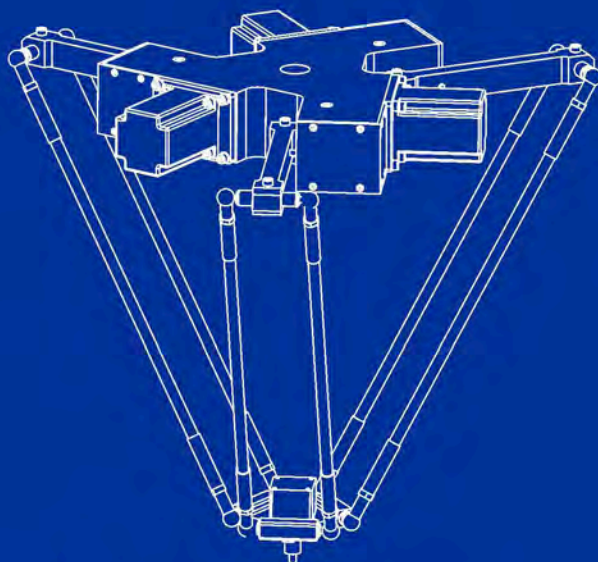
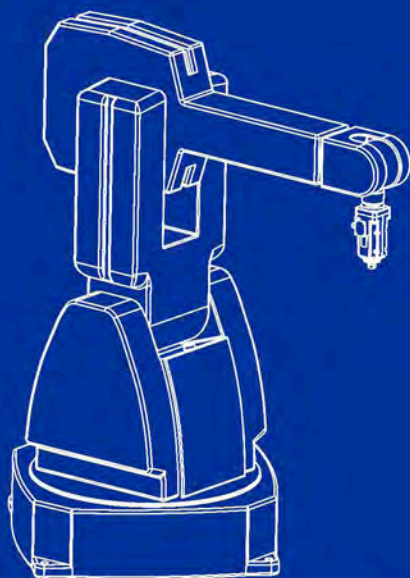


**UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET**

Dragan S. Milutinović



INDUSTRIJSKI ROBOTI

Beograd, 2024

UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET

Dragan S. Milutinović

INDUSTRIJSKI ROBOTI

Beograd, 2024.

Dr Dragan Milutinović, redovni profesor u penziji

INDUSTRIJSKI ROBOTI

Recenzenti:

Prof. dr Kornel Ehmann

Prof. dr Branislav Borovac

Izdavač:

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

11120 Beograd, Kraljice Marije 16

Tel: 011 3370 350, 3302 384

Tel/fax:011 3370 364

Za izdavača: Dekan, prof. dr Vladimir Popović

Glavni i odgovorni urednik: prof. dr Milan Lečić

Odobreno za štampu odlukom Dekana Mašinskog fakulteta u Beogradu br. 26/2023 od 29.12.2023. godine.

Tehnička obrada: prof. dr Mihajlo Popović

Tiraž: 200 primeraka

ISBN 978-86-6060-175-1

Štampa: Planeta print

11000 Beograd

www.planeta-print.rs

© Autor i Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
Zabranjeno preštampavanje i umnožavanje.

PREDGOVOR

Intenzivan razvoj, proizvodnja i primena industrijskih robota u 80-tim godinama prošlog veka su nametnuli potrebu da inženjeri budu osposobljeni za ovu oblast kroz redovno školovanje. Ovo je dovelo do toga da se već u ranim 90-tim godinama uvode predmeti različitog sadržaja iz oblasti robotike na univerzitetima širom sveta. Danas se roboti izučavaju na svim nivoima studija na različitim usmerenjima mašinskih, elektrotehničkih i drugih fakulteta.

Prateći ove trendove, Katedra za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu je prva u bivšoj Jugoslaviji, na tada dodiplomskim studijama, uvela predmet **Industrijski roboti** školske 1991/92 godine. Predmet su u VIII i IX semestru, kao obavezni, slušali studenti smera za proizvodno mašinstvo i, kao izborni, studenti smera za automatsko upravljanje. Autoru je, kao prvom izabranom nastavniku za ovaj predmet iz redova stalno zaposlenih na mašinskom fakultetu bilo povereno da sačini program predmeta i obezbedi potrebnu laboratorijsku opremu i učila.

Nakon reformi studijskih programa u skladu sa Bolonjskom deklaracijom, predmet Industrijski roboti se od školske 2008/09 godine, kao obavezni, sluša u I semestru master akademskih studija na modulu za Proizvodno mašinstvo i obuhvata industrijske robote serijske strukture odnosno serijske robote.

Prateći stalne i intenzivne promene kako u pogledu usavršavanja osnovnih podsistema (pogona, upravljanja, senzora, itd.) tako i u pogledu velikih promena koncepcija i struktura industrijskih robota i mašina alatki Katedra je, kao izborni predmet za veći broj modula na master akademskim studijama, uvela predmet **Mašine alatke i roboti nove generacije**.

Jedna od važnih tematskih celina, koja je takođe bila poverena autoru, obuhvata paralelne mašine odnosno paralelne robote i paralelne mašine alatke bazirane na mehanizmima sa paralelnom kinematikom. I pored suštinskih razlika u zahtevanim performansama između paralelnih robota i paralelnih mašina alatki, koje se često nazivaju i robotske mašine alatke, metode modeliranja i analize su im zajedničke i predstavljaju logičku celinu sa metodama modeliranja i analize serijskih robota.

