2)$$

$$T_{em} = \frac{P_{el}}{\omega_0} = \frac{3 \cdot U_S I \cos \varphi}{\omega_0} \quad (5.3)$$

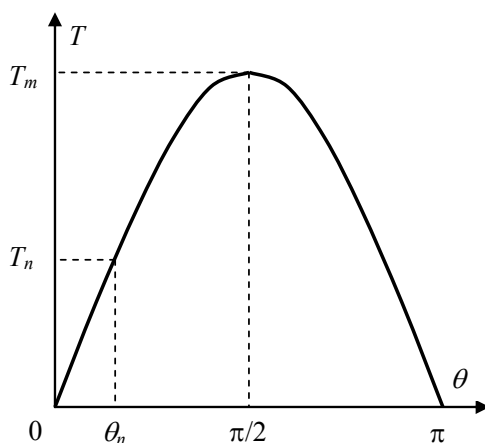
kus

$I$  - staatori faasivool,

$U_S$  - võrgupinge,

$\varphi$  - võrgupinge ja staatorivoolu vektorite vaheline nurk.

Sünkroonmootori momendi-nurga tunnusjoon on joonisel 5.4. Masina pöörlemisel tekkiva elektromotoorjõu ja võrgupinge vektorite vaheline nurk  $\theta$  on ühtlasi masina koormusnurk, millest sõltub masina poolt tekitatav moment. Koormusnurga suurenemisel üle  $\pi/2$  hakkab moment vähenema. See nurk on masina stabiilsuspiiriks. Suurel koormusel ei suuda mootor enam tasakaalustada koormusmomenti ning mootor langeb sünkronismist välja. Selleks et normaaltalitluses oleks mootoril teatav momendivaru, valitakse tavaliste sünkroonmootorite puhul nimitalitlusele vastav koormusnurk suhteliselt väike (alla  $\pi/4$ ).



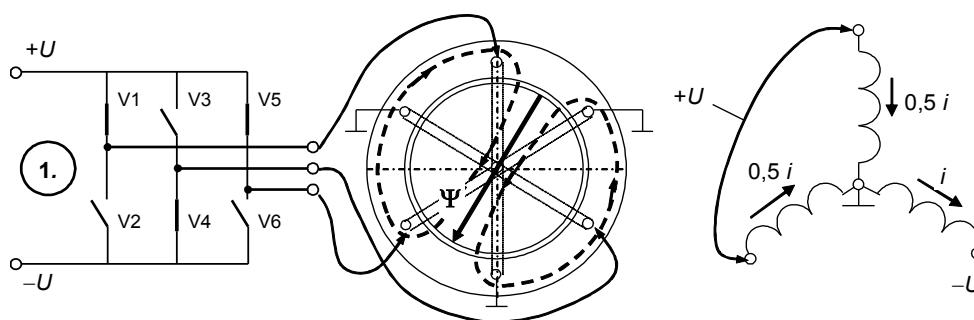
**Joonis 5.4. Sünkroonmootori momendi-nurga tunnusjoon**

Moodsates servoajamites juhitakse automaatselt mootori momenti. Mootor arendab maksimaalset momenti juhul, kui teda juhitakse alalisvoolumootorile iseloomulikul viisil, s.t staatorimähiseid kommuteeritakse nii, et koormuse muutumisel hoitakse masina rootori magnetvälja ja staatori vooluvektorid teineteisega risti.

Mootori töötamiseks on staatorimähisega vaja tekitada pöörlev magnetväli, mis haarab endaga kaasa rootoril paiknevad püsomagnetid ning sunnib rootorit pöörlema koos magnetväljaga.

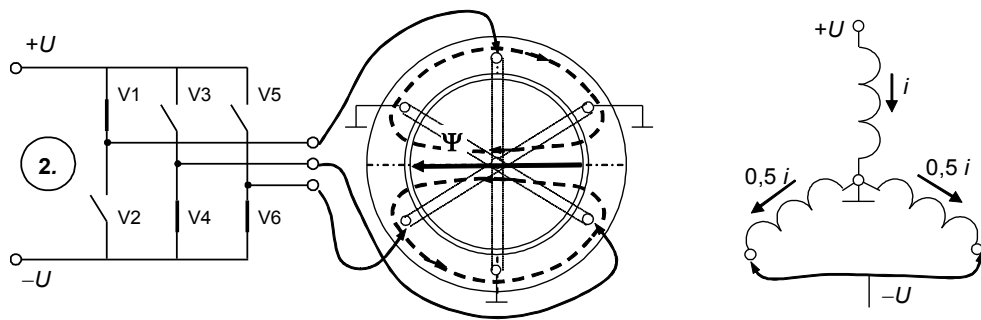
**Pöörlev magnetväli tekitatakse** toitemuunduri pooljuhtventiilide kommuteerimisega (joonis 5.5, *a...f*). Muunduri lülititel on kokku kaheksa erinevat lülitusolekut. Neist kahel juhul võrdub väljundpinge nulliga, s.t siis kui kõigi faaside lülitid on ühendatud alalispinge sama potentsiaali (+ või -) siiniga. Ülejäänud kuuel juhul antakse mootori mähistele pinge, mis omakorda tekitab voolu ja magnetvoo. Magnetvoo suuna saab määrata parema käe kruvireeglga. See tähendab, et kui kruvi liigub voolu suunas, siis tekitatakse juhtme ümber magnetvoog, mille suunda näitab parema käe kruvipea pöörlemis-suund. Järgnevatel joonistel näeb pooljuhtmuunduri ventiilide kommuteerimise järjekorda, voolu suunda eri etappidel ning sellest tulenevat pöördmagnetvälja tekkimist mootoris. Märkigem, et summaarne magnetvoog haarab juhte, mille voolu suund on sama. Samal viisil tekitatakse vool peaaegu kõikides elektrimootorit toitvates sagedusmuundurites.

**1. etapp.** Pooljuhtmuunduri ventiilid V1, V4 ja V5 juhivad voolu staatorimähisesse. Voolu suund ning suhteline suurus faasimähistes on näidatud paremal. Summaarse vooluvektori suuna saab leida kõigi kolme faasi vooluvektorite summeerimise teel. Voolud tekitavad summaarse magnetvälja, mille suunavektor on vooluvektoriga risti ja see on joonisel näidatud rasvaselt. Sama märkus kehtib kõikide järgmistel joonistel 5.5, *a...f* näidatud kommuteerimise etappide kohta. Nagu joonistelt on näha, pöörduvad igal järgmisel etapil nii voolu kui ka magnetvälja vektorid eelmise etapiga võrreldes 60 kraadi võrra. Kuue etapi tulemusena teevad vektorid täispöörde.



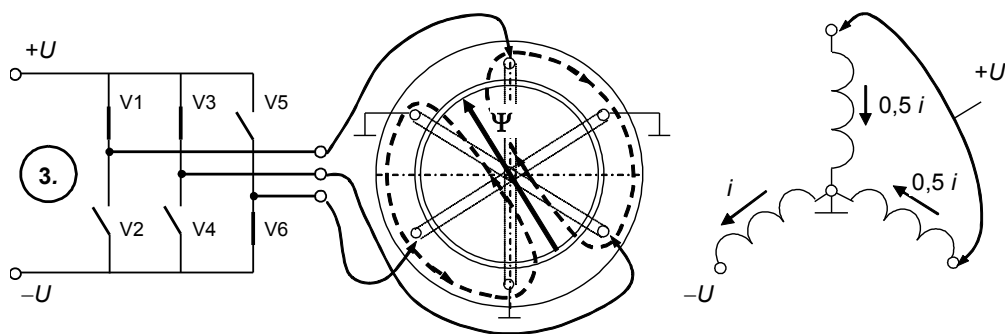
Joonis 5.5, *a*

**2. etapp.** Pooljuhtmuunduri ventiilid V1, V4 ja V6 juhivad voolu staatorimähisesse. Võrreldes eelmise etapiga on magnetvälja vektor pöördunud 60° päripäeva.



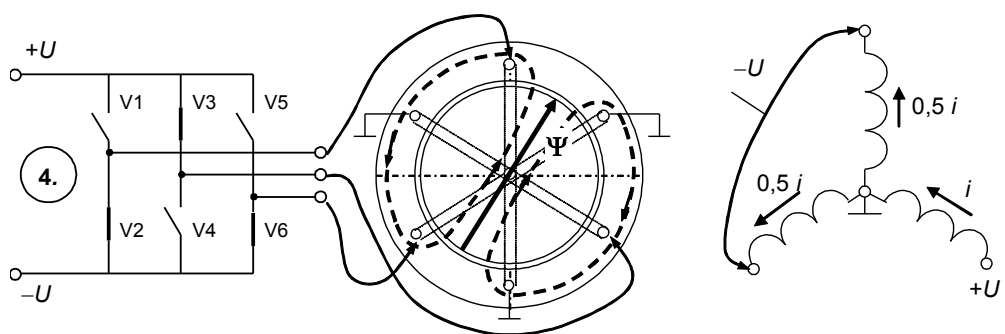
Joonis 5.5, b

**3. etapp.** Pooljuhtmuunduri ventiilid V1, V3 ja V6 juhivad voolu staatorimähisesse. Võrreldes eelmise etapiga on magnetvälja vektor pöördunud  $60^\circ$  päripäeva.



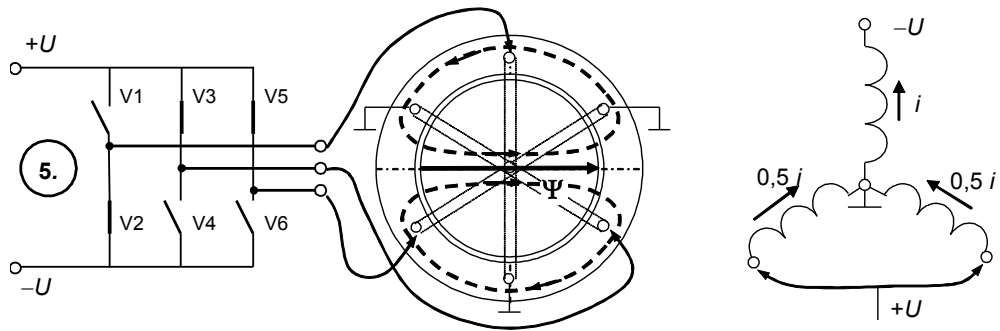
Joonis 5.5, c

**4. etapp.** Pooljuhtmuunduri ventiilid V2, V3 ja V6 juhivad voolu staatorimähisesse. Voolu suund ning suhteline suurus faasimähistes on näidatud paremal. Võrreldes eelmise etapiga on magnetvälja vektor pöördunud  $60^\circ$  päripäeva.



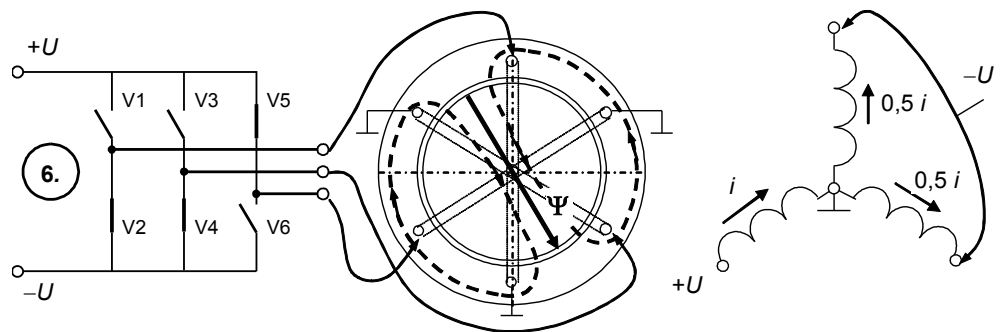
Joonis 5.5, d

**5. etapp.** Pooljuhtmuunduri ventiilid V2, V3 ja V5 juhivad voolu staatorimähisesse. Voolu suund ning suhteline suurus faasimähistes on näidatud paremal. Võrreldes eelmise etapiga on magnetvälja vektor pöördunud  $60^\circ$  päripäeva.



Joonis 5.5, e

**6. etapp.** Pooljuhtmuunduri ventiilid V2, V4 ja V5 juhivad voolu staatorimähisesse. Voolu suund ning suhteline suurus faasimähistes on näidatud paremal. Võrreldes eelmise etapiga on magnetvälja vektor pöördunud  $60^\circ$  päripäeva.

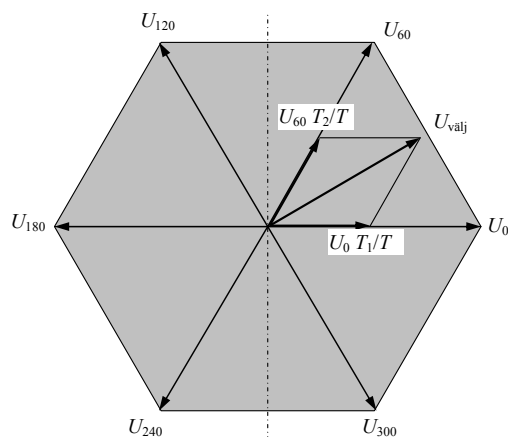


Joonis 5.5, f

Eelkirjeldatud lülitusprotsessi kuue etapi kestel teeb mootori väljavektor astmeliselt ühe täispöörde. Iga sammuga pöörduv vektor  $60^\circ$  võrra. Selleks et vektorit sujuvalt pöörata, tuleb kasutada väljavektori moduleerimist.

**Väljavektori modulatsioon** (*space vector modulation*) tähendab vektori kõrgsageduslikku ümberlülitamist kahe lähima ruumilise oleku vahel nii, et tema näiv keskmine olek pöörduv ruumis sujuvalt (joonis 5.6). Kui soovitakse vektori näiv olek viia kahe püsioleku keskasendisse, tuleb vektorit kommuteerida nii, et 50% ajast on see ühes ja 50% ajast teises püsiolekus. Vektori pikkust (moodulit) saab reguleerida pausi kestuse muutmisega. Paus on ajavahemik, kus vaheldi pinge on null. Väljundpinge võrdub nulliga siis, kui kõigi faaside lülitid on ühendatud alalispinge sama potentsiaali (+ või  $-$ ) siiniga. Erinevate lülituskestuste kombineerimisega saab muunduri väljundis tekitada erineva suuna ja pikkusega väljundvektori ning muunduri väljundis vastava pinge. Pinge ja vooluvektori juhtimine võimaldab omakorda juhtida mootori pöörlemiskiirust ja momenti.





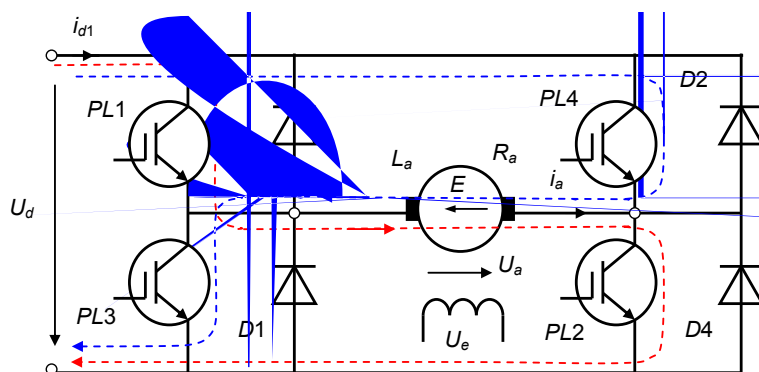
**Joonis 5.6. Väljavektori modulsioon**

Toitemuundurist toitmisel saab mootori koormuse suurenemisel automaatselt suurendada mootori pinget ja stabiliseerida mootori tööd koormuse muutumisel.

## 5.2. Servomootori toiteahelad

### Harjadega alalisvoolumootori toiteahelad

Harjadega alalisvoolumootorit võib lugeda sisseehitatud mehaanilise vaheldiga mootoriks, seepärast saab mootorit reguleerida alalisvoolu ja -pinge reguleerimisega. Voolu ja pinget reguleerida ning pinge polaarsust ja voolu suunda muuta saab neljakvadrantilise pulsilaiusmuunduriga. Niisugust muundurit (joonis 5.7) kasutatakse muudetava pöörlemissuuna ning muutuva momendiga elektriajamites. Elektrimasin võib töötada nii mootorina kui generaatorina. Mootoritalitluses töötamisel on mootori elektromotoorjõud toiteallika pingest väiksem  $E_L < U_d$ . Muunduri pinget ja mootori kiirust reguleeritakse pooljuhtlülititega PL1 ja PL2. Pooljuhtlülitid PL3, PL4 on pidevalt välja lülitatud. Sisselülitatud lülitite PL1 ja PL2 korral läbib mootorit kasvav positiivne vool. Kui neist üks lüliti välja lülitada, läbib mootori samasuunaline kahanev vool diode D1 ja D2.



**Joonis 5.7. Neljakvadrantilise pingemuunduriga alalisvooluajam**

Mootori pöörlemis-suuna muutmiseks tuleb muuta pinget ja voolu suunda. Selleks lülitatakse pooljuhtlülitid PL1 ja PL2 välja ning lülitid PL3 ja PL4 sisse.

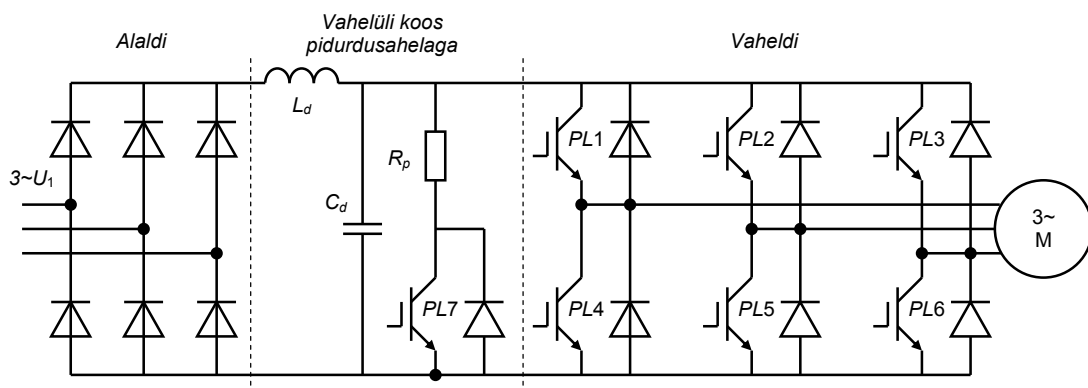
Generaatoritalitluses jääb pinget suund samaks, kuid muutub voolu suund mootoritalitlusega võrreldes. Joonisel näidatud pinget puhul avanevad diodid D3 ja D4 ning voolude  $i_{d1}$  ja  $i_{d2}$  suund muutub vastupidiseks joonisel näidatuga. Neljakvadrantilise muunduri talitlust, kui korraga töötab ainult kaks pooljuhtlülitit (ülejäanud kaks on välja lülitatud), nimetatakse **ühepolaarseks talitluseks**. Neljakvadrantilist muundurit saab kasutada ka nii, et pooljuhtlülititeid kommuteeritakse paarikaupa (PL1 ja PL2) või (PL3 ja PL4). Sel juhul moodustub väljundis nelinurkne vahelduvpinge, mille keskvaartust saab reguleerida pooljuhtide suhtelise lülituskestusega. Pinget positiivse ja negatiivse poolperioodi võrdse kestuse korral on väljundpinge keskvaartus null.

### Vahelduvvoolumootori toiteahelad

Vahelduvvoolumootoriteks võib lugeda kõiki mootoreid, millel pole sisseehitatud vaheldit. Seepärast tuleb juhitava sageduse ja pingega vahelduvvoolu saamiseks kasutada mootorist eraldi asuvat vaheldit. Vaheldi muundab alalisvoolu vahelduvvooluks. Eristatakse pinget- ja vooluvaheldeid.

**Pingevaheldi** toiteallikaks on väikese sisetakistusega pingetallikas, mille tunnuseks on tavaliselt allikaga rööbiti lülitatud suure mahtuvusega kondensaatoreid (hoiab pinget konstantsena). Pingetvaheldi väljundvoolu kujuneb vastavalt pinget ja koormustakistuse väärtusele. **Vooluvaheldi** toiteallikaks on konstantse vooluga alalisvooluallikas, mille tunnuseks on jadamisi lülitatud suur induktiivsus (hoiab voolu konstantsena). Voolu juhitakse pooljuhtlülitite kaudu vaheldi väljundisse. Vooluvaheldi väljundpinget on määratud väljundvoolu poolt põhjustatud pingelanguga koormusel.

Vaheldit toidetakse alalisvooluallikast, milleks võib olla nii akumulaator kui ka vahelduvvooluvõrgust toidetav alaldi (joonis 5.8).



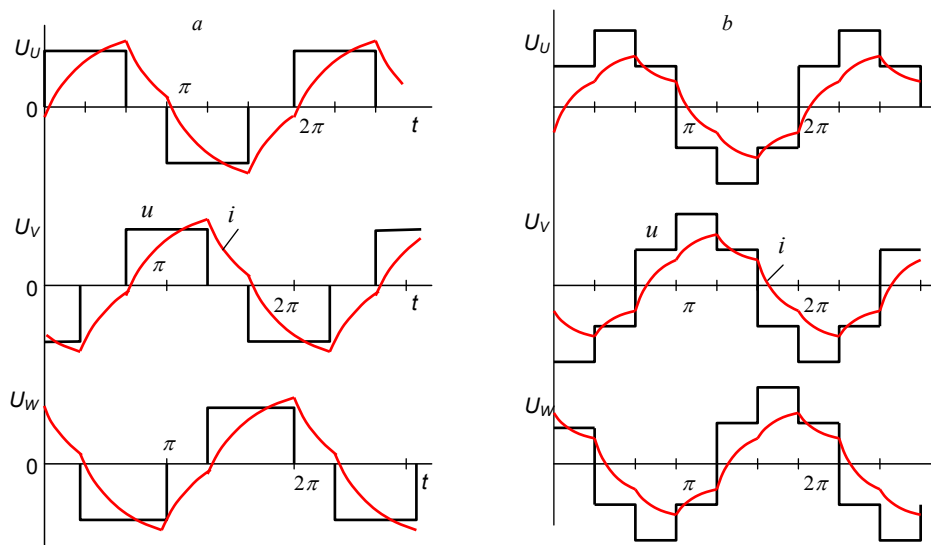
Joonis 5.8. Ühesuunalise energiavooga sagedusjuhtimisajam

Joonisel 5.8 on näidatud kolmefaasiline sildlülituses vaheldi, mida toidetakse vahelduvvooluvõrku lülitatud kolmefaasilisest sildalaldist. Alaldit ja vaheldit ühendab alalisvoolu vahelüli, millesse kuuluvad drossel  $L_d$ , kondensaator  $C_d$ , energiat summutav ehk pidurdustakisti  $R_p$  ning pooljuhtlüli PL7. Sõltuvalt vahelüli drosseli induktiivsusest ja kondensaatori mahtuvusest võib vaheldi toiteallikas olla nii pinge- kui ka vooluallikas. Pooljuhtlülitena on joonisel näidatud isoleeritud baasiga bipolaarsed transistorid ehk IGBTd.

**Kolmefaasilist sildlülituses pingevaheldit** saab kasutada kolmefaasilise vahelduvvoolumootori toitmiseks reguleeritava sageduse ja amplituudiga pingega. Sümmeetriliste faasipingete puhul on need omavahel  $120^\circ$  võrra nihutatud, kusjuures eri faaside pingekõverate kuju ja amplituudid on ühesugused.

Vaheldeid juhitakse plokk- või pulssjuhtimise põhimõttel. **Plokkjuhtimisel** moodustatakse vahelduvpinge negatiivne või positiivne poolperiood pooljuhtlüli ühekordse avamise ja sulgemisega. Selle tulemusena tekivad väljundis nelinurksed (ristkülikukujulised) pingeplokid. Siinuselist vahelduvpinget pole plokkjuhtimisega võimalik saavutada. Voolukõver koosneb sel juhul eksponentkõvera lõikudest.

Joonisel 5.9 on näidatud kuuetaktilise vaheldi väljundpinged juhul, kui korraga on avatud kaks ventiili ning poollaine kestuseks on 120 elektrilist kraadi ning juhul, kui ühel ajal on avatud kolm ventiili ning poollaine kestus on 180 elektrilist kraadi.



**Joonis 5.9. Kuuepulsilise kolmefaasilise plokkjuhtimisega vaheldi väljundpinged ja -voolud: a kahe ühel ajal avatud ventiili korral, b kolme ühel ajal avatud ventiili korral**

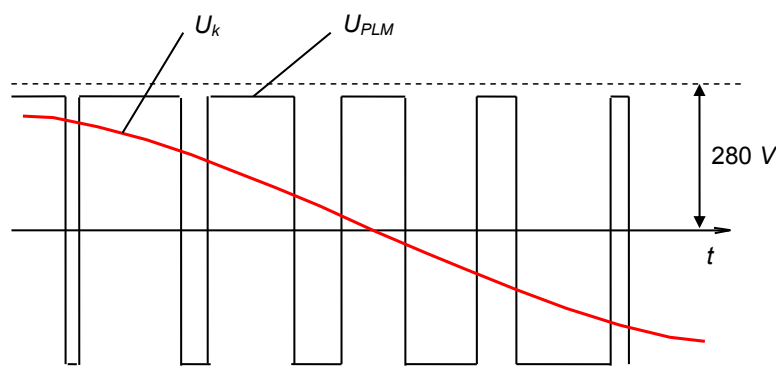
Märkigem, et kolmefaasilise sildalaldiga saadakse 230 V faasipingega võrgupinge alaldamisel u 560 V alalispinge, s.t  $U_d = 560$  V. Juhul kui vaheldi töötab kuuetaktilises plokkjuhtimistalitusel ning selle väljundpinge on astmeline (joonis 5.9, b), siis on selle maksimaalväärtus

$U_m = 2 \cdot U_d / 3 = 373 \text{ V}$ . Pinge keskvaärtuseks kujuneb sel juhul 248 V, mis on märksa suurem kui siinuspinge korral (207 V). Järelikult on toitemuunduril niisugusel juhul teatud pingearu ning mootor võib kõrgematel sagedustel arendada suuremat maksimaalset pöördemomenti. See saavutatakse aga siinuspingest loobumise hinnaga ja ka kõrgematest harmoonilistest komponentidest tingitud kadude mõningase suurenemise arvel.

