

Sl. 27. Blok-shema uređaja za rendgensku tomografiju pomoću računala

mora ostati konstantan, kako bi mjerena veličina odgovarala koeficijentu slabljenja μ_{ij} . U tomografiji se primjenjuju brza računala, a na diskove se može uskladištiti veći broj slika.

LIT.: B. K. Шмелеб, Рентгеновские аппараты. Государственное энергетическое издательство, Москва 1957. — J. Urlaub, Röntgenanalyse, Band 1. Siemens A. G., Berlin-München 1974. — Ю. А. Быстров, С. А. Иванов, Ускорители и рентгеновские приборы. Высшая школа, Москва 1976. — S. Deutsch, W. Welkowitz, Biomedical Instruments, Theory and Design. Academic Press, New York 1976. — R. A. Lens van Rijn, General Principles of CT Scanning. Journal Belge de Radiologie, 1976. 3. 201-211. — И. А. Перелетна, Технические средства рентгено-диагностики. Медицина, Москва 1981.

A. Šantić

ROBOTIKA, naučnoistraživačka disciplina i privredno-industrijska grana. Mada ne postoji univerzalna definicija robota, industrijski robot je, prema definiciji RIA (Robot Institute of America), reprogramabilni multifunkcionalni sistem projektovan za pokretanje materijala, delova alata ili specijalnih uređaja duž promenljivih programskih kretanja koji vrše pri tome raznovrsne zadatke.

Naziv *robot* (prema slovačkom *robota*, teški rad) prvi put je (1920) upotrebio češki pisac K. Čapek u svojoj naučnofantastičnoj drami R. U. R. (*Rossum's Universal Robots*, Rossumovi univerzalni roboti), koji je tako nazvao mašinu u obliku čoveka, namenjenu za obavljanje teških poslova. Danas roboti vrlo retko imaju oblik čoveka.

Prvi je industrijski robot prijavljen radi patentne zaštite u SAD pod nazivom programirani prenosnik delova, a prijavio ga je G. S. Devol 1961. Tada je prva usavršena verzija tog uređaja puštena u redovni rad u velikoj livnici za livenje pod pritiskom. Od tada je ovo rešenje, pod nazivom UNIMATE, prošireno širom sveta.

Za razvoj industrijske robotike važni su: a) robotski hardver (tj. mehanika, elektronika i ostali sastavni delovi robotskih instalacija) i b) robotski softver (tj. algoritmi upravljanja i specijalni robotski jezici, koji predstavljaju bitne delove upravljanja robotima; njihova je usavršenost često presudna za kvalitet obavljanja zadatka, postavljenog robotskoj instalaciji).

Prvi roboti imali su veoma skroman softver, jer su upravljački sistemi bili jednostavni električni, pneumatski ili čak hidraulički sekvencijalni sistemi, koji su redosledno generalisali pojedina stanja robotskog zadatka; ta su se stanja određivala lokalnim regulacionim kolima po pojedinim stepenima slobode kretanja.

Sadašnje stanje razvoja robotskog mehaničkog hardvera okarakterisano je sve većom upotrebom lakih legura, uključujući titanijumske i novih materijala (ugljena vlakna i sl.) za izradu mehaničke strukture robota. Što se tiče vrste pogona, danas najviše robota ima elektromotorni, pa zatim elektrohidraulički, dok je najmanje robota s elektropneumatskim pogonom. Kao davači položaja najčešći su *enkoderni i rezolverti*, a kao davači za adaptivne i inteligentne robote davači dodira, sila, daljine, vizije i drugi. Kao upravljački sistemi upotrebljavaju se mikroročunari, sa tendencijom realizacije robotskih kontrolera multiprocesorskog tipa. Rešavanje složenijih radnih zadataka zahtevalo je razvoj sredstava za programiranje, pa su razvijeni specijalizovani programski jezici za programiranje robota.

WAVE je prvi eksperimentalni robotski jezik. Razvijen je 1973. u laboratoriji za veštačku inteligenciju Univerziteta u Stanfordu. Nakon šest godina pojavio se prvi komercijalni robotski jezik VAL firme UNIMATION, koja je izgradila i upotrebila (1961) prvi industrijski robot. Od 1979. do danas niz velikih, uglavnom američkih proizvođača industrijskih robota, izneo je na

tržište sisteme za upravljanje robotima koji omogućavaju tekstualno programiranje robota. Razlikuju se tri osnovna nivoa programiranja: nivo primitivnog kretanja, nivo strukturnog programiranja i nivo programiranja zadataka.

Tipični su predstavnici prve grupe jezika pomenuti VAL i SIGLA (Olivetti). U tim je jezicima karakteristično da komande kretanja opisuju pomeranje vrha manipulatora iz jedne u drugu poziciju.

Jezike iz druge kategorije karakteriše upotreba strukturiranih kontrolnih iskaza visokog nivoa i obilje struktura podataka i operacije za definisanje položaja i relativnih odnosa položaja manipulatora i radnih predmeta. Većina tih jezika predviđa mogućnost definisanja položaja radnih predmeta upotrebom sistema vizije. Sintaksa jezika zasnovana je na sintaksi programskih jezika koji podržavaju struktorno programiranje. Npr., sintaksa jezika AL (Stanford) zasnovana je na programskom jeziku ALGOL, robotski jezik HELP (General Electric) koristi se programskim jezikom PASCAL, jezik AML (IBM) sintaksom programskog jezika PL/I itd. Osnovna je mana pomenutih jezika da se u robotskom jeziku u osnovi definiše željeno kretanje robota, a ne radni zadatak koji treba da se izvrši. Taj se nedostatak delimično otklanja u jezicima vrlo visokog nivoa kojima je predstavnik AUTOPASS (IBM). Taj jezik daje komandu za smeštaj jednog na drugi radni predmet, pri čemu su detektovanje položaja obaju radnih predmeta, odluka o načinu prihvaćanja predmeta i postavljanja na drugi te odluka o radnoj putanji manipulatora prepušteni sistemu. Za izvršavanje tako složenih komandi neophodno je da sistem za upravljanje robotom može ne samo intenzivno komunicirati sa sistemom spoljašnjih senzora i vizionim sistemom već i da inkorporira složene algoritme za modeliranje radnog prostora i odluka u složenim situacijama.

Osim specijalizovanih programskih jezika, razvijen je softver za računarsko konstruisanje i sintezu upravljanja manipulatornih robota.

U Laboratoriji za robotiku Instituta »Mihajlo Pupin« u Beogradu razvijeni su prvi u svetu programski paketi aplikacionog softvera za sledeće aktivnosti: efikasno računarsko formiranje matematičkih modela dinamike manipulatornih robota, dinamičku analizu robota, interaktivno projektovanje mehanizma robota, optimalni izbor dimenzija poprečnih preseka njegovih segmenata, izbor pogonskih jedinica manipulatora, računarsko formiranje kinematičkog modela robota sa proizvoljnim brojem stepena slobode u simboličkoj formi, sintezu trajektorija redundantnih robota, sračunavanja programskog upravljanja robotskog mehanizma, sintezu lokalnog upravljanja podsistemima robota, sintezu povratnih sprega po silama, proveru stabilnosti ukupnog robotskog sistema, mikroročunarsku implementaciju različitih zakona upravljanja i druge module opšteg simulacionog paketa za upravljanje robotom. Sličan se aplikacioni softver takođe razvija i u drugim istraživačkim centrima za robotiku u svetu.

RAZVOJ I STANJE ROBOTIKE

SAD. Između 1960. i 1970. skoro sve firme koje su se počele baviti robotima bile su proizvođači mašina alatki, uređaja za rukovanje i transport materijala, raznih vrsta neelektronske opreme i sl. (UNIMATION, Cincinnati-Milacron, PRAB, AMF Versatran i dr.). Potkraj sedamdesetih godina počele su se uključivati velike firme raznorodne proizvodnje sa značajnim sopstvenim računarskim kapacitetima, kao što su Westinghouse i General Electric, kod kojih su se počele formirati proizvodne jedinice ili odeljenja za proizvodnju robota. Većinom su takve firme ulazile u posao kupovinom manjih robotskih firmi. Tako je Westinghouse (1985) postao potpuni vlasnik firme Unimation, General Electric je otkupio licencu i pravo prodaje robota Volkswagen, dok je General Motors osnovao najveću svetsku firmu za robotsku tehnologiju GMF (General Motors-Fanuc), kupujući većinu akcija japanske robotske firme Fanuc, poznate po proizvodnji električnih pogona za robote i industrijskih robota na električni pogon. Tokom osamdesetih godina u SAD se pojavio i IBM, koji radi sa velikim japanskim firmama, dok ima i mnogo novih propulzivnih firmi koje uvode sasvim novu tehnologiju. Npr. ADEPT, mala robotska firma koja je prva na svetu (1984) komercijalizovala električne robote sa direktnim pogonom i s njima postigla izvanredne komercijalne uspehe.

Japan. U Japanu je rad na robotskim tehnologijama počeo 1968. kada je Kawasaki otkupio licencu za hidraulične industrijske robote američke firme UNIMATION. Od tada se više krupnih industrijskih firmi počelo baviti robotima. Poreklo je tih firmi, za razliku od američkih, znatnim delom iz elektronske i računarske industrije (Hitachi, Seiko i dr.). Mnoge od njih započele su tu delatnost razvijajući i primenjuju robote u sopstvenoj proizvodnji, što je karakteristično za razvoj robotske industrije u Japanu. Osim u automobilskoj industriji, u Japanu se počela i ranije nego u SAD masovnije da primenjuje robotska, a kasnije i fleksibilna tehnologija proizvodnje u elektronskoj i računarskoj industriji. Otuda i veća upotreba primenjenih robota u Japanu nego u SAD.

Zapadna Evropa. Poreklo je proizvođača robota ravnomernije raspoređeno nego u SAD i Japanu. Mnogi vodeći

proizvođači robota u Evropi, Renault, Fiat (Comau), Volkswagen i ASEA, ujedno su i korisnici svojih robota. Nasuprot njima stoje proizvođači, kao KUKA (SR Nemačka), Bissiach & Carru (Italija) i dr., koji samo opremaju kupce. Situacija je u Zapadnoj Evropi u pogledu uvođenja i upotrebe robotske tehnologije u mnogočemu slična onoj u SAD, gde su se proizvođači prvenstveno usredsredili na usavršavanje visoke robotske tehnologije, dok su japanski proizvođači razvoj te tehnologije uglavnom bazirali na neposredno iskazanim potrebama korisnika, što je rezultovalo jednostavnijim rešenjima, koja su lakše mogla da budu i prihvaćena u praksi.

Primena robota u glavnim industrijskim granama. Procenjuje se da je danas 50...60% robota u SAD primenjeno u automobilske industriji (tabl. 1), posebno na poslovima zavarivanja i bojenja. Slična situacija je i u Zapadnoj Evropi (tabl. 2). U Japanu automobilska industrija upotrebljava manje od 30% ugrađenih robota, a najviše se robota nalazi u elektronskoj i srodnim industrijama (tabl. 3). Primećeno je da dosta brzo raste broj robota (tabl. 4), pogotovo za operacije sklapanja (montaže) i kontrole. To posebno vredi za elektronsku i slične industrijske grane.