Koncipirajući sadržaj ove knjige autor je pošao od ključne činjenice da su razvoj, modeliranje i projektovanje industrijskih robota sa jedne strane i planiranje integracije, instalisanje i primena odnosno eksploatacija, sa druge strane, veoma različiti inženjerski

zadaci. S obzirom da se proizvodno mašinstvo smatra za zajednički sadržalac celokupnog mašinstva pred inženjerima ovog profila su, slično kao i u slučaju mašina alatki, oba ova zadatka.

U ovo se i sam autor uverio u toku svog višedecenijskog nastavnog, istraživačkog i inženjerskog rada pa je i sadržaj ove knjige u tom smislu integralan.

Nedostatak adekvatne udžbeničke i druge literature na regionalnom jezičkom području koja bi integralno pokrila oblast industrijske robotike, uključujući pri tome pored serijskih i paralelne robote, je motivisao autora da napiše ovakvu knjigu. S obzirom na ovako zamišljen obim knjige, izložena materija je obuhvaćena kroz dvadeset poglavlja.

- Prvo poglavlje, pored definicija industrijskih robota i robotike obuhvata funkcionalnu strukturu, klasifikaciju i kratak prikaz istorijskog razvoja;
- Drugo poglavlje obuhvata analizu kinematičkih parova i kinematičkih lanaca, opis i klasifikaciju mehaničke strukture robota i analizu broja stepeni slobode. Za slučaj serijskih robota objašnjeni su pojmovi redundandnosti, singulariteta i radnog prostora;
- Treće poglavlje obuhvata prostorne opise i transformacije kao osnova za modeliranje serijskih i paralelnih robota;
- Četvrto, peto i šesto poglavlje obuhvataju kompletno kinematičko modeliranje serijskih manipulatora kroz direktni i inverzni kinematički problem, brzine i ubrzanja segmenata i end-efektora i Jakobijan matricu;
- Sedmo poglavlje obuhvata modeliranje statike serijskih manipulatora, pokazatelje manipulabilnosti i analizu statičke krutosti;
- Osmo poglavlje obuhvata dinamiku serijskih manipulatora Njutn-Ojlerovom formulacijom, osvrt na Lagranževu formulaciju i analizu strukture dinamičkih jednačina kretanja;
- Deveto poglavlje obuhvata planiranje trajektorije u prostoru unutrašnjih i spoljašnjih koordinata;
- Deseto poglavlje obuhvata pogonske sisteme, merne sisteme i prenosnike;
- U poglavlju jedanaest se ukratko razmatraju najčešće korišćeni senzori industrijskih robota;
- U poglavlju dvanaest se na elementarnom nivou razmatraju upravljanje kretanjem, upravljanje silom i hibridno upravljanje;
- Poglavlje trinaest obuhvata opis strukture i konfiguracije vizuelnih sistema industrijskih robota, geometrijski model nastanka slike, obradu slike, izdvajanje karakteristika i prepoznavanja. Pored kalibracije kamere na nivou koncepta se razmatra i vizuelno servo upravljanje serijskim robotima;
- Poglavlje četrnaest obuhvata različite metode programiranja industrijskih robota;
- Poglavlje petnaest obuhvata klasifikaciju i razmatranje osnovnih tipova završnih uređaja (end-efektora) industrijskih robota;
- U poglavlju šesnaest se razmatraju kolaborativni roboti;
- Poglavlje sedamnaest se odnosi na primenu serijskih industrijskih robota kroz koncept ćelija sa robotom, manipulacione i procesne zadatke, tehnoekonomsku

- analizu opravdanosti uvođenja robota, analizu ciklusnog vremena i metodologiju uvođenja robota;
- U poglavlju osamnaest se ukratko navode smernice vezane za projektovanje, ispitivanje i kalibraciju serijskih robota;
 - Poglavlje devetnaest obuhvata razmatranje industrijskih robota i mašina alatki sa paralelnom kinematikom kroz definicije, klasifikacije i analizu mehanizama sa paralelnom kinematikom za ove oblasti;
 - U poglavlju dvadeset se razmatra modeliranje kinematike, statike i dinamike paralelnih manipulatora.

S obzirom na multidisciplinarnost oblasti sa jedne strane i ograničenost obima koju treba da ima jedna ovakva knjiga, u ovim izlaganjima su za materiju, koja se detaljnije izučava na mašinskom ili drugim fakultetima, date samo osnove značajne za primenu kod industrijskih robota. Iz ovih razloga se pojedina poglavlja značajno razlikuju po obimu obuhvaćenih sadržaja. Izložena materija treba da, pre svega studentima modula za proizvodno mašinstvo svih nivoa studija, pruži teorijske i praktične osnove iz oblasti industrijske robotike. Knjiga takođe može da bude od koristi i studentima drugih modula i drugih fakulteta kao i inženjerima iz prakse s obzirom da je primena robota u našoj zemlji uveliko počela. Imajući ove činjenice u vidu autor je se trudio da izlaganja budu dovoljno rigorozna ali i dovoljno jednostavna kako bi stečena znanja bila inženjerski primenljiva što je i osnovni cilj ove knjige.