**Pulssjuhtimisel** lülitatakse pooljuhtlülitite vahelduvpinge poolperioodi vältel korduvalt sisse ja välja, kusjuures lülituskestus muudetakse vastavalt väljundpinge soovitud kujule. Teisiti öeldes, väljundpinge moodustatakse pulsimumulatsiooniga põhiolemel. Kui pinge moduleerimine toimub siinuslaine järgi, saadakse väljundist impulsspinge, mille keskvaärtus muutub siinuseliselt. Pulssjuhtimisel on pooljuhtlülitite kommuteerimise sagedus kümneid kordi suurem kui plokkjuhtimisel.

Pulsilaiusmodulatsiooniga moodustatud pinge  $U_{PLM}$  on joonisel 5.10. Pulsilaiusmodulaatori töö toimub vastavalt mikroprotsessorjuhtseadmes arvutatud lülitushetkedele. Pinge keskvaärtus  $U_k$  võib sel juhul muutuda ka siinuskõvera järgi.

Pinge siinusmodulatsiooniga muunduri väljundpinge maksimaal-, kesk- ja efektiivvaärtused on väiksemad kui võrgupingel. Pärast võrgupinge  $3 \sim U_1$  (kus  $U_1$  on faasipinge efektiivvaärtus) alaldamist saadakse filtri väljundis alaldatud pinge  $U_d$ , mis võrdub võrgu liinipinge amplituudvaärtusega ehk  $U_d = 2,44 \cdot U_1 = 560 \text{ V}$ . Selle pingega toidetakse pulsilaiusmodulatsiooniga transistorvaheldit. Kui väljundi vahelduvpinge nullpotentsiaaliks võtta pingevahemiku keskmine ehk  $\pm 280 \text{ V}$ , siis kujuneb väljundpinge amplituudiks siinusmodulatsiooniga korral ainult 280 V. Muunduri pingelangude tõttu on see pinge isegi veidi väiksem. Väljundpinge efektiivvaärtuseks on sel juhul  $280 / \sqrt{2} = 199 \text{ V}$  ning keskvaärtuseks 179 V. Võrdluseks olgu öeldud, et võrgu 230 V faasipinge amplituudvaärtus on 324 V. Järelikult arendab niisugusest sagedusmuundurist toidetakse mootor nimisagedusel toitepinge vähenemise tõttu ka väiksemat momenti.



**Joonis 5.10. Vaheldi väljundpinge moodustamine pulsilaiusmodulatsiooniga**

Seoses sagedusjuhtimise üha laiema levikuga elektriagamites ning kolmefaasiliste elektrimasinate tööpõhimõttega (kolmefaasiline toitepinge tekitab ruumiliselt sümmeetrilises staatorimähiste süsteemis pöörleva magnetvälja) rakendatakse ajamites **vektorjuhtimise põhimõtet**. Sisuliselt tähendab see seda, et vaheldi juhtimise eesmärk pole tekitada mitte kolm sümmeetrilist faasipinget, vaid luua niisugune pingesüsteem, mille pinge kompleksvektor pöörleb ühtlaselt komplekstasandil. Vaheldi niisugust juhtimist nimetatakse **pingevektori juhtimiseks**. Kolmefaasiline sümmeetriline siinuspingete süsteem, mille faasid on komplekstasandil  $120^\circ$  võrra nihutatud, tagab pingevektori ühtlase pöörlemise. Vaheldi puhul jõutakse sama tulemuseni kahel viisil: kas tekitatakse kolmes faasis omavahel sümmeetriliselt nihutatud sama kuju ja võrdse amplituudiga faasipingete süsteem ning toidetakse selle pingega kolmefaasilist elektrimasinat, või valitakse vaheldi pooljuhtlülitite kommuteerimise niisugune järjekord, mis tekitab kolmefaasilise elektrimasina mähistes pöörleva magnetvälja. Viimast varianti nimetataksegi pingevektori juhtimiseks. Sobivate pooljuhtlülitite valikuga ning nende juhtimisega pulsilaiusmodulatsiooni põhimõttel saab komplekstasandil tekitada mis tahes pingevektori. Muutes kindla seaduspärasuse järgi pooljuhtlülitite valikut ja pulsilaiusmodulatsiooni tegurit saab pingevektorit soovi kohaselt komplekstasandil pöörata.

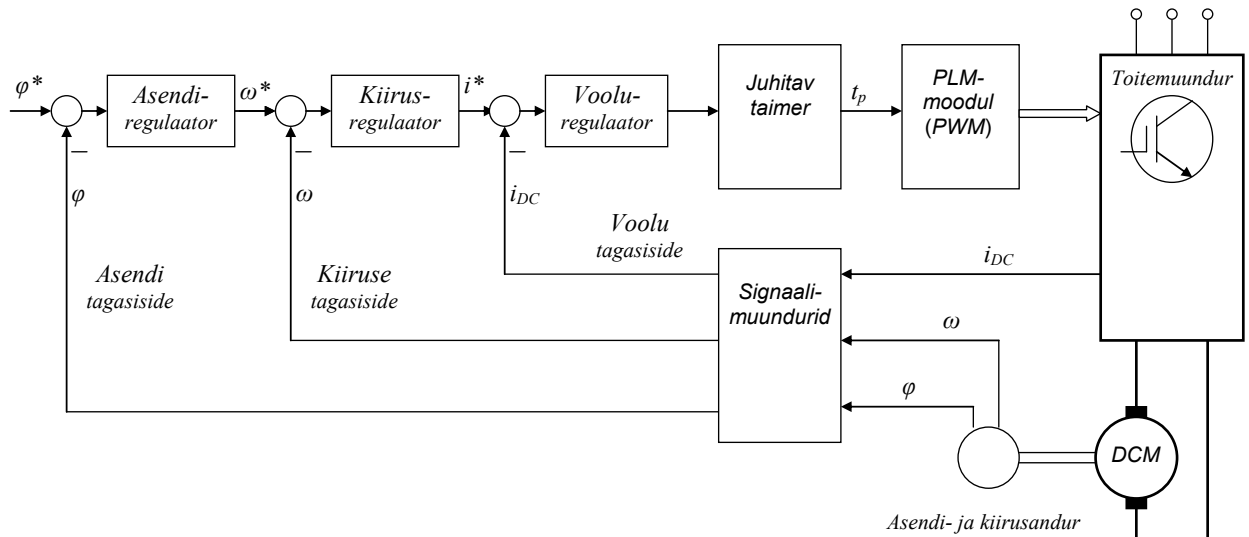
Pingevektori juhtimine võimaldab tekitada **trapetslaine kujulise väljundpinge**, mis saavutab oma maksimumväärtuse  $1/6$  perioodi jooksul. Sel juhul suureneb pinge keskvärtus veelgi (248 V) ning mootori toitepinge maksimaalne sagedus sama koormatavuse puhul on 60 Hz.

### 5.3. Servomootori juhtimine

Nüüdisaegseid elektriagameid juhitakse mikroprotsessorjuhtseadmetega. Signaaliprotsessorisse (*digital signal processor, DSP*) on sisse ehitatud analoog-digitaalmuundurid, pulsilaiusmodulaatorid, taimerid ja muud signaaluundurid. Ajami regulaatorid realiseeritakse tarkvaraliselt. Ajami juhtimissüsteemi struktuur on üles ehitatud kaskaadjuhtimise põhimõttel ja koosneb mitmest üksteisega sõltuvuses olevast juhtimiskontuurist. Juhitakse tagasiside signaalide järgi, mis saadakse otse andurilt, arvutatakse kaudse mõõteinfo põhjal või loetakse reaajas töötavalt mootori mudelilt.

**Olekutagasisidega süsteem ja alluvkontuuridega juhtimine.** Süsteemi jagamine alluvkontuuridega osadeks on üks süsteemi dekomponeerimise viise. Elektriagamite puhul on loomulikeks alluvkontuurideks jõu (momendi), kiiruse ja asendi juhtimiskontuurid. Harjadega alalisvoolumootori juhtimissüsteemi struktuuri on näha joonisel 5.11.

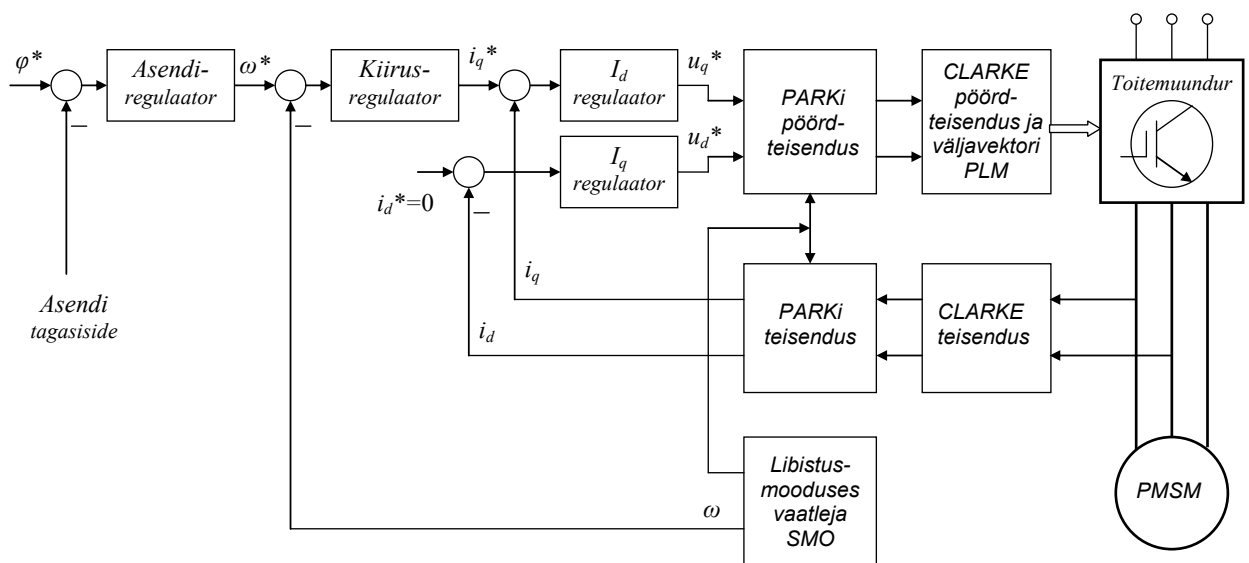
**Pingega muudetakse masina voolu ja momenti. Mootori kiirus kasvab seni, kuni vastuelektromotoorjõud ja pingelang masinas tasakaalustavad toitepinge ning mootori moment tasakaalustub koormusmomendiga.**



**Joonis 5.11. Harjadega alalisvoolumootori kaskaadjuhtimissüsteem**

Vooluregulaator, sh voolupiirang, P ja PI regulaator või binaarregulaator, stabiliseerib voolu ja konstantse magnetvoo korral ka momendi. Voolu ja momendi juhtimine masina käivitamisel võimaldab juhtida elektrimasina momenti ja manipulaatori tööorgani kiirendust. Kiirusregulaator (P, PI, PID, binaarregulaator) rakendub ja stabiliseerib kiiruse pärast mootori ülesjooksu nõutava kiiruseni. Asendiregulaator (P, PI) rakendub positsioonimispunkti või seadeasendi lähedal ning tagab asendiseadeks vajaliku siirdeprotsessi.

Vahelduvvoolumootoreid, sh püsिमagnetergutusega sünkroonmootorit (*PMSM*) juhitakse vektorjuhtimise põhimõttel (joonis 5.12).



**Joonis 5.12. Püsिमagnetergutusega sünkroonmasina vektorjuhtimine**

Juhtimiseks vajalik info saadakse mootori mudelist ja reaalse mootori toiteahelatesse lülitatud voolu ja pinge anduritelt. Mootori mudelist saadakse info voolu ja väljavektorite asendi kohta. Juhtimissüsteem püüab hoida vektorid omavahel risti, et mootori moment ja kasutegur oleks võimalikult suured. Mootori mudel sisaldab ka kahte tarkvaralist muundurit - kolmefaasilise süsteemi muundamiseks kahefaasiliseks ning pöörlevate koordinaatide muundamiseks paigalseisvaks. Neid muundurid nimetatakse ka Park'i ja Clarke'i teisendusteks.

## 5.4. Robotiajami andurid

**Asendi-, siirde- ja kiirusandurid.** Tööstusautomaatikas kasutatakse eritüübilisi asendi- ja siirdeandureid sõltuvalt nõutavast täpsusest, tööpiirkonnast, toimekiirusest, mõõtmetest, hinnast ja muudest tehnilistest ning majanduslikest näitajatest. **Asendiandurid** on ette nähtud absoluutse asendi mõõtmiseks masina paigalseisva detaili või ümbritseva ruumi suhtes. **Siirde- ehk nihkeandurid** mõõdavad asendi muutust ehk suhtelist asendit mingi lähteasendiga võrreldes. Absoluutasendi mõõtmiseks tuleb siirdeandurit enne töö algust kalibreerida. Siirdeanduriteks on kõik impulssandurid, mille väljundimpulsside sagedus on võrdeline liikumiskiirusega, impulsside arv aga siirdega. Seega toimivad **impulssandurid** nii siirde- kui ka kiirusanduritena.

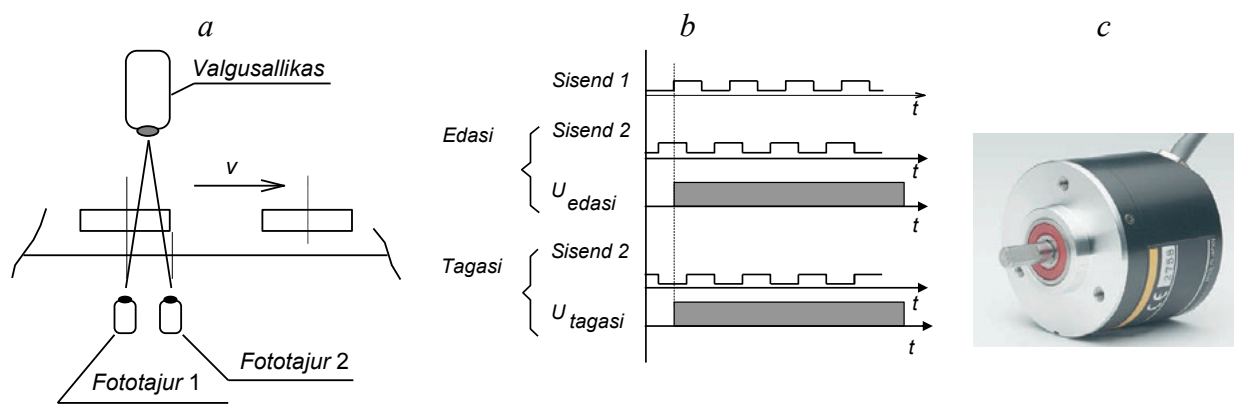
Suuremate siirete täpseks mõõtmiseks kasutatakse mitmepooluselisi mõõteotstarbelisi elektrimasinaid ja ka fototajuritega impulss- ja koodandureid. Vedelike ja puistematerjalide asendi (nivoo) mõõtmiseks sobivad aga mahtuvustajuritega andurid. Asendiandurite mitmekesisuse tõttu on siinkohal võimalik lähemalt kirjeldada vaid enam kasutatavate andurite tööpõhimõtet.

**Fototajuriga impulssandureid** kasutatakse siirdeanduritena ning koos kalibreerimislülitusega ka asendianduritena robotites, mitmesugustes tehnoloogiaseadmetes ja tööpinkides. Andur koosneb valgusvooallikast, modulatsioonikettast ning fototajurist. Valgusvooallikaks on harilikult valgusdiood. Modulatsiooniketas on optiliselt läbipaistvate piludega ketas, mis pöörlemisel sulgeb perioodiliselt valgusvoo pääsu fototajurile (fotodioidile) ning tekitab selles perioodiliselt muutuva voolu. Pulsatsiooni sagedus on võrdeline ketta pöörlemiskiirusega, vooluimpulsside arv aga ketta pöördenurgaga. Anduri täpsus sõltub impulsside arvust ühe pöörde kohta. Valgusvoo pulsatsioonisageduse suurendamiseks kasutatakse lisaks modulatsioonikettale mitmesuguse mustriga rasterplaate, mille pilud on modulatsiooniketta piludega võrreldes kaldu. Sel juhul läbib valgusvoog nii modulatsiooniketta kui ka rasterplaadi ning ühe pilu möödumisel tekib fototajuril mitu voo maksimumi ja miinimumi. Täpsetelt fototajuriga impulssanduritelt saadakse  $10^3 \dots 10^4$  ja rohkemgi impulssi ketta ühe pöörde kohta.

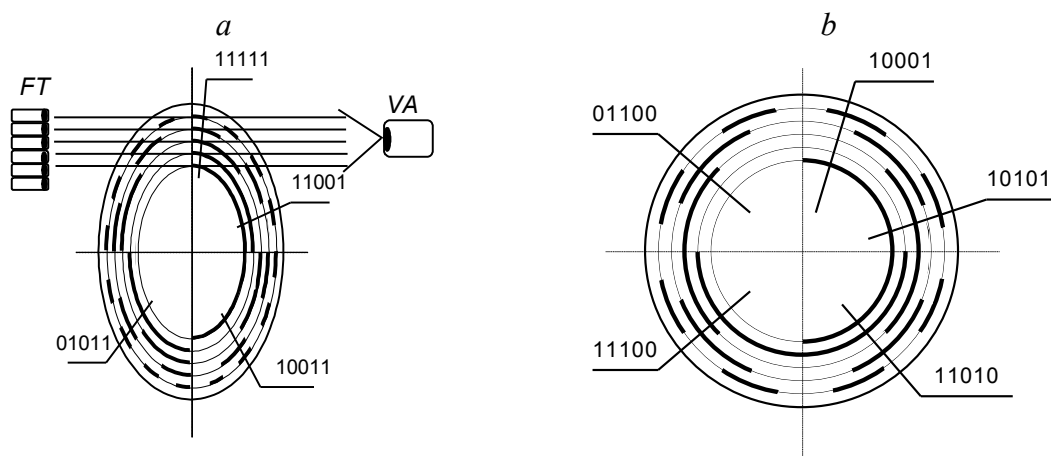
Omaette probleemiks on impulssandurite korral liikumissuuna määramine (joonis 5.14). Selleks tehakse impulssandurid kahe- või enamakanalilistena, nii et need annavad teineteise suhtes neljandikperioodi võrra nihutatud impulsse. Kahe impulsijada võrdlemisel määrab vastav loogikalülitus (joonis 5.14, b) liikumissuuna. Sageli kasutatakse veel kolmandat kanalit, millelt

saadakse iga pöörde kohta üks indeksimpulss. Seda impulssi kasutatakse anduri kalibreerimiseks lähteasendi suhtes. Impulssanduri kasutamisel asendiandurina on selle kalibreerimine hädavajalik.

**Koodandurid** sarnanevad ehituselt impulssanduritega, kuid neid saab kasutada ka absoluutasendi määramiseks. Koodanduril on mitu optilist kanalit ning ta väljastab kahendkoodis signaali (joonis 5.15). Anduri modulaatsiooniketas võib olla kodeeritud tavalises 8421-kahendkoodis või Gray-koodis. Gray-kood on samuti kahendkood, kuid erineb 8421-koodist selle poolest, et kaks järjestikku loendatud koodi ei erine rohkem kui ühe koha võrra. Seepärast võib väita, et asendi sujuval muutumisel muutub ka kood sujuvalt, s.t ilma tavalisele kahendkoodile omaste hüpeteta, kus kahe järjestikulise arvu koodis võivad erineda kõik kohad.



**Joonis 5.14. Liikumissuuna määramine 1/4 perioodi võrra nihutatud fototajuritega**



**Joonis 5.15. Fototajuriga koodandur harilikus 8421-kahendkoodis modulaatsiooniketta mustri[ga a](#) ja Gray-koodis modulaatsiooniketta mustri[ga b](#)**

Gray-kood tagab võrreldes tavalise kahendkoodiga anduri ja juhtimissüsteemi suurema töökindluse, sest koodi muutumisest tingitud loogikalülituste ümberlülitumiste arv on sel juhul



minimaalne. Anduri koosseisu kuulub ka koodimuundur, mis muudab Gray koodi tavaliseks kahendkoodiks. Gray-kood muudetakse tavaliseks 8421-kahendkoodiks vastavalt loogikavõrrandile

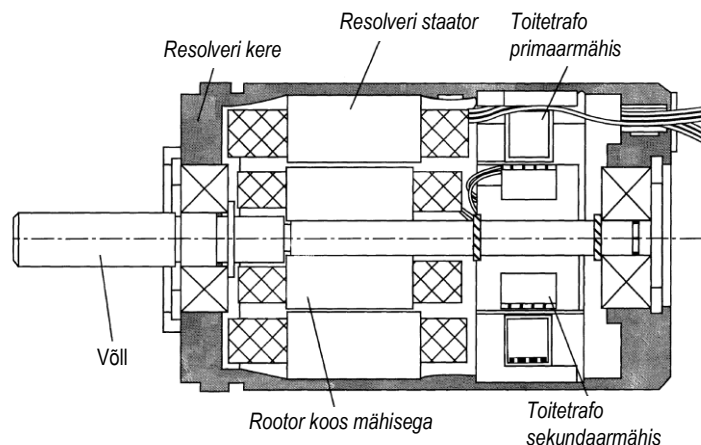
$$B_i = B_{i+1} \wedge \bar{A}_i \vee \bar{B}_{i+1} \wedge A_i \quad (5.9)$$

kus  $B_i$  ja  $B_{i+1}$  tähistavad väljundkoodi (8421-kood)  $i$ -ndat ja  $i+1$  kohta,  $A_i$  aga Gray-koodi  $i$ -ndat kohta. Vastavalt võrrandile  $B_i = 1$ , kui väljundkoodi  $B_{i+1}$  koht ei võrdu sisendkoodi  $A_i$  kohaga. Sisuliselt tuleb koodi muutmiseks teha loogikatehe VÄLISTAV VÕI kõigi koodi kohtadega. Koodi muutmist alustatakse kõige vanemast kohast ning lõpetatakse kõige nooremaga, s.t  $k$ -kohalise koodi muutmiseks tuleb loogikavõrrandit lahendada  $k$  korda.

**Pöördtrafod (resolverid) (joonis 5.16) ja trükkmähistega paljupooluselised elektrimasinad - induktsüünid** sarnanevad oma tööpõhimõttelt hammasmodulaatoriga transformatoorse tajuriga, kuid pooluste ühtlase jaotuse ja suure arvu tõttu anduri konstruktsioonilistest ebatäpsustest tingitud vead kompenseerivad üksteist ning anduri töö on täpsem.

Induktosüüni kasutatakse diskreettalitluses impulssandurina, pidevtalitluses aga amplituudi või faasimuundurina. Masina staatori- ja rootorimähised on valmistatud trükimeetodil ja kujutavad endast siksakilist vaskriba. Staatoril paikneb tavaliselt ergutusmähis, rootoril kaks mitmesse sektsiooni jaotatud mõõtemähist.

Resolveri rootoril on ergutusmähis ja staatoril kaks siinus-koosinusmõõtemähist



**Joonis 5.16. Resolveri ehitus**

Põhimõtteliselt on induktsüün nagu iga teinegi elektrimasin pööratav, s.t staatorile võib paigutada rootorimähise ja vastupidi. Kaks mõõtemähist on vajalikud liikumissuuna määramiseks ning need on teineteise suhtes  $1/4$  perioodi võrra nihutatud. Vastavalt sellele nimetatakse neid ka siinus- ja koosinusmähisteks. Mähiste sobiva kuju ning lülitusega saab

väljundi pöördenurgast sõltuva pinge, mis võib olla rootori pöördenurga perioodiline siinus-, koosinus- või lineaarfunktsioon  $U = U_m \sin \alpha$ ,  $U = U_m \cos \alpha$  või  $U = \text{sign}(\sin \alpha) \cdot k\alpha$ .

Liikumissuuna määramise loogika on sama kui fototajuriga impulssanduri korral. Valmistatakse nii lineaarseid kui ka pöördliikumise induktosüüne. Kulgliikumise korral nimetatakse masina liikuvat osa liuguriks. Suure ulatusega kulgliikumise mõõtmiseks kasutatakse üksikutest lineaarsetest moodulitest koostatud induktosüüne, mille pikkus võib ulatuda mitme meetrini.

**Pidevatoimelised kiirusandurid.** Pidevatoimelistest anduritest kasutatakse kiiruse mõõtmiseks kõige enam tahhogeneeraatoreid, mis on väikese võimsusega mikroelektrimasinad, mille väljundist saadav pinge on võrdeline rootori nurkkiirusega. **Tahhogeneaatoritena** kasutatakse alalisvoolu-, sünkroon- ja asünkroonmasinaid. Tahhogeneaatoreid iseloomustavad väljundi tunnusjoon  $U_{tg} = f(\omega)$ , selle tõus ning lineaarsus, väljundpinge sümmeetrilisus, minimaalne jääkpinge seisva rootori korral, väljundvõimsus või koormusvool, väljundpinge pulsatsioon, rootori inertsimoment, parameetrite stabiilsus väliste mõjutuste suhtes ning töökindlus.

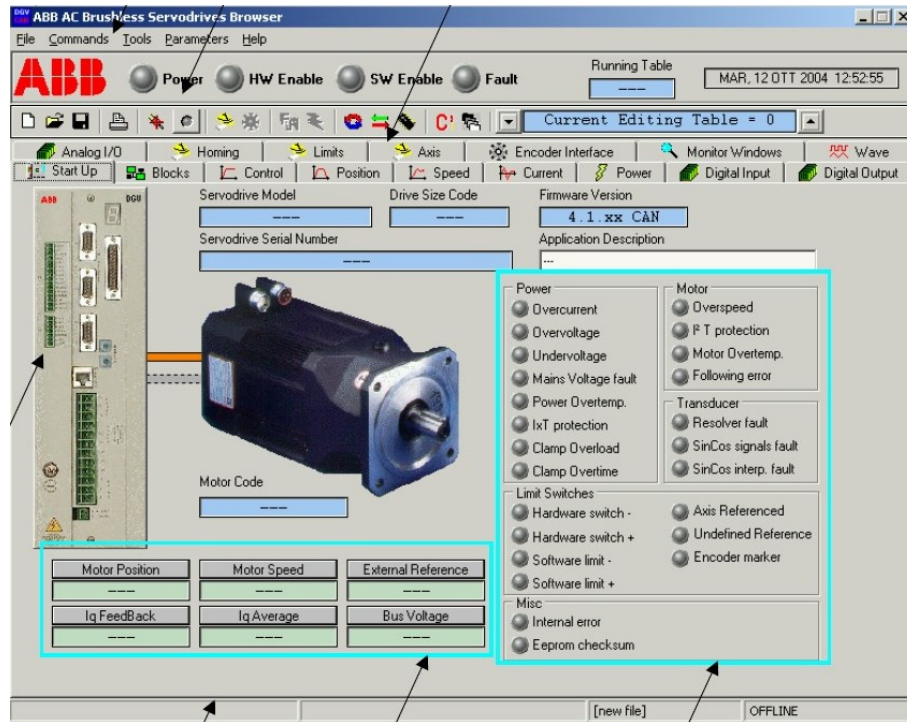
**Vooluanduritena** kasutatakse vooluahelasse lülitatud kalibreeritud takisteid (šunte), vahelduvvoolu ja alalisvoolu voolutrafosid ning Halli-tajuritega vooluandureid. Kalibreeritud takistite pingelangu mõõtmise korral on põhiprobleemiks jõu- ja mõõteahelate galvaanilise ühenduse olemasolu. Mõõteahelate galvaaniliseks eraldamiseks kasutatakse optilise eraldusega võimendeid. Ka voolutrafod tagavad ahelate galvaanilise eralduse, kuid nende puuduseks on inertsus, mis ei võimalda mõõta mittesiinuselise voolu hetkväärtust. Trafode peamiseks eeliseks on nende lihtsus. Viimastel aastatel on vooluanduritena üha enam kasutusele võetud Halli-tajuril põhinevaid vooluandureid. Andur koosneb õhupiluga suletud magnetahelast, mida läbib vooluga juhe või lattu. Vooluga juhti ümbritseb magnetväli, mille tugevus on võrdeline vooluga ning mille magnetvoo suund määratakse kruvireeglga. Magnetväli sulgub läbi magnetahela südamiku ning õhupilu. Õhupilus asub Halli-tajur, mille väljundis genereeritakse magnetväljaga võrdeline elektromotoorjõud.