Tablica 1
BROJ ROBOTA ZA OPERACIJE
SKLAPANJA U SAD

Godina	Broj robota	Elektronska industrija %
1983.	2800	6
1990.	10000	12
1995.	16000	16

Tablica 2
RASPORED ROBOTA U INDUSTRIJSKIM GRANAMA
U SR NEMAČKOJ (%)

Proizvodnja	1980.	1985-1987.	1990-1994.
Mehanička industrija	8	14	14
Motorna industrija	56	38	34
Proizvodnja građevinskih mašina	8	11	10
Proizvodnja električnih mašina	10	19	24
Ostale grane	18	18	18
Ukupno	100	100	100

Tablica 3
UDEO INDUSTRIJSKIH GRANA U UPOTREBI ROBOTA
U JAPANU (%)

Vrsta proizvodnje	1976.	1977.	1978.	1979.	1980.
Proizvodnja automobila	30	34	39	38	29
Elektronska oprema	21	23	24	18	36
Ostala industrija	49	43	37	44	35
Ukupno	100	100	100	100	100

Tablica 4
ISPORUKE INDUSTRIJSKIH ROBOTA

	1980.	1981.	1985.	1990.
Japan	6000	14000	85000	100000
SAD	3600	5000	25000	150000
Evropa	3700	7300	25000	62000
Ukupno	13300	26300	135000	312000

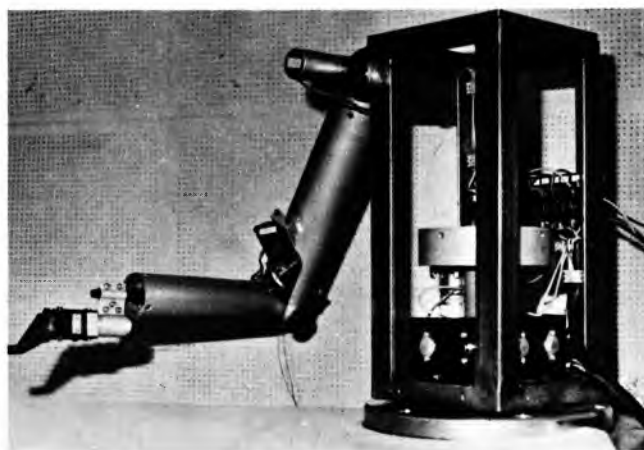
Industrijska robotika u Jugoslaviji. Razvoj industrijske robotike u SFRJ počeo je 1975. u Odeljenju za robotiku Instituta »Mihajlo Pupin« u Beogradu.

Prvi domaći robot UMS-1 (sl. 1) izrađen je u saradnji tog instituta i fabrike Teleoptik u Zemunu 1978. i iste godine bio je ugrađen na radno mesto baždarenja termostata za

motorna vozila. Pomoću njega izbaždareno je, bez zastoja, 100000 termostata.

Nakon toga razvijeno je još nekoliko prototipova robotskih sistema. Laki elektromotorni robot UMS-2 razvijen je takođe u saradnji Instituta »M. Pupin« i Teleoptika 1979. Elektrohidraulički robot srednje nosivosti UMS-3 izrađen je 1981. u saradnji Instituta »M. Pupin« s fabrikom Prva petoletka. Izrađeno je pet robota toga tipa od kojih dva prototipa rade u industriji. U saradnji Instituta »M. Pupin«, Instituta »Jožef Stefan« i Gorenja godine 1982. razvijena je specijalna verzija robota UMS-3 pod nazivom GORO-101. Iz tog modela namenjenog bojenju prskanjem razvijen je novi model GOROBOT-102, a 1987. u Institutu »J. Stefan« novi prototip robota srednje nosivosti STEFAN-130. Veliki elektrohidraulički robot UMS-4 za opsluživanje rotacionih peći realizovan je 1983. u saradnji Instituta »M. Pupin« i fabrike Prva petoletka. Pušten je u probni rad u Zavodima Crvena zastava. Specijalni robot dozator, UMS-6L, za opsluživanje mašina za livenje, izrađen u saradnji Instituta »M. Pupin« i Prve petoletke, pušten je u probni rad 1985. u Iskri u Kranju. Precizni robot za montažu sitnih i preciznih sklopova u formi prototipa razvijen je 1986. u Iskri u Kranju.

Elektromotorni robot IRB-20 u formi prototipa razvijen je 1982. u fabrici Prvomajska u Raši. Specijalni elektromotorni robot za šavno zavarivanje IVR-10 razvijen je 1986. u saradnji Iskre i Tehničkog fakulteta u Mariboru.



Sl. 1. Prvi domaći industrijski robot UMS-1

Pored nekoliko prethodnih prototipova robota manje nosivosti, u Fabrici »Ivo Lola Ribar«, 1986. je proizveden člankasti elektromotorni robot LOLA-80 nosivosti do 80 kg, predviđen za tačkasto zavarivanje u automobilske industriji. U toku je konstruisanje i izrada nekoliko savremenih prototipova industrijskih robota u Institutu »M. Pupin«, Energoinvestu i UNIS-u u Sarajevu, Institutu »J. Stefan« te drugim naučnoistraživačkim institucijama i fabričkim zavodima.

Perspektive. Poboljšanje robotske tehnologije zavisice o tehnološkom napretku računarskih, pogonskih jedinica i davača (senzora) različitih vrsta.

U poslednje vreme formirana su dva osnovna pravca u automatizaciji proizvodnje. Prvi pravac uslovno je objedinio automatizovane sisteme upravljanja i sisteme automatizovanog projektovanja sa tehnološkom pripremom proizvodnje. Taj pravac je nazvan MIS/CAD (engl. Management Information Systems/Computer Aided Design).

Drugi pravac predstavlja automatizovane sisteme upravljanja tehnološkim procesima, poznat pod nazivom CAM (Computer Aided Manufacturing, proizvodnja pomoću računara).

Prvi pravac obuhvata organizaciju i upravljanje proizvodnjom, a takođe i projektovanje i tehnološku pripremu proizvodnje. Taj je pravac uglavnom usmeren k automatizaciji dobijanja i obrade informacija o tehnologiji i proizvodnih

funkcija vezanih za nju. Drugi pravac direktno je usmeren k automatizaciji proizvodnje.

Zbog svoje adaptivnosti na promenljive uslove proizvodnje (modifikacija i izmena modela i tipova i sl.) industrijski roboti postaju kičma fleksibilnih proizvodnih sistema.

Tehnološki najnaprednije zemlje već imaju u radu prve primerke tzv. *fabrika bez ljudi* u kojima roboti rade sve ono što su ranije radili ljudi (od transporta, preko opsluživanja mašina, do direktne obrade).

NAMENA I KLASIFIKACIJA ROBOTA

Robotski sistemi su u principu nova tehnička sredstva kompleksne automatizacije proizvodnih procesa. Njihovim se korišćenjem može u potpunosti eliminisati ručni rad i u pomoćnim i u osnovnim tehnološkim operacijama.

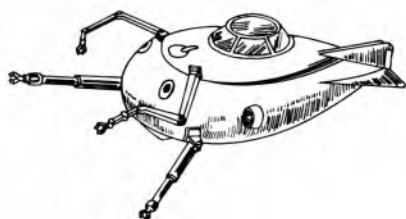
Praksa je pokazala da se tradicionalnim sredstvima ne mogu automatizovati mnoge pomoćne ručne operacije. Zbog toga je potrebna realizacija i široka primena industrijskih robota kao višesegmentnih mehanizama sa svim stepenima slobode. Delovanjem automatskog sistema upravljanja robota njegovi se manipulatori često kreću slično kretanju čovekovih ruku pri njegovoj radnoj aktivnosti.

Upravljački sistemi robota odlikuju se lakim prebacivanjem na različite vrste operacija. Tako je industrijski robot višenamenska mašina koja omogućuje fleksibilnu automatizovanu proizvodnju i ekonomičnu tehnologiju te humaniziranje rada u industriji, rudnicima, pod vodom i drugde.

Robotski sistemi mogu se razvrstati u sledeće šire klase: a) mobilni robotski sistemi, b) informacioni i upravljački robotski sistemi i c) manipulacioni robotski sistemi.

Najveći razvoj i praktičnu primenu u industriji postigli su manipulacioni robotski sistemi različitog tipa.

Mobilni robotski sistemi su platforme koje se kreću upravljane automatskim sistemom. Oni imaju osim programa za definisanje trajektorije kretanja programirani cilj kretanja, a mogu se automatski opterećivati i rasterećivati. U proizvodnim su organizacijama namenjeni za automatsku dostavu delova i alata mašinama alatkama, te od alatnih mašina do skladišta. Na takve pokretne sisteme mogu se postaviti manipulacioni mehanizmi. U poljoprivrednoj proizvodnji mobilni robotski sistemi služe kao automatski agregati za poljske i plantažne radove, kao što su npr. samohodne traktorske mašine. Mobilni se sistemi upotrebljavaju i za radove po morskome dnu (sl. 2) da bi se opsluživala postrojenja za dobijanje nafte, gasa i sl. Mobilni roboti koriste se različitim principima kretanja. Oni se ostvaruju pomoću točkova, mehaničkih nogu, pomoću kombinacije točkova i nogu, ili pomoću gusenica. Oni mogu biti leteći (bespilotne letilice i sl.) i plovni objekti (podmornice bez posade i sl.).



Sl. 2. Podvodni aparat – robot

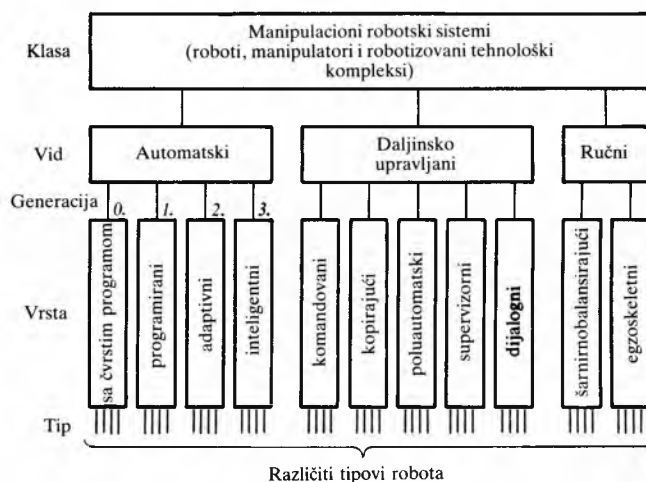
Informacioni i upravljački robotski sistemi su kompleksni merno-informacioni i upravljački uređaji, koji služe za sakupljanje, obradu i prenos informacija, te za njihovo iskorišćavanje pri formiranju različitih upravljačkih signala. U proizvodnim pogonima to su sistemi automatske kontrole i upravljanja za proizvodne procese praktično bez ljudi. Oni su kompleksno mehanizovani s grupnom upotrebom industrijskih robota. U podvodnim uslovima to su aparati snabdeveni merno-informacionim i upravljačkim uređajima te automatskom kino-fotoaparaturom za određivanje osobina dna i vode

(sl. 3), za raspoznavanje predmeta s automatskim prikazivanjem informacije i sl.