Autor koristi priliku da se zahvali svojim kolegama i dugogodišnjim saradnicima sa Katedre za proizvodno mašinstvo prof. dr Saši Živanoviću, prof. dr Nikoli Slavkoviću, prof. dr Mihajlu Popoviću, prof. dr Slavenku Stojadinoviću, doc. dr Milošu Pjeviću i dr Zoranu Dimiću iz Lola instituta na nesebičnoj pomoći i doprinosu u tehničkoj realizaciji sadržaja ove knjige. Autor se takođe posebno zahvaljuje i recenzentima prof. dr Kornel Emanu i prof. dr Branislavu Borovcu, kao i prof. dr Mihajlu Popoviću na uloženom trudu pri tehničkom uređenju knjige.

Na kraju autor se takođe zahvaljuje i svojoj porodici na razumevanju, strpljenju i pomoći da istraje na ovom poslu.

U Beogradu, 15.01.2024.

Autor

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 Roboti i robotika	1
1.2 Industrijski roboti	5
1.3 Industrijska robotika	12
1.4 Istorijat razvoja industrijskih robota	12
2. KINEMATIČKA (MEHANIČKA) STRUKTURA ROBOTA	23
2.1 Broj stepeni slobode krutog tela	23
2.2 Kinematički parovi	24
2.3 Kinematički lanci	26
2.4 Predstavljanje mehaničke strukture robota	29
2.5 Indeks pokretljivosti i broj stepeni slobode manipulatora	31
2.6 Indeks pokretljivosti i broj stepeni slobode serijskih manipulatora strukture prostog otvorenog kinematičkog lanca	36
2.7 Konfiguracioni prostor i prostor zadatka	38
2.8 Opšta struktura serijskih manipulatora	40
2.9 Veza između broja stepeni slobode serijskih manipulatora i tehnoloških zadataka	47
2.10 Redudantnost serijskih manipulatora	49
2.11 Singulariteti serijskih manipulatora	53
2.12 Radni prostor serijskih manipulatora	54
3. PROSTORNI OPISI I TRANSFORMACIJE	59
3.1 Opis pozicije tačke u prostoru	59
3.2 Pozicija i orijentacija krutog tela	61
3.3 Matrica rotacije kao matrica transformacije	63
3.4 Transformacija koordinata i opis koordinatnog sistema	64
3.5 Osnovne matrice rotacija	65
3.6 Kompozitna matrica rotacije – apsolutne i relativne transformacije	68
3.7 Uobičajeni načini opisa i parametrizacije orijentacije	69
3.8 Homogene transformacije i koordinatni sistemi (frejmovi)	79
4. KINEMATIKA SERIJSKIH MANIPULATORA 1: DIREKTNI KINEMATIČKI PROBLEM	95
4.1 Kinematički model serijskog manipulatora	96
4.2 Denavit-Hartenberg-ovi kinematički parametri, specifikacija A matrica	102
4.3 Direktni kinematički problem	106
4.4 Primeri rešavanja direktnog kinematičkog problema	110

5. KINEMATIKA SERIJSKIH MANIPULATORA 2: INVERZNI KINEMATIČKI PROBLEM	143
5.1 Postavka problema.....	143
5.2 Analitičko rešavanje inverznog kinematičkog problema	147
5.3 Numeričko rešavanje inverznog kinematičkog problema.....	153
5.4 Primeri rešavanja inverznog kinematičkog problema	154
5.5 Analiza i simulacija rešenja inverznog kinematičkog problema	174
6. KINEMATIKA SERIJSKIH MANIPULATORA 3: BRZINE I UBRZANJA SEGMENTA I END-EFEKTORA, JAKOBIJAN MATRICA	177
6.1 Translatorna i ugaona brzine end-efektora	177
6.2 Brzina i ubrzanje segmenata i end-efektora.....	185
6.3 Jakobijan matrica manipulatora	194
7. STATIKA SERIJSKIH MANIPULATORA	219
7.1 Analiza sila i momenata koji deluju na izolovani segment manipulatora.....	219
7.2 Rekurzivni metod određivanja sila i momenata reakcija u zglobovima segmenata	222
7.3 Jakobijan matrica u statici manipulatora	228
7.4 Pokazatelji manipulabilnosti manipulatora	229
7.5 Analiza statičke krutosti manipulatora.....	237
8. DINAMIKA SERIJSKIH MANIPULATORA	247
8.1 Osnovne postavke i zakoni	249
8.2 Njutn-Ojlerova formulacija dinamike serijskih manipulatora	264
8.3 Lagranževa formulacija dinamike serijskih manipulatora.....	280
8.4 Dinamičke jednačine u prostoru zadatka	286
8.5 Opšti osvrti na problematiku dinamičkog modeliranja manipulatora.....	287
9. PLANIRANJE TRAJEKTORIJE	291
9.1 Klasifikacija trajektorija	291
9.2 Trajektorije u prostoru unutrašnjih koordinata – PTP kretanje.....	292
9.3 Trajektorija u prostoru spoljašnjih koordinata.....	318
10. POGONSKI SISTEMI	347
10.1 Pneumatski pogoni.....	348
10.2 Hidraulički pogon.....	348
10.3 Elektromotori	350
10.4 Merni sistemi	359
10.5 Prenosnici.....	367