## 5.5. Servoajamite seadistustarkvara

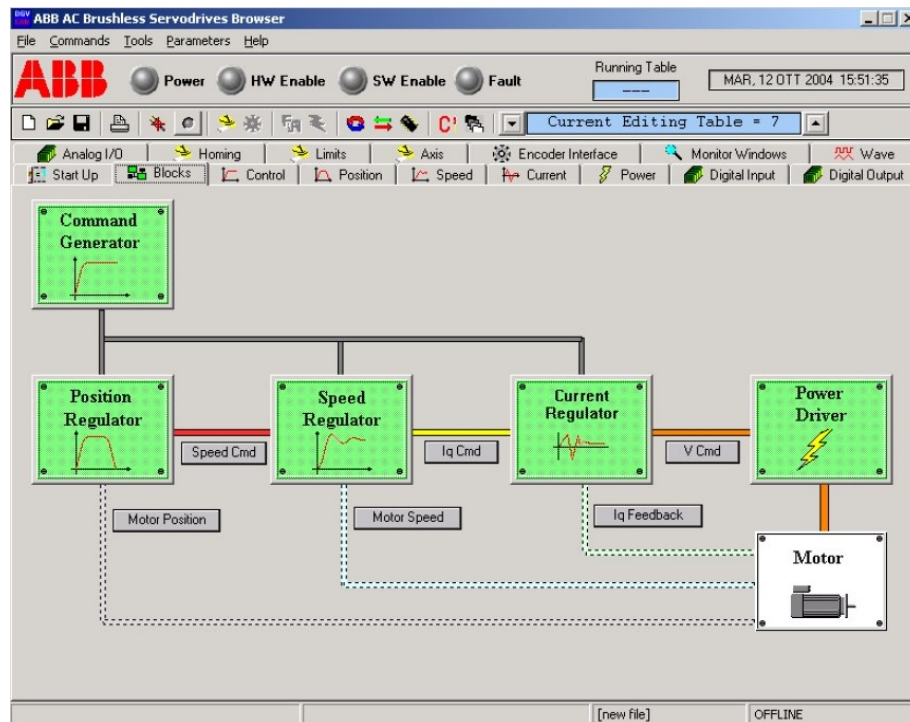
Servoajamite seadistamiseks on firmadel olemas spetsiaalne seadistustarkvara. Selle tarkvaraga sätitakse ajami riistvara tüüp, mootori nimiaandmed, kaitsefunktsioonid, talitluspiirangud. Sama tarkvara abil seadistatakse ka ajami juhtimisomadused: regulaatorite parameetrid, muutujate piirväärtused jm. Ajamis on kasutusel voolu, kiiruse ja asendi tagasisided. Seadistustarkvaraga sätitakse ajami soovitud liikumiskiirus, kiirendus, aeglustus, eri kiiruste suhtelised väärtused, samuti kiiruste ja kiirenduste piirväärtused. Seadistustarkvara võimalustest annavad ülevaate joonistel 5.17, 5.18 ja 5.19 esitatud kuvad.

Riistvara sättimise kuval (joonis 5.17) saab valida mootori ja muunduri tüübi, voolu, pinge ja temperatuuri piirväärtused kaitseüsteemi rakendamiseks jm. Regulaatorite sättimise kuval

(joonis 5.18) saab valida asendi-, kiiruse- ja momendiregulaatori ning seadesignaali generaatori parameetrid.

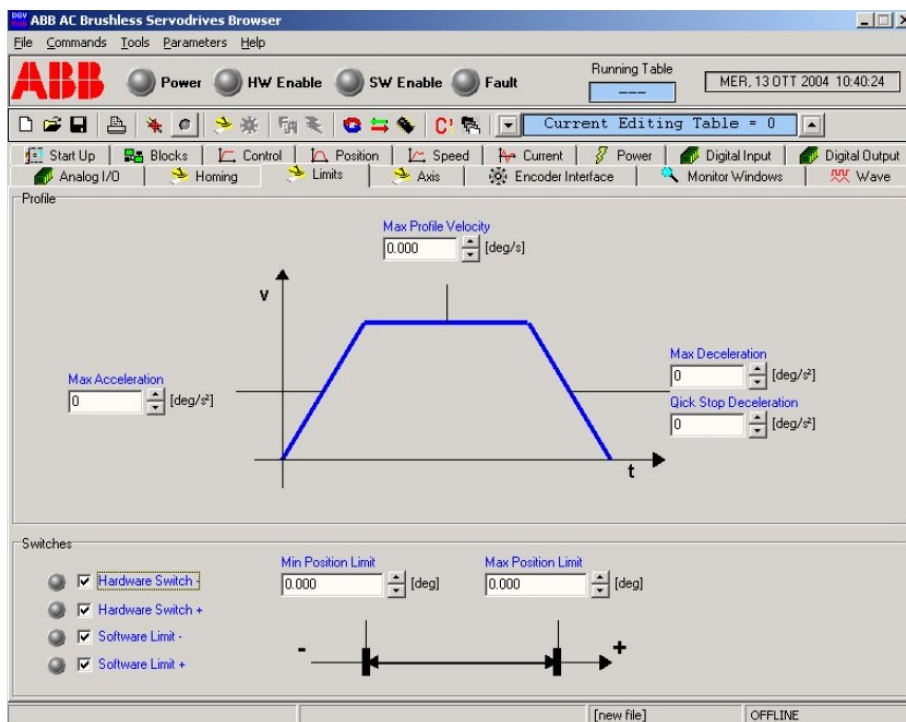


Joonis 5.17. Firma ABB servoajamite seadistustarkvara riistvara sättimise kuva



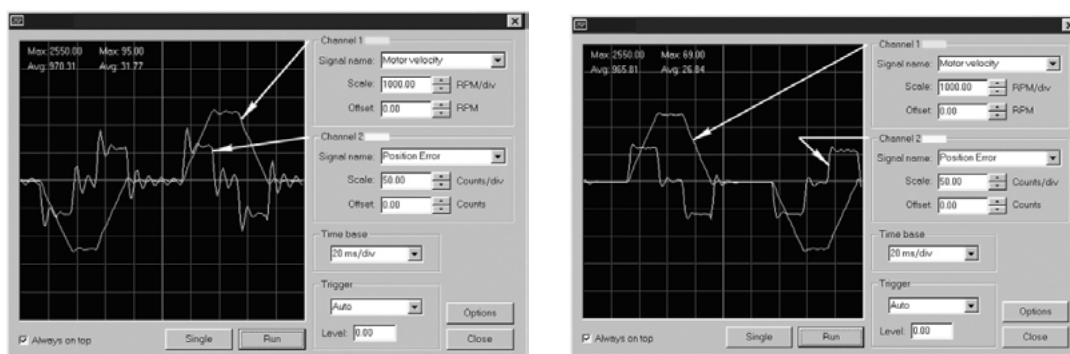
Joonis 5.18. Firma ABB servoajamite seadistustarkvara regulaatorite sättimise kuva

Kiirusdiagrammi parameetrite sättimise kuval (joonis 5.19) saab määrata kiiruse minimaal- ja maksimaalväärtuse, kiirenduse ja aeglustuse väärtused.



**Joonis 5.19. Firma ABB servoajamite seadistustarkvara kiirusdiagrammi parameetrite sättimise kuva**

Regulaatorite seadistamiseks mõõdetakse muutujate tegelikke väärtusi. Selleks on seadistustarkvaras olemas ka kahekanalilise ostsilloskoobi funktsioon, mis võimaldab mõõta ajami kiiruse ja voolu tegelikke väärtusi (joonis 5.20).



**Joonis 5.20. Seadistustarkvarasse integreeritud ostsilloskoobi kuva**

Ostsilloskoobiga mõõdetud kiiruse ja voolu kõverate põhjal saab hinnata regulaatori parameetrite sätete õigsust. Regulaator on säitud õigesti, kui kiirus ei võngu, positsioonimisviga on väike ning positsioonimisaeg lühike. Tööstusrobotite ajamid seadistab valmistaja.

## 6. LIIKURROBOTITE NAVIGATSIOON

### 6.1. Asukoha tuvastamise viisid

Liikurrobotid (*mobile robots*) erinevad statsionaarsetest ehk kohtrobotitest (*stationary robot*) selle poolest, et neil on sõltumatu (autonoomne) energiavarustus ning nende tööruum on tavaliselt palju suurem kui kohtrobotitel. Avar tööruum põhjustab suure tõenäosusega ka suuremat töötingimuste määramatust. Roboti tööruumi pole alati võimalik täpselt kirjeldada, seal võivad esineda juhuslikult ilmunud tõkked, mis üldjuhul võivad tööruumis määramatult (tundmatul trajektooriga) liikuda. Seepärast peab liikurrobotil olema ümbrusetaju ehk ümbritseva keskkonna tuvastamise võime.

Inimene toimib samuti juhuslikult muutuv keskkonnas. Ümbruse tuvastamiseks on inimesel kuus meelt: nägemine, kuulmine, kompamine, haistmine, maitsmine ja tasakaalumeel. Neid meeli saab võrrelda erinevate füüsiliste keskkondade anduritega. Nägemine kuulub optika valdkonda ja silmad registreerivad valgussignaale. Vastuvõetud optilisi kujundeid töödeldakse ja neist eraldatakse inimese tegevuseks kasulik info. Kuulmismeel kuulub akustika valdkonda. Kõrvad registreerivad helilainete võnked, mille põhjal tuvastatakse inimesele oluline info, nt teise inimese kõne või helid, mis aitavad inimesel tegutseda või hoiatavad ohu eest. Kompimine kuulub mehaanika valdkonda. Inimese nahk on tundlik mehaanilisele toimele (survele) ja soojusele (temperatuurile). Haistmis- ja maitsmismeel on seotud keemiliste protsessidega ning need aitavad samuti inimest keskkonna tuvastamisel. Lõpuks, tasakaalumeel põhineb inimese kõrvas asuval tasakaaluelundil, mis aitab inimesel orienteeruda kolmemõõtmelises ruumis ja säilitada liikumisel või seismisel keha teatud asend (tasakaal).

Roboti ümbrusetaju (meeled) põhineb mitmesugustel tehnilistel vahenditel (anduritel), mis samuti võimaldavad ümbrust tuvastada. Inimese meeleeelundid ja roboti ümbrusetajuandurid on esitatud tabelis 6.1. Tehisnägemise puhul on roboti sensorite poolt tuvastatav sagedusvahemik suurem (infrapuna- ja ultraviolettkiirgus, raadiosageduspiirkond) kui inimese silmaga tuvastatava kiirguse sagedusvahemik. See võimaldab robotil näha inimesest paremini pimedas, näha kaugemale või näha mikroskoopilisi objekte. Sama kehtib ka roboti tehiskuulmisandurite kohta. Infra- või ultraheliandurid võimaldavad robotil kuulda helisid, mis inimesele pole kuuldav.

Vastuvõetava info töötlemisvõimelt ületab inimene nüüdisroboteid. Kujundite ja helide (kõne) tuvastamine on roboti jaoks väga raske ülesanne ning teaduse saavutused sellel alal on üsna tagasihoidlikud. Optiliste kujundite ja heli tuvastamisel on vaja tõhusalt eristada olulist ja mitteolulist infot. Inimene on omandanud selle oskuse aastatepikkuse õppimisega. Robotile vastava algõpetuse andmine põhineb inimese maailmatunnetusel, mille algoritmiline

kirjeldamine on keeruline. Robotit õpetada on võimalik, kuid vastavad süsteemid on samuti alles arengu algfaasis.

Robot saab tuvastada ka keskkonna radioaktiivsust, milleks inimene pole võimeline.

Tabel 6.1

Inimese meeleelundid ja roboti ümbrusetajuandurid

Inimese meel või tuvastatav keskkond	Inimene	Robot
<b>Nägemine</b> (valgus, elektromagnetiline kiirgusväli)	Silmad	Tehisnägemine (videokaamera, fotoandurid, infrapuna- ja ultraviolettkiirguse andurid, elektromagnetvälja andurid)
<b>Kuulmine</b> (heli, infra- ja ultraheli)	Kõrvad	Tehiskuulmine (mikrofon, sonar, infra- või ultrahelivastuvõtja)
<b>Kompimine</b> , puudutamine (mehaaniline ja soojuslik toime, nt jõud, temperatuur)	Nahk	Tehiskompimine (taktiil- ehk puuteandurid, lähedusandurid, temperatuuriandurid)
<b>Haistmine</b>	Nina	Keemiline analüüs (mitmesugused keemilised analüüsid, gaasianalüsaatorid jms)
<b>Maitmine</b>	Suu	
<b>Tasakaalumeel</b>	Tasakaaluelund sisekõrvas	Inertsiaandurid, güroskoobid, kiirendusandurid
Radioaktiivsus	Inimesel puudub	Radioaktiivsusanurid

Liikuroboti asukoha määramise viis ja mõttesüsteemi valik sõltuvad roboti tööruumi suuruselt või roboti tegevusulatuselt. Liikuroboti võimalikud mõttesüsteemid ja andurid on esitatud tabelis 6.2 ja näidatud joonisel 6.1.

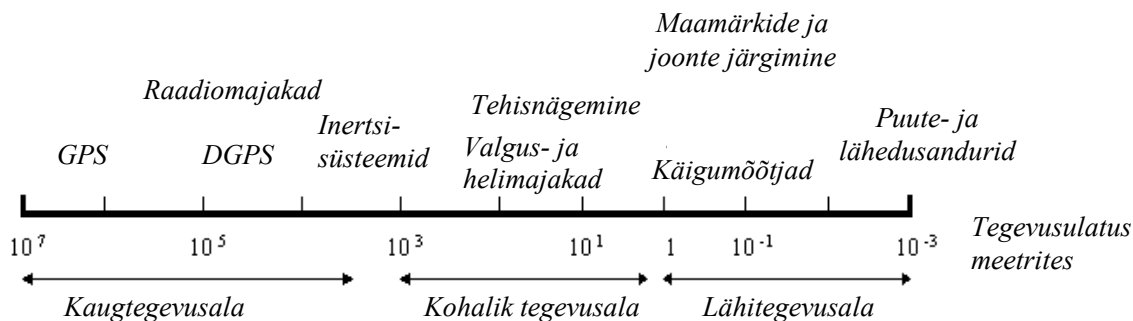
Liikuroboti asukoha saab lihtsal juhul tuvastada töökohale või maastikule kantud koha- või trajektoormärkide järgi. Tööstuses on levinud robotite juhtimine mööda põrandale märgitud radasid. Rajad võivad olla kantud põrandale värviga, süvistatud põrandasse kõrgsagedusliku vooluga elektrijuhil abil, näidatud valgusmärkide reana või mõnel muul anduritega lähikauguselt tuvastataval viisil. Ruumis vabalt liikuva roboti puhul on vaja tuvastada roboti asukoht ruumi elektroonsel plaanil, et vältida kokkupõrkeid ruumi seinte ja ruumis olevate esemetega ning ka selleks, et lahendada ruumis rajaplaanimise ülesandeid.

Maastikul liikumisel peab robot tuvastama oma asukoha maastiku elektroonsel plaanil või topograafilisel kaardil. Roboti liikumissuuna saab maastikul määrata elektroonse kompassiga mõõdetud asimuudi järgi.

Mõõtesüsteemi valik sõltuvalt roboti tööruumi suurusest või roboti tegevusulatusest

Positsioonimise meetod	Mõõtesüsteem või andurid	Roboti tegevusulatus		
		Väike	Keskmine	Suur
Asukoha- ja trajektoormärkide tuvastamise või asimuudi järgi	Puute-ja lähedusandurid	X	X	
	Optilised asendiandurid	X	X	
	Kell ja kiirusandur	X	X	
	Kiirendusandur	X	X	
	Käigumõõtja	X	X	
	Kompass		X	
Kaardi ja mõõdetud koordinaatide järgi  Ruumide plaanid, topograafilised ja 3D kaardid	Kiirendusandur	X	X	
	Ultraheliandur	X	X	
	Laserkaugusmõõtja	X	X	
	Kompass		X	X
	Raadiomajakas		X	X
	Inertsiaalsed güroskoobid		X	X
	Optilised güroskoobid		X	X
	GPS, DGPS			X

Kõige üldisemalt võib liikurroboti tegevusala jaotada kaugtegevusalaks, kohalikuks ja lähitegevusalaks. Globaalses ulatuses aitab roboti asukohta tuvastada globaalne positsioonimissüsteem GPS (*global positioning system*) või diferentsiaalne GPS ehk DGPS (*differential global positioning system*). Roboti kaugtegevuse juhtimiseks sobib ka asukoha tuvastamine raadiomajakate (*beacons*) abil. Väiksema tegevusulatuse puhul saab roboti liikumissuunda mõõta kompassiga ning orientatsiooni säilitada kiirendusandurite ja/või güroskoopidega, mida võib lugeda inertsil põhinevateks mõõtesüsteemideks.



Joonis 6.1. Liikurroboti navigatsiooniandurite valik sõltuvalt roboti tegevuskaugusest

Tehisnägemisel ning valgus- ja helimajakatel põhinevate mõõtesüsteemide rakendamine on võimalik otsese nähtavuse või kuuldavusega tegevuspiirkonnas ja avatud maastikul. Lähitegevusega robotid töötavad kindlal suletud (aiaga piiratud) alal, mille mõõtmed ulatuvad mõnest meetrist kuni mõnekümne meetrini. Läbitud vahemaa ehk käigutee mõõtmine (*odometry*) võib näiteks toimuda roboti veorataste pöördenurga mõõtmisega. Roboti asukohta saab sel juhul tuvastada ka maamärkide ja rajajoonte järgi, kokkupõrgete vältimiseks aga kasutada puute- ja/või lähedusandureid. Lähedusandurid sobivad ka rajajoonte jälgimiseks.

## 6.2. Liikuroboti lähitegevuse navigatsioonandurid

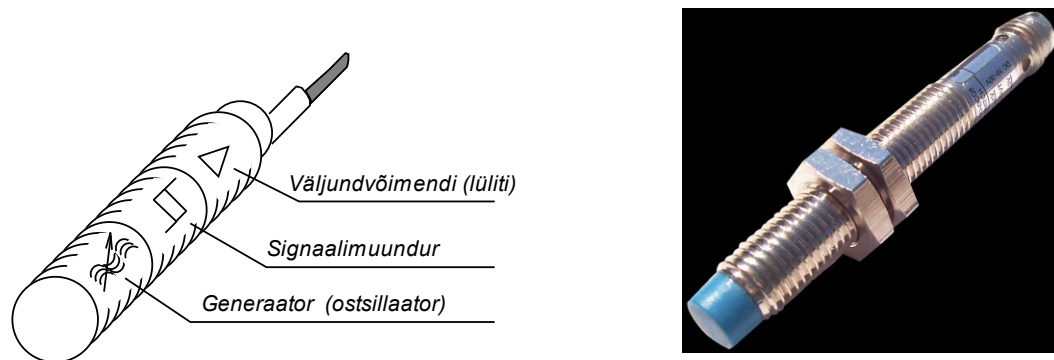
**Puute- ehk taktilandurid** põhinevad kas piirlülitel või survejõu anduritel.

**Piirlülid** (*limit switches*) koos induktiivsete ja mahtvuslike lähedusanduritega on kasutusel nii robotites kui ka laiemalt tööstusautomaatika rakendustes. Piirlülid on asendianduritena kasutatavad lülid, kus kontaktide suletud või lahutatud olek sõltub neid käitava mehhanismi asendist. Piirlülid jagunevad lineaarseteks (*linear switches*) ja pöördlüliteks (*rotary switches*). Piirlülid edastavad protsessi olekumuutujate kohta loogilist infot olles tuvastanud mehaanilise liikumise erinevaid faase, nt teatud vahemaa läbimist, positsioonimist teatud punktis või ühesuunalise liikumise lõppemist. Elektrotehnilisest vaatenurgast on kontakt-piirlülite peamiseks eelisteks ahelate galvaaniline eraldamine (*galvanic separation*), väike kontakttakistus, mis võimaldab kommuteerida ka väga nõrku voole, suletud kontaktide kindel lahtamine ning elektromagnetiline häirekindlus (*immunity to electromagnetic interference*). Mehaanilisest vaatenurgast on piirlülite eeliseks vastupidavus tööstuskeskkonna eritingimustele, suur täpsus ning väike korratavusviga (*repeatability*), nt lülitasendi erinevus töö jooksul on alla 0,01 mm, ning lihtne talitluspõhimõte.

**Survejõuandurite** töö põhineb materjali elektrilise takistuse muutumisel sõltuvalt temale rakendatud jõust. Selleks kasutatakse elektrit juhtivat kummi või elastsele materjalile kinnitatud tensotajurit, mille deformeerimisel muutub mõõteahela elektriline takistus ning saadakse jõuga võrdeline elektriline signaal.

**Lähedusandurid.** Induktiivsed ja mahtvuslikud lähedusandurid on robotsüsteemide tähtsad komponendid. Nendega saab koguda infot masinate ja tehnoloogiaprotsesside talitluse, roboti enda või tema tööorgani asukoha või kokkupõrkeohu kohta ning edastada info loogikasignaalidena juhtseadmele. Lähedusanduritega saab määrata nii tehnoloogiaseadmete täiturite kui ka töödeldavate esemete asendit (olemasolu), möödumist ettenähtud punktist, liikumise lõppu, tuvastada või loendada rajamärke jms.

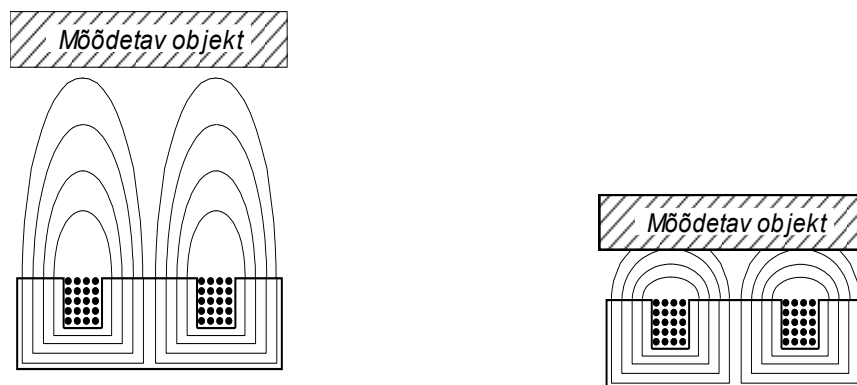




**Joonis 6.2. Induktiivse lähedusanduri üldehitus**

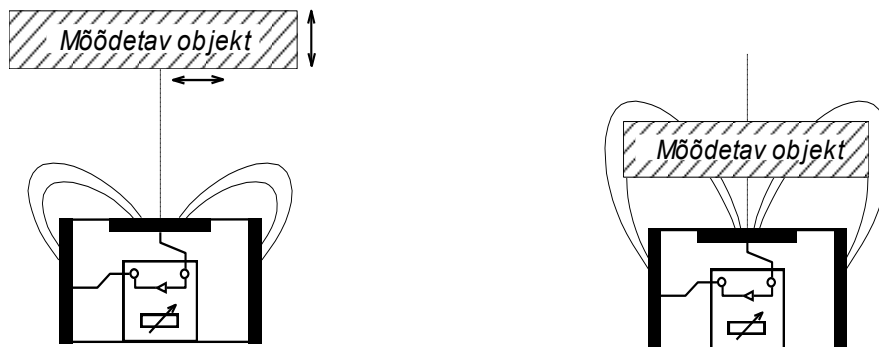
Diskreetse väljundiga lähedusandur koosneb tavaliselt kõrgsagedusgeneraatoril põhinevast tajurist, signaaluundurist ja võimendist (joonis 6.2). Tajurit iseloomustavad tööpõhimõte (induktiivne või mahtuvuslik), kuju ja mõõtmed, mis sõltuvad kasutusotstarbest, põhilised tehnilised karakteristikud nagu tundlikkus või tundlikkuse sõltuvus mõõdetava objekti ja tajuri vahelisest kaugusest, väljundsignaali hüstereesi olemasolu vms. Võrreldes puuteanduritega (nt piirlülititega) on lähedusanduritel rida eeliseid: andur pole kokkupuutes mõõdetava objektiga, mistõttu saab tuvastada määrduvad, kleepuvaid või värskelt värvitud esemeid; anduri rakendamiseks pole vaja rakendada jõudu; anduris pole liikuvaid mehaanilisi osi, mistõttu tal on suur toimekiirus ning ta saab mõõta suure kiirusega liikuvaid esemeid.

**Induktiivse lähedusanduri** tajur (joonis 6.3) põhineb kõrgsagedusgeneraatoril ehk ostillaatoril, mille töö sõltub tuvastatava objekti kaugusest. Generaatori mähised moodustavad tajuri tundliku osa, mille lähedal tekitatakse magnetväli. Kui metallist (elektrit juhtiv) objekt satub anduri mähiste magnetvälja mõjupiirkonda, siis selles indutseeritud voolud tekitavad generaatorile lisakoormuse, mida saab mõõta. Lisakoormuse tõttu võnkumiste genereerimine katkeb ning rakendub signaaluunduri loogikalülitus. Vastavalt vajadusele väljastatakse signaal loogiline 0 või loogiline 1, mis vastavad normaalselt lahutatud või normaalselt suletud kontaktidele.