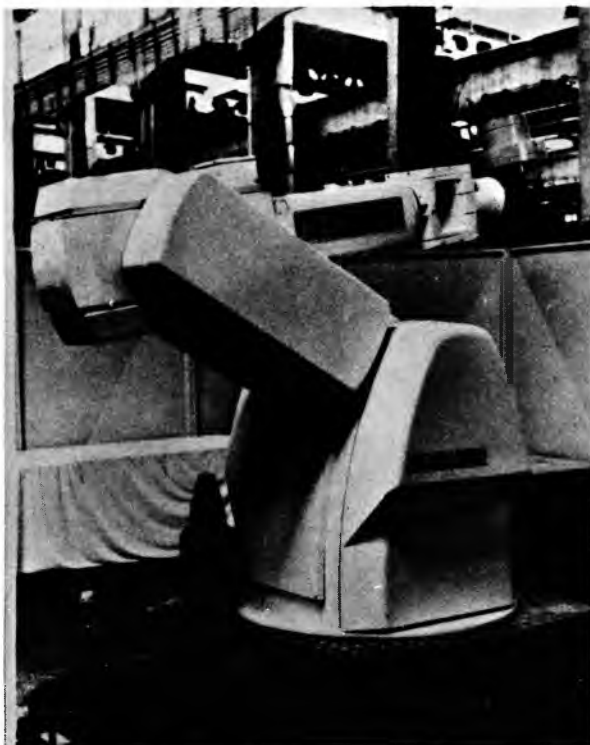
Sl. 3. Informacioni podvodni robot

Manipulacioni robotski sistemi mogu se razvrstati u tri klase (sl. 4): a) automatski roboti, automatski manipulatori i robotizovani tehnološki kompleksi, b) distanciono upravljani roboti, manipulatori i tehnološki kompleksi te c) ručni, neposredno vezani sa kretanjem ruku, a ponekad i nogu čoveka-operatora.

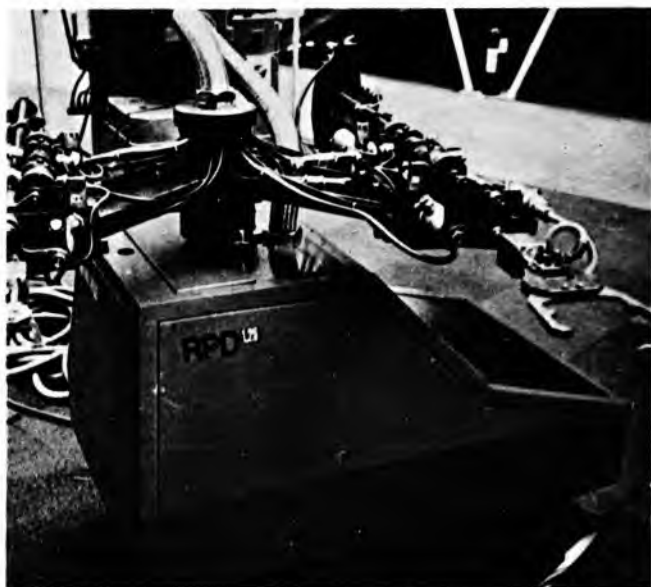


Sl. 4. Klasifikacija manipulacionih robota

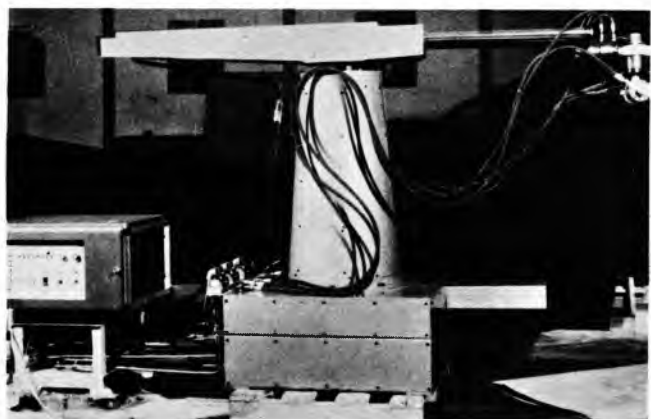
Prvi se primenjuju uglavnom u industrijskoj proizvodnji (industrijski roboti i robotizovani kompleksi), a drugi uglavnom u ekstremnim uslovima, tj. u uslovima radijacije, zatrovanosti vazduha, opasnosti od eksplozije, visokih i niskih temperatura i pritiska. Treća se klasa robota primenjuje za teške radove. Oni se razlikuju po principima i tehnici konstruisanja upravljačkih uređaja, izvršnim organima u zglobovima manipulatora, broju segmenata manipulatora, težini tereta, tipu davača, matematičkoj programskoj podršci i sl. Tri su različita tipa industrijskih robota s obzirom na vrstu pogona: elektromehanički (sl. 5), elektropneumatski (sl. 6) i elektrohidraulički (sl. 7).



Sl. 5. Domaći elektromehanički robot LOLA 80 (1986)



Sl. 6. Domaći elektropneumatski manipulator RPD-1 (1981)



Sl. 7. Domaći elektrohidraulički robot UMS-3 (1980)

Automatski manipulacioni uređaji dele se na četiri vrste: sa čvrstim programom, programski, adaptivni i tzv. inteligentni. Mesto termina *vrsta* primenjuje se takođe i termin *generacija*. Kako manipulatori sa čvrstim programom nisu roboti, oni se mogu smatrati nultom (dorobotskom) generacijom. Tako se programirani roboti smatraju prvom, adaptivni drugom, a inteligentni trećom generacijom.

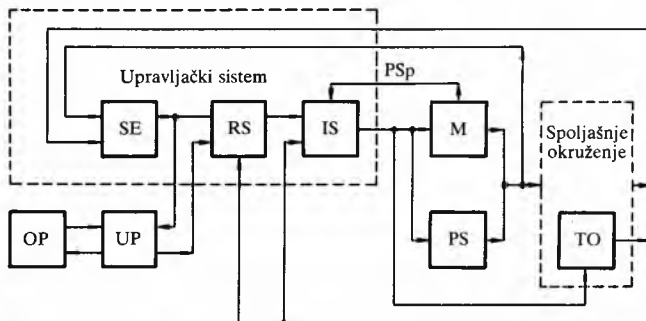
Manipulatori sa čvrstim programom nemaju promenljiv programski upravljački uređaj. To su mehaničke ruke. One su čvrsto povezane sa tehnološkom opremom, podčinjavajući se određenom programu tehnološkog procesa kao celine. Njihova je primena posebno karakteristična za zamenu ručnog rada u masovnoj proizvodnji, npr. na linijama za montažu mehanizama u fabrikama satova i sl.

Programirani roboti (prva generacija robota) imaju upravljane pogone u svim zglobovima i njihov se upravljački sistem lako prilagođava različitim ručnim operacijama. Ali posle svakog podešavanja takvi roboti ponavljaju isti program u strogo određenim uslovima, sa određenim rasporedom predmeta. Većina je savremenih industrijskih robota takvog tipa, a primenjuju se za obavljanje pomoćnih operacija kod presovanja i zavarivanja, na alatnim i livačkim mašinama i sl. Takvi roboti zahtevaju tehnološko sređivanje radne okoline i položaja delova.

Adaptivni roboti (druga generacija) takvi su roboti koji se mogu samostalno u većem ili manjem stepenu orijentisati u okruženju koje nije sasvim određeno i na koje se adaptiraju. U tom cilju takvi su roboti snabdeveni davačima koji reaguju na situaciju, te sistemom za obradu informacija od davača radi generisanja signala adaptivnog upravljanja, tj. fleksibilne izmene programa kretanja manipulatora prema stvarnoj situaciji. Danas se u takvim sistemima široko upotrebljavaju kompaktni mikroprocesorski sistemi. Adaptivni industrijski roboti potrebni su uvek kad je teško obezbediti strogo definisanu situaciju pri obilaženju prepreka, pri radu sa delovima na pokretnoj traci, pri montažnim operacijama, pri lučnom zavarivanju, bojenju, nanošenju zaštite i pri drugim operacijama.

Inteligentni roboti (treća generacija) poseduju raznovrsnije davače sa mikroprocesorskom obradom informacija, raspoređivanjem situacije, automatskim generisanjem rešenja za svoje dalje delovanje radi obavljanja potrebne tehnološke operacije u neodređenoj ili promenljivoj sredini. To su roboti s elementima veštačke inteligencije.

Slika 8 predstavlja principijelnu organizaciju automatskog robotskog sistema u kojem se nalaze tipični elementi, potrebni za njegovo funkcionisanje.



Sl. 8. Shema automatskog robotskog sistema. SE senzorski element, OP operator, UP upravljački pult, RS računarski sistem, IS izvršni sistem, PSp povratna sprega, M manipulator, PS prenosni sistem, TO tehnološka oprema

Davači (senzori) se koriste u robotima druge i treće generacije. U robotima druge generacije mogu biti primenjeni davači sila, taktilni davači, lokacioni (ultrazvučni) i sl. Roboti treće generacije imaju i senzorske uređaje koji uključuju tehničku viziju, što zajedno s razvijenom mikroprocesorskom obradom informacija i čini veštačku inteligenciju, tj. ponašanje je robota tada potpunije i odgovara u izvesnom stepenu razumnom ponašanju čoveka pri njegovoj radnoj aktivnosti. Osim toga, u kompleks senzorskih uređaja mogu biti uklju-

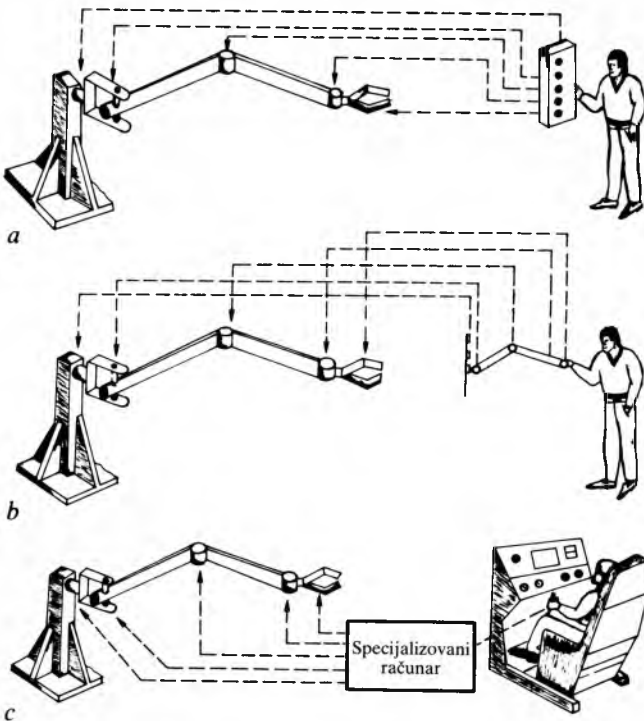
čena i sredstva kontrole kvalitete proizvodnje i osobina spoljašnje sredine, ako se to zahteva kod automatske regulacije režima rada.

U proizvodnim procesima robot koji obavlja određeni posao spregnut je u jedinstveni sistem odgovarajuće tehnološke opreme. Zbog toga njega treba posmatrati kao element kompleksne automatizovane tehnološke linije. Pri tome zadatak se obično ne rešava jednim robotom, već grupom robota u jedinstvenom tehnološkom sistemu (fleksibilnoj ćeliji ili liniji).

Daljinsko upravljani roboti i manipulatori razvrstavaju se na pet vrsta (sl. 4): manipulatori s komandnim upravljanjem, kopirajući manipulatori, poluautomatski manipulatori, roboti sa supervizornim upravljanjem, roboti s dijalognim (interaktivnim) upravljanjem.

Samo su dvije poslednje vrste nazvane robotima, jer oni uporedo s daljinskim upravljanjem poseduju u potpunosti automatske režime rada.