11. SENZORI	373
11.1 Zadaci, klasifikacija i osnovne karakteristike senzora.....	373
11.2 Unutrašnji senzori.....	374
11.3 Senzori sila i momenata.....	375
11.4 RCC jedinice	380
11.5 Spoljašnji senzori	382
12. UPRAVLJANJE ROBOTIMA	391
12.1 Povratna sprega i upravljanje zatvorenim sistemom	393
12.2 Linearni sistemi drugog reda.....	394
12.3 Upravljanje kretanjem u unutrašnjim koordinatama.....	410
12.4 Upravljanje kretanjem u spoljašnjim koordinatama.....	427
12.5 Upravljanje silom.....	429
12.6 Arhitektura upravljačkog sistema	439
13. VIZUELNI SISTEM ROBOTA	445
13.1 Funkcionalna struktura vizuelnog sistema robota.....	447
13.2 Konfiguracije vizuelnog sistema robota	456
13.3 Formiranje slike – geometrijski model nastanka slike.....	456
13.4 Modeliranje perspektivne kamere	463
13.5 Kalibracija kamere.....	473
13.6 Obrada slike	478
13.7 Izdvajanje karakteristika	499
13.8 Prepoznavanje objekata.....	508
13.9 Određivanje pozicije i orijentacije objekta/kamere	519
13.10 Vizuelno servo upravljanje	531
14. PROGRAMIRANJE INDUSTRIJSKIH ROBOTA	539
14.1 Metode programiranja	541
14.2 On-line metode programiranja	542
14.3 Off-line metode programiranja	547
15. ZAVRŠNI UREĐAJI – END EFEKTORI	565
15.1 Hvatači	566
15.2 Uređaji, mašine i alati.....	575
15.3 Veza robota i end efektoru	576
16. KOLABORATIVNI INDUSTRIJSKI ROBOTI	579
16.1 Koncepti podsistema kolaborativnih robota	582
16.2 Klasifikacija odnosa čovek – robot.....	584
16.3 Osnovne definicije i bezbednosni zahtevi u primeni kolaborativnih robota prema ISO standardima.....	585

17. PRIMENA ROBOTA	591
17.1 Čelije sa robotom	591
17.2 Primena robota u manipulacionim zadacima	602
17.3 Procesni zadaci	608
17.4 Primena robota u montaži	641
17.5 Metodologija uvođenja robota	650
18. OSVRT NA PROJEKTOVANJE, ISPITIVANJE I KALIBRACIJU INDUSTRIJSKIH ROBOTA	657
18.1 Projektovanje industrijskih robota	657
18.2 Ispitivanje robota	658
18.3 Kalibracija robota.....	659
19. ROBOTI I MAŠINE SA PARALELNOU KINEMATIKOM	663
19.1 Osvrt na karakteristike serijskih struktura robota i mašina alatki i pojava novog koncepta	663
19.2 Osvrt na istorijski razvoj paralelnih mehanizama i mašina baziranih na njima	665
19.3 Generalizovana definicija paralelnih mehanizama	668
19.4 Pasivni zglobovi.....	670
19.5 Kinematički lanci za vezu baze i platforme	671
19.6 Klasifikacija paralelnih mehanizama prema vrstama nogu i načinima pogona aktivnih zglobova	671
19.7 Predstavljanje strukture paralelnih mehanizama	674
19.8 Klasifikacija paralelnih mehanizama prema karakteristikama kretanja i broju stepeni slobode	675
19.9 Usporedne karakteristike serijskih i paralelnih mehanizama	691
20. MODELIRANJE MANIPULATORA PARALELNIH ROBOTA I MAŠINA ALATKI	697
20.1 Kinematičko modeliranje paralelnih manipulatora.....	697
20.2 Statika paralelnih manipulatora	744
20.3 Dinamika paralelnih manipulatora	746

UVOD

- 1.1 Roboti i robotika
 - 1.2 Industrijski roboti
 - 1.3 Industrijska robotika
 - 1.4 Istorijat razvoja industrijskih robota
-

Ovo poglavlje, pored osvrt na robote i robotiku u širem smislu, obuhvata uvodna razmatranja vezana za industrijske robote i industrijsku robotiku. Ovim su obuhvaćene osnovne definicije industrijskih robota i funkcionalna struktura sa osnovnim podsistemima kao osnova za klasifikaciju i sadržaje koje obuhvata industrijska robotika. Na kraju poglavlja je dat i pregled istorijskog razvoja industrijskih robota odnosno industrijske robotike.

1.1 Roboti i robotika

Čovek je od davnina imao želju da stvara naprave i mašine koje bi po veštini i inteligenciji bile analogne živim sistemima pa i njemu samom. Neke od tih naprava iz antičkog i renesansnog perioda se mogu posmatrati i kao preteče današnjih robota digitalne ere. Futurističke ideje začete čovekovom maštovitošću i kreativnošću koje se po pravilu ne mogu realizovati u periodu nastanka se, često samo i privremeno, presele u književna i filmska dela naučne fantastike strpljivo čekajući da budu realizovane. Tako je bilo i sa robotima i robotikom koji imaju svoje početke u naučnoj fantastici.