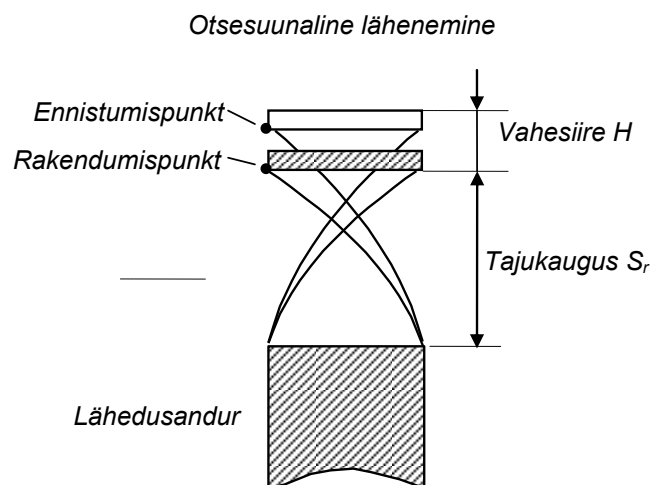
**Joonis 6.3. Induktiivse lähedusanduri tööpõhimõte**

**Mahtuvusliku lähedusanduri** tajur (joonis 6.4) põhineb kõrgsagedusgeneraatoril ehk ostsillaatoril, mille võnkeahela kondensaator moodustab tajuri tundliku elemendi. Ostsillaatori töötamisel tekib kondensaatori ümber kõrgsageduslik elektriväli. Kui mingi elektrit juhtivast või ka isoleermaterjalist objekt, mille suhteline dielektriline läbitavus on suurem kui 1, satub kondensaatori elektrivälja mõjupiirkonda, siis kondensaatori mahtuvus muutub. Sõltuvalt ostsillaatori ehitusest põhjustab niisugune mahtuvuse muutus kas genereerimise katkemise või vastupidi, kõrgsageduslike võnkumiste genereerimist. Ostsillaatori oleku muutumisele reageerib loogikalülitus (relee), mis omakorda moodustab väljundis sulguvale või lahtuvalale kontaktile või loogilistele signaalidele 0 ja 1 vastava väljundi.



**Joonis 6.4. Mahtuvuslike lähedusandurite tööpõhimõte**

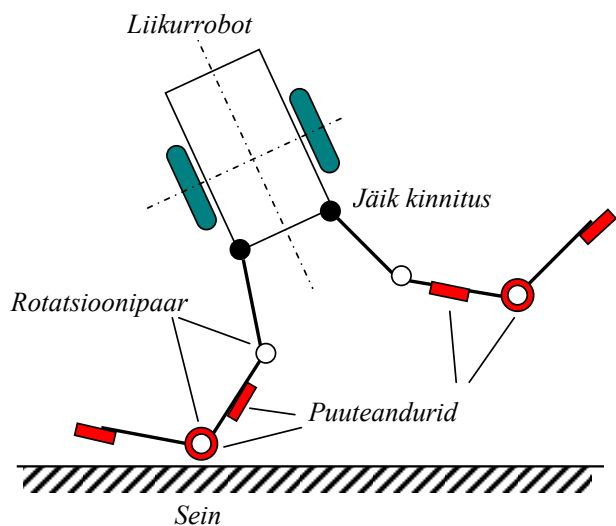
Lähedusanduri tööle on iseloomulik anduri rakendus- ja ennistuskauguse erinevus. Seda erinevust nimetatakse lähedusanduri hüsteresivahemikuks ehk vahesiirdeks  $H$  (*differential travel*). Vahesiire on määratud standardse metallobjekti otsesuunalisele lähenemisele ning eemaldumisele vastavate anduri rakendumis- (*pick-up point*) ja ennistumispunktide (*drop-out point*) vahelise kaugusega. Vahesiiret iseloomustatakse protsentides reaalse tajukauguse  $S_r$  suhtes.



**Joonis 6.5. Lähedusanduri hüsteresivahemik ehk vahesiire**

Korratavustäpsus (*repeatability*) iseloomustab tajukauguse stabiilsust ajas. Korratavusviga väljendatakse protsentides reaalse tajukauguse  $S_r$  suhtes.

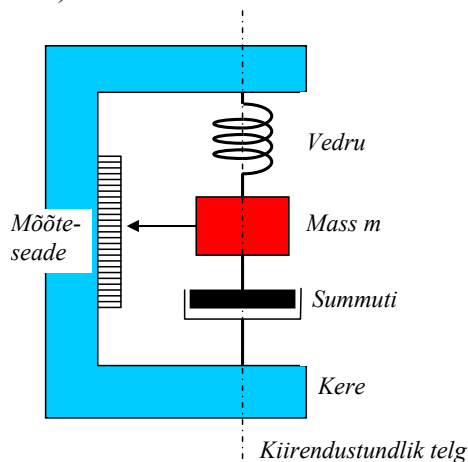
Liikuroboti **puuteandurid** põhinevad sageli mehaanilistel tundlatel. Roboti tundlad täidavad sama ülesannet nagu tundlad putukatelgi. Joonisel 6.6 on mitmeastmeline tundel, millega saab tuvastada takistuse erinevalt kauguselt. Tundla lülidadele on kinnitatud puuteandurid.



**Joonis 6.6.** Tundlate kasutamine takistuste tuvastamisel

### Kiirendusandurid ja güroskoobid

Kiirendusandurid (*accelerometers*) ja güroskoobid (*gyroscopes*) põhinevad lineaarselt liikuva või pöörleva massi inertsil kasutamisel selleks, et säilitada kindlat liikumissuunda või hinnata liikumissuuna muutust (joonis 6.7).



**Joonis 6.7.** Kiirendusanduri tööpõhimõte

Kiirendusanduri tööpõhimõtet näeb joonisel 6.7. Jäiga raami külge on kinnitatud vedru ja summutiga ühendatud mass  $m$ . Kiirendamisel mõjub massile inertsjõud, mis deformeerib vedru. Deformatsiooni suurus iseloomustab kiirendust ja seda mõõdetakse mõõteseadmega. Kiirendusanduri tundlikkus on kõige suurem kiirendustundliku telje sihis. Summutit kasutatakse vältimaks massi võnkumist kiirenduse järsul muutumisel.

Kiirendusandureid kasutatakse autode ja robotite navigatsioonisüsteemis. Neid kasutatakse ka autotulede stabiliseerimiseks ebaühtlasel teel liikumisel, vibratsiooni või kaldenurga mõõtmiseks, fotoaparaatide ja kaamerate pildi stabiliseerimiseks jm otstarbel.

Nüüdisaegsed kiirendusandurid on väikeste mõõtmetega mehhatroonilised süsteemid, milles anduri mehaaniline osa on integreeritud pooljuhtkiibil paikneva elektroonilise mõõtesüsteemiga. Inertsiaalsel mikro-elektromehaanilisel süsteemil (*inertial MEMS sensors*) põhinevad andurid tuvastavad liikumist ühes, kahes või kolmes lineaarkoordinaadis (joonis 6.8).



**Joonis 6.8. Kolmekoordinaadiline mikro-elektromehaaniline kiirendusandur ja güroskoop MEMS**

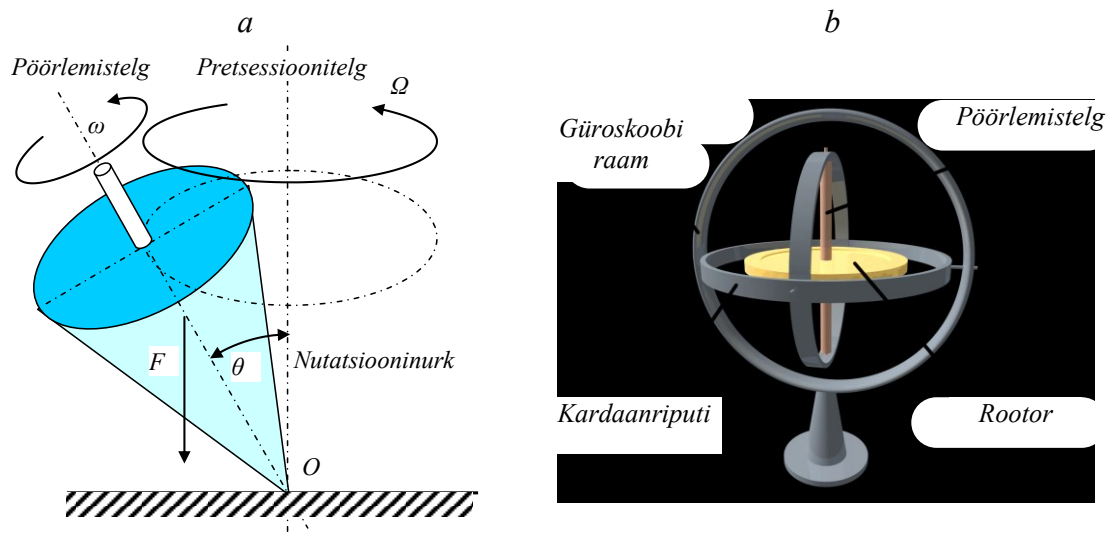
Pöördliikumiskiirenduse mõõtmiseks on samuti olemas andurid. Güroskoobil põhinevad andurid võimaldavad mõõta ka Coriolise kiirendust. Andurite mõõtesüsteemis mõõdetakse liikuva ja fikseeritud osa vahelise **mahtuvuse** muutumist. Kiirendusandurite mõõtesüsteemides kasutatakse veel piesoelektrilisi ja magnetilisi induksioontajureid, samuti optilisi ja akustilistel pinnalainetel (keskkonna tiheduse muutumisel) põhinevaid süsteeme. Nüüdisaegsete kiirendusandurite välisilmest annab ülevaate joonis 6.9.



**Joonis 6.9. Kiirendusanduri eri vaated**

Güroskoop on kiiresti ümber telje pöörlev jäik keha, nt vurr. Kui güroskoobi pöörlemistelg toetub või on mingis punktis kinnitatud aluse külge ja güroskoobile mõjub raskusjõud, hakkab güroskoobi telg esimese lähenduses pöörlema ümber koonuse. Niisugust nähtust nimetatakse pretsessiooniks (*precession*). Vertikaalsihi ja pöörlemistelje vahelist nurka nimetatakse nutatsiooninurgaks. Protsessi, mille tulemusena see nurk perioodiliselt muutub (võngub), nimetatakse nutatsiooniks (*nutation*).

Güroskoopi kasutatakse mitmesuguste güroskoopseadmete (vurrseadmete) valmistamiseks. Näiteks täiendavad või asendavad gürokompassid tavalisi magnetkompasse. Gürokompasse kasutatakse üldjuhul mitmesugustel sõidukitel: laevadel, lennukitel, kosmoselaevadel, raketitel, liikurrobotitel sõidusihi (asimuudi) määramiseks. Güroseadmetega saab sõidukit stabiliseerida, määrata nurkkiirust (gürotahhomeeter) või -kiirendust. Güroskoopseadmeid kasutatakse keha orientatsiooni määramiseks ja liikumise juhtimiseks ruumis (*inertial guidance system*). Güroskoop ja samal põhimõttel töötav vurr on näidatud joonisel 6.10.

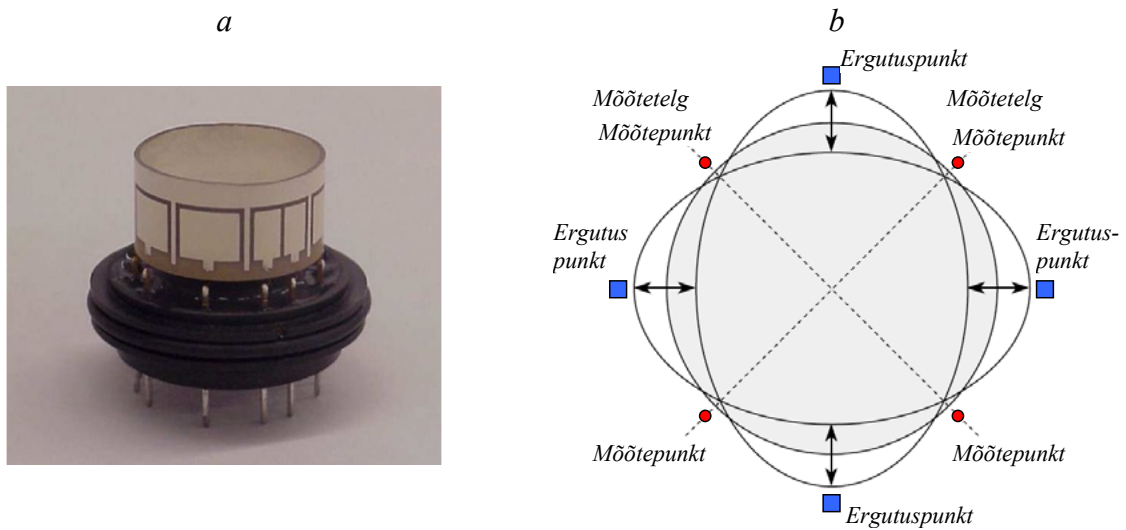


**Joonis 6.10. Pöörlev vurr *a* ja klassikaline mehaaniline güroskoop *b***

Mehaaniline güroskoop koosneb raamist, mille külge on liigendiga kinnitatud kardaanriputi (*gimbal*), mis on ette nähtud selleks, et pöörleva rootori telg saaks raami suhtes suvaliselt pöörduda. Ka rootori pöörlemistasand saab güroskoobi aluspinna suhtes suvaliselt pöörduda.

Peale mehaaniliste güroskoopide on olemas ka vibratsioonigüroskoobid ja optilised güroskoobid.

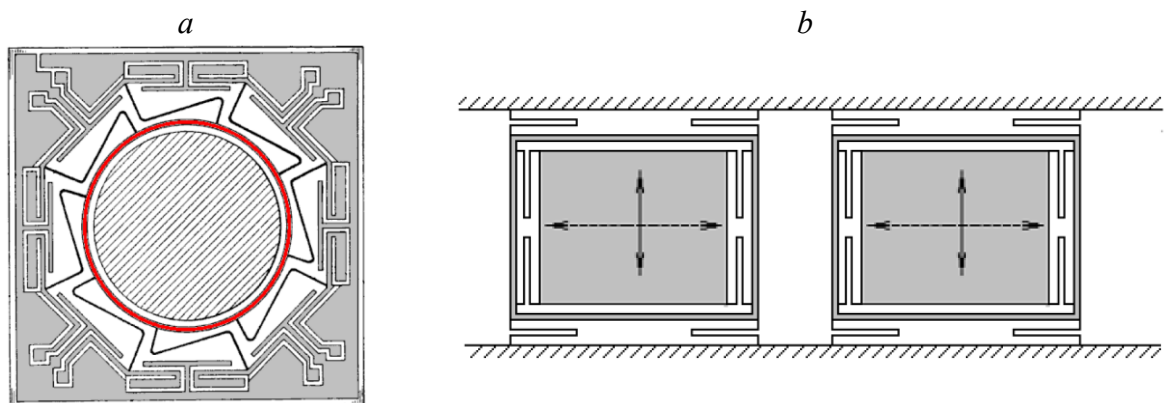
Vibratsioonigüroskoobi põhielement on piesokeraamiline pokaalikujuline resonaator (joonis 6.11, a). Pokaali ülemine ringikujuline serv pannakse võnkuma. Võnkumine toimub kahe ovaalikuulise asendi vahel (joonis 6.11, b). Kui güroskoop on seisulekus, siis mõõtepunktides vibratsioon puudub. Kui güroskoop on ergutatud ja pöörleb ümber oma sümmeetriatelje, siis mõõtepunktides asuvad elektroodid väljastavad pöörlemiskiirusega võrdelise signaali.



Joonis 6.11. Vibratsioongyroskoop: väliskuju *a* ja tööpõhimõte *b*

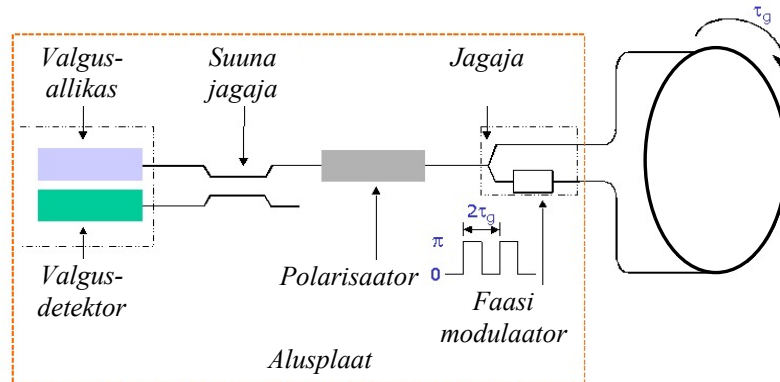
Gyroskoobil on kokku 8 elektroodi: 4 mõõdetelgede telgedel ja 4 ergutustelgedel. Pokaali pöörlemisel on kahe ristasisendis mõõdetelje anduri signaalid omavahel vastufaasis. Kahe ergutustelje signaalid on samuti vastufaasis. Seejuures kasutatakse ristuvale ergutusteljel olevaid elektroode tagasisideks, et saavutada võnkumiste konstantne amplituud. Selleks et ka võnkumiste telg oleks juhitav, kasutatakse kallutatud või lõhestatud elektroode. Ergutuselektroodide seadistamisega saab vähendada võnkumiste kõrgemate harmooniliste komponentide osakaalu. Teljelt kõrvale nihutatud elektroodide kasutamine ehk elektroodide kallutamine (*skew*) võimaldab juhtida võnkumiste vektori suunda. Seega saab ergutuselektroodidega juhtida (seadistada) nii võnkumiste amplituudi kui ka võnketasandit.

Peale ringikujulise resonaatori valmistatakse gyroskoobe ka helihargikujulise resonaatoriga. Gyroskoobi tööpõhimõte on seejuures üldjoontes sama. Kirjeldatud põhimõtet on rakendatud ka ränil põhinevates integraallülitustes asuvates gyroskoopides (joonis 6.12). Integreeritud gyroskoopides on nii resonator kui ka elektrilised ergutus- ja toiteahelad samal ränikristallil.



Joonis 6.12. Ränikristallil gyroskoobid: ringikujuline *a* ja MEMS-tüüpi *b*

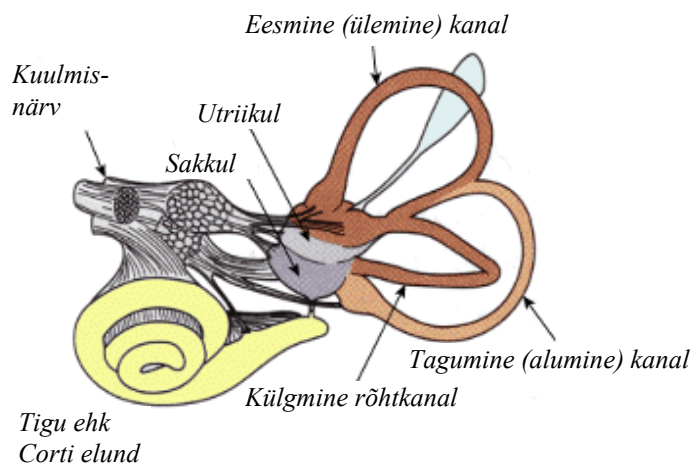
Nüüdisaegne tehnoloogia võimaldab valmistada ka optilisi güroskoobe (joonis 6.13). Optilise güroskoobi (*fiber-optic gyroscope*) tööpõhimõte on järgmine: kui kaks vastassuunas kulgevat kiirt läbivad valgusjuhist keritud mähise, siis tekib nende kiirte levimisel ajaline nihe, mille suurus on võrdeline mähise pöördenurgaga. Ajalist nihet mõõdetakse interferentsi põhimõtet kasutades kahe valguslaine faasinurga erinevuste kaudu.



**Joonis 6.13. Optiline güroskoop**

Güroskoopidel põhinevad süsteemid täiendavad sageli teisi sõidukitel paigaldatud navigatsioonisüsteeme. Näiteks ei tööta suurlinnas kuigi hästi GPS, sest kõrgehitised takistavad satelliitide nähtavust. Sel juhul täiendab güroskoop GPSil põhinevat navigatsioonisüsteemi ning võimaldab lühemaid vahemaid läbida GPSi abita.

Güroskoopi saab kasutada ka sõiduki või mobiilse roboti tasakaalustajana. Eriti on see vajalik kahe rattaliste sõidukite puhul. **Tasakaaluelund** on olemas ka inimesel. See aitab hoida tasakaalu kõndimisel, koordineerida kõigi jäsemete liigutusi ning juhtida silmi. Inimese tasakaaluelund (*vestibular apparatus*) (joonis 6.14) asub sisekõrvas. See elund koosneb alumisest kambrist ehk sakkulist (*saccul*) ja ülemisest kambrist ehk utriikulist (*utricle*) ning poolringikujulistest kanalitest (*semicircular canals*).



**Joonis 6.14. Inimese kõrva ehitus ja tasakaaluelund**

Inimese sisekõrvas on kolm ristuvaal tasandil asuvat poolringikujulisest kanalit: külgmine (*horizontal, lateral*), eesmine (ülemine, *anterior, superior*) ja tagumine (alumine, *posterior, inferior*). Need kanalid on täidetud vedelikuga, mis inimese liikumisel (kiirendamisel) samuti liigub ja avaldab survet kanalitega seotud kambritele. Selle surve registreerivad kuulmisnärvid. Kuna kanalid on eri tasanditel, saab nende abil eristada liikumist ruumis. Tasakaaluelund töötab koos silmadega. Kiire liikumise korral on inimesele oluline, et silmad liiguksid kaasa ning aitaksid säilitada orientatsiooni. Tigu (*cochlea*) on spiraalikujuline sisekõrva elund õhu võnkumiste ülekandmiseks kuulmisnärville. Tema põhikomponent on kuulmissensor ehk *Corti elund*.

### **Kinnismärgid, majakad ja nende tuvastamine**

Robot või autonoomne sõiduk saab maastikul või põrandal liikuda ka kinnismärkide või maamärkide (*robot landmarks*) järgi. Üldjuhul võib keskkonnamärke nimetada kinnismärkideks ning jaotada loomulikeks ja kunstlikeks.

Loomulikud kinnismärgid on näiteks toa sein, toa nurk, maapinna reljeef, jõgi, teepinna tekstuur, päike, taevatähed (nt Põhjanaan), maa magnetväli, keskkonna rõhk või rõhu gradient jms.

Kunstlikud kinnismärgid on näiteks kunstlikud maamärgid, jooned põrandal või maapinnal, peeglid, metallribad, keemilised märgid, valgusmajakad, raadiomajakad, globaalse positsioonimissüsteemi (GPS) satelliidid jm.

Mobiilsete tööstusrobotite puhul kasutatakse liikumisraja märkimiseks põrandale värvitud või põrandasse süvistatud tähiseid. Levinumad on värvitud rajad ja süvistatud elektrijuhid.

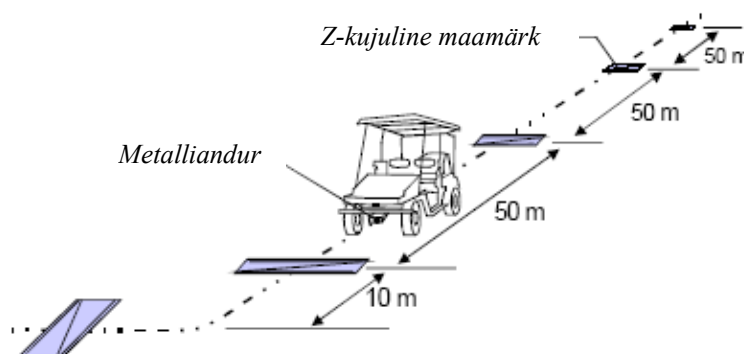
**Värvitud rajad** sobivad bürooruumidesse. Raja märkimiseks kasutatakse eredat nähtavat värvi või inimsilmale nähtamatut UV-valguses helenduvat värvi. Robotil on fototundlikud andurid, mis võimaldavad eristada rajajoont ülejäänud põrandast ja ajamite juhtimissüsteem, mis tagab roboti liikumise mööda rajajoont. Rada on hõlpsasti muudetav. Raja kuju peab olema lihtne, sest keerukaid värvitud liikumissõlmi on raske läbida. Värvitud rada võib aja jooksul tuhmuda või kustuda ning seda tuleb sageli uuendada.

**Elektrijuhid** sobivad tööstusoludes liikuvatele robotitele. Põrandas asuvad kaablite süvistatud suletud kontuurid. Igas kaablikontuuris on eri sagedusega vahelduvvool. Kontuuri järskudes pöördekohtades on maapinnale kinnitatud väikesed magnetilisest materjalist plaadid, mis võimaldavad tuvastada potentsiaalselt raskesti järgitavaid kohti ning vähendada eelnevalt roboti liikumiskiirust. Süsteemis on liikumisteel ka sidepidamispunktid, kus saab tuvastada roboti olekut ja edastada seda juhtarvutile tööde edasiseks plaanimiseks või kokkupõrgete vältimiseks. Süsteem on väga töökindel ja suhteliselt lihtsa ehitusega. Puuduseks on asjaolu, et liikumisteed on raske muuta, sest kaabel asetseb vähemalt 1 cm sügavusel.

**Diskreetsed maamärgid**, nt metallplaadid, raadiosageduslikud identifitseerimissüsteemid (*radio frequency ID systems*) võimaldavad samuti robotil orienteeruda nii maastikul kui põrandal.



Diskreetsed märgid võivad olla ühetaolised või ükshaaval identifitseeritavad tuvastuskoodi abil. Diskreetsete märkide paigutus maastikul on varem teada ja need on elektrooniliselt kaardistatud. Märkide vahekaugus sõltub roboti võimest läbida ja järgida rada mingite muude orientatsioonimeetodite, nt kompassi, kiirendusanduri, güroskoobi või käigumõõduri (*odometer*) abil. Üks võimalik maamärkide kasutusviis on joonisel 6.15.