Manipulatori s komandnim upravljanjem odlikuju se time što čovek-operator daljinski uključuje posebno izvršne organe svakog zgloba manipulatora pritiskom na odgovarajuće dirke (sl. 9a). Takvim komandnim režimom često se obučavaju industrijski roboti s upravljačkog pulta. Po analognom principu rade i teleoperatori koji se nalaze u opasnoj zoni.



Sl. 9. Daljinski upravljani manipulator. a manipulator s komandnim upravljanjem, b kopirajući manipulator, c poluautomatski manipulator

Kopirajućim manipulatorima koji se nalaze u opasnoj zoni upravlja čovek-operator s udaljenog bezbednog mesta pomoću uređaja kinematički sličnog radnom manipulatoru (sl. 9b). Pri tome se kretanje svakog zgloba komandnog mehanizma prenosi na odgovarajući zglob radnog (izvršnog) mehanizma (manipulatora) na principu pratećeg sistema. Takvi se manipulatori primenjuju za rad u uslovima radijacije, zatrovanosti atmosfere i u drugim agresivnim uslovima.

Poluautomatski manipulatori, za razliku od kopirajućih, kao komandni mehanizam na pultu operatora imaju višestepenu upravljačku palicu, s kinematikom koja može biti proizvoljna, pogodna za male pokrete ljudske ruke. Električni se signali s upravljačke palice transformišu pomoću specijalizovanog računara (sl. 9c) u upravljačke signale pogona manipulatora. Mogući su različiti algoritmi upravljanja.

Roboti sa supervizornim upravljanjem imaju programirane sve elemente operacija i mogu se generisati automatski.

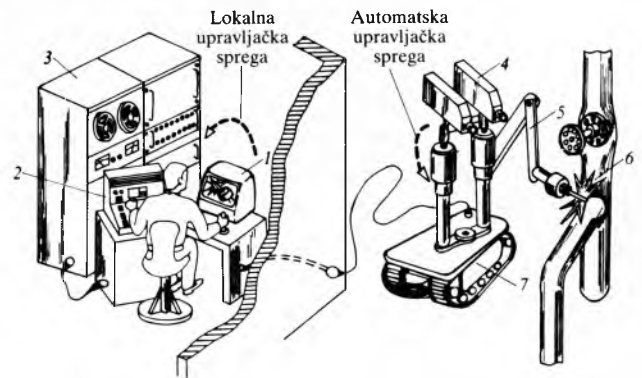
Čovek-operator, koji prati na daljinu delovanje robota smeštenog u opasnoj zoni, daje samo pojedinačne komande cilja prema čijim se signalima uključuju pojedini programi automatskog rada robota. Čoveku ostaje samo funkcija prepoznavanja okoline (situacije) i donošenja odluka. Posle izdavanja komande cilja robot deluje prema određenom programu. Ako je robot više adaptivan, čovek-operator može zadavati ređe i globalnije komande.

Treba napomenuti da se roboti s takvim upravljanjem sve češće upotrebljavaju, npr. kao specijalna vozila koja operišu u specifičnim uslovima, kada je potrebno izvući čoveka iz zone opasne za njega.

Roboti s kombinovanim upravljanjem imaju kombinaciju automatskog režima (kao roboti sa supervizornim upravljanjem) s režimima ručnog upravljanja (kao poluautomatski ili kopirajući manipulatori). Oni se primenjuju za podvodne aparate bez posade, u eksplozivnim sredinama, za rad u rudarskim oknima bez ljudi, u nuklearnoj energetici i sl.

Roboti s dijalognim (interaktivnim) upravljanjem u pravilu su (ali ne obavezno) inteligentni i razlikuju se od supervizornih po tome što robot ne prima samo komande čoveka već i sam aktivno učestvuje u prepoznavanju situacije i donošenju odluka, pomažući u tome čoveku-operatoru.

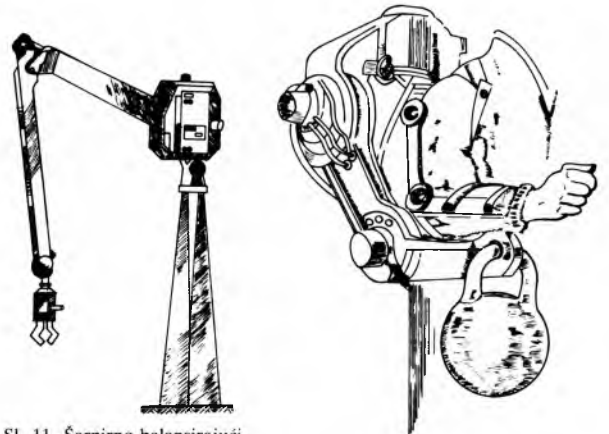
Shema funkcionisanja supervizornih i dijalognih (interaktivnih) robotskih sistema prikazana je na sl. 10. Ako je potrebno, na pultu postoji upravljačka ručica da bi operator mogao preuzeti upravljanje kretanjem manipulacionog mehanizma u poluautomatskom ili kopirajućem režimu.



Sl. 10. Funkcionalna shema interaktivnih sistema upravljanja robotima. 1 displej, 2 operatorski pult, 3 upravljački računar, 4 senzori, 5 manipulatori, 6 radni objekt, 7 računar robotskog sistema

Takva shema funkcionisanja robota predstavlja najkompleksniji sistem upravljanja i pruža najšire mogućnosti za uvođenje adaptivnih mobilnih sistema u najrazličitijim radnim uslovima.

Ručni manipulacioni robotski sistemi dele se na šarnirno-balansirajuće manipulatore i egzoskeltone (pojačavače snage čovekovih ekstremiteta).

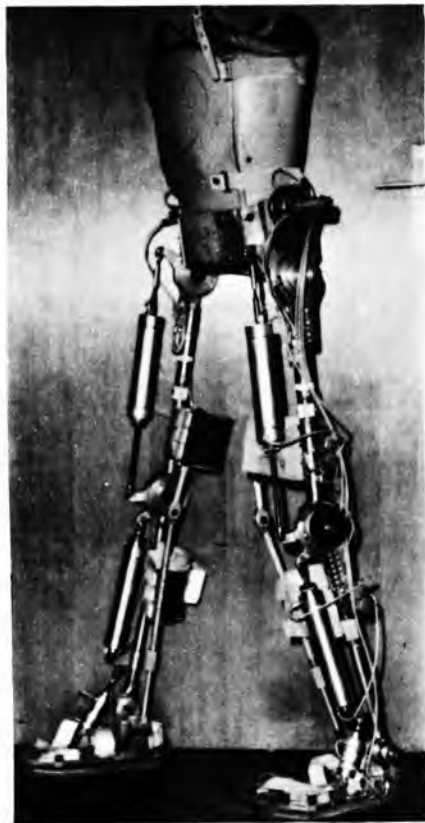


Sl. 11. Šarnirno-balansirajući manipulator

Sl. 12. Egzoskelet za ruku

Šarnirno-balansirajući manipulator (sl. 11) je višesegmentni mehanizam s pogonima u svakom zglobu, koji se, pri proizvoljnoj veličini uhvaćenog tereta (u granicama njegovih mogućnosti) i pri proizvoljnoj konfiguraciji u prostoru, nalazi u ravnoteži. Zbog toga operator pomoću palice manipulatora lako može pomerati veliki teret. Pokrećući palicu čovek ostvaruje upravljačke signale i pri tome se teret pomera pomoću pogona u zglobovima manipulatora. Takvi manipulacioni sistemi veoma su pogodni za utovar i istovar velikih tereta.

Egzoskeleti su višesegmentni mehanizmi sa segmentima koji su neposredno povezani s rukama (sl. 12) ili nogama čoveka. U zglobovima mehanizma, koji odgovaraju zglobovima čoveka, takođe se nalaze upravljani pokretači koji na sebe preuzimaju kompletnu težinu rada. Pokreti čoveka samo formiraju upravljačke signale. Takvi se sistemi primenjuju za pojačavanje snage ekstremiteta (i tela) zdravog ili hendikepiranog čoveka. U Institutu »Mihajlo Pupin« u Beogradu konstruisani su prvi egzoskeleti u svetu, namenjeni uspostavljanju osnovnih lokomotornih, a kasnije manipulacionih aktivnosti hendikepiranih ljudi. Slika 13 prikazuje jedan od prvih prototipova egzoskeleta namenjen paraplegičarima, a sl. 14 kompletni egzoskelet pogonjen elektromehaničkim izvršnim organima. Slika 15 prikazuje elektronsku ruku egzoskeletnog tipa namenjenu distrofičarima u poodmakloj fazi te bolesti.



Sl. 13. Pneumatski egzoskelet za paraplegičare (1971)

ROBOTSKI MEHANIZMI I NJIHOVA KLASIFIKACIJA

Sa stanovišta teorije mehanizama aktivni su mehanizmi u robotici složeni kinematički lanci najčešće promenljive strukture, s više osnaženih članova (segmenta), koji takođe mogu biti promenljive dužine. Sa stanovišta teorije sistema robotski su mehanizmi složeni nelinearni multivarijabilni dinamički sistemi.

Aktivni se mehanizmi mogu podeliti s obzirom na broj kinematičkih lanaca na proste (jedan kinematički lanac) i složene (više prostih lanaca), a prema kinematičkom ograničenju na njihovim krajnjim članovima na otvorene i zatvorene mehanizme (u kontaktu sa fiksnom osnovom).



Sl. 14. Električni egzoskelet za paraplegičare (1974)



Sl. 15. Elektronska ruka za distrofičare (1979)

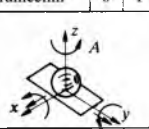
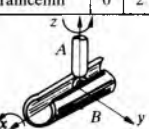
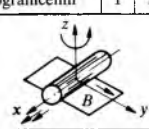
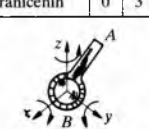
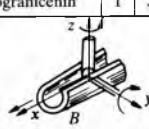
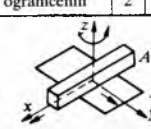
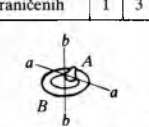
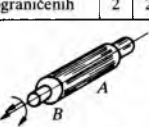
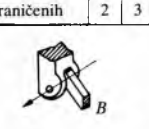
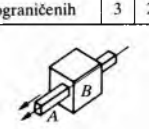
Članovi su aktivnog mehanizma međusobno povezani kinematičkim parovima. Kinematički par čine dva člana mehanizma povezana tako da se omogućava relativno pomicanje.

S obzirom na način sjedinjavanja članova na njihovo se relativno kretanje postavljaju određena ograničenja ili veze. Te veze mogu da oduzmu različit broj stepeni slobode u relativnom kretanju tela i prema toj se karakteristici kinematički parovi dele na pet klasa. Kinematički parovi različitih klasa predstavljeni su na sl. 16. Parovi prve klase dopuštaju pet stepeni slobode u relativnom kretanju članova, a parovi pete klase samo jedan stepen slobode.

Osim na klase, kinematički parovi takođe se dele na tipove. Parovi prvog tipa dopuštaju maksimalni broj rotacionih relativnih kretanja (u parovima prve do treće klase dopuštaju se tri rotacije oko međusobno normalnih osa, u parovima četvrte klase dve, a u parovima pete klase jedna rotacija). Parovi drugog tipa u poredenju s parovima prvog tipa nameću ograničenja na jedno od rotacionih kretanja, a

parovi trećeg tipa nameću ograničenja na dva rotaciona kretanja.