Reč *robot*, slika 1.1, se prvi put pojavljuje u naučnofantastičnoj drami češkog pisca Karela Čapeka pod nazivom „Rosumovi univerzalni roboti“ (R.U.R) objavljenoj 1920. godine [3]. Reč robot potiče od češke reči *roboťa* koja znači prisilan rad.

Predstava o robotima široko varira među običnim ljudima, istraživačima, inženjerima, proizvođačima robota, pa i regionima i zemljama. Obični, manje upućeni, ljudi i danas kada se pomene reč robot pomisle na čovekolike mašine odnosno androide ili humanoide sa antropomorfnim karakteristikama iz dela naučne fantastike kao što su roboti iz R.U.R.-a ili roboti R2D2 i C3PO iz filmova „Ratovi zvezda“ slika 1.2.

2

KINEMATIČKA (MEHANIČKA) STRUKTURA ROBOTA

- 2.1 Broj stepeni slobode krutog tela
 - 2.2 Kinematički parovi
 - 2.3 Kinematički lanci
 - 2.4 Predstavljanje mehaničke strukture robota
 - 2.5 Indeks pokretljivosti i broj stepeni slobode manipulatora
 - 2.6 Indeks pokretljivosti i broj stepeni slobode serijskih manipulatora strukture prostog otvorenog kinematičkog lanca
 - 2.7 Konfiguracioni prostor i prostor zadatka
 - 2.8 Opšta struktura serijskih manipulatora
 - 2.9 Veza između broja stepeni slobode serijskih manipulatora i tehnoloških zadataka
 - 2.10 Redudantnost serijskih manipulatora
 - 2.11 Singulariteti serijskih manipulatora
 - 2.12 Radni prostor serijskih manipulatora
-

Kinematička ili mehanička struktura odnosno mehanizam robota ili manipulator se može posmatrati kao sistem krutih tela (članova ili segmenata) međusobno povezanih zglobovima. Kao što je pomenuto, funkcija manipulatora je uspostavljanje prostornih odnosa između end-efektora i objekata manipulacije odnosno dovođenje end-efektora u željeni položaj (poziciju i orijentaciju) željenom brzinom i željenim ubrzanjem.

Polazeći od osnovnih pojmova iz teorije mehanizama, odnosno kinematičkih parova i kinematičkih lanaca ovo poglavlje obuhvata opis, analizu i klasifikaciju mehaničke strukture robota. Kroz elementarne primere, objašnjavaju se pojmovi konfiguracionog prostora, indeksa pokretljivosti odnosno broja stepeni slobode, prostor zadatka, radni prostor, redudantnost i singulariteti za serijske robote. O ovoj problematici za paralelne robote će biti reči u poglavlju 19.

2.1 Broj stepeni slobode krutog tela

Kao što je poznato iz kinematike, da bi se odredio položaj (konfiguracija) odnosno pozicija i orijentacija slobodnog krutog tela u prostoru dovoljno je poznavati koordinate njegove tri nekolinearne tačke. S obzirom da je u pitanju kruto telo to su rastojanja između tih tačaka konstantna tako da njihove koordinate nisu međusobno nezavisne. Ovo znači da je u opštem slučaju položaj krutog tela u prostoru potpuno određen sa šest nezavisnih parametara odnosno stepeni slobode koji se obično klasifikuju u dve kategorije:

PROSTORNI OPISI I TRANSFORMACIJE

- 3.1 Opis pozicije tačke u prostoru
 - 3.2 Pozicija i orijentacija krutog tela
 - 3.3 Matrica rotacije kao matrica transformacije
 - 3.4 Transformacija koordinata i opis koordinatnog sistema
 - 3.5 Osnovne matrice rotacija
 - 3.6 Kompozitna matrica rotacije – apsolutne i relativne transformacije
 - 3.7 Uobičajeni načini opisa i parametrizacije orijentacije
 - 3.8 Homogene transformacije i koordinatni sistemi (frejmovi)
-

Manipulacija robotima podrazumeva pomeranje objekata i alata u prostoru. Izučavanje problema manipulacije obuhvata definisanje i opis prostornih odnosa između objekata i odnosa između objekata i manipulatora. Za opis položaja (pozicije i orijentacije) objekata i manipulatora, odnosno end-efektora i svakog segmenta ponaosob, potrebno je definisati koordinatne sisteme i konvencije za njihov opis i predstavljanje. Ključni elementi za uspostavljanje ovog formalizma su bazirani na teoriji konačnih rotacija i homogenim koordinatama odnosno homogenim transformacijama. Ovo će biti osnova za dalje razumevanje kinematike i dinamike robota, upravljanja, programiranja i primene robota. Slični problemi i matematički aparat su razmatrani i u kompjuterskoj grafici, sistemima modeliranja tela (*Solid modelling systems*) i vizuelnim sistemima (*Vision systems*).