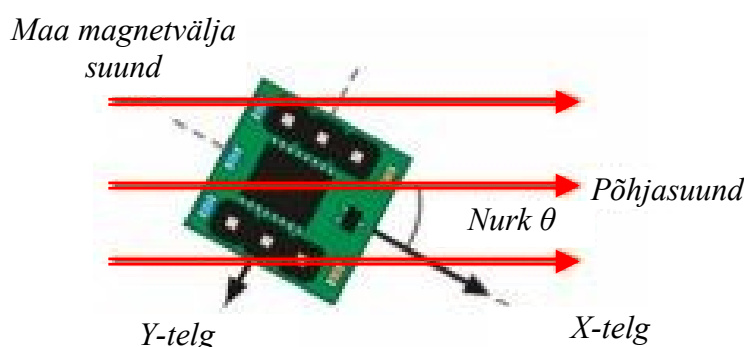


**Joonis 6.15. Maamärkide kasutamine sõiduki liikumise juhtimiseks.**

**Kompass** on ette nähtud liikumissuuna määramiseks maastikul ja selle töö põhineb maa magnetvälja mõõtmisel. Magnetiline kompassandur tuvastab maa magnetvälja suuna anduri sisemiste  $X$ - $Y$ -telgede suhtes (joonis 6.16). Andur väljastab ilmakaartele vastavad  $X$ - $Y$ -signaalid ning arvutab nende põhjal suunanurga  $\theta$ . Seejuures on  $+X = \text{PÕHI (NORTH)}$ ,  $-X = \text{LÕUNA (SOUTH)}$ ,  $+Y = \text{LÄÄS (WEST)}$  ja  $-Y = \text{IDA (EAST)}$ . Suuna nurk arvutatakse valemiga

$$\theta = \arctan(Y / X) \quad (6.1)$$

Joonisel näidatud juhtumil leitakse nurk idasuuna ( $-Y$ ) ja põhjasuuna ( $+X$ ) vahel. Anduri tundlikkus maa magnetvälja suhtes on kuni üks mikrotlesla.

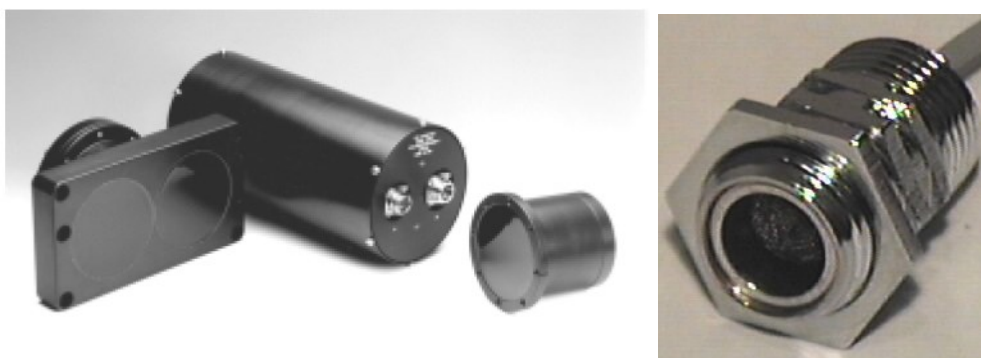


**Joonis 6.16. Kompassanduri tööpõhimõte**

Maamärke saab tuvastada ka helilainete abil. Üheks niisuguseks seadmeks, mis töötab peegeldunud helilainete mõõtmisel, on sonar. Sonaris kasutatakse ultraheli saatjat ja vastuvõtjat.

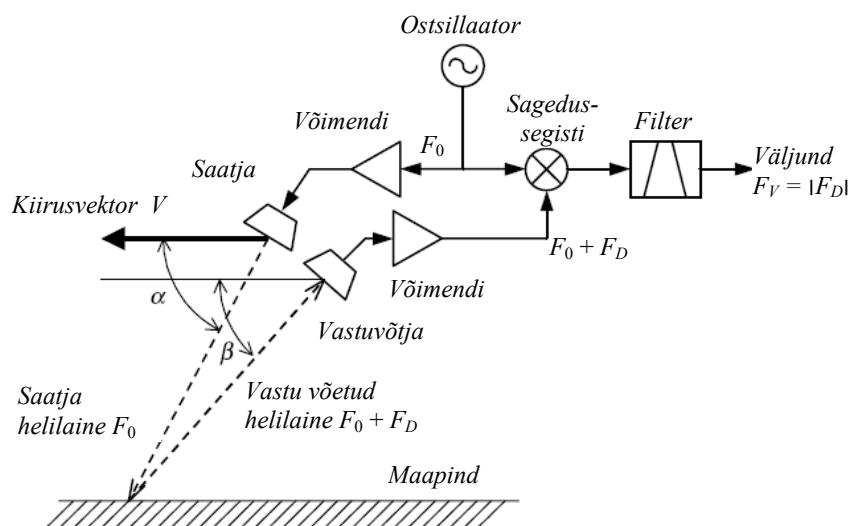
Sonarit saab edukalt kasutada ka objekti kiiruse mõõtmiseks. Vastavat sonarit nimetatakse Doppleri sonariks, sest ta põhineb Doppleri efektil.

Liikuvale objektile asuva heliallika sagedus seisva vastuvõtja jaoks sõltub sellest, kas heliallikas läheneb või kaugeneb vastuvõtjast. Läheneva heli sagedus vastuvõtjas suureneb ja kaugeneva heli sagedus väheneb sõltuvalt heliallika liikumiskiiruse ja heli levimiskiiruse suhtest. Doppleri sonari välisilme on näidatud joonisel 6.17.



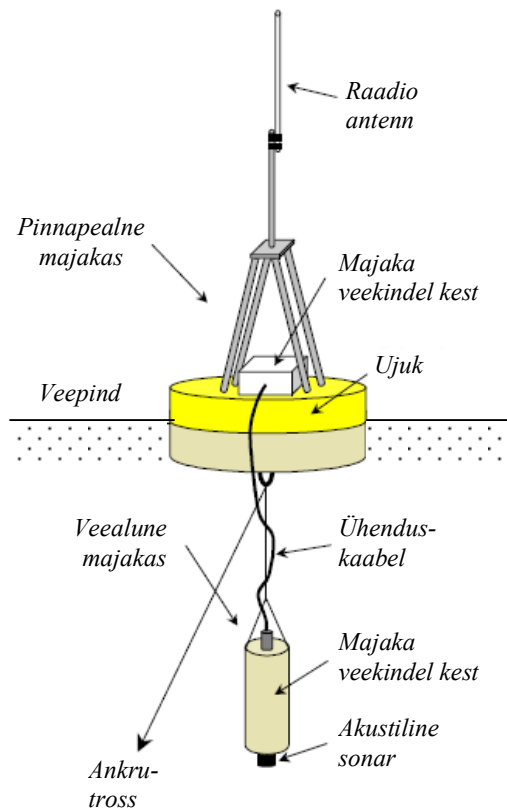
Joonis 6.17. Doppleri sonari välisilme

Doppleri sonari tööpõhimõtet selgitab joonis 6.18. Ultrahelisaatja edastab ultraheli sagedusel (nt 40 kHz) laia kiirega ( $\pm 12$  kraadi) ja tugeva signaali (120 dB). Heli langeb maapinnale ja peegeldub sealt tagasi. Vastuvõtja registreerib peegeldunud heli. Maapinnale langeva ja peegeldunud heli sagedused erinevad kiirusvektori tekitatud sagedusnihkest  $F_D$ . Selle leidmiseks võrreldakse segistis kahte sagedust ning leitakse nende erinevus. Pärast signaali filtreerimist saadakse kiirusega võrdeline sagedussignaali.



Joonis 6.18. Ultrahelisonari tööpõhimõte





**Joonis 6.20. Veepealne raadiomajakas koos veealuse akustilise sonariga**

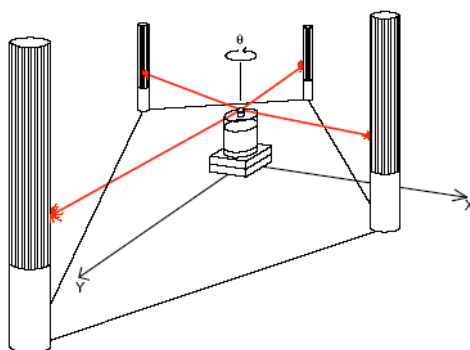


**Joonis 6.21. Valgusmajakas**

Maamärgid ja majakad on roboti jaoks asukoha tuvastamisel sama olulised, kui on inimesele orienteerumiseks vajalik ära tunda tuttavaid kohti, nt murdunud puid, loomade käiguradu või oja metsas, kindla nimega tänavaid ja numbritega maju linnas.

### 6.3. Roboti asukohta määramine tasapinnal ja ruumis

Roboti asukohta tuvastamise üldpõhimõtte majakate signaalide järgi on joonisel 6.22. Positsioonimist tasapinnal nimetatakse kahemõõtmeliseks ehk 2D-positsioonimiseks. Positsioonimisülesannet saab lahendada kas tasapinnalises polaarkoordinaadistikus või ristkoordinaadistikus. Fikseeritud majakatega tasapinnal saab asukohta määrata mõõdetud kaugusvektori pikkuse või nurkade abil. Juhul kui asukohta määratakse kahe kaugusvektori järgi, tuleb selleks lahendada geomeetriaülesanne ja arvutada kahe ringjoone lõikumispunkti koordinaadid.



Joonis 6.22. Roboti asukohta tuvastamine

Kui koordinaadistiku tšenter on ringjoone keskpunkt, siis kirjeldab ringjoont võrrand

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad (6.2)$$

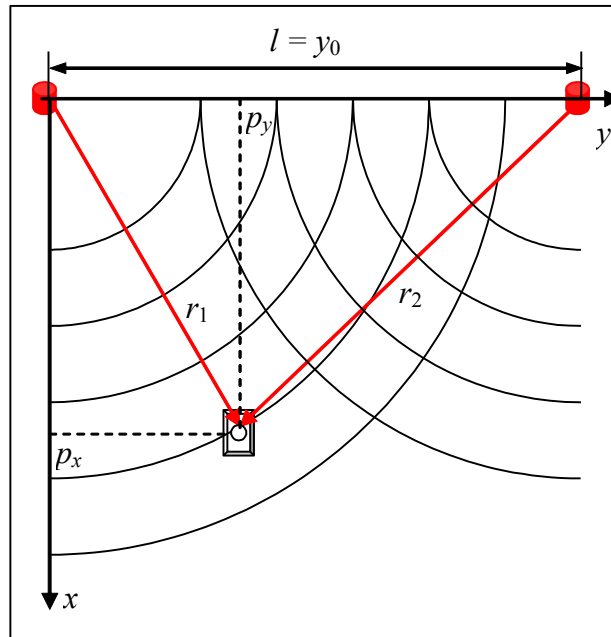
kus  $x$  ja  $y$  on joone punktide  $x$ - ja  $y$ -koordinaadid ning  $r$  raadiusvektori pikkus. Kui ringjoone tšenter ei lange kokku koordinaadistiku alguspunktiga ja selle asukoht on määratud koordinaatidega  $x_0$  ja  $y_0$ , siis kirjeldab ringjoont võrrand

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2. \quad (6.3)$$

Joonisel 6.23 on näidatud roboti asukohta tuvastamine kahe kaugusvektori järgi, mida mõõdetakse kahelt majakalt saadud signaalide põhjal. Majakad asuvad teineteisest kaugusel  $l$ . Esimene majakas asub  $xy$ -koordinaadistiku alguspunktis, teine on nihutatud piki  $y$ -telge kaugusele  $l = y_0$ . Mõõdetud kaugusvektorid on ühtlasi majakaid ümbritsevate ringjoonte raadiused. Kahe ringjoone kohta saab kirjutada võrrandisüsteemi

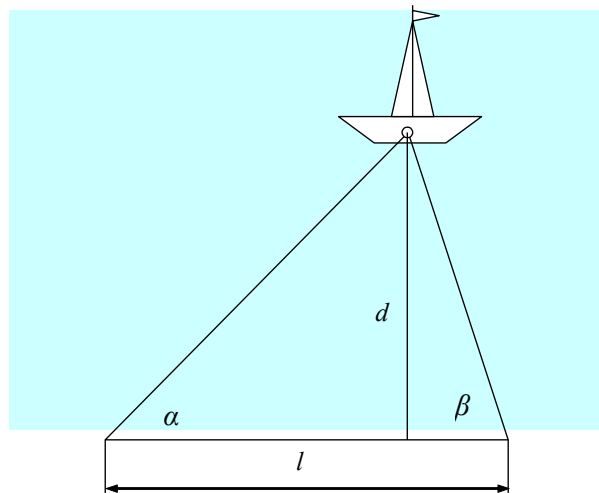
$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= r_1^2 \\ x^2 + (y - y_0)^2 &= r_2^2 \end{aligned} \quad (6.4)$$

Võrrandisüsteemi lahendiks on  $x = p_x$  ja  $y = p_y$ , mis on ühtlasi roboti asukohakoordinaadid.



**Joonis 6.23. Roboti asukoha tuvastamine kahe majaka ja kaugusvektorite abil**

Teiseks asukoha määramise viisiks on kahe nähtava majaka sihtjoontevahelise nurga mõõtmine. Seda mõõteviisi tuntakse juba ammu triangulatsiooni nime all ning seda on kasutatud ka maastikul asuvate objektide kaardistamiseks (selleks ehitati üksteisele nähtavate triangulatsioonitornide võrgustik). Triangulatsiooni näiteks on merel asuva laeva kauguse arvutamine rannikust, kui on teada kahe kaldal asuva majaka omavaheline kaugus (joonis 6.24).

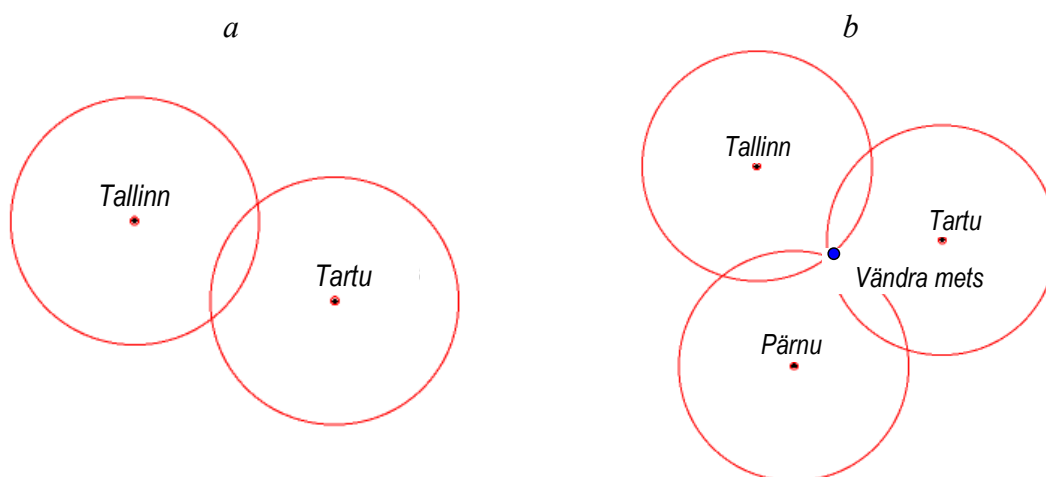


**Joonis 6.24. Laeva kauguse määramine kaldast kahe mõõdetud nurga ja mõõtepunktidevahelise kauguse abil**

Laeva kaugus arvutatakse valemiga

$$d = \frac{l \sin \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha \frac{\cos \beta}{\sin \beta}} = \frac{l \sin \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta}. \quad (6.5)$$

Alati pole asukoha määramisel võimalik piirduda kahe majakaga. Oletagem, et metsa on eksinud inimene või robot, kellel on seade majakate signaalide tuvastamiseks ja vastava kauguse mõõtmiseks. Kui piirduda kahe majakaga, siis tekib olukord, kui ülesandel on kaks lahendit (ringjoontel on kaks lõikumispunkti). Eksinud inimesel või robotil pole sel juhul võimalik tuvastada, kumb nendest lahenditest vastab tema tegeliku asukoha koordinaatidele. Kolme majaka kasutamisel saadakse ühene vastus ja kindlad asukoha koordinaadid (joonis 6.26).

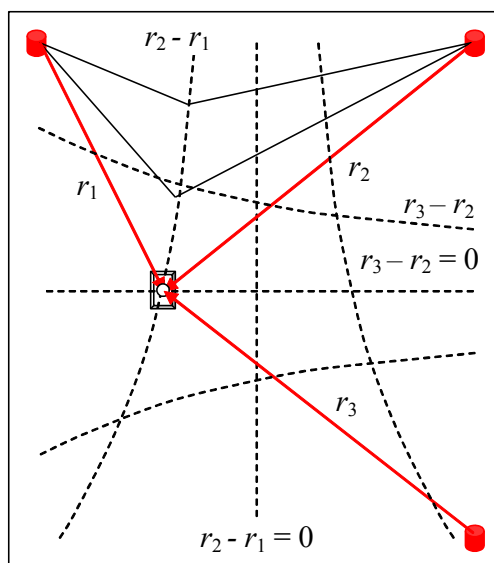


**Joonis 6.25. Asukoha tuvastamine kahe ja/või kolme majaka signaalide järgi**

Matemaatiliselt tuleb kolme majaka puhul leida kolmest ringjoone võrrandist koosneva võrrandisüsteemi lahend.

$$\begin{aligned} (x_1 - x_{10})^2 + (y_1 - y_{10})^2 &= r_1^2 \\ (x_2 - x_{20})^2 + (y_2 - y_{20})^2 &= r_2^2 \\ (x_3 - x_{30})^2 + (y_3 - y_{30})^2 &= r_3^2 \end{aligned} \quad (6.6)$$

Mõnel juhul on majakate kauguse mõõtmise asemel otstarbekam mõõta ja võrrelda kauguste erinevust kahest majakast. Sel juhul on tegemist kauguste erinevusel ehk diferentsiaalkaugusel (*differential range*) põhineva asukoha määramisega. Diferentsiaalkaugusjooned (hüperbooljooned) on joonisel 6.26. Nende joonte lõikumispunktide arvutamisega saab määrata ka otsitavad asukoha koordinaadid. Diferentsiaalkauguste määramisel põhineb ka diferentsiaalne GPSi süsteem, milles lisaks kosmoses asuvatele majakatele (satelliitidele) kasutatakse maapealseid majakaid. Kahe süsteemi koostoime võimaldab oluliselt suurendada asukoha määramise täpsust.



**Joonis 6.26. Kauguste erinevusel põhinev asukoha määramine**

**Ümbruse eeltuvastamine ja kaardistamine.** Roboti navigatsiooniks on oluline nii liikumise ajal hangitud informatsioon kui ka keskkonna kohta eelnevalt kogutud informatsioon, mille väljenduseks on keskkonna elektroonilised kaardid ja skeemid koos kõigi eelnevalt tuvastatud objektidega selles keskkonnas. Roboti töökeskkonna eeltuvastamiseks on välja töötatud laserskaneerimisel põhinevad seadmed (*Advanced Robotics Control System, ARCS*). Niisugune süsteem (*ARCS*) võimaldab:

- hoonete e-kaardistamist (*mapping*) ehk e-skeemile kandmist,
- asukoha määramist kaardistatud hoonetes veega mitte üle  $\pm 2$  cm, kusjuures täpsust saab suurendada lisaanduritega,
- navigeerimist kaardistatud hoonetes,
- punktist punkti liikumist ja tõkete vältimist, kusjuures tõkete vältimiseks saab integreerida lisaandureid (sonarid, laserid),
- sihtkoha koordinaatide kandmist e-kaardile ( $x, y, \theta$ ),
- liikumiseks mittesobivate alade (*keep off areas*) kandmist e-kaardile,
- sihtkoha dünaamilise muutmise arvestamist eraldi tarkvarapaketi toel,
- olekusignaali (nt *goal reached*) edastamist,
- toiteallika seisundi automaatset jälgimist, s.t millal tuleb akut laadida.

Roboti keskkonna eeltuvastamist võimaldab ka nn roboti silm e 3D-Lidar (*Light detection and ranging, LIDAR*), mis on näidatud joonisel 6.27.

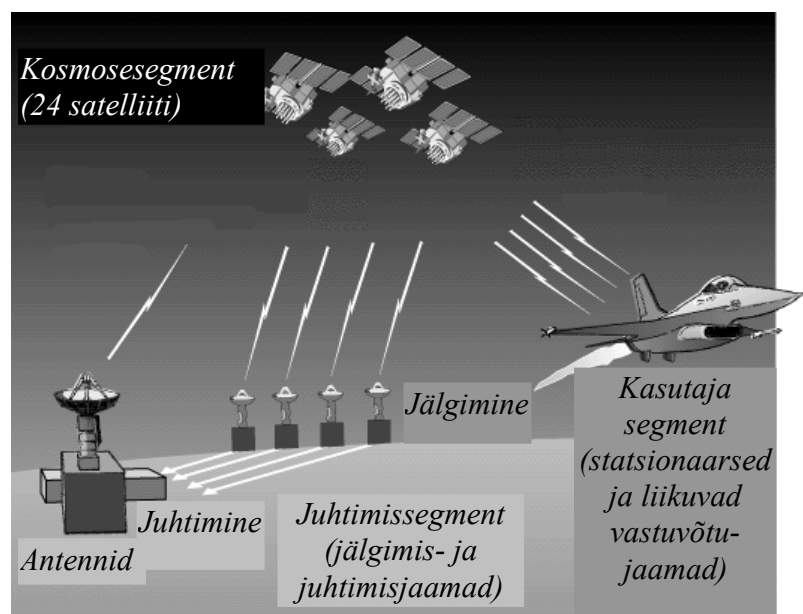




**Joonis 6.27. Roboti töökeskkonna eeltuvastusseade 3D- Lidar  
(pilt on pärit Internetist)**

### Roboti asukohta määramine ruumis, GPS

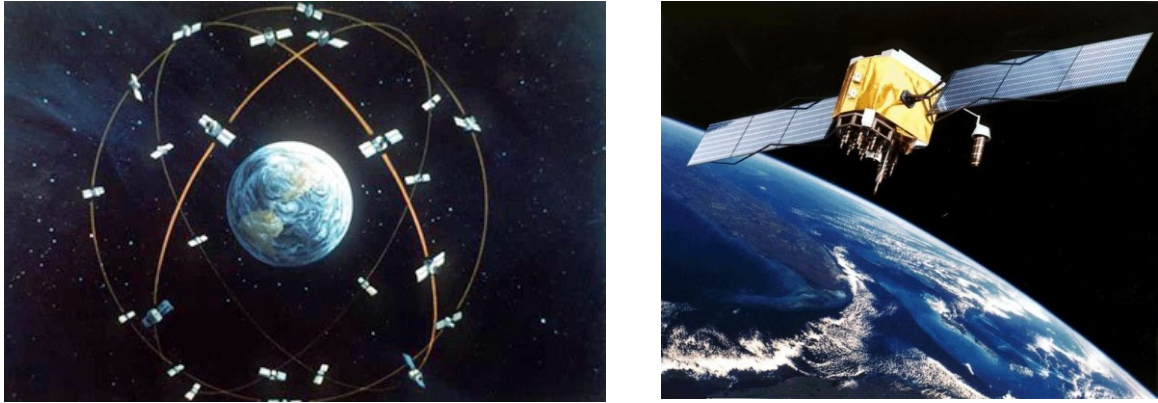
Kõige täiuslikum ja reaalsest eksisteeriv asukohta tuvastamise süsteem on globaalne positsioonimissüsteem ehk lühendatult GPS. Globaalse positsioonimissüsteemi üldine struktuur on joonisel 6.28. Süsteem koosneb kolmest segmendist: kosmoses ümber maa 20 000 km kõrgusel tiirlevatest satelliitidest (kokku 24 satelliiti), maapealsetest juhtimis- ja jälgimisjaamadest ning süsteemi kasutajate segmendist.



**Joonis 6.28. Globaalse positsioonimissüsteemi üldstruktuur**

Maapealsed juhtimis- ja jälgimisjaamad paikevad laiali laotatult üle Maa, et satelliite saaks võimalikult hästi jälgida ja kontrollida, kas need töötavad ettenähtud viisil. Kasutajate segment haarab kõiki kasutajate käes olevaid GPSi vastuvõtuseadmeid, millega tuvastatakse nii

statsionaarsete kui ka liikuvate objektide (laevade, lennukite, autode, robotite) asukohta (koordinaate). Käesoleval ajal (2014) on täielikult välja arendatud USA kaitseministeeriumi globaalse positsioonimissüsteemi *Global Positioning System* (GPS) kõrval vene süsteem *GLONASS* ning Euroopa süsteem *GALILEO*. USA kaitseministeeriumi monteeritud pildid GPSist on joonisel 6.29 ja GPSi vastuvõtjaam joonisel 6.30.



**Joonis 6.29. Kosmilised majakad - satelliidid  
(USA kaitseministeeriumi montaažpildid Internetist)**



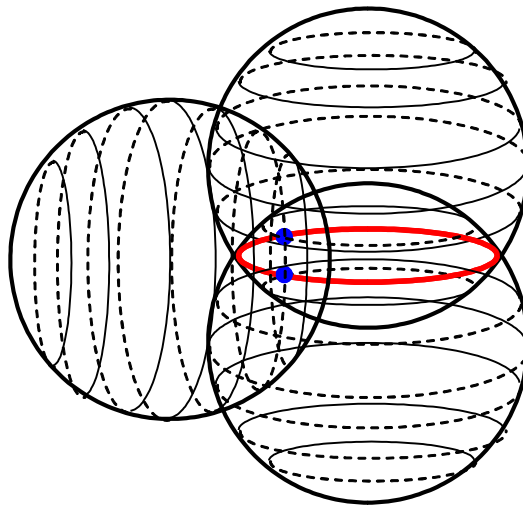
**Joonis 6.30. GPSi vastuvõtjaam koos ümbruse elektronkaardiga (pilt Internetist)**

Asukoha tuvastamine GPS-iga põhineb üldjoontes lihtsal põhimõttel, et mitme kera lõikumisel tekivad neil ühised kokkupuutejooned ja -punktid. Kaks erinevate tsentritega kerapinda lõikuvad mööda ringjoont. Kolm kerapinda lõikuvad kahes punktis ja neli kerapinda saavad lõikuda vaid ühes punktis (joonis 6.31).

Võrrandisüsteem kolme sfäärilise pinna lõikepunktide leidmiseks ristkoordinaadistikus on järgmine:

$$\begin{aligned}(x - x_{10})^2 + (y - y_{10})^2 + (z - z_{10})^2 &= r_1^2 \\(x - x_{20})^2 + (y - y_{20})^2 + (z - z_{20})^2 &= r_2^2 \\(x - x_{30})^2 + (y - y_{30})^2 + (z - z_{30})^2 &= r_3^2\end{aligned}\tag{6.7}$$

Süsteemi poolt mõõdetud suurused on kaugusvektorid  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ . Otsitava asukohavektori projektsioonid on  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . GPS tuvastab objekti koordinaate Maaga seotud polaarkoordinaadistikus.