Osim parova kod kojih je dopušteno nezavisno relativno pomeranje, postoje parovi sa vezanim kretanjem. Najprostiji primer predstavlja zavojni par kojemu je translatorno i rotaciono kretanje članova linearno zavisno.

Klasa parova	Broj uslova veze	Broj stepeni slobode	Tipovi parova								
			1. tip		2. tip		3. tip				
I	1	5	Broj kretanja	rot.	tr.						
			dopuštenih	3	2						
			ograničenih	0	1						
											
II	2	4	Broj kretanja	rot.	tr.	Broj kretanja	rot.	tr.			
			dopuštenih	3	1	dopuštenih	2	2			
			ograničenih	0	2	ograničenih	1	1			
											
III	3	3	Broj kretanja	rot.	tr.	Broj kretanja	rot.	tr.	Broj kretanja	rot.	tr.
			dopuštenih	3	0	dopuštenih	2	1	dopuštenih	1	2
			ograničenih	0	3	ograničenih	1	2	ograničenih	2	1
											
IV	4	2	Broj kretanja	rot.	tr.	Broj kretanja	rot.	tr.			
			dopuštenih	2	0	dopuštenih	1	1			
			ograničenih	1	3	ograničenih	2	2			
											
V	5	1	Broj kretanja	rot.	tr.	Broj kretanja	rot.	tr.			
			dopuštenih	1	0	dopuštenih	0	1			
			ograničenih	2	3	ograničenih	3	2			
											

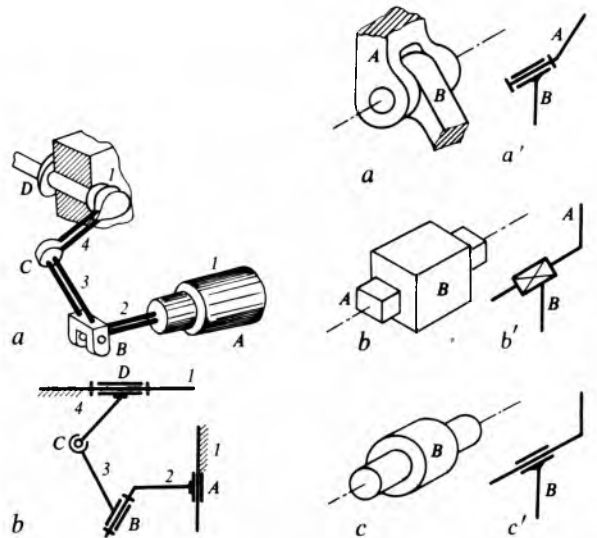
Sl. 16. Klase kinematičkih parova

Od kinematičkih parova sastavljaju se kinematički lanci. Na sl. 17 pokazan je primer prostornog mehanizma upravljanja volanom. Mehanizam se sastoji od četiri kinematička para, a svaki član ulazi samo u dva kinematička para. Jedan je član mehanizma (na sl. 17 član 1) nepokretan. Nepokretni se član obično naziva podlogom. Na sl. 17 prikazan je prost zatvoreni lanac. U zatvorenom lancu svaki član ulazi u dva kinematička para.

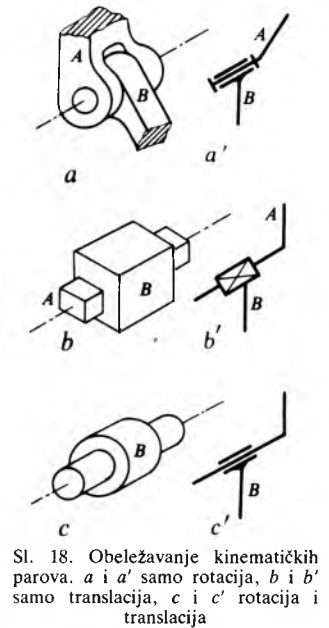
Na kinematičkim shemama mehanizma usvojena su simbolička obeležavanja za različite kinematičke parove (sl. 18).

Drugi primer prostornog mehanizma prikazan je na sl. 19. To je mehanizam manipulatora sa pet stepeni slobode. Lanac se sastoji od šest kinematičkih parova, samo što poslednji član, za razliku od prethodnog primera, ulazi samo u jedan kinematički par. To je primer prostog otvorenog kinematičkog lanca.

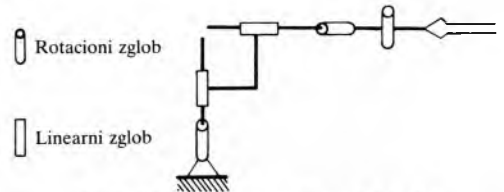
U razmatranim primerima bilo koji član mehanizma nije ulazio u više od dva kinematička para. Međutim, mogući su



Sl. 17. Mehanizam upravljanja volanom. a izgled mehanizma, b shematski prikaz



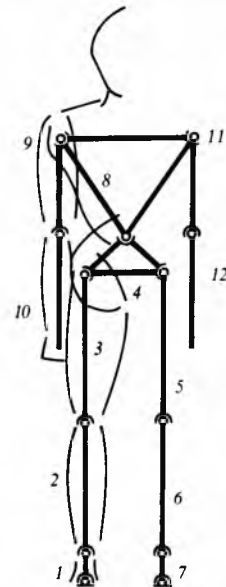
Sl. 18. Obeležavanje kinematičkih parova. a i a' samo rotacija, b i b' samo translacija, c i c' rotacija i translacija



Sl. 19. Manipulator sa pet stepeni slobode

mehanizmi kod kojih jedan član može da pripada većem broju kinematičkih parova. Slika 20 prikazuje kinematičku shemu antropomornog robota (egzoskeleta). Model sadrži dvanaest pokretnih članova spojenih u kinematičke parove treće klase prvog tipa. U takvom mehanizmu članovi 4 i 8 čine telo robota i ulaze svaki u tri kinematička para.

Lanac u kome bilo koji član ulazi u više od dva kinematička para naziva se složenim lancem. Zatvoreni lanci ne moraju da imaju spoj preko svojih krajnjih članova s nepokretnom podlogom, već se mogu spajati sa članovima ostalih lanaca. Analogno vredi i za otvorene lance. Npr. za mehanizam prema sl. 20 jedan kinematički lanac formiraju članovi (1...7), a dva druga otvorena lanca formiraju ruke i

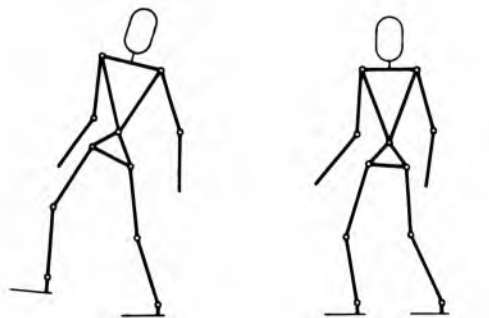


Sl. 20. Shema antropomornog mehanizma

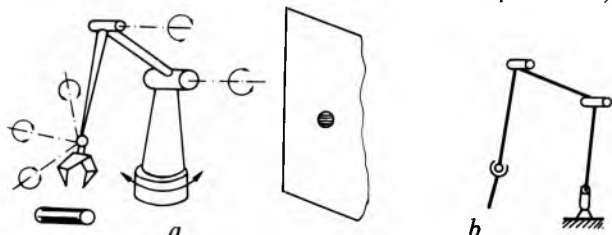
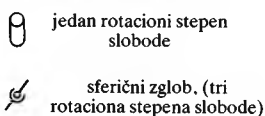
telo (8...10) i (11 i 12). Tada su lanci vezani za pokretne članove drugih lanaca.

Tokom svog funkcionisanja antropomorfnih mehanizam prelazi iz otvorene u zatvorenu konfiguraciju (sl. 21).

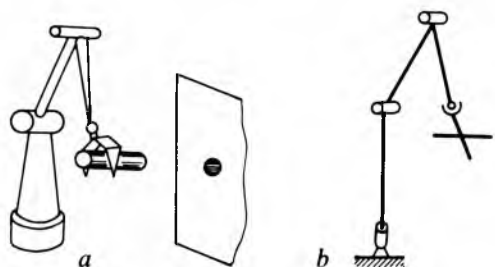
Promenljivost strukture robota može se uočiti promatranjem specifičnog manipulacionog zadatka montaže mehaničkih delova. U fazama zadatka (sl. 22 i 23) manipulator predstavlja prost otvoreni lanac, dok se u fazi uvlačenja predmeta (sl. 24) menja kinematička shema mehanizma i on postaje prost zatvoreni lanac.



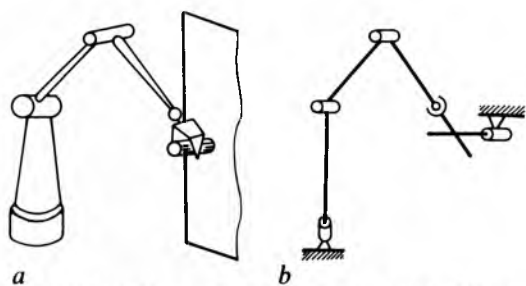
Sl. 21. Promenljiva konfiguracija antropomorfno mehanizma



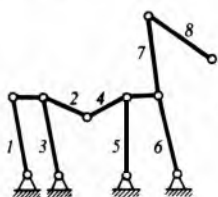
Sl. 22. Manipulator pre hvatanja predmeta. a izgled, b shema



Sl. 23. Faza prenošenja radnog predmeta. a izgled, b shema



Sl. 24. Faza uvlačenja predmeta u otvor. a izgled, b shema



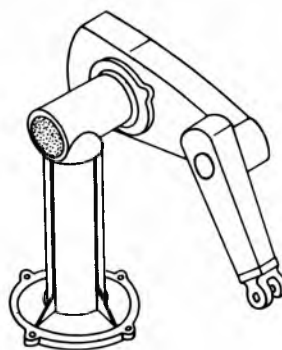
Sl. 25. Složeni kinematički lanac

Pored antropomorfnih mehanizama postoje roboti koji savladaju prostor primenom više nogu. Slika 25 prikazuje složen kinematički lanac sačinjen od četiri prosta lanca, od kojih su prva tri (formirana članovima 1...6) zatvoreni, dok članovi mehanizma 7 i 8 čine otvoreni lanac.

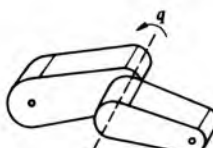
KINEMATIČKI MODELI MANIPULACIONIH ROBOTA

Pod kinematičkim modeliranjem manipulacionog robota razumeva se uspostavljanje veza između pozicije i orijentacije hvataljke s obzirom na predmete u radnom prostoru manipulatora i uglova zakretanja u zglobovima manipulatora. Taj je model veoma značajan za sintezu kretanja manipulatora duž željenih putanja u radnom prostoru i nezaobilazan je korak pri formiranju upravljanja savremenim robotima.

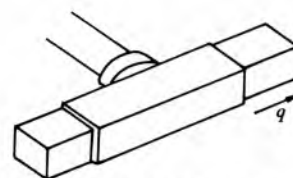
Manipulator (sl. 26) sastoji se od n krutih tela koja predstavljaju članove (segmente) međusobno povezane zglobovima. Zglobovi mogu biti rotacioni i translatorni. Rotacioni zglobovi obezbeđuju rotaciono kretanje jednog člana u odnosu na drugi (relativno kretanje, sl. 27), dok translatorni zglobovi obezbeđuju translatorno pomeranje jednog člana u odnosu na drugi (sl. 28).