3.1 Opis pozicije tačke u prostoru

Pozicija tačke u prostoru je određena vektorom položaja u nekom unapred definisanom referentnom koordinatnom sistemu^{*)}. S obzirom da je u robotici potrebno uspostaviti veći broj koordinatnih sistema to je uobičajeno da vektor položaja tačke nosi oznaku koordinatnog sistema u kojem je definisan. Na slici 3.1 je pokazan vektor položaja tačke P u Dekartovom koordinatnom sistemu {A} u oznaci ${}^A\mathbf{p} \in R^3$. Vektor položaja tačke P sa slike 3.1 je određen svojim komponentama odnosno projekcijama i može se izraziti kao ${}^A\mathbf{p} = p_{xA} \cdot \mathbf{i}_A + p_{yA} \cdot \mathbf{j}_A + p_{zA} \cdot \mathbf{k}_A$ ili u matričnom obliku kao

^{*)} U robotici, kao i u ovim razmatranjima se obično koristi Dekartov pravougli koordinatni sistem desne orijentacije osim ako se drugačije ne naglasi.

KINEMATIKA SERIJSKIH MANIPULATORA 1: DIREKTNI KINEMATIČKI PROBLEM

4

- 4.1 Kinematički model serijskog manipulatora
 - 4.2 Denavit-Hartenberg-ovi kinematički parametri, specifikacija A matrica
 - 4.3 Direktni kinematički problem
 - 4.4 Primeri rešavanja direktnog kinematičkog problema
-

Kinematika manipulatora se bavi izučavanjem problema određivanja pozicije i orijentacije kao i brzina i ubrzanja end-efektora i segmenata preko unutrašnjih i spoljašnjih koordinata. S obzirom da su manipulatori u suštini projektovani da zadatke izvršavaju kretanjem, izučavanje njihove kinematike predstavlja osnovu za analizu, simulacije, dinamiku, projektovanje, upravljanje i programiranje.

Sistematizovan pristup kinematičkog modeliranja manipulatora zahteva adekvatne metode opisa njihove strukture. Od nekoliko metoda koje se susreću u literaturi^{*)} u ovom poglavlju će se razmotriti Denavit-Hartenberg-ov metod [5] kao jedan od najčešće korišćenih.

Polazeći od kinematičkog modela manipulatora i homogenih transformacija razmatranih u prethodnom poglavlju, prvo su definisane unutrašnje koordinate, kao pomeranja u zglobovima, i spoljašnje koordinate koje opisuju poziciju i orijentaciju end-efektora u odnosu na neki unapred usvojeni koordinatni sistem. Zatim se pridruživanjem koordinatnih sistema segmentima manipulatora i definisanjem Denavit-Hartenberg-ovih (DH) kinematičkih parametara formiraju kinematičke jednačine kao analitički opis relacija između pomeranja u zglobovima i pozicije i orijentacije end-efektora. Na ovaj način su definisana dva fundamentalna teorijska i praktična pitanja kinematike robota odnosno direktni i inverzni kinematički problem. Kroz detaljno razmotren pristup kinematičkog modeliranja manipulatora i rešavanje direktnog kinematičkog problema, za uobičajene konfiguracije manipulatora, u ovom poglavlju su stvoreni uslovi za razmatranje inverznog kinematičkog problema u poglavlju 5, kao i za razmatranje brzina i ubrzanja segmenata i end-efektora i Jakobijan matrica manipulatora u poglavlju 6.

^{*)} U [14] je opisan metod sukcesivnih zavojnih pomeranja (succesive screw displacements). U [9] je opisan metod Formula proizvoda eksponencijala (Product of exponential (PoE) formula) i univerzalni format opisa robota (Universal Robot Description Format URDF) kao format datoteke koji se koristi u ROS-u (Robot Operating System). U [6] je opisan Shet-ov metod pogodan za polinarne segmente.

5

KINEMATIKA SERIJSKIH MANIPULATORA 2: INVERZNI KINEMATIČKI PROBLEM

- 5.1 Postavka problema
 - 5.2 Analitičko rešavanje inverznog kinematičkog problema
 - 5.3 Numeričko rešavanje inverznog kinematičkog problema
 - 5.4 Primeri rešavanja inverznog kinematičkog problema
 - 5.5 Analiza i simulacija rešenja inverznog kinematičkog problema
-

Rešavanje inverznog kinematičkog problema je od fundamentalnog značaja za upravljanje i obuhvata određivanje vektora unutrašnjih koordinata odnosno pomeranja u zglobovima za zadati vektor spoljašnjih koordinata odnosno za zadatu poziciju i orijentaciju end-efektora. S obzirom na značaj i kompleksnost, rešavanje inverznog kinematičkog problema se mora posmatrati kao matematički ali i inženjerski problem. U ovom poglavlju će se prvo ukratko razmotriti problem rešivosti odnosno postojanje rešenja i višestrukost rešenja kao i metode rešavanja. Zatim će se razmotriti uobičajeni analitički pristupi rešavanja inverznog kinematičkog problema i pokazati njihova primena na primerima za koje je direktni kinematički problem rešavan u prethodnom poglavlju. O numeričkom pristupu rešavanja inverznog kinematičkog problema će detaljno biti reči u poglavlju 6.