**Joonis 6.31. Kerapindade lõikejooned ja -punktid**

Vaatamata koordinaatide määramise põhimõttelisele lihtsusele, on GPSi puhul koordinaatide täpne arvutamine keerukas. Üheks raskuseks on Maa kuju, mis erineb sfäärist. Maakujulist keha nimetatakse **geoidiks** ja koordinaate arvutatakse vastavas polaarkoordinaadistikus. Lisaraskusi põhjustavad ka atmosfääri olude muutumisest tingitud mõõtmisvead ning nende kompenseerimine.

## 7. ROBOTITE PAIGALDAMINE, TALITLUSJÄRELEVALVE JA HOOLDAMINE

### 7.1. Robotite paigaldamine

#### 7.1.1. Robotsüsteemi projekteerimine

Robotsüsteemi loomine ja paigaldamine on otstarbekas jätta robotit tootva firma hooleks. Robotitootja tunneb oma roboti omadusi ja võimalusi kõige paremini ja oskab ka kõige paremini ette näha võimalikke esilekerkivaid probleeme. Robotifirmal on olemas ka väljaõppinud spetsialistid ja kõik vahendid robotsüsteemide projekteerimiseks, sh virtuaalse robotitehnika tarkvara. Seepärast peavad tellija ja tootja tegema koostööd juba tellimuse ja müügipakkumise ettevalmistamisel. Koostöö tulemusena tuleb luua tulevasest robotsüsteemist tarkvaraline arvutimudel. Mida täpsem see mudel on, seda vähem tekib reaalses paigaldises ettenägematuid probleeme. Kõige olulisem on valida õigete tehniliste omadustega robot. Roboti valik on seotud teatud riskiga, sest alati on tellija poolt surve valida võimalikult väike ja odav robot, kuid samas peab see robot tööprotsessis ulatuma kõikide tööpunktideni. Järgnevalt käsitletakse ABB robotite paigaldamist ja teenindamist.

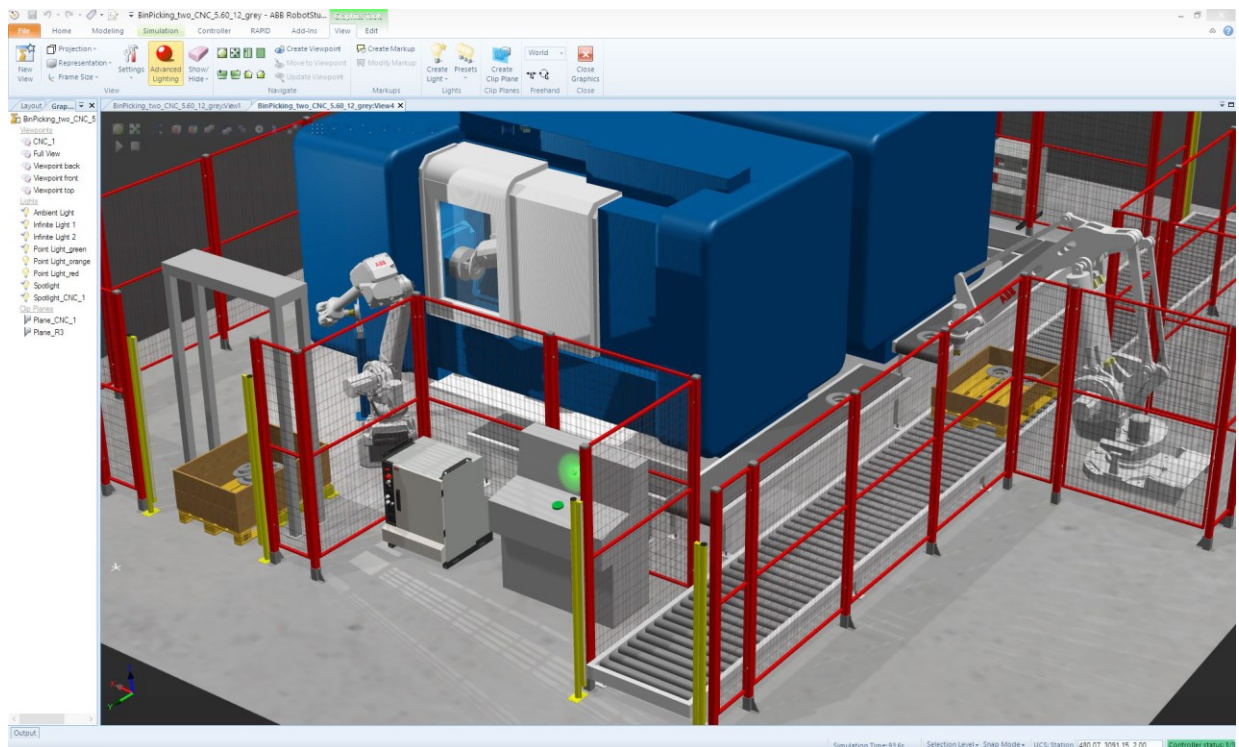
ABB tootevalikus on olemas mitmed robotitega seotud seadmed ja need on üldjuhul 3D-mudelitena olemas ka virtuaalse robotitehnika tarkvaralises *RobotStudio* keskkonnas. Nende seadmete mudelitest saab kokku panna terve robotsüsteemi esialgse mudeli. Lisaks, on soovitatav hankida kliendilt ka töödeldava detaili mudel. Niisugusel juhul saab *RobotStudio* keskkonnas luua süsteemist küllaltki täpse mudeli ja genereerida selle talitluseks ka täpse programmi. Samuti saab lisaks roboti liikumiste kontrollimisele hinnata näiteks ka roboti töötsükli aega. Liikumiste kontrollimisel on vaja arvestada peale roboti ja detaili ka näiteks kasutatava tööriista ja detaili kinnitamiseks kasutatavate rakiste mõõtmeid ning roboti tööalas olevaid mitmesuguseid juhtmeid ja kaableid. CAD-keskkonnas varakult leitud puudujääke on väga lihtne ja odav kõrvaldada. Tellijale juba tarnitud roboti ümbervahetamine suurema vastu võib osutuda väga kulukaks ja aeganõudvaks.

Projekteerimist alustatakse üldjuhul robotsüsteemile sobiva asukoha valimisega, ka seda tehakse koostöös kliendiga. Sageli paigaldatakse robotid juba töötavatesse ettevõtetesse ja tootmispinnad ei ole tavaliselt ülemäära suured. Lisaks tuleb arvestada väga paljude asjaoludega nagu ligipääs elektritoitele ja suruõhule, piisavalt ruumi peab olema ka robotiga töötamiseks, sh toodete või toorikute transpordiks ja laadimiseks kompleksi ning sealt valmistoodangu eemaldamiseks ja ladustamiseks.

Juhul kui klient on enne roboti tellimist hoolikalt läbi mõelnud, millist robotit ja kuhu ta seda paigaldada soovib, siis on tal ka olemas oma nägemusest konkreetsed joonised, millel on märgitud ära kõik olulised mõõtmed, nõutavad ligipääsud ja kommunikatsioonid. Selleks jooniseks võib olla väljatrukitud osa tehase projektist, millele on peale kantud soovitava robotsüsteemi eskiis. Roboti pakkuja ülesandeks on sel juhul luua koostöös kliendiga etteantud eskiisi põhjal adekvaatne robotsüsteemi mudel tulevase kompleksi hinna arvutamiseks. Niisuguse mudeli olemasolu lihtsustab oluliselt kõiki järgmisi robotsüsteemi loomisega seotud etappe alates roboti valikust ja müügist kuni süsteemi tööprotsessi ja hoolduseni välja.

Tööstusrobotid on praktikas alati osa suuremast tootmisliinist ja seega on robotite integreerimine eri süsteemidega iga robotiprojekti üks olulisimaid toiminguid. Robot on masin, mis võimaldab teisaldada ja paigutada tööriista või toodet ruumis väga täpselt ja korratavalt. Robotsüsteemi plaanisel on oluline arvestada asjaoluga, et peale roboti on süsteemis väga palju muid seadmeid, masinaid ja vahendeid. Ei tohi ära unustada näiteks robotkeevituse toiteseadmeid, ventilatsiooniagregaate, turvaseadmeid ja -piirdeid jne.

ABB robotite korral kasutatakse *RobotStudio* keskkonda, milles saab süsteemi mudelisse sisse viia lisaseadmete erinevaid CAD-mudeleid (joonis 7.1). See eeltöö lihtsustab oluliselt hilisemat täpsemat projekteerimist, sest võimaldab kiiresti ära näha kitsaskohad ja vajadusel juba enne lepingu sõlmimist kliendiga näidata talle tulevase kompleksi üldilmet. Kahjuks ei oska see tarkvara ise tähelepanu juhtida puuduolevatele seadmetele. Seega peavad nii klient kui ka robotitootja kriitiliselt hindama süsteemi tööd ja alati arvestama võimalike lisaseadmete vajadusega reaalses paigaldises.



**Joonis 7.1. ABB RobotStudio arvutikuva**

### 7.1.2. Robotikompleksi turvaelemendid

Tööstuslike robotisüsteemide korral on pea alati vajalikud turvapiirded, mis sageli on ohutusseadustega muudetud kohustuslikus. Võrreldes enamike masinatega on robotid sageli ohtlikumad oma liikumise ettearvamatus tõttu. Paljudes robotites töötavad programmid saavad sisendinfot mitmetelt erinevatelt anduritelt ja roboti käitumisloogika võib olla väga keeruline. See kõik muutub ohtlikuks, kui tootmises töötavad inimesed sattuvad roboti käe liikumisulatusse ega oska vältida roboti liikuvaid osi. Seepärast on robotsüsteemid alati ümbritsetud piiretega mis aitavad roboti töötamise ajal vältida inimeste sattumist roboti tööalasse. Kõige lihtsamad piirded on füüsilised tõkked nagu aiad, väravad ja ukсед, aga tihti on vaja kasutada paindlikumaid lahendusi. Kuna robotid töötavad tänapäeval enamasti siiski koos inimesega, on vaja tagada ka roboti operaatorile ohutu töökeskkond. Kuna robotiga töötamisel peab operaator pääsema ligi detailidele, mida manipuleerib ka robot, siis võivad operaatori ja roboti töötsoonid kattuda.

Vältimaks roboti ja inimese kokkupõrkeid on vaja anda robotile teavet operaatori asukohast ja kavatsustest. Sageli kasutatakse selleks mitmesuguseid optilisi piirded, mis seiskavad roboti, kui operaator piirdele läheneb. Piirete andurid kasutavad valguskiirt, mis peegeldub kahe posti vahel ja kiire katkemisel (kui inimene läheneb robotile) peatatakse robot koheselt. Niisugused lahendused on väga levinud näiteks keevitusrobotite juures, kus operaator peab tihti detaile rakisesse asetama ja sealt valmisdetaile ära võtma. Suurema tootlikkuse saavutamiseks kasutatakse ka kahe tööalaga roboteid. See tähendab, et optilisi piirdeid on kaks ja olenevalt roboti asendist võib ühe piirde toimimise ka roboti töötamisel katkestada. Sel juhul robot „teab“, et operaator on ühes tööalal sees ja sinna liikuda ei tohi. Kui roboti programm peaks ikkagi roboti viima samasse tööalasse inimesega, seiskab turvakontroller kohe roboti. Operaatori lahkumisel tööalast peab ta nuppude abil robotile „teatama“, et see tööala on jälle ohutu automaatseks tööks. Robotsüsteemi projekteerimisel ja paigaldamisel on niisuguse lahenduse korral vaja jälgida, et need tööalad oleksid teineteisest võimalikult kaugel. Siis saab robot segamatult töötada ühes alas ja teine ala on samal ajal ohutu inimesele. Näiteks laadimisrobotitel peab olema võimalus teostada oma liikumistsükkel ilma keelatud ala läbimata.

Lisaks optilistele anduritele saab kasutada ka väravalüliteid. Väravalülite eelis on nende väiksem hind, kuid operaatorile on need tihti oluliselt ebamugavamad. Paljudel juhtudel ei võimalda väravad piisavalt head ligipääsu nt kraanadele või tõstukitele. Seepärast kasutatakse väravaid ja väravalüliteid kompleksi vähem käidavates osades, näiteks keevitusgaasi balloonihoidla või seadmete hoolduseks vajalike uste juures.

Kõik ligipääsud roboti tööalale peavad olema varustatud niisuguste turvameetmetega, mis tagavad ohutuse mitte ainult spetsialistidele, vaid ka väljaõpetamata inimesele. Juhul kui robotsüsteemi piiretes on väravad, kuid neile ei soovita paigaldada turvalüliteid, siis peavad need väravad olema kindlalt lukustatavad. Täpsed nõuded, missuguseid meetmed tuleb igal konkreetsel juhul rakendada, võivad eri riikides olla erinevad. Ohutusnõuded on tavaliselt määratud ohutusseadusega ja neid võidakse ka suhteliselt tihti muuta. Enne robotipaigaldise lõplikku üleandmist kliendile on mõistlik kontrollida selle vastavust turvanõuetele.

Lisaks operaatori ohutusele peab robot kaitsma ka iseennast ohtlike olukordade eest. Kõige

sagedasemad avariid robotiga on jäigad kokkupõrked muude kompleksi elementidega. Kõigil kaasaegsetel robotitel on servoajamid kaitstud elektrooniliselt, et vähendada mootorite rikkimineku võimalust. Kui robot liigub mingi tõkke vastu ja liikumistakistus suureneb järsult, siis suureneb ka mootori vool ja servoajami liigvoolukaitse lülitab ajami automaatselt välja. See on kõige lihtsam, kuid samas väikese toimekiirusega kaitse. Lisaks on ABB robotitel kasutusel „*Collision Detection*“, mis pidevalt kontrollib ja võrdleb kõigile roboti lülidade toimivaid jõudusid teoreetiliselt võimalike väärtustega.

Normaalseks tööks peavad roboti kinemaatiline ja dünaamiline mudel olema võimalikult täpsed. Kuna roboti manipulaatori massile lisatakse alati vähemalt haarats või tööriist, vahel ka muid seadmeid, on oluline arvestada mudelis ka kõiki lisamasse ja muid parameetreid. Tööriista puhul on näiteks vaja sisestada tööriista mass ja massikeskme koordinaadid roboti käe suhtes. Uuematel robotitel saab neid andmeid sisestada ka spetsiaalse programmi abil, mis kiirete liigutuste abil mõõdab ära tööriista massi ja massikeskme. „*Collision Detection*“ annab võimaluse roboti töö ajal sättida takistusjõudude piirtaset, mille ületamisel robot eeldab, et on toimunud avariid. See tähendab, et suurt täpsust ja tundlikkust nõudvate liigutuste juures saab muuta roboti tundlikumaks ja vältida õrnade masinaosade või detailide purunemist kokkupõrkel. Samal ajal säilib aga programmi muudes osades võimalus liikuda väga kiiresti ja töötada raskete detailidega ilma, et rakenduks kaitse. Roboti kontroller jälgib pidevalt mitmeid turvasignaale, mis ei ole seotud ainult inimese turvalisusega. Näiteks keevitusrobotid oskavad kontrollida paljusid keevitusmasina parameetreid ja ei alusta tööd, kui kaitsegaasi rõhk või jahutusvedeliku vool on puudulik. Turvasüsteemis saab kasutada mitmesugust konkreetse rakendusega seotud eriloogikat ja suurendada seeläbi turvalisuse taset. Näiteks pressidega töötavate robotite puhul on oluline, et robot ei üritaks liikuda suletud pressi vahele. Sellisel juhul ühendatakse roboti üks sisendsignaal pressi vastava väljundi külge ja roboti turvaloogikas defineeritakse ala, kuhu robot ei tohi siseneda ilma vastavat signaali kontrollimata.

Keevitusrobotite puhul on oluline kaitsta operaatoreid keevitusel tekkiva kahjuliku kiirguse ja gaasi eest. Kaitsmiseks ereda valguse eest tuleks roboti ümber kasutada mitteläbipaistvat piirdeaeda. Seepärast ongi keevitusrobotite piire valmistatud plekist, mitte aga võrgust, nagu muudel juhtudel. Kõik aknad peaksid olema spetsiaalse keevitusklaasiga ja suuremad sissepääsud peaksid olema varustatud keevituskardinatega. Võib lisada, et keevitusel tekkiv valgus on väga intensiivne ja isegi selle peegeldus heledatelt pindadelt on inimestele häiriv. Mõistlik on värvida kõik robotikompleksi sisemised seinad ja piirded musta mati värviga.

Lisaks valgusele tekib keevitusel ka palju inimesele ohtlikke gaase, mille eemaldamiseks on vaja head ventilatsiooni. Tõhusa ventilatsiooni projekteerimiseks on mõistlik teha koostööd mõne ventilatsioonitöödele spetsialiseerunud ettevõttega. Üldjuhul on igal keevitustöökohal gaaside tõhusaks eemaldamiseks vaja piisavalt suure õhuvooluga äratõmmet. Mida lähemal on äratõmme töökohale, seda väiksema vooluga saab tagada gaaside piisava äratõmbe. Samas võib väga madalale paigaldatud ventilatsioonisüsteem takistada operaatoreid ligipääsu töökohale. Suurema õhuvoolu korral on ventilatsiooni hind, voolutarve ja paljudel juhtudel ka müra suuremad.

### 7.1.3. Roboti asetus

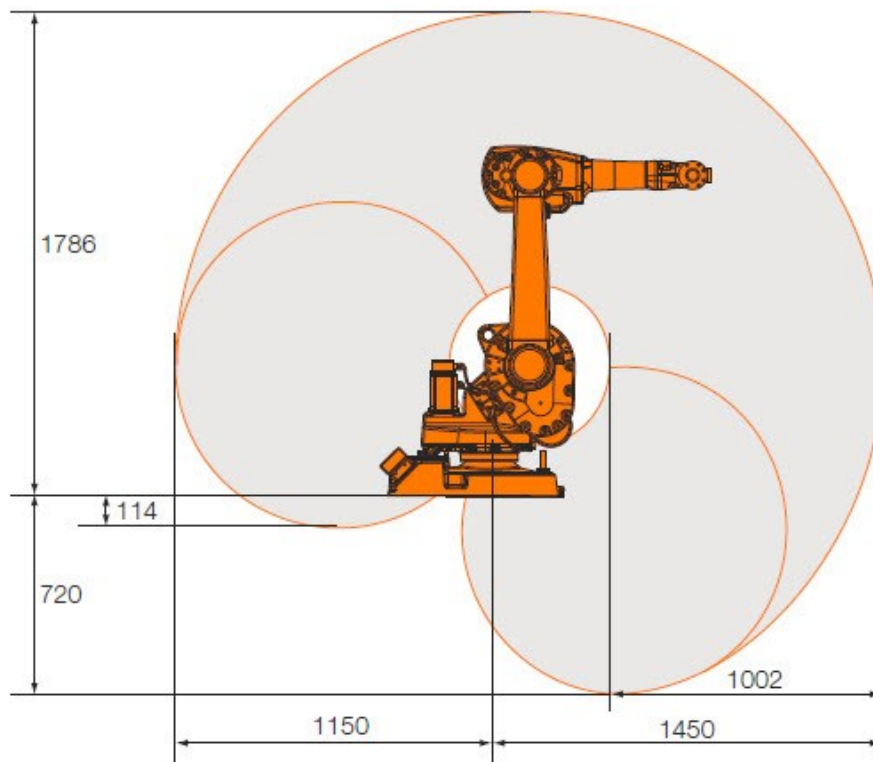
Robotikompleksi projekteerimisel võib CAD-keskkonnas paigutada roboti ruumi suvalises asendis. Üldjuhul paigutatakse robot nii, et tööala saaks maksimaalselt ära kasutada ja seepärast pole roboti paigaldamine otse põrandale mitte alati parimaks lahenduseks.

Kõige enam kasutatavate kuue liikuvusastmega robotite töötsoon on tavaliselt suurim põranda rööptasapinnal, mis läbib roboti 1. ja 2. telje ühenduskohta (joonis 7.2). Enamike robotite puhul on see tasapind küllaltki madalal. Kuna tööd on vaja teha põrandast kõrgemal, siis kasutatakse tihti roboti all postamenti. Robotikompleksi projekteerimisel on üheks kriitiliseks sammuks roboti paigaldamine õigele kõrgusele. Kogemused on näidanud, et mõistlik on robot paigutada nii, et keevituslaua tasapind jääks roboti põhjaga ligikaudu samale kõrgusele. Üldjuhul tuleks roboti tööala valida sellele kõrgusele, mis on kõige mugavam operaatorile.

Juhul kui mugav töökoht operaatorile on tagatud, siis edasi tuleks jälgida, et manipulaatori ükski lüli ei töötaks oma piirasendi lähedal. See on eriti oluline just manipulaatori käe (esimese kolme lüli) puhul. Manipulaatori lülide töötamisel piirasendite lähedal on roboti töö ebatäpsem, samuti või tekkida probleeme roboti käele sobiva poosi leidmisel. Lisaks sellele tekivad pikalt väljasirutatud käega manipulaatoris suured mehaanilised pinged ka aluse kinnitusliidetes. Väljasirutatud käe korral peavad ka mootorid arendama suuremat võimsust (suurem inertsimoment), aga see tähendab omakorda, et robot tarbib rohkem energiat ja mootorid soojenevad kiiremini. Eriti halb on olukord siis, kui robot peab selles asendis tegema palju kiireid ja lühikesi liigutusi. Näiteks keevitusel on levinud robotiga ringikujuliste liigutustega õmbluse laiemaks venitamine, mis väljasirutatud käe korral võib väga lihtsalt põhjustada mootorite ülekuumenemist. Suured mehaanilised pinged roboti aluses ja vibratsioon, mida sellised väikesed liigutused põhjustavad, võivad väga kiiresti tekitada pragusid nii pjedestaalis kui ka pjedestaali ankrupoltide ümber põrandas.

Mõned robotid suudavad töötada ka “selja taga” ja seda saab teatud olukordades väga edukalt ära kasutada parema tsükliaja saamiseks. Üldjuhul on roboti käe lülisid liigutavate ajamite võimsus seda suurem, mida lähemal on lüli alusele. Kui robotil on vaja töötada näiteks kahes eri positsioonis, mis on teine teiselpool robotit, siis on positsiooni vahetamiseks kaks võimalust: 1) pöörata ümber esimese telje või 2) pöörata ümber kolmanda telje. Kuna kolmanda lüliga seotud mass on oluliselt väiksem, siis on 2. variandi korral võimalik saavutada olulist ajalast säästu. Keevitusroboti puhul tuleb sel juhul arvestada ka robotile paigaldatud kaablitega, mis ei pruugi alati niisugust manöövrit võimaldada. Näiteks kolmandale lülile paigutatud keevitustraadi ettesöötja võib takistada teise lüli liikumist, samuti või tekkida probleeme kaablite ulatuvuse või keerumisega. Roboti tarkvara oskab üldjuhul vältida roboti eri lülide kokkupõrget, kuid lisaseadmete paigaldamise järel on olukord muutunud ja roboti tarkvara ei pruugi nende olemasolu piisavalt täpselt arvesse võtta. Robotsüsteemi käikulaskmisel on otstarbekas väikese kiirusega läbi käia kõik olulisemad tööpositsioonid ja jälgida ka kõigi teiste kompleksi osade liikumist, et edaspidi vältida kokkupõrkeid täiskiirusel töötamisel.





**Joonis 7.2. Roboti IRB 1600 tööala**

## 7.2. Robotite hooldus

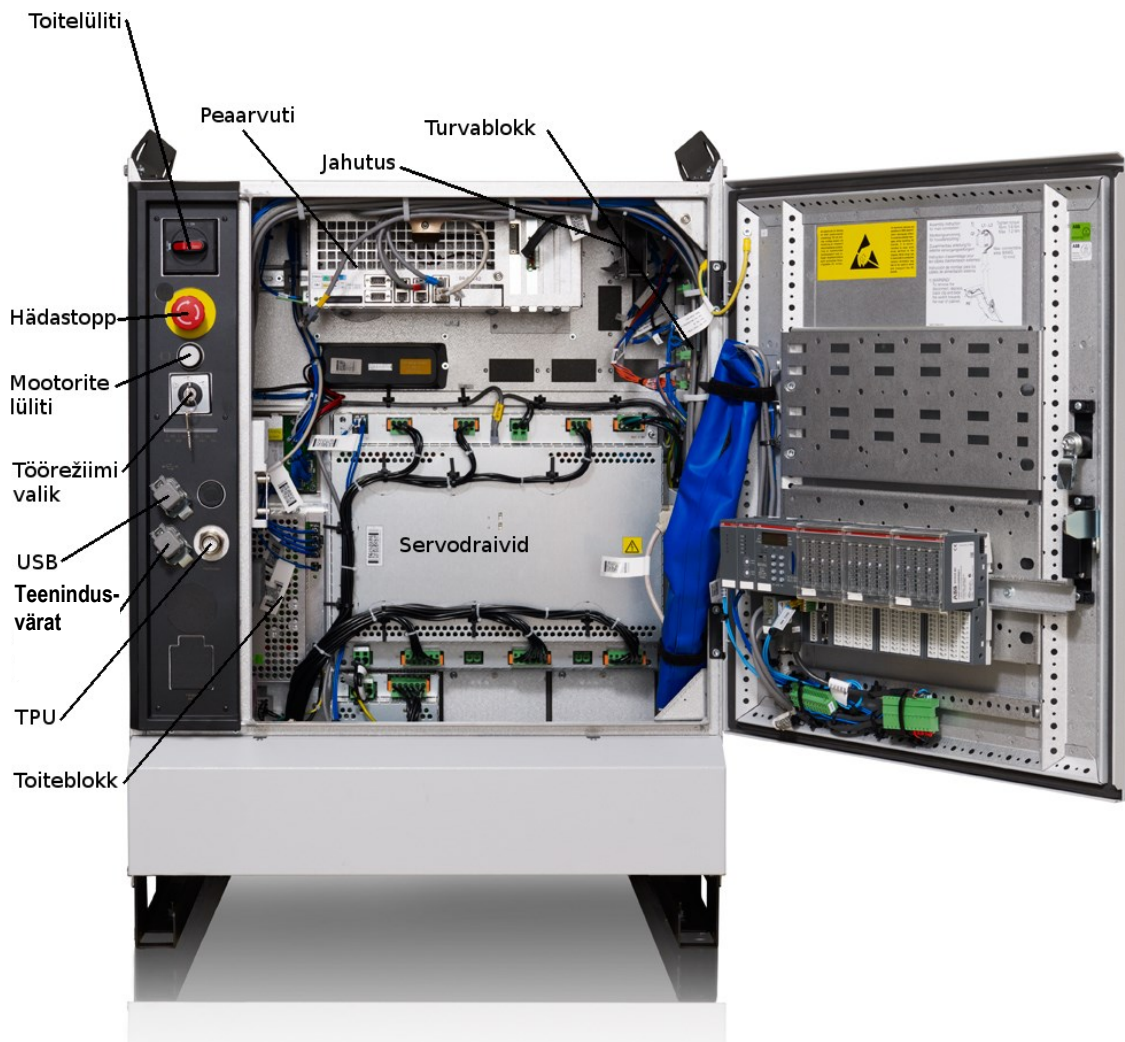
Robotid, nagu kõik teisedki masinad, vajavad regulaarset hooldust. Robotsüsteemid koosnevad mitmest komponendist (nt manipulaatorist, abiseadmetest, toiteallikatest, kontrollierist jne), mille hooldus on väga erinev. Seepärast võime eraldi rääkida elektroonikaseadmete hooldusest, tarkvarahooldusest, kaablite ja juhtmete hooldusest ning mehhanismide hooldusest.