Sl. 26. Manipulator sa šest stepeni slobode

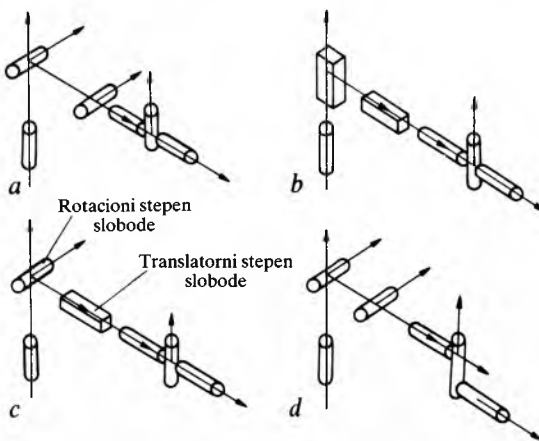


Sl. 27. Rotacioni zglob



Sl. 28. Translatorsni zglob

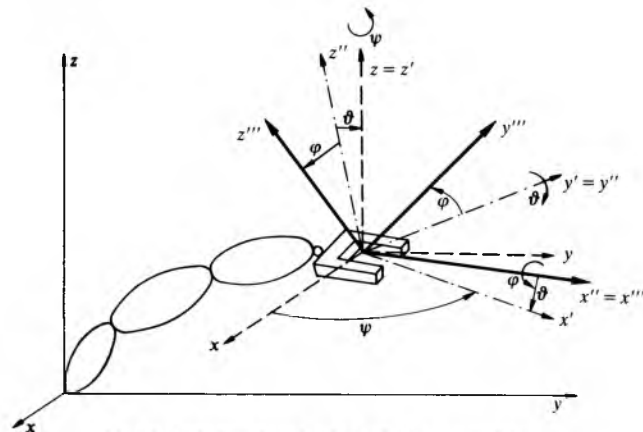
Mehanička (kinematička) konfiguracija. Radi što jednostavnijeg opisivanja kinematičke konfiguracije mehanizma uvedeni su različiti shematski prikazi mehanizma. Na sl. 29 prikazano je nekoliko tipova mehaničkih konfiguracija manipulatora koji su najčešći u praksi, i to tako što su rotacioni stepeni slobode označeni valjcima, a translatorni kvadririma.



Sl. 29. Shematski prikaz nekih tipičnih mehaničkih konfiguracija robota

Unutrašnje koordinate su skalarnе veličine koje opisuju relativni položaj jednog člana u odnosu na drugi član kinematičkog para. Kod rotacionog zgloba unutrašnja je koordinata ugao zakretanja u zglobu, a kod translatorskog kinematičkog para unutrašnja je koordinata linearni pomeraj duž ose zgloba. Unutrašnje koordinate se najčešće označavaju sa q_1, q_2, \dots, q_n i čine vektor unutrašnjih koordinata. Svaka unutrašnja koordinata q_i može da se menja u određenom opsegu $q_{imin} \leq q_i \leq q_{imax}$, gde su q_{imin} i q_{imax} minimalna i maksimalna vrednost te koordinate određene mehaničkim ograničenjima.

Spoljašnje koordinate opisuju položaj i orijentaciju hvataljke manipulatora (poslednjeg člana kinematičkog lanca) u odnosu na neki nepokretni koordinatni sistem. Najčešće se kao referentni sistem bira sistem vezan za bazu manipulatora, u kojem se položaj hvataljke opisuje sa tri pravokutne koordinate x, y, z (sl. 30), a takođe se upotrebljavaju i cilindrične i sferne koordinate. Pored kontrolisanja položaja hvataljke manipulatora u prostoru, za pravilno izvršenje manipulacionih zadataka potrebno je precizno poznavanje i upravljanje orijentacijom hvataljke u odnosu na predmete u radnoj sredini manipulatora. Oriјentacija se najčešće opisuje pomoću Eulerovih uglova zakretanja između osa koordinatnog sistema vezanog za poslednji segmet i nepokretnog sistema (sl. 30). Oriјentaciju definišu ugao skretanja ψ , ugao propinjanja θ i ugao valjanja φ . Skretanje odgovara rotaciji za ugao ψ oko ose z nepokretnog sistema, propinjanje odgovara rotaciji za ugao θ oko nove ose y , a valjanje rotaciji za ugao φ oko nove ose x .



Sl. 30. Spoljašnje koordinate hvataljke manipulatora

Vektor spoljašnjih koordinata x_e u opštem slučaju ima m koordinata, gde je m broj koordinata potreban da se opiše određena klasa manipulacionih zadataka. Vektor od šest spoljašnjih koordinata ($m=6$) u potpunosti opisuje poziciju i orijentaciju hvataljke u odnosu na nepokretni sistem:

$$x_e = [x y z \psi \theta \varphi]^T, \quad (1)$$

gde je T znak za transpoziciju matrice.

Ako je za opisivanje određenog zadatka dovoljno manje spoljašnjih koordinata, vektor spoljašnjih koordinata ima samo one koordinate koje su interesantne. Npr. ako se posmatra samo pozicioniranje hvataljke, vektor spoljašnjih koordinata ima oblik $x_e = [x y z]^T$.

Direktni kinematički problem. Pri promeni unutrašnjih koordinata manipulatora q_i ($i=1, \dots, n$) menjaju se spoljašnje koordinate x_{ei} ($i=1, \dots, m$). Ta se veza može opisati relacijom

$$x_e = f(q), \quad (2)$$

gde je f vektorska funkcija koja preslikava unutrašnje koordinate u spoljašnje. Problem određivanja vektora spoljašnjih koordinata x_e za zadati vektor unutrašnjih koordinata q poznat je kao direktni kinematički problem.

Inverzni kinematički problem. Određivanje vektora unutrašnjih koordinata za zadat vektor spoljašnjih koordinata, tj. rešavanje skupa nelinearnih jednačina

$$q = f^{-1}(x_e) \quad (3)$$

naziva se inverznim kinematičkim problemom. Taj je problem znatno složeniji od direktnog problema, jer obuhvata rešavanje skupa nelinearnih trigonometrijskih jednačina. Njega je potrebno rešavati pri sintezi kretanja manipulatora kada je trajektorija hvataljke zadata u prostoru spoljašnjih koordinata, pa je tada potrebno odrediti odgovarajuću promenu unutrašnjih koordinata manipulatora.

Pojam redundantnosti. Manipulator se smatra neredundantnim u odnosu na klasu radnih zadataka ako je dimenzija vektora spoljašnjih koordinata m jednaka broju stepeni slobode manipulatora n , tj. ako je $m = \dim x_e = \dim q = n$. Ako je $n > m$, manipulator je redundantan u odnosu na zadatak, odnosno postoji beskonačno mnogo vektora unutrašnjih koordinata koji odgovaraju jednom stanju hvataljke.

DINAMIKA MANIPULACIONIH ROBOTA

U savremenom razvoju robotike brzohodni manipulacioni mehanizmi nalaze sve veću primenu. Manipulacioni roboti već danas postižu translatorsnu kompozitnu brzinu do 4 m/s, a ugaona je brzina pojedinih članova mehanizma veća od 6 rad/s. To ne vredi samo za robote male dohvatljivosti, već i za robote većih manipulacionih mogućnosti. Takvo stanje uzrokuje sve značajnije dinamičke efekte robotskih mehanizama, te stoga postoji realna potreba za pažljivim izučavanjem njihove dinamike. Dinamički modeli manipulacionih robota mogu da posluže za projektovanje mehanizma robota i optimalni izbor njegovih izvršnih organa te za projektovanje upravljačkih sistema (kontrolera).

Sastavljanje matematičkih modela složenih prostornih mehanizama konvencionalnim postupcima (ručno) dovodi do neminovnih grešaka. Upotreba računara i automatsko sastavljanje diferencijalnih jednačina kretanja robotskih mehanizama omogućuje efikasno izučavanje dinamike i sintezu algoritama upravljanja robotskim sistemima.

Da bi se rešio taj zadatak, metoda sastavljanja jednačina kretanja ne treba da bude vezana za diferenciranje bilo kakvog analitičkog izraza, jer je numeričko diferenciranje na digitalnim računarima nepoželjno. Proizilazi da je za sastavljanje matematičkih modela aktivnih mehanizama dovoljno postaviti opšti algoritam na digitalnim računarima. Takav algoritam treba da na bazi samo informacije o kinematičkoj shemi parametrima mehanizma zadovolji sledeće zahteve: da sastavi mehanizam prema kinematičkoj shemi, da odredi položaj, brzine i ubrzanja članova mehanizma, da sastavi diferencijalne jednačine kretanja i da integrali sastavljene jednačine sa nametnutim specifičnim uslovima ili da odredi pogonske sile za zadato kretanje.

Automatsko formiranje matematičkih modela dinamike robotskih mehanizama predstavljalo je odlučujuć korak ka sistematskom izučavanju mehanike robota i sintezi algoritama upravljanja u najrazličitijim zadacima primenjene, a posebno industrijske robotike.

Matematički model koji opisuje dinamiku robotskog mehanizma otvorene kinematičke konfiguracije može se najkondicijnije predstaviti u sledećem obliku:

$$H(q, \Theta)\ddot{q} + h(q, \dot{q}, \Theta) = P, \quad (4)$$

gde je $P = [P_1, \dots, P_n]^T$ vektor pogonskih momenata (kada su svi stepeni slobode robota rotacioni), $q = [q_1, \dots, q_n]^T$ vektor unutrašnjih koordinata, $\Theta = [\Theta_1, \dots, \Theta_n]^T$ vektor geometrijskih i dinamičkih parametara, H inercijalna matrica sistema, a h vektor centrifugalnih, Coriolisovih i gravitacionih sila.

UPRAVLJANJE ROBOTIMA

Upravljački sistemi robota mogu se ostvariti na različite načine, sa različitim stepenom složenosti, već prema zadacima koje mora izvršiti posmatrani robot. Najjednostavniji je zadatak da se roboti pozicioniraju u pojedine tačke u radnom prostoru, odnosno da zauzimaju različite položaje u prostoru (pri tome se roboti mogu pozicionirati bez radnog predmeta

ili s njime tako da je njihov zadatak premeštanje radnog predmeta iz jednog položaja u drugi). Postavljanje (pozicioniranje) robota može se ostvariti na različite načine. Zadatak je u osnovi da se hvataljka robota (ili radni predmet) postavi u određeni položaj uz odgovarajuću orijentaciju. Ako se radi o jednostavnim strukturama robota (npr. robot sa tri translatorna stepena), moguće je lako odrediti položaje zglobova robota tako da se hvataljka dovede u željeni položaj. Tada je moguće zadavati direktno položaje zglobova robota. Upravljački sistem treba da ostvari željene pozicije pojedinih zglobova robota. Najjednostavniji su upravljački sistemi ostvareni za manipulatore sa čvrstim programima, i to su upravljački sistemi bez povratnih sprega (odnosno tzv. upravljački sistemi s otvorenim povratnim spregama). Takvi manipulatori imaju izvršne organe (pogonske jedinice) koji pokreću pojedine zglobove: oni su pokretani maksimalnim brzinama dok ne postignu određene položaje zglobova. Željeni položaji zglobova zadavani su pomoću mehaničkih graničnika ili položaja prekidača (senzora). Kada zglob dođe do određenog graničnika ili senzora (željenog položaja), izvršni se organ zaustavlja. Prema tome, upravljački sistem nema stalnu informaciju o položaju (uglovima ili translatorskim pomeranjima) pojedinih zglobova, tj. nema povratne sprega sa manipulacionog sistema. Ako se uvede mikroracunar u upravljački sistem, položaji se robota mogu zadati preko računara i memorisati. Pomoću odgovarajućih senzora (potencijometra i sl.) kontroliše se položaj zgloba i upoređuje sa zadatim položajem u računaru. Mogućnosti za programiranje složenijih kretanja takvih robota veoma su sužene.