5.1 Postavka problema

Pri rešavanju direktnog kinematičkog problema npr. manipulatora sa 6 stepeni slobode, jednačina (4.15), članovi matrice ${}^0T(\mathbf{q})$ dobijeni kao

$$\begin{aligned} {}^0T(q_1, q_2, \dots, q_6) &= {}^0_1A(q_1) \cdot {}^1_2A(q_2) \cdot \dots \cdot {}^5_6A(q_6) = \\ &= \left[\begin{array}{ccc|c} {}^0R(q_1, \dots, q_6) & & & {}^0\mathbf{p}_6(q_1, \dots, q_6) \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|c} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ \hline n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{aligned} \quad (5.1)$$

su funkcije unutrašnjih koordinata q_i , $i = 1, 2, \dots, 6$ čije vrednosti jednoznačno određuju poziciju i orijentaciju end-efektora. Sa druge strane, za zadatu poziciju i orijentaciju end-efektora odnosno za zadati vektor spoljašnjih koordinata, npr. pri minimalnom opisu, kao $\mathbf{x}_e = [p_x \ p_y \ p_z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ formira se matrica ${}^0T(\mathbf{x}_e)$ kao

KINEMATIKA SERIJSKIH MANIPULATORA 3: BRZINE I UBRZANJA SEGMENTA I END- EFEKTORA, JAKOBIJAN MATRICA

6

- 6.1 Translatorna i ugaona brzine end-efektora
- 6.2 Brzina i ubrzanje segmenata i end-efektora
- 6.3 Jakobijan matrica manipulatora

U ovom poglavlju će se razmotriti translatorne i ugaone brzine, kao i ubrzanja segmenata i end-efektora. Poznavanje brzina i ubrzanja segmenata, a posebno end-efektora je od velike važnosti za dinamiku i upravljanje robotima. Kako se u ovim razmatranjima manipulator modelira kao prost otvoreni kinematički lanac, sa segmentima koji se relativno kreću u odnosu na susedne, to će se položaji, brzine i ubrzanja segmenata i end-efektora, u odnosu na nepokretnu osnovu, sračunavati rekurzivno.

U ovom poglavlju će se, takođe, razmatrati i odnosi između translatorne i ugaone brzine end-efektora i brzina u zglobovima preko Jakobijan matrice manipulatora. Kako je Jakobijan matrica manipulatora važna u svim aspektima modeliranja manipulatora, to će se ovde razmotriti načini njenog izvođenja i primene.

6.1 Translatorna i ugaona brzine end-efektora

Pozicija i orijentacija end-efektora, zadata ili dobijena rešavanjem direktnog kinematičkog problema, za opšti slučaj manipulatora sa 6 stepeni slobode, slika 6.1, se, kao što je objašnjeno u poglavlju 4, može predstaviti na dva načina. Prvi način je preko minimalnog broja parametara u formi vektora spoljašnjih koordinata, kao u jednačini (4.6). Za slučaj sa slike 6.1 vektor spoljašnjih koordinata bi bio:

$$\mathbf{x}_e = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{p}_6^T & \Phi_e^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z & \phi & \theta & \psi \end{bmatrix}^T \quad (6.1)$$

gde je ${}^0\mathbf{p}_6$ pozicija vrha end-efektora T , dok je Φ_e matrica kolona npr. RPY ili z - y - z Ojlerovih uglova ϕ , θ i ψ koji opisuju orijentaciju end-efektora. Drugi način je preko matrica 0T , jednačina (6.2) koja sadrži vektor položaja vrha end-efektora ${}^0\mathbf{p}_6$ i matricu rotacije 0R koja opisuje njegovu orijentaciju kao

7

STATIKA SERIJSKIH MANIPULATORA

- 7.1 Analiza sila i momenata koji deluju na izolovani segment manipulatora
 - 7.2 Rekurzivni metod određivanja sila i momenata reakcija u zglobovima segmenata
 - 7.3 Jakobijan matrica u statici manipulatora
 - 7.4 Pokazatelji manipulabilnosti manipulatora
 - 7.5 Analiza statičke krutosti manipulatora
-

Pri izvršavanju različitih zadataka kao što su manipulacija ili obavljanje nekog procesa potrebno je da end-efektor deluje na okolinu odgovarajućim silama i momentima u tačkama kontakta. Zahtevana rezultujuća sila i rezultujući moment kojim end-efektor treba da deluje u tački ili tačkama kontakta sa okolinom se ostvaruje pogonskim silama i momentima u zglobovima. Analiza statičkih sila i momenata je od velikog praktičnog značaja u projektovanju manipulatora jer predstavlja osnovu za dimenzionisanje segmenata, elemenata i sklopova zglobova uključujući i izbor aktuatora. Pored toga, statika manipulatora je od velikog značaja za upravljanje i primenu kao i za analizu statičke krutosti odnosno popustljivosti koja ima veliki uticaj na tačnost robota.

S obzirom na strukturu serijskih manipulatora u ovom poglavlju će se razmatrati rekurzivni metod određivanja sila i momenata reakcija u zglobovima kao i pogonskih ili tzv. ekvivalentnih sila i momenata za zadate spoljašnje statičke sile i momente koji deluju na end-efektor. Odnosi između spoljašnjih statičkih sila i momenata koji deluju na end-efektor i pogonskih sila i momenata u zglobovima manipulatora su takođe pokazani primenom principa virtuelnog rada i Jakobijan matrice. U okviru analize manipulabilnosti manipulatora, pored elipsoida brzine i sile razmatraju se i indeks manipulabilnosti i izotropnost. U analizi statičke krutosti odnosno popustljivosti manipulatora razmotriće se i izvođenje matrice statičke popustljivosti i pokazati njen značaj kroz primere u kontaktnim zadacima.