### 7.2.1. Elektroonikaseadmete hooldus

Roboti kontrolleri sisaldab elektroonikakomponentide ja juhtimistarkvara. Mootorite toitemuundurites kasutatavad jõuelektroonikakomponendid vajavad väga head jahutust. Muunduri võimsuskaod on seda suuremad, mida võimsam ja suurem on manipulaator ja mida intensiivsemalt see töötab. ABB robotitel on jahutusradiaatorid kontrolleri kapi tagaküljel. Kuna tootmiskeskond on tihti väga tolmune, siis on oht, et tolmuste radiaatorite jahutusvõime väheneb. Tagamaks piisavat jahutust tuleb radiaatoreid regulaarselt puhastada. Väikeste robotite puhul piisab sageli ka passiivsest e loomulikust jahutusest. Üldjuhul on aga vaja kasutada sundjahutust ja ventilaatoreid. Sel juhul tuleb lisaks radiaatoritele puhastada ka ventilaatoreid. Ventilaatorite puhastamiseks tuleb robot välja lülitada ja kindlasti blokeerida ventilaatorid nii, et need suruõhuga puhastamisel kiiresti pöörlema ei hakkaks. Vastasel juhul genereerivad pöörlevad ventilaatorid generaatorina töötades energiat, mis võib kahjustada nende toiteseadme elektroonikakomponente. Radiaatoreid on samuti otstarbekas puhastada suruõhuga. Igal juhul

tuleb aga jälgida, et radiaatorite puhastamise ajal oleks kontrolleri kapi uks suletud. Vastasel juhul lendab suur osa õhkupaisatud tolmust kontrolleri sisse ja võib seal olulist kahju tekitada.

Peale väliste radiaatorite ja ventilaatorite on mõnel robotil olemas eraldi jahutus ka juhtarvutil. Selle tolmust puhastamiseks tuleb arvuti kontrolleri kapist välja võtta ja puhastada eraldi. Alati tuleks jälgida, et tolmu ega muu mustus ei satuks kappi, sest kontrolleri kapi põhjas olevate toite- ja juhtkaablid vahelt on tolmu ja mustust väga tülikas eemaldada. Kontrolleri hoolduse käigus tuleks üle kontrollida ka kõik pistikühendused ja kapis olevad kaablid, et need ei ole kahjustatud. Mõnikord tuleb jõumoodulite puhastamiseks need kontrolleri kapist välja võtta ja puhastada eraldi. Seda võtet kasutatakse just uuemate IRC5-tüüpi kontrollerite puhul. Sel juhul tuleb olla ettevaatlik, et eemaldatud moodulitel olev tolmu ei pudeneks kappi. Enne juhtmete lahtiühendamist ja moodulite eemaldamist on kindlasti vaja üles märkida kõikide moodulite ja kaablite asukohad. Võimalusel tuleks teha ka fotosid esialgselt olukorrast. IRC5-kontrolleris on jõumoodulid kinnitatud kapi tagaseinale (joonis 7.3).



**Joonis 7.3. Kontroller IRC5**

### 7.2.2. Tarkvara hooldus

Üks osa hooldusest hõlmab ka tarkvara hooldust. Seejuures tehakse tagavarakoopiaid kõigist roboti ja süsteemi programmidest. Tagavarakoopiade tegemiseks on hea kasutada IRC5 kontrolleri puhul USB mälu pulka. Vanematel robotitel on vaja kasutada ketasmäluseadmeid. IRC5 kontrolleri võimaldab tagavarakoopiaid teha ka roboti sisemälusse, kuid need tarkvarakoopiaid võivad sisemälu rikkumisel kaduda koos roboti süsteemse tarkvaraga. Seetõttu tuleks perioodiliselt teha koopiaid ka mõnele muule andmekandjale. Lisaks saab vastavalt seadistatud robotiga teha koopiaid läbi võrguliidese ka otse mõnda serverisse, mis vajadusel võimaldab kasutusele võtta koopiade automaatse salvestamise. Roboti tarkvara varukoopiaid sisaldavad infot süsteemi seadete ja programmide, tööriistade ning tööobjektide kohta, kuid ei sisalda mälu ketta täielikku koopiaid. Eraldi koopiaid on vaja ka roboti operatsioonisüsteemist ja seda on kõige lihtsam varuda süsteemi loomisel, enne tarkvara kirjutamist roboti kontrolleri sisse. Süsteemi loomisel ABB *RobotStudio* abil tekitatakse süsteem kõigepealt arvutisse, seejärel on seda võimalik kopeerida roboti kontrolleri sisse. Arvutis olev fail tuleks samuti kindlasti salvestada kuhugi kindlasse kohta. Parimaks variandiks on kirjutada roboti algseisus varukoopiaid ühele CD-le ja hoida seda roboti juures. IRC5-kontrolleri mälu kaart ei ole tavavahenditega kopeeritav ja seega ei ole mõtet teha sellest koopiaid, sest see ei pruugi töötada. Vajadusel saab ABB käest osta samasuguse kaardi ja kopeerida sinna süsteemi tarkvara. Sel juhul oleks võimalik rikki läinud süsteemi tarkvara viia uuesti töökorda kaardi lihtsa väljavahetamisega.

Eestis on väga levinud veel vanema põlvkonna robotid, mille peamiseks andmekandjateks olid ketasmäluseadmed. Nende robotite puhul tuleks võimalikult kiiresti teha turvalised koopiaid kõikidest allesolevatest ketastest. Vanade robotite operatsioonisüsteem on enamasti salvestatud mitmele kettale ja seepärast on hädavajalik, et iga konkreetse robotiga kaasas olev kettakomplekt oleks lisaks salvestatud ka mõnele muule töökindlale andmekandjale. Ketasmälude (*floppy disk*) rikkiminekut põhjustavad erinevad mõjurid, kuid robotite puhul on peamiseks põhjuseks asjaolu, et kettaid hoitakse roboti kontrolleri kapi sees või läheduses. Mõlemal juhul on tegemist kuuma ja räpase keskkonnaga, mis ei mõju ketastele hästi. Kui roboti operatsioonisüsteemi kettad on kaotsi läinud või kahjustatud ja süsteemi on vaja uuesti installida, tuleb uue komplekti saamiseks pöörduda roboti tootja poole. Väga vanade süsteemide puhul võib tarkvara asendus olla vägagi kallis või võimatu. ABB robotite jaoks on olemas ketasseadme asemele sobiv liides (adapter), mis võimaldab ketaste asemel kasutada USB mälu pulka ja sellele salvestatud kettakoopiaid. Niisugune lahendus on tänapäeval võrreldes ketasmäludega palju parem, kuid isegi sel juhul on soovitatav teha koopiaid kõigist ketastest ka mõnda turvalisse arvutisse. Mõnikord on lisaks roboti süsteemsele tarkvarale ketastele salvestatud ka roboti algseaded ja programmid, mille kaotamine tähendaks olukorra taastamiseks samuti väga suurt tööd. Eriti puudutab see vanemaid roboteid, mille süsteemne tarkvara on patareitoitega muutmälus ja kustub toite katkemisel. Kui robot jäetakse kauaks seisma, siis tõenäoliselt on hiljem vaja süsteemi uuesti taastada ketastelt ja nende puudumisel võib mõnikord isegi uue roboti soetamine osutuda odavamaks kui endise süsteemi taastamine.

Erinevate robotite valik võib olla väga suur. Juba ainuüksi ABB tootevalikust on Eestis laialt levinud kolm eri põlvkonda roboteid. ABB robotipõlvkonnad erinevad peamiselt kontrolleri

poolest, nende mehaaniline osa on väga sarnane ja erinevusi leiab ainult lähemal vaatlemisel. Kontrollereid on kõige lihtsam eristada juhtpuldi (*Teach Pendant Unit, TPU*) järgi. Eestis kasutusel olevaid vanimaid S3-tüüpi kontrollereid on jäänud töökorda veel vaid üksikuid. Nende juhtpuldi peamiseks tunnuseks on tekstipõhine LCD-ekraan. Roboti hooldaja seisukohalt on oluline osata puldilt lugeda ja ära tunda veakoode.

Järgmine ABB robotipõlvkonna S4-tüüpi kontrollid on tänapäeval Eestis kõige laiemalt levinud. S4-tüüpi kontrollite sari oli tootmises kaua aega ja seepärast on sellest olemas ka palju eri variante. S4-kontrollerisarja juhtpuldid erinevad enamasti vaid selle poolest, et mõned nupud liigutatud teise kohta. S4-tüüpi kontrolleri juhtpult on võrreldes S3-tüüpi juhtpuldiga palju kasutajasõbralikum, sest selle ekraan on suurem ja korraga saab seal kuvada oluliselt rohkem infot. Kui S3-tüüpi kontrolleri juhtelektroonika kapp oli enamasti inimesekõrgune, siis S4-sarjas on olemas ka S4C-tüüpi kontrollid, mille kontroll on mõõtmetelt väiksem.

Pärast S4-sarja kontrollite tootmise lõpetamist laskis ABB välja uue IRC5-tüüpi kontrolleri ja koos sellega ka uue puuteekraaniga juhtpuldi. Uuel puldil on ära jäetud suur hulk nuppe, mis olid tihti vigade tekkimise põhjuseks. Uute kontrollite mõõtmed on üldjuhul väiksemad, kuid nende arvutusvõimsus ja mälu maht on oluliselt suuremad. IRC5-kontrollerit saab ära tunda nii juhtpuldi, kui ka kontrolleri kapi uue kuju järgi.

Kõigil kolmel kontrollipõlvkonnal on õnneks üldjoontes säilinud kasutajaliidese sama struktuur, üksnes selle kasutamine on muutunud mugavamaks. Juhtpuldi menüüdel on sarnane struktuur ja samad või sarnased käsud. Tänu sellele on robotihooldaja töö oluliselt lihtsam, sest iga puldi kasutamist pole vaja eraldi selgeks õppida. Kahjuks on vanemad S3-tüüpi kontrollitega robotid tihti väga pikalt hooldamata ja nende esimesed hooldused on sageli väga probleemsed. Paljudel vanematel robotitel on kontrollid sageli ümber ehitatud, et robotit saaks kasutada koos muude protsessis osalevate seadmetega, kusjuures liiteseadmetena on kasutusel nii ABB kui ka teiste tootjate seadmeid. Need süsteemid ei pruugi alati olla dokumenteeritud või on dokumendid lihtsalt kaotsi läinud. Eriti halb võib olla olukord tarkvaraga, sest liideste tarkvara on väga tõenäoliselt dokumenteerimata. Sellisel juhul tuleb roboti hooldajal töötada loominguliselt ja süstemaatiliselt. Tuleks üles kirjutada võimalikult täpselt, mida iga roboti väljund juhib ja mida iga süsteemi sisend teeb. See on küll väga aeganõudev ja tüütu protsess, kuid sageli võib see olla ainukene võimalus, kuidas vana süsteemi töökorras hoida. Just niisuguste probleemide tõttu on mõnikord lihtsam ja odavam vahetada kogu süsteem välja täiesti uue vastu.

### **7.2.3. Kaablite ja juhtmete hooldus**

Kontroller ja manipulaator on omavahel ühendatud terve hulga kaablitega. Neid on vaja perioodiliselt üle kontrollida ja võimalike kahjustuste korral hinnata kahjustuste iseloomu. Kaablid on küll ette nähtud kasutamiseks tööstusoludes, kuid sellele vaatamata ei ole nad purunematud. Kõige ohtlikum on kaablite mehaaniline vigastamine. Seda tuleb ette kohtades, kus kaabel pidevalt paindub, näiteks manipulaatori lülide ühenduskaablite juures. Ohtlik on

kaablile ka pikisuunaline väänamine, mis põhjustab isolatsioonis spiraalseid pragusid. Lisaks on kaablile ohtlikud keevitusel tekkivad pritsmed, mis võivad läbistada kaabli isolatsiooni. Keevitusel tekkiv UV-kiirgus kahjustab plastiku ja kummit. Olenevalt keevituse võimsusest võib kaablite katmine olla vajalik. Kaablikanalites olevad kaablid võivad saada kahjustada juhul, kui neid surutakse teiste kaablitega kokku või jäävad need kanali teravate servade vahele. Igal juhul on vaja kaableid kontrollida täies pikkuses. Ei saa eeldada, et kanalis olevad kaablid on alati terved. Lisaks kaablite isolatsioonile on vaja kontrollida kindlasti ka kõikide pistikühenduste korralolekut. Kogemused on näidanud, et väga suur osa robotitega tekkivatest probleemidest on seotud kaablite ja pistikutega.

**Näide:** Ühel ABB kliendil oli pikka aega probleeme manipulaatori lülide nullpunktide kadumisega. Iga kord, kui roboti kontrollerilt eemaldati toide, kaotas kuues lüli oma nullpunkti ja seda oli vaja uuesti kalibreerida. Kuna probleemile kiiret lahendust ei leitud, kirjutati robotile uus programm, mis võimaldas viia kõik lülid nullasendisse ja roboti operaator õpetati seda programmi kasutama. Igal hommikul pidi ta roboti kasutamiseks kõigepealt käivitama kalibreerimisprogrammi ja alles seejärel võis alustada tööd. See probleem avaldus lisaks veel telgede kalibreerimise veateates: “*Unable to clear battery flag*”. ABB robotite puhul on vea diagnoosimiseks alati kontrolleri puldil ka soovitused, mida peaks järgmiseks tegema. Antud juhul oli esimene soovitus kontrollida kaableid. Soovituse järgi said kõik kaablid roboti ja kontrolleri vahel üle vaadatud, ent midagi ei leitud. Seejärel prooviti järjest komponentide väljavahetamist. Esmalt vahetati robotis olev lülide asendi mõõtmise kaart, ka sellest polnud abi. Järgmisena vahetati roboti kontrolleri arvuti, kui ka see ei aidanud. Seejärel vahetati lülide asendi arvutamise kaart, aga positiivset tulemust ei saadud. Vahel tundus viga ära kaduvat, kuid mõne päeva jooksul tekkis see taas. Korduvalt said vahetatud ka kõikide lülide asendimälude patareid, millest samuti abi ei olnud.

Antud kliendi süsteem koosnes kolmest suuremast robotiga seotud komponendist: manipulaatorist, keevitusdetaili hoidvast pöörlevast asendiseadurist (positsioneerist 1) ja roboti suurema tööala saavutamiseks kasutatud manipulaatori alusvankrist (positsioneerist 2). ABB robotite puhul on iga täiendav positsioneer määratletud kui roboti lisalüli. Igal lülil on kalibreeritud asendi nullpunkt ja seda nullpunkti väärtust hoitakse patareitoitega asendiandurite (resolverite) lugemiskaardi (*Serial Measurement Board, SMB*) mälus. SMB-d asuvad enamasti võimalikult telgede lähedal ja selle süsteemi puhul oli neid kolm. Üks SMB on alati roboti enda sees, mis hoiab roboti kõigi kuue lüli nullpunkte. Teised kaks olid aga ülejäänud lülide ehk positsioneeride juures. Kõik SMB-d on omavahel ühendatud siiniga ja siis läbi robotis oleva SMB on need kõik ühendatud ka kontrolleriga. SMB-de vahetamise käigus kadus lõpuks viga täielikult ära, vaatamata sellele, et vahetuseks toodud komponent ei olnudki veel üldse paigaldatud. Lähemal uurimisel selgus täiesti juhuslikult, et viga oli olnud SMB-de vahelise siini ühes pistikus, mis ei olnud korralikult lõpuni pesasse lükatud. Kuna ühendus oli ikkagi olemas, ei osanud robot seda viga ise leida ja kuna see pistik oli väga raskesti ligipääsetavas kohas, siis ei olnud seda viga ka korduvad kontrollimised tuvastanud. Tegemist oli RJ45-tüüpi pistikuga, millel oli ka lukustumiseks vajalik mehhanism küljes, aga see ei olnud rakendunud ja roboti liikumisel oli pistik ilmselt oma pesast välja nihkunud. Selle süsteemi vea otsing läks kokkuvõttes kõigi osapoolte jaoks äärmiselt kulukaks, sest just kaablite kontroll ei olnud

piisavalt põhjalik. Enne igasuguse muu põhjuse otsimist on alati mõistlik väga korralikult üle kontrollida kõik kaablid ja ka need pistikud ja kaablid, mis võivad esmapilgul tunduda ebaolulised või millele ligipääs võib olla väga tülikas.

#### **7.2.4. Manipulaatori mehhanismide hooldus**

Roboti manipulaatori hooldus on võrreldes elektroonika ja kaablite kontrollimise ja hooldamisega suhteliselt lihtne. ABB väiksematel robotitel on käelaba lülid (ülemised teljed) tihti täiesti hooldusvabad. Sel juhul tuleb rikke korral rikkis komponent lihtsalt välja vahetada. Käte lülide (alumistel telgedel) kasutatakse ülekandemehhanismides õli ja selle olemasolu on vaja perioodiliselt kontrollida. Uute robotite puhul on alati igale liigendile (teljele) peale märgitud selles kasutatava õli tüüp. Sama info on üldjuhul olemas ka roboti hooldusjuhendis. Liigendite õlitaseme kontrollimiseks on otstarbekas kasutada nt valgeid kaablisidemeid, kuid tuleb olla ettevaatlik, et mehhanismi ei satuks võõrkehi. Üldiselt ei ole reduktorite ja nende õlidega olulisi probleeme. Kui robot töötab väga intensiivselt, siis võib olla vajalik ka õli vahetus, kuid see on enamiku robotite puhul suhteliselt keeruline ja aeganõudev toiming. Kuna manipulaatorid on väga erinevad, siis pole siinkohal mõtet seda protseduuri täpselt kirjeldada. Vajadusel saab hooldusjuhendist leida üksikasjalikud juhised peaaegu kõikide toimingute jaoks.

Õli vahetamisel on oluline mõõta ära kasutatud õli kogus, et lisada sama palju uut õli. Kui õli on robotist välja lekkinud või pole teada, kui palju õli peaks ülekandes olema, siis on kõige õigem hankida seda infot roboti hooldusjuhendist või tootjalt. Kui on vaja robot taas kiiresti töösesse võtta, siis tuleks täita reduktor pooles ulatuses või veidi üle poole. See peaks üldjuhul tagama ohutu töö.

Lisaks õli kontrollimisele, on vaja regulaarselt kontrollida ka manipulaatoris esinevaid lõtkusid. Selleks on näiteks ABB robotitel olemas spetsiaalsed tööriistad, kuid nende kõrge hinna tõttu ei pruugi need alati kohapeal saadaval olla. Heas korras manipulaatoris ei tohiks olla käega tuntavaid lõtkusid. Kui robot on vana ja robotsüsteemis valmistatavale tootele esitatavad nõuded ei ole kõrged, siis saab põhimõtteliselt töötada ka suhteliselt suurte lõtkudega, kuid tuleb arvestada, et robot ei oska lõtkusid automaatselt kompenseerida ja liikumissuuna muutumisel võib sel juhul positsioonimisel esineda üsna suuri vigu (kuni mitu mm).

Väiksemate manipulaatorite kaugemate lülide (ülemiste telgede) puhul võib lõtku põhjustada väljaveninud hammasrihmülekanne. Kuna rihma vahetamine ei ole väga keeruline, on see mõnikord oluliselt pikendanud vanema amortiseerunud roboti eluiga. Üks hea „nipp“ selle töö lihtsustamiseks on õpetada robotile enne rihmavahetust selgeks üks suvaline positsioonimispunkt, näiteks laua külge keevitatud naela teravik, ja viia roboti tööpunkt selle naela teraviku juurde. Seejärel võib manipulaatori viia asendisse, kus rihma on mugav vahetada. Rihma vahetamisel tuleb ülejäänud lülid kindlasti paigal hoida. Peale rihmavahetust ei pruugi lüli ja tema ajami (telje) nullpunkt olla enam samas kohas. Selleks et nullpunkti uuesti kalibreerida, tuleb robotile anda käsk liikuda varem salvestatud punkti (naela teravik). Kui robot täpselt samas kohas ei positsiooni, on nullpunkt paigast ära. Nüüd tuleb ülejäänud lülisid liikumatuna hoides liikuda ainult vahetatud rihmaga lüli (telje) abil positsioonimispunkti ehk

naela teraviku juurde, ja seal läbi viia nullpunkti kalibreerimine. Seda „nippi“ saab ära kasutada ka näiteks mootori vahetamise juures. Kui on vaja vahetada rohkem kui ühe lüli ülekandemehhanismid, siis tuleks seda teha võimalusel ühe kaupa ja pärast igat mehhanismi vahetust manipulaator uuesti kalibreerida. Vastupidisel juhul võib uue nullpunkti kalibreerimisel tekkiv viga võrreldes eelmise punktiga olla nii suur, et kõik roboti süsteemsed programmid tuleb ümber teha.

**Näide:** Ühel ABB kliendil oli robot, mis teisaldas lintsae linte laualt keevitusmasinasse ja sealt edasi laadimisalasse. Roboti ühe mootoriga tekkisid probleemid ja see otsustati välja vahetada. Mootori probleemide tuvastamiseks kasutati multimeetrit, et mõõta ära manipulaatori kõikide lülide mootorimähiste takistused. Kuna kaugemate lülide (väiksemate telgede) mootorid olid täpselt sama tüüpi, siis võis eeldada, et neil kõigil on ka sama takistusega mähised. Mõõtmiseks tuli eemaldada kaablid ja mõõta iga mootori kolme toitejuhi vahelised takistused. Ühel mootoril oligi ühes ahelas tekkinud lühis ja see mootor läks vahetamisele. Kuna robotil enam mootoreid sisse lülitada ei olnud võimalik, siis ei saanud robotit enam ühtegi kindlasse positsioonimispunkti viia. Selleks et manipulaator viia kalibreerimiseks algasendisse e nullpositsiooni tuli lülide pidurid käsitsi maha võtta, seejuures tuli manipulaatori kõikidele liigenditele (telgedele) markeriga märkida lüli täpne positsioon enne mootori vahetust. Vahetus ise toimus vastava ABB juhendi järgi ega olnud kuigi keeruline. Peale mootori vahetust selgus, et robot polnud ikka veel töökorras. Järgmiseks loogiliseks sammuks oli üle kontrollida kõigi servoajamite juhtplokid. Selleks tuli kahe ajami juhtplokid omavahel ära vahetada ja vaadata, kas roboti positsioonimisviga selle tõttu ka muutub (seda sai teha, sest ajamid olid identsed). Selgus, et ka üks servoajam oli vigane ja lähemal vaatlusel oli trükiplaadil isegi silmaga näha kahjustunud jõupooljuhte. Peale ajami juhtploki vahetamist sai roboti liikuma panna ja enne mootori vahetust tehtud märkide järgi ka uuesti kalibreerida. Kogu vahetusprotsess õnnestus ja juhtprogramme muutma ei pidanudki. See on ilmekas näide selle kohta, kuidas roboti süsteemides võivad probleemid avalduda sageli mitmes kohas korraga. Antud juhul oli ilmselt kõigepealt toimunud lühis mootoris, mille tulemusena oli kahjustada saanud ka servoajami juhtplokk. Üldjuhul taluvad servoajamite juhtplokid ka lühiseid, kuid vanade robotite puhul võivad nende kaitsemeetmed osutuda mittepiisavaks või on nende rakendumine liiga aeglane.

### **7.2.5. Turvaseadmete hooldus**

Hoolduse käigus on vaja üle kontrollida roboti kõigi turvaseadmete korrasolek. Kõige olulisem on kontrollida roboti pidureid. Seda on lihtne teha, kui püüda väljalülitatud robotit käega liigutada. Väiksemate robotite puhul ei tohiks kontrollimisel rakendada ülemäärast jõudu, sest pidurid on ette nähtud manipulaatori peatamiseks tema maksimaalse koormuse juures. Kui roboti tõstevõime on oluliselt väiksem kui käega rakendatav jõud, siis hakkavad pidurid libisema. Suuremate robotite puhul on pidurite poolt tekitatav jõud oluliselt suurem ning töökorras piduritega väljalülitatud roboti liigendeid tavaliselt käega liigutada ei õnnestu. Lisaks piduritele tuleb kontrollida turvalülite korrasolekut. Väga tihti on probleeme robotsüsteemi väravalülititega, mis töö käigus võivad saada kahjustada või on neid nõ „tahtlikult“ muudetud, et ust ei peaks pidevalt sulgema. Kõigi turvariskide kohta tuleb teha kirjalik raport, mille on ka teavitamist kinnitav kliendi esindaja allkiri. Puuduste kõrvaldamise suhtes lepatakse üldjuhul

kokku eraldi, sest ohutuse eest vastutab ikkagi masinat või süsteemi opereeriv ettevõtte. Valguskardinatega üldiselt probleeme ei esine ja ka probleemide olemasolu korral on need pigem niisugused, mis takistavad roboti tööd, kuid ei põhjusta ohtu operaatorile. Ohutuse kontrollimiseks on vaja ükskõik üle vaadata kõik punased hädaseiskamisnupud.

Automaattalitluses töötav robot peab hädaseiskamise korral mootorid välja lülitama ja neid ei tohi olla võimalik uuesti aktiveeruda ilma nupule vajutamiseta. Kui robotil on kasutusel mitme tööalaga talitusviis, siis on vaja kontrollida ka selle toimimist. Robot peab seiskuma, kui aktiivsesse tööalasse siseneb inimene. Vaja on jälgida, et roboti kasutamisel ei saaks tekkida olukorda, kus roboti viimisel automaattalitusse viibib roboti tööalal inimene. Pärast robotsüsteemi käikulaskmist ja kasutajale üleandmist on paljudel juhtudel kliendid teinud töö paremaks korraldamiseks süsteemis muudatusi. Kui niisugused muudatused võivad tekitada ohuolukordi, tuleb sellest klienti teavitada kirjaliku raportiga.