Da bi se obezbedio što ravnomerniji rad izvršnih organa i fleksibilnije zadavanje željenih položaja zglobova, uvedeno je *servosistemsko* upravljanje zglobovima robota, tj. upravljanje na bazi povratnih sprega koje daju informacije o položajima, brzinama i ubrzanjima zglobova. Većina savremenih robota ima takvo upravljanje. Praktično je za sve robote prve, druge i treće generacije neophodno upravljanje preko zatvorenih povratnih sprega.

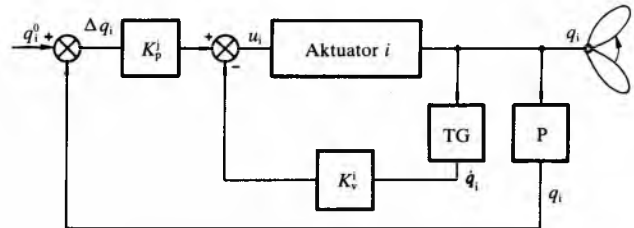
Kad se robotima upravlja preko povratnih sprega, željeni se položaji zglobova zadaju preko računara. Računar zadaje željene položaje upravljačkim podsistemima za upravljanje pojedinih zglobovima. Na bazi povratnih sprega ostvaruju se ulazni signali koji pokreću izvršne organe i dovode zglobove u željene položaje. Međutim, zadavanje željenih pozicija robota preko direktnog zadavanja položaja zglobova ima ozbiljnih nedostataka. Da bi korisnik postavio hvataljku robota u određeni položaj zadavanjem položaja zglobova, on mora u više iteracija pokušati da odredi odgovarajuće položaje zglobova. Dakle, treba omogućiti da se direktno zadaje željena pozicija i orijentacija hvataljke (ili radnog predmeta), a da upravljački sistem automatski preračuna odgovarajuće položaje zglobova. Naime, upravljački sistem treba da iz zadatih spoljašnjih koordinata izračuna unutrašnje koordinate zglobova. To preračunavanje ostvaruju najčešće digitalni računari. Većina savremenih robota imaju upravljačke sisteme koji omogućavaju direktno zadavanje spoljašnjih koordinata.

U savremenoj se industriji robotima postavljaju sve složeniji zadaci. Od savremenih se robota zahteva da ostvare kretanje po određenim putanjama u prostoru (npr. za šavno zavarivanje, premeštanje radnog predmeta u radnom prostoru sa više prepreka i sl.). Pri tome korisnik (operator) zadaje željenu putanju hvataljke robota, a upravljački sistem treba da preračuna odgovarajuće trajektorije zglobova i da ih realizuje.

Međutim, zadaci koje treba da obavljaju roboti često su toliko složeni da je korisniku potrebno veoma mnogo vremena da bi zadao kroz koje položaje, odnosno po kojim putanjama treba da se kreće hvataljka robota da bi se realizovao dati zadatak. Zato je neophodno obezbediti da upravljački sistem sam, automatski rešava takve zadatke, te da se korisnik oslobodi od problema planiranja trajektorija robota. Korisnik samo zadaje zadatak generalno (npr. premešti predmet iz jedne mašine u drugu i sl.), a upravljački sistem

sam planira sve pokrete robota. Takvo automatsko planiranje trajektorija robota veoma je važno za uključivanje robota u fleksibilne tehnološke sisteme, što je primarni zahtev u savremenoj robotici.

Ako se samo jedan zglob robota kreće (npr. zglob i), dok su svi ostali zglobovi fiksirani, potrebno je sintetizovati upravljanje zglobom i pomoću izvršnih organa tako da se obezbedi željena pozicija zgloba q_i^0 , te da se zglob dovede u tu poziciju. Takvo se upravljanje najčešće ostvaruje servosistemom (sl. 31).



Sl. 31. Pozicioni servosistem. TG tahogenerator, P potencijometar

Servosistem za upravljanje i -tim izvršnim organom i zglobom čine sledeći elementi: *senzor (davač) pozicije* koji daje informaciju q_i o trenutnom položaju i -tog zgloba i osovine izvršnog organa koji ga pokreće (potencijometar i sl.), *senzor brzine rotacije* (pomeranja) zgloba i motora \dot{q}_i (najčešće tahogenerator), *diferencijator* koji daje razliku (grešku) Δq_i između zadatog položaja q_i^0 i stvarnog položaja q_i merenog senzorom pozicije, *pojačavač greške* po poziciji koji pojačava signal greške pozicije $\Delta q_i = q_i^0 - q_i$ za K_p^i puta (K_p^i je tzv. poziciono pojačanje), *pojačavač informacije* o brzini koji pojačava signal senzora brzine rotacije zgloba \dot{q}_i za K_i^i puta (K_i^i pojačanje brzinske povratne sprega, brzinsko pojačanje).

Informacija o položaju zgloba q_i vraća se kao povratna sprega, a razlika između željenog i stvarnog položaja pojačava se K_p^i puta i dovodi kao ulazni naponski signal na izvršni organ. Ako je $q_i^0 > q_i$, stvara se pozitivni naponski signal koji pokreće motor tako da q_i raste dok se ne postigne q_i^0 ; ako je $q_i^0 < q_i$, javlja se negativni naponski signal koji pokreće izvršni organ u smeru smanjenja ugla q_i dok se ne dostigne q_i^0 . Kada q_i dostigne q_i^0 , greška Δq_i postaje jednaka nuli, pa nema ni signala na ulazu izvršnog organa i izvršni organ se zaustavlja. Međutim, zbog inercije rotora motora i mehanizma zaustavljanje motora se ne može ostvariti trenutno, već može nastati *preskok*, tj. stvarna pozicija može da pređe preko zadatog položaja q_i^0 pre nego što se izvršni organ zaustavi. Da bi se zglob što povoljnije doveo u željenu poziciju (bez preskoka), uvodi se i povratna sprega po brzini; informacija se sa senzora brzine pojačava K_i^i puta i dovodi takođe izvršnom organu da bi se prigušile nagle promene u kretanju izvršnog organa koje može da izazove poziciona povratna sprega.

Prema tome, ulazni naponski signal za izvršni organ iznosi:

$$u_i = -K_p^i (q_i - q_i^0) - K_i^i \dot{q}_i = K_p^i \Delta q_i - K_i^i \dot{q}_i. \quad (5)$$

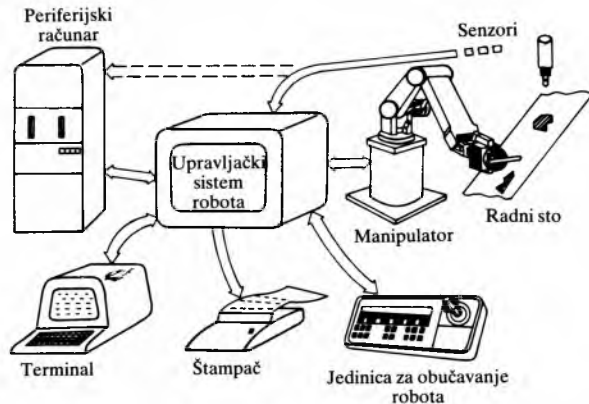
Pri sintezi servosistema treba izabrati poziciono i brzinsko pojačanje tako da se postigne zadovoljavajuće pozicioniranje zgloba u zadati položaj q_i^0 .

Mikroracunarsko upravljanje robotima. Savremeni upravljački sistemi robota mogu komunicirati s drugim računarima, s operatorom preko terminala i jedinicom za obučavanje robota, te sa samim robotom (sl. 32).

Pored terminala za komunikaciju s operatorom vrlo često se koristi i jedinica za obučavanje robota. Ta jedinica znatno olakšava zadavanje radnog zadatka robotu. Njene funkcije se mogu vrlo efikasno upotrebiti zajedno s instrukcijama robotskog jezika za zadavanje složenih manipulacionih i drugih zadataka.

Radni se zadatak može zadati i pomoću *pilota robota*, koji ima istu kinematičku strukturu kao i robot, ali nema izvršne organe, već samo senzore za merenje unutrašnjih koordinata. To se naziva obučavanjem robota. Operator pokreće pilot u skladu sa radnim zadatkom, a upravljački sistem robota

očitava podatke sa senzora, optimizira njihov broj i smešta ih u memoriju. Time se *snimaju* kretanja pilota, na osnovu kojeg se zatim *reprodukuje* kretanje robota. Takvo je obučavanje vrlo pogodno za radne zadatke sa vrlo složenim prostornim kretanjima.

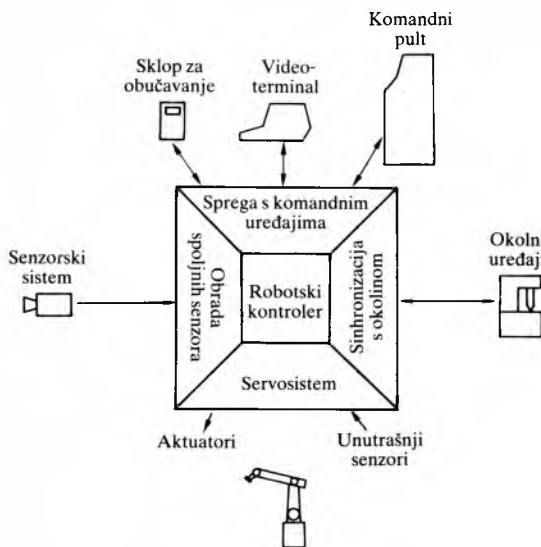


Sl. 32. Upravljački sistem robota

Osnovna je funkcija upravljačkog sistema da u svakom trenutku postavlja odgovarajuće signale na ulaze izvršnih organa robota. Da bi se formirali signali za pobuđivanje izvršnih organa, upravljački sistem mora da skanira interne senzore robota. Interni senzori najčešće mere unutrašnje uglove (koordinate) i brzine, mada se mogu koristiti i senzori ubrzanja, sile, struje motora i drugi. Upravljački sistem prima signale i sa niza eksternih senzora koji daju informaciju o stanju različitih uređaja, radnih predmeta i dr. u okolini robota. Npr. senzori za merenje brzine pokretne trake, pozicija pokretnih delova presa, distancometri i dr. takođe se skaniraju i predstavljaju ulazne informacije za viši nivo upravljanja.

Programiranje industrijskih robota. Današnji industrijski roboti služe za izvršavanje niza zadataka različite složenosti, kao što su bojenje, zavarivanje, opsluživanje mašina i uređaja, kontrola kvaliteta, pakovanje delova i proizvoda itd. Programabilnost jedan je od osnovnih zahteva koji se pritom postavljaju. Mogućnost da se robot za relativno kratko vreme programira za izvršavanje željenog zadatka često je ključni preduslov za uvođenje robota u proizvodne sisteme. Zbog toga su svi postojeći robotski sistemi opremljeni sredstvima koja omogućuju manje ili više efikasno programiranje određenog skupa zadataka.