### **7.2.6. Hoolduse dokumenteerimine**

Oluline osa robotisüsteemide hooldusest on dokumenteerimine. Eestis pole see alati väga levinud praktika, kuid põhjalik dokumenteerimine on ka hea töö aluseks. Eelkõige on see oluline tüüprobleemide tuvastamisel. Üldiselt on robotisüsteemid väga töökindlad, probleeme esineb harva ja lihtsalt mälu järgi korduvate vigade avastamine on raskendatud. Väga tihti on aga vead konkreetsetes süsteemides korduvad või sarnased ja sel juhul saab dokumentatsiooni abil vigu kiiremini tuvastada. Teine põhjus, miks kõike on hea dokumenteerida, on vastutuse edasiandmine. Kliendi süsteemis peab üldjuhul tegema muudatusi kliendi operaator, sest robotifirma poolt saadetud hooldajal ei pruugi olla juurdepääsu kõigile vahenditele. Avastatud vead ja võimalikud probleemid peab kõrvaldama klient ise, samuti vastutab ta võimalike edasiste probleemide eest. Garantii ajal esilekerkinud probleemidest tuleb teavitada roboti tootjat või süsteemiintegraatorit, kes robotikompleksi paigaldas. See on vajalik selleks, et oleks võimalik jälgida tootmises tekkinud vigu. ABB robotite korral on sellisel juhul garantii korras vahetatava detailiga kaasas raporti blankett, mis on vaja täita ja tagasi saata koos väljavahetatud osaga. Isegi siis kui hoolduse viib läbi klient ise, on väga hea, kui luuakse dokumentatsioon robotiga tehtud töödest ja esinenud probleemidest. See võimaldab edaspidi hinnata ka süsteemi uuendamise vajadust.

### **7.3. Robotite talitusjärelevalve ja ohutus**

Robotisüsteemide ja ka muude automaatikasüsteemide töödega kaasnevad alati teatud ohud. Kuna robotid on kiired ja sageli ka suured masinad, siis nendega töötamisel tuleb alati jälgida teatud ohutusõudeid. Kõik robotitootjaid pööravad seepärast suurt rõhku inimese ohutusele ja tema vara säilimisele. Roboti õpetamisel peab inimene viibima roboti vahetus läheduses, seepärast on robotitootjad ette näinud robotile kiire automaattalitluse ja aeglase toimega õpetusrežiimi. Lisaks on seaduste ja standarditega ette nähtud ranged nõuded robotite käsitlemiseks erinevates režiimides ja olukordades, paljudel juhtudel peab näiteks robotil olema visuaalne indikatsioon mootorite ja pidurite oleku näitamiseks.



Nüüdisaegsete robotite kontrollid on küllaltki võimekad arvutisüsteemid, mis suudavad jälgida reaajas sadu roboti tööparameetreid ja nende alusel teha otsuseid roboti töö kohta. Suures osas on roboti ohutus tagatud just kontrolleri loogiliste algoritmidega. Inimese ohutuse tagamiseks on hädavajalik algoritmide usaldusväärsus. ABB robotitel on ohutuskriitilised süsteemid dubleeritud. See tähendab, et kaks eraldiseisvat arvutit jälgivad ja võrdlevad samu parameetreid. Robot saab tööd jätkata vaid juhul, kui saadud arvutustulemused on samad. Niisuguse lahenduse näeb ilma füüsiliste lõpulülititeta ette nt *Station Indication*. Dubleeritud süsteemide juures on oluline hoida eraldiseisvad süsteemid omavahel sünkroonis ja selleks on ABB robotite puhul integreeritud *Robot Studio* 'sse spetsiaalne tarkvara. Kuna niisuguse lahenduse korral on inimese ohutus tagatud vaid tarkvaraliselt, siis on väga oluline kaitsta süsteemi parameetreid ekslike või pahatahtlike muudatuste eest. Selleks on ABB robotitel olemas kasutaja ligipääsukontroll *User Access Control* ehk midagi kasutajakontode taolist. Turvaparameetrite muutmine peab olema võimatu roboti operaatorile, kuid süsteemi paigaldajal peab olema tagatud ligipääs kogu süsteemile. Selleks määratakse süsteemile vähemalt kaks kasutajat ja nendest vähemalt turvakasutajal peab olema seadistatud ka salasõna, mis on otstarbekas kindlasse kohta üles kirjutada, sest seda läheb väga harva tarvis ja see ei pruugi meeles püsida.

Kõige olulisemad osad roboti turvalisuse seisukohast on tema pidurid. Igasuguses hädaolukorras peab robot suutma väga kiiresti seiskuda ja selleks kasutatakse mehaanilisi pidureid. Robotite pidurid peavad olema ehitatud nii, et nad rakenduksid isegi toite kadumisel ja robot peatuks kiiresti. Selleks on kasutusel elektriliselt vabastatavad pidurid, mille vabastamiseks on vaja elektritoidet. Seetõttu võib väga lihtsalt tekkida olukord, kus roboti pidureid ei saa maha võtta, sest kontrollid on tuvastanud ebanormaalse olukorra ja pidurite toite välja lülitanud. ABB robotitel on roboti alusplaadi tagaküljel mõnikord nupud pidurite vabastamiseks, kuid need töötavad vaid juhul, kui kontrollidest tuleb 24 V toide robotisse. Roboti kokkupõrkel jäiga takistusega on võimalik, et robotit ei saa puldist käivitada ja sel juhul tuleb pidurid vabastada käsitsi. Alati tuleb olla väga ettevaatlik, sest roboti mehhanismid võivad olla rasked ja piduri vabastamisel võivad need raskusjõu toimele põhjustada kahjustusi või vigastusi. Pidurite liigne kasutamine võib neid liialt kulutada ja ka sel juhul muutub robot ohtlikuks, sest ta ei suuda enam piisavalt kiiresti peatuda. Väga kulunud pidurid ei pruugi enam manipulaatori lülide raskusjõudu kompenseerida ja sel juhul ei saa robotit enne pidurite vahetamist edasi kasutada. ABB robotitel on pidurid seisva mootori korral alati rakendunud (tingimusel, et pidurid pole käsitsi vabastatud). See tähendab, et pidurite kontrollimiseks ei pea robotit välja lülitama ja piisab vaid mootorite seiskamisest. Roboti õpetamisel on puldil olev nn *dead man switch* võrdsustatud hädaseiskamislülitiga, mis tähendab, et lüliti avamisel peatatakse robot piduritega. Seda tuleks võimalusel vältida, sest mehaaniliste pidurite kasutamine liikuva roboti peatamiseks kulutab pidureid ja lisaks põhjustab piduritega peatumine robotis suuri koormusjõude. Piduritega peatumisel ei suuda robot kontrollida oma liikumise trajektoori ja võib kalduda kõrvale soovitud asendist. Vajutades puldil stopp nuppu, pidurdab robot kõigepealt kontrollitult mootoritega ja alles seejärel rakendab mehaanilised pidurid. See erinevus on selgesti näha vanadel robotitel, kui *surnud mehe lüliti* vabastamisel „libiseb” roboti käsi peatumiskohast üsna kaugele.

ABB roboti kontrollil IRC5 on väga head võimalused kliendi integreerimiseks tehasevõrguga.

Paljudes tootmisüksustes on olemas SCADA-süsteemid (*Supervisory Control and Data Acquisition*), mis teostavad automaatset talitlusjärelvalvet ja salvestavad pidevalt parameetreid andmebaasidesse. Üheks levinud nõudeks kaasaegsetes kvaliteedisüsteemides on tootmise jälgitavus ja seda ka üsna kaugele minevikku ulatuva võimalusega. Selleks salvestatakse logidesse nt keevituseks kulunud aega, gaasi hulka, traadi kulu jms. Roboti puhul saab niisugust jälgimist teha oluliselt suurema täpsusega ja lisaks saab jälgida ka kompleksparameetreid. Näiteks saab robot jälgida keevitusseadmete poolt igal õmblusel kasutatud voolu ja pinget, saab logida keevitusel esinenud tõrkeid ja vastavate lisade olemasolul saab isegi mõõta detaili mõõtmete hälbeid nii enne keevitust kui ka keevituse ajal. Roboti tarkvara võimaldab lisaks tehtud tööde parameetritele jälgida ka roboti enda seisundit. Hoolduse seisukohast on eriti oluline kasutada hooldustaimereid ja eelhoiatusi, et varakult ennetada probleemide teket, enne kui need hakkavad segama tootmist. Näiteks suudab robot kokku lugeda iga oma lüli ja ajami töötunde. Ettenähtud tööaja möödudes annab ta operaatorile teada, et on vaja teha hooldust või mingi komponent välja vahetada. ABB robotite kontrolleri puhul on veel väga huvitav võimalus kaughalduseks ja -hoolduseks. Selleks paigaldatakse roboti kontrollerrisse raadioseadmed, mis võimaldavad ABB tehnikutel saada robotiga igal ajal ühendust ja läbi selle ühenduse saab robot saata teateid oma rikestest või eelseisvast hooldusest. Paljude probleemide puhul saab nii vältida tehnikute väljakutset objektile ja mõnel juhul saab probleeme kõrvaldada ka töötava robotiga nii, et see tootmist ei häiri. IRC5-kontrollerite puhul saab kaughaldust teha ka läbi interneti ja raadiosidet pole vaja kasutada. IRC5-kontroller on varustatud väga heade liidestega. Juba standardvariandis oleval liidesel on interneti TCP/IP-protokoll, mis tähendab, et seda saab ühendada nii tavalisse tehasevõrku kui ka kontori LAN-võrku.

## VASTUSED 4. PEATÜKI HARJUTUSTELE

1. Kõverjooneline liikumine:  $P6 \rightarrow P7, P8 \rightarrow P9$   
Sirgjooneline liikumine:  $P3 \rightarrow P4, P7 \rightarrow P8, P9 \rightarrow P1$   
Ringjooneline liikumine:  $P1 \rightarrow P2 \rightarrow P3, P4 \rightarrow P5 \rightarrow P6$

2. Vastus:



Tööriista koordinaadistik



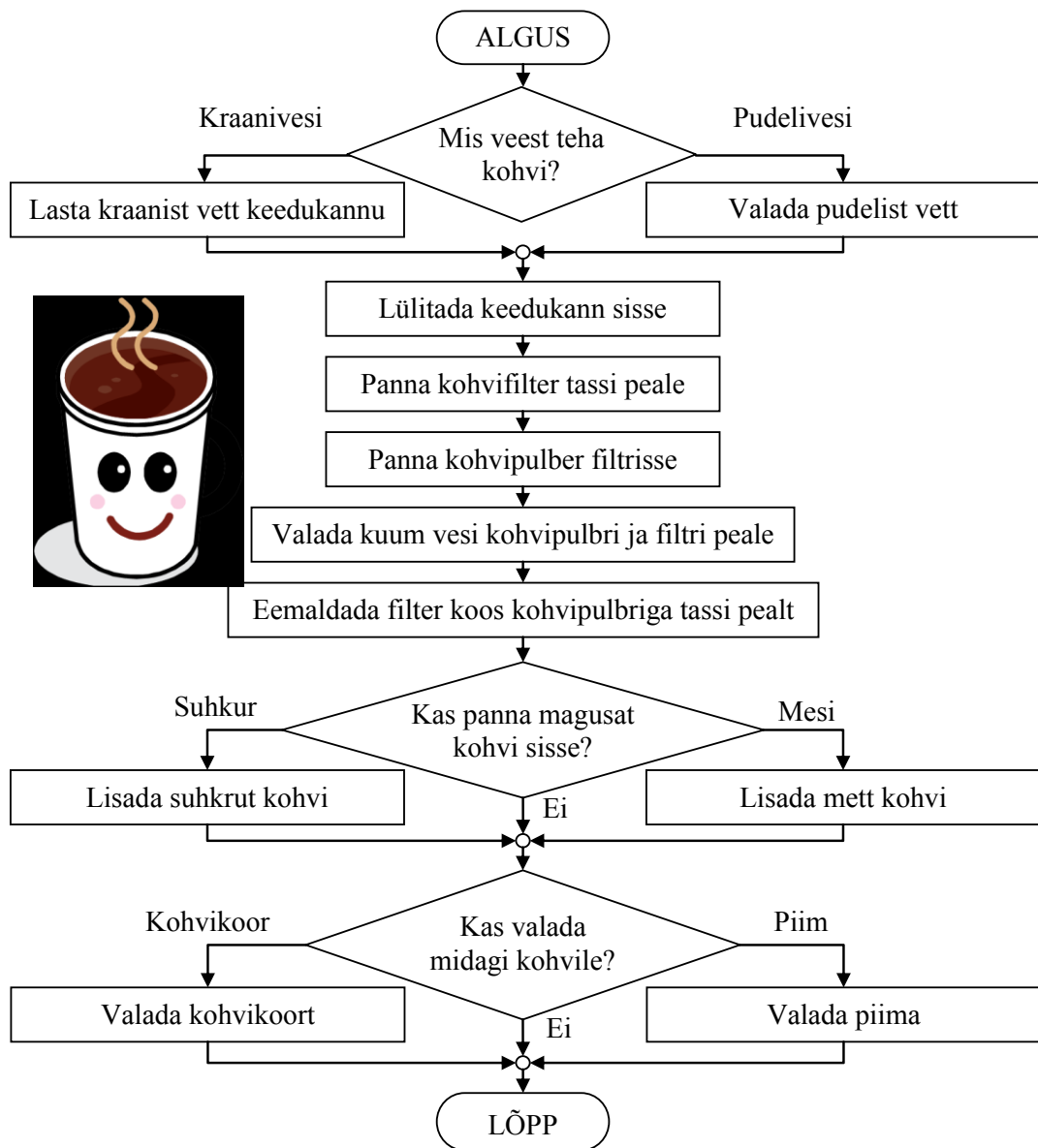
Ruumi  
koordinaadistik



Baaskoordi-  
naadistik

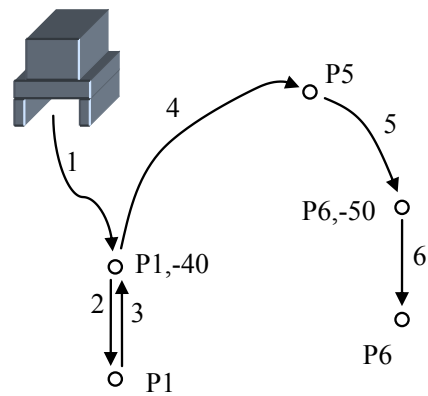
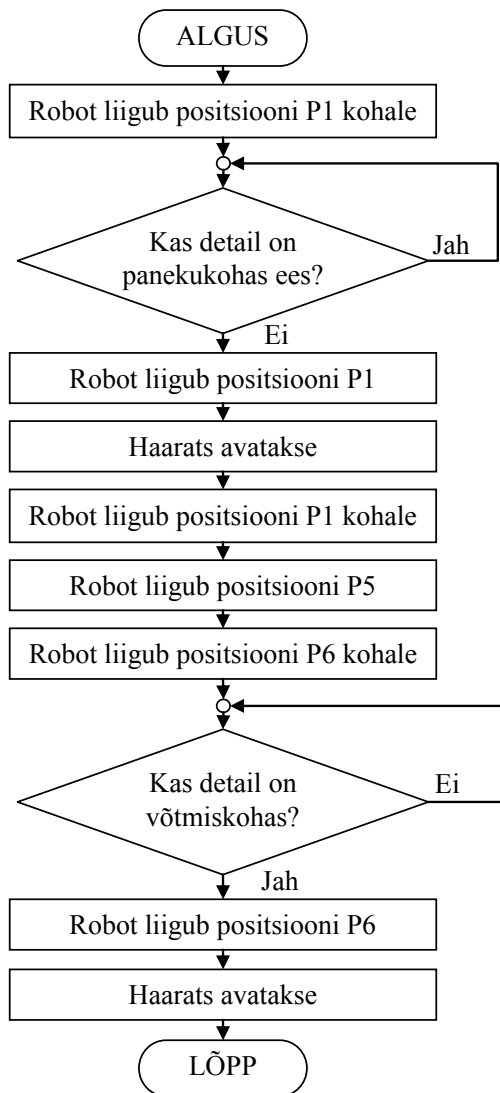
3. Vastus:

- Ühe robotitootja poolt pakutavas robotisüsteemi arendustarkvaras **ei saa** kasutada teise robotifirma robotit.
  - Robotisüsteemide arendustarkvara võimaldab kirjutada ja testida roboti programme **virtuaalsete** ja **reaalsete** robotsüsteemide peal.
  - Tootmisliinide virtuaalseid mudeleid saab kasutada nii **liinitöölise** ja **hooldajate** koolitamiseks kui ka robotsüsteemi töö **demonstreerimiseks** klientidele, kui reaalsel süsteemi pole veel valmis ehitatud.
  - Virtuaalne robotsüsteemi mudel võib koosneda ka enda joonistatud seadmete, detailide jne **3D-mudelitest**.
4. Joonisel 8.1 on esitatud üks võimalik vastus. See võib olla koostatud nii, nagu inimene ise on harjunud kohvi valmistama.



**Joonis 8.1. Neljanda harjutuse vastus**

5. Vastus on esitatud joonisel 8.2.



**Joonis 8.2. Viienda harjutuse algoritm ja manipulaatori liikumine ruumis**

# KASUTATUD KIRJANDUS

## Eestikeelne kasutatud kirjandus

Lehtla, Tõnu. Tööstusrobotid. Otstarve ja ehitus, Valgus, Tallinn 1985. 118 lk.

Lehtla, Tõnu. Tööstusrobotid. Ajamid ja nende elemendid, Valgus. Tallinn 1987. 160 lk.

Lehtla, Tõnu. Robotitehnika. Tallinna Tehnikaülikool, Elektri- ja Jõuelektroonika instituut, Tallinn, 2008. 201 lk.

Mehhatroonika ja robotika õpisisu ja õpik. Koostanud: Raivo Sell. ITT Group, Tallinn 2013. 220 lk.

## Robotialast kirjandust TTÜ raamatukogus

1. Algorithmic and computational robotics - new directions: the fourth Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics. Natick (Mass.): A. K. Peters, 2001. 390 p.
2. Wu, Huapeng. Analysis, design and control of a hydraulically driven parallel robot manipulator. Acta Universitatis Lappeenrantaensis, 1456-4491; 117 Lappeenranta: Lappeenranta teknillinen korkeakoulu, 2001. 26 p.
3. Stadler, Wolfram. Analytical robotics and mechatronics. New York [etc.]: McGraw-Hill, 1995. xxii, 570 p.
4. Morriss, S. Brian. Automated manufacturing systems: actuators, controls, sensors, and robotics. New York [etc.]: Glencoe/McGraw-Hill, 1995. 301 p.
5. Bekey, George A. Autonomous robots : from biological inspiration to implementation and control. Cambridge (Mass.); London: MIT Press, 2005. 577 p.
6. Dyukendjiev, Evgeny Petkov. Bionics - master studies. Vol. 1, Biotechnical robotics = Бионика – обучение магистров. Биотехническая робототехника. 150 p.
7. Dyukendjiev, Evgeny Petkov. Bionics - training of post-graduates, magistrs, engineers. Vol. 1, Biotechnical robotics = Бионика – обучение докторантов, магистрантов, инженеров. Биотехническая робототехника. 161 p.
8. Gibilisco, Stan. Concise encyclopedia of robotics. New York [etc.]: McGraw-Hill, 2003. 365 p.
9. Hasemann, Jörg-Michael. A control architecture for intelligent robots based on graph manipulation for planning, monitoring, execution, intention switching, and fault recovery. Espoo: VTT, 1996. 145 p.
10. Control problems in robotics. Berlin [etc.]: Springer, 2003. 280 p.
11. Bräunl, Thomas. Embedded robotics: mobile robot design and applications with embedded systems. Berlin [etc.]: Springer, 2003. 434 p.
12. Watanabe, Keigo. Evolutionary computations: new algorithms and their applications to evolutionary robots. Berlin [etc.]: Springer, 2004. 172 p.
13. Robinett, Rush D.; Dohrmann, Clark R.; Eisler, G. Richard. Flexible robot dynamics and controls. New York [etc.]: Kluwer Academic/Plenum, 2002. 339 p.
14. Ceccarelli, Marco. Fundamentals of mechanics of robotic manipulation. Dordrecht [etc.]: Kluwer Academic Publishers, 2004. 310 p.
15. Geometric computing with Clifford algebras: theoretical foundations and applications in computer vision and robotics. Berlin [etc.]: Springer, 2001. 551 p.
16. Selig, J. M. Geometric fundamentals of robotics. New York: Springer, 2005. 398 p.
17. Colestock, Harry. Industrial robotics: selection, design, and maintenance. New York [etc.]: McGraw-Hill, 2005. 211 p.

18. Pires, J. Norberto. Industrial robots programming: building applications for the factories of the future. New York: Springer, 2007. 282 p.
19. Vainio, Mika. Intelligence through interactions: underwater robot society for distributed operations in closed aquatic environment. Espoo: Helsinki University of Technology, 1999. 131 p.
20. Xu, Bing. An interactive method for robot control and its application to deburring. Helsinki: Helsinki University of Technology, 1998. 110 p.
21. Kauppi, Ilkka. Intermediate language for mobile robots: a link between the high-level planner and low-level services in robots. Espoo: VTT, 2003. 143 p.
22. Siegwart, Roland. Introduction to autonomous mobile robots. Cambridge (Mass.); London: MIT Press, 2004. 321 p.
23. Craig, John J. Introduction to robotics: mechanics and control. Upper Saddle River (N.J.): Pearson/Prentice Hall, 2005. 400 p.
24. Czinki, Alexander. Konstruktion, Aufbau und Regelung servopneumatischer Roboterhände. Aachen : Shaker Verlag, 2001. 167 p.
25. Icke, David. Mina olen mina! Ma olen vaba! - robotite teejuht vabaduse juurde. Tallinn: Matrix Kirjastus, 2003. 208 lk.
26. Khalil, W. Modeling, identification & control of robots. London; Sterling (Va.): Kogan Page Science, 2004. 480 p.
27. Sciavicco, L. Modelling and control of robot manipulators. London: Springer, 2000. 377 p.
28. Sallinen, Mikko. Modelling and estimation of spatial relationships in sensor-based robot workcells. Espoo: VTT, 2003. 218 p.
29. Liu, Jiming. Multi-agent robotic systems. Boca Raton (Fla.) [etc.]: CRC Press, 2001. 304 p.
30. Kief, Hans B. NC/CNC Handbuch '95/96 : NC, CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS NC-Maschinen, NC-Roboter, LAN Fachwortverzeichnis. München; Wien: Hanser, 1995. 520 S.
31. Döschner, C. Ein neuronales Netz für das Erlernen der Dynamik eines Roboters. 101 S.
32. Heero, Kristo. Path planning and learning strategies for mobile robots in dynamic partially unknown environments. Tartu: Tartu University Press, 2006. 122 p.
33. Iovine, John. PIC robotics: a beginner's guide to robotics projects using the PICmicro. New York [etc.]: McGraw-Hill, 2004. 274 p.
34. Practical motion planning in robotics: current approaches and future directions. Chichester [etc.]: Wiley, c1998. 356 p.
35. Choset, Howie; Lynch, Kevin; Hutchinson, Seth. Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation. Cambridge (Mass.); London: MIT Press, 2005. 603 p.
36. Thrun, Sebastian. Probabilistic robotics. Cambridge (Mass.); London: MIT Press, 2005. 647 p.
37. Riekkilä, Jukka. Reactive task execution of a mobile robot. Oulu: Oulun Yliopisto, 1998. 105 p.
38. Thielscher, Michael. Reasoning robots: the art and science of programming robotic agents. Dordrecht: Springer, 2005. 327 p.
39. RoboCup 2003: Robot Soccer World Cup VII : [the 7th Robot World Cup Soccer and Rescue Competitions and Conferences, held at Padova Fiere, Italy. Berlin [etc.]: Springer, 2004. 767 p.
40. McComb, Gordon. Robot builder's bonanza. New York [etc.]: McGraw-Hill, 2006. 733 p.
41. Bishop, Owen. The robot builder's cookbook: [build and design your own robots]. Amsterdam [etc.]: Elsevier, 2007. 366 p.

42. Patnaik, Srikanta. Robot cognition and navigation: an experiment with mobile robots. Berlin [etc.]: Springer, 2007. 288 p.
43. Sandin, Paul E. Robot mechanisms and mechanical devices illustrated. New York [etc.]: McGraw-Hill, 2003. 299 p.
44. Spong, Mark W. Robot modeling and control. Hoboken (N.J.): Wiley, 2006. 478 p.
45. Manseur, Rachid. Robot modeling and kinematics. Boston (Mass.): Da Vinci Engineering Press, 2006. 367 p.
46. Martin, Fred G. Robotic explorations: a hands-on introduction to engineering. Upper Saddle River (N.J.) Prentice-Hall, 2001. 462 p.
47. Zhou, Quan. Robotic micromanipulation and microassembly: modelling and practices. Tampere: Tampere University of Technology, 2004. 62 p.
48. Ghosal, Ashitava. Robotics: fundamental concepts and analysis. Oxford [etc.]: Oxford University Press, 2006. 423 p.
49. Thro, Ellen. Robotics: intelligent machines for the new century. New York: 2003. 196 p.
50. Robotics and automation handbook. Boca Raton (Fla.) [etc.] : CRC Press, 2005. 1024 p.
51. Robotics: the algorithmic perspective: The Third Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics. Natick (Mass.) : A K Peters, 1998. 389 p.
52. Moor, Kristjan. Robottehniline moodulsüsteem. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 1999. 80 lk.
53. Nehmzow, Ulrich. Scientific methods in mobile robotics: quantitative analysis of agent behaviour. London: Springer, 2006. 207 p.
54. Listak, Madis. A task-oriented design of a biologically inspired underwater robot. Tallinn: Tallinn University of Technology Press, 2007. 92 p.
55. Jazar, Reza N. Theory of applied robotics: kinematics, dynamics, and control. New York: Springer, 2007. 693 p.
56. Rouvinen, Asko. Use of neural networks in robot positioning of large flexible redundant manipulators. Lappeenranta Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 1999. 71 p.
57. Schiffers, Christoph. Werkzeuge zur Integration von Sensoren in Roboterarbeitszellen. 145 S.