Tipična konfiguracija robotskog sistema shematski je prikazana na sl. 33, a sastoji se od manipulacionog mehanizma, robotskog kontrolera, komandnog pulta, prenosivog



Sl. 33. Tipična konfiguracija robotskog sistema

uređaja za ručno upravljanje i programiranje i, eventualno, videoterminala s alfanumeričkom tastaturom.

Robotski kontroler je najvažniji deo robotskog sistema. Njegov je centralni deo mikroračunar, koji omogućava upravljanje kretanjem manipulatora, obradu informacija dobijenih iz senzorskog sistema i upravljanje priključenim perifernim jedinicama. Rad robotskog kontrolera odvija se prema unapred pripremljenom programu, tj. nizu instrukcija kojima se opisuju operacije koje treba da se izvrše tokom rada robota. Kontroler se može posmatrati kao interpretator robotskog programa.

Komandni pult je poseban uređaj sa komandnom tastaturom i vizuelnim pokazivačima koji omogućuje praćenje rada robota i komunikaciju između operatera i robota tokom izvršavanja radnog zadatka.

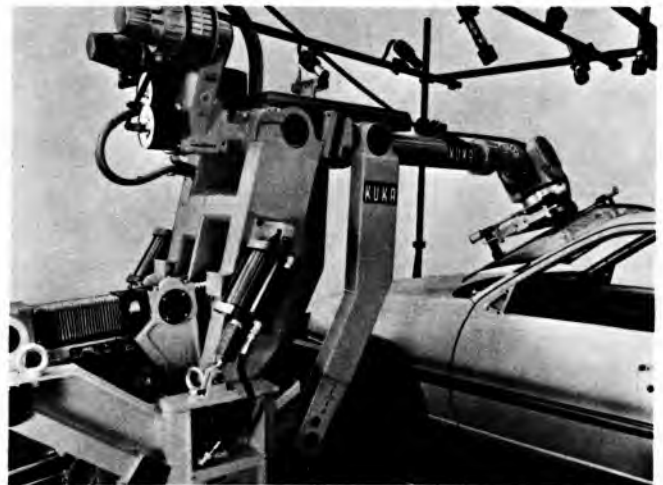
Prenosivi uređaj za ručno upravljanje (sklop za obučavanje) specijalni je minijaturni kontrolni uređaj koji omogućuje zadavanje operacija koje robotski kontroler treba da izvrši neposredno nakon njihova unošenja, kao što je kretanje hvataljke u zadatu poziciju i orijentaciju, memorisanje tekućih položaja zglobova itd. Zadavanje operacija ostvaruje se pomoću funkcionalne tastature uređaja i eventualno komandne palice. Pritom se zadata sekvenca operacija može zapamtiti u internoj memoriji kontrolera, što omogućuje automatsko ponavljanje jednom zapamćenog programa. Takav se postupak često označava kao *obučavanje robota* i efikasan je u nizu jednostavnijih primena kao što je bojenje ili tačkasto zavarivanje.

Ako se radi o složenijim zadacima koji uključuju npr. intenzivnu obradu neregularnosti u radnoj okolini, optimizaciju trajektorija robota ili obilaženje prepreka, neophodno je da programer robota raspolaze sredstvima koja omogućuju interaktivno programiranje ili programiranje upotrebom specijalizovanih programskih jezika. Priprema robotskog programa može se ostvariti na specijalizovanom mikroračunaru, miniračunaru ili na računaru opšte namene. Takođe, veoma se često sistem za programiranje direktno ugrađuje u kontroler.

KONSTRUKCIJA I PRIMENA INDUSTRIJSKIH ROBOTA

Velika većina savremenih industrijskih robota, tj. njihov mehanički deo, koji se često naziva manipulatorom, u obliku je većih ili manjih člankastih (*laktastih*), ili kranskih (*portalnih*) dizalica.

Slika 34 prikazuje tipičan savremeni industrijski robot vertikalne člankaste konfiguracije s elektromehaničkim pogonom, nosivosti do 60 kg, tipa IR 601/60 zapadnonemačke firme KUKA.

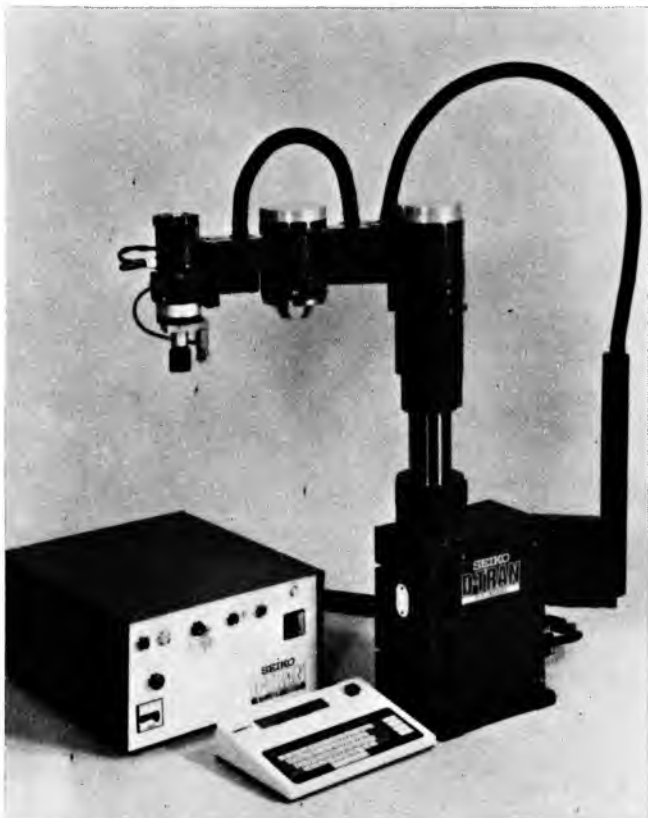


Sl. 34. Industrijski robot (KUKA)

Moderni industrijski roboti mogu imati električni, hidraulički ili pneumatski pogon. Pogoni su raspoređeni na mehaničkom delu robota na odgovarajuće zglobove (sl. 35). Pogoni

pak koji su van zglobova prenose svoje kretanje na njih pomoću mehaničkih reduktora ili poluga.

U mašinskom pogledu konstrukcija industrijskih robota najviše liči na podsklopove alatnih mašina i dizalica, ali su mnogo lakši i preciznije izrađeni, čime se postižu manje gravitacione i inercijalne sile i momenti te značajno smanjenje zazora.



Sl. 35. Robot s motorima u zglobovima (Seiko T1-300)

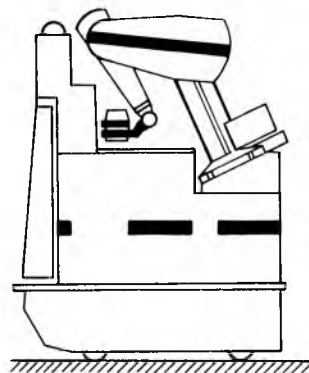


Sl. 36. Merni robot

Danas skoro ne postoji delatnost industrijske proizvodnje u kojoj bar nije pokušana primena industrijskih robota. Učešće robota se sve više uočava u sledećim postupcima: elektrolučnog zavarivanja, elektrotlačnog zavarivanja, livenja pod pritiskom, bojenja prskanjem, opsluživanja radnih mašina, rukovanja materijalom i paletizacijom, obrade odlivaka i otkivaka, nanošenja lepka i zaptivne mase, montaže itd.

U poslednje vreme pojavile su se i nekonvencionalne primene industrijskih robota. Tako je vrlo visoka tačnost pozicioniranja, a posebno tačnost senzora položaja organa robota (enkoderni, rezolverti, merne letve) omogućila upotrebu robota umesto tzv. *mernih mašina*, koje predstavljaju izuzetno skupe motorizovane pravouglove merne sisteme znatnih dimenzija ako se radi o većim proizvodima (letilice, plovila, vozila i sl.). Slika 36 prikazuje instalaciju za proveru dimenzija trupa

aviona koji dva merna robota *opipavaju* na karakterističnim mestima, pa se izmereni podaci preračunavaju na dimenzije radnog predmeta u njegovu koordinatnom sistemu i pamte u memoriji upravljačkog sistema, a posle merenja izdaju u obliku štampanog protokola.



Sl. 37. Pokretni robot sa postavljenim manipulatorom

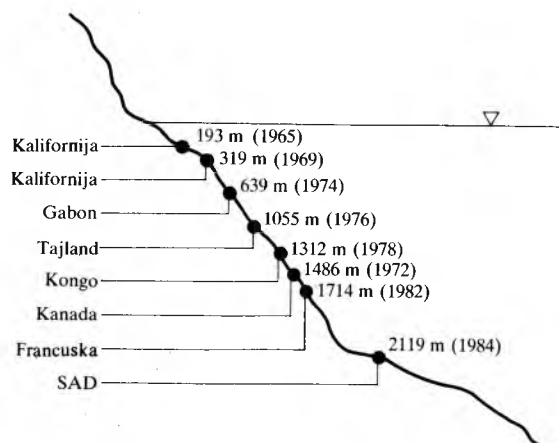
Sasvim drugu neobičnu primenu industrijskog robota predstavlja sl. 37, gde se na pokretnom robotu (ROBOCAR) nalazi industrijski robot (tipa PUMA) za opsluživanje više radnih mesta u tzv. *čistim sobama* elektronske i nekih drugih industrija.

LIT.: Ю. А. Степаненко, Динамика пространственных механизмов. Математички институт, Београд 1974. – Роботехника, под редакцией Е. П. Попова, Е. И. Юревича, Машиностроение, Москва 1984. – М. Вукобратовић, Примењена динамика манипулационих робота. Техничка knjiga, Београд 1986. – М. Вукобратовић и др., Увод у роботiku. Институт »Михајло Пупин«, Београд 1986. – М. Вукобратовић, Д. Стокић, Управљање манипулационим роботима. Техничка knjiga, Београд 1988.

M. Vukobratović

RUDARSKA PODMORSKA BUŠENJA, bušenja morskog dna radi istraživanja i dobivanja korisnih sirovina iz podmorskih sedimenata. Danas se takva bušenja primenjuju za istraživanje i iskorištavanje podmorskih ležišta ugljikovodika: nafte, kondenzata i plina. Za tu se svrhu rabe platforme i brodovi za bušenje. Platforme mogu biti stalne (nepokretne) te pokretne samopodizne, uronjene i poluuronjene.

Prve podmorske bušotine izrađene su devedesetih godina prošlog stoljeća sa stalnih, nepokretnih platformi neposredno uz obalu Kalifornije. Tamo je odobalno (offshore) naftno polje Summerland otkriveno 1886. U istom naftonosnom području izrađena je 1930. i prva usmjerena bušotina (Huntington Beach i Wilmington), a 1932. izrađeno je nekoliko bušotina s prve odobalne platforme na stupovima. Godine 1933. počinju istraživanja podmorskim bušenjem u Meksičkom zaljevu, gdje je 1947. otkriveno prvo veliko odobalno ležište. Od tada datira intenzivan razvoj istraživanja i dobivanja ugljikovodika iz podmorskih stijena. To omogućuje radove na sve većim dubinama (sl. 1).



Sl. 1. Povećanje morske dubine na kojoj su provedena podmorska bušenja u razdoblju od 1965. do 1984.