7.1 Analiza sila i momenata koji deluju na izolovani segment manipulatora

Svaki segment manipulatora, osim poslednjeg za kojeg je vezan end-efektor, je povezan sa dva susedna segmenta obrtnim i/ili translatorskim zglobovom. Na slici 7.1 su prikazane statičke sile i momenti koji deluju na izolovani segment i koji je zglobovom i povezan sa segmentom $i-1$ a zglobovom $i+1$ sa segmentom $i+1$. Koordinatni sistemi $\{i-1\}$ i $\{i\}$ su

8

DINAMIKA SERIJSKIH MANIPULATORA

- 8.1 Osnovne postavke i zakoni
 - 8.2 Njtn-Ojlerova formulacija dinamike serijskih manipulatora
 - 8.3 Lagranževa formulacija dinamike serijskih manipulatora
 - 8.4 Dinamičke jednačine u prostoru zadatka
 - 8.5 Opšti osvrti na problematiku dinamičkog modeliranja manipulatora
-

Dinamika manipulatora je od izuzetnog značaja za ostvarivanje visokih performansi robota. Izvođenje dinamičkih jednačina koje opisuju dinamičko ponašanje manipulatora odnosno razvoj dinamičkog modela manipulatora omogućava:

- razvoj upravljačkih strategija u cilju ostvarivanja željenih performansi robota u zadacima koji zahtevaju velike brzine kretanja pri praćenju željenih trajektorija;
- analizu u procesu projektovanja kao osnove za dimenzionisanje sklopova zglobova, elemenata strukture i pogonskog sistema; i
- računarske simulacije u cilju ispitivanja i predviđanja ponašanja manipulatora u različitim eksploatacionim uslovima pre njihove gradnje.

Kao što je pomenuto u Poglavlju 2, serijski manipulatori, zbog svoje strukture, nisu pogodni sa aspekta dinamike. Međutim, sa aspekta modeliranja, serijska struktura manipulatora je pogodnija za izvođenje dinamičkih jednačina kretanja. Bez obzira na metode izvođenja, dinamičke jednačine serijskih manipulatora, o kojima je ovde reč, se, u opštem slučaju, mogu predstaviti skupom diferencijalnih jednačina koje se kompaktnom matrično-vektorskom notacijom mogu predstaviti jednom jednačinom^{*)} npr. kao

$$\boldsymbol{\tau} = \mathcal{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}), \quad (8.1)$$

gde su: $\boldsymbol{q} \in R^n$ – vektor unutrašnjih koordinata, $\boldsymbol{\tau} \in R^n$ – vektor pogonskih sila i/ili momenata u zglobovima, $\mathcal{M}(\boldsymbol{q}) \in R^{n \times n}$ – simetrična pozitivno-definitna inercijalna matrica ili matrica masa, i $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$ – vektor grupisanih sila koje sadrže centripetalne, Koriolisove, gravitacione i frikционе članove koji zavise od \boldsymbol{q} i $\dot{\boldsymbol{q}}$. Bez obzira na

^{*)} Opšta vektorska diferencijalna jednačina kretanja serijskih manipulatora (8.1) se, zavisno od željenog načina grupisanja članova (odnosno primene) može interpretirati i na druge načine o čemu će biti više reči.

konceptualnu jednostavnost ove jednačine kretanja serijskih manipulatora, kao i činjenicu da su ose zglobova uglavnom međusobno paralelne ili upravne, matrica $\mathcal{M}(\mathbf{q})$ i vektor $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ su veoma kompleksni.

U dinamici manipulatora, slično kao i u kinematici, su od osnovne važnosti inverzni i direktni dinamički problemi. **Inverzni dinamički problem** obuhvata određivanje pogonskih sila i/ili momenata u zglobovima potrebnih za ostvarivanje željenih trajektorija. Prema jednačini (8.1) ovo znači da se vektor pogonskih sila i/ili momenata u zglobovima $\boldsymbol{\tau}$ može odrediti za zadato stanje $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ i željeno ubrzanje $\ddot{\mathbf{q}}$. Problem može biti formulisan u prostoru zglobova, $\mathbf{q}(t)$ ili u prostoru spoljašnjih koordinata $\mathbf{x}(t)$. **Direktni dinamički problem** obuhvata određivanje rezultujućeg kretanja manipulatora za zadati vektor pogonskih sila i/ili momenata u zglobovima. Prema jednačini (8.1), ovo znači da se ubrzanje $\ddot{\mathbf{q}}$, za zadato stanje $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ i pogonske sile i/ili momente u zglobovima $\boldsymbol{\tau}$ može izraziti kao

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathcal{M}^{-1}(\mathbf{q}) \cdot (\boldsymbol{\tau} - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})). \quad (8.2)$$

U opštem slučaju, efikasnost sračunavanja rešenja direktnog dinamičkog problema nije od ključnog značaja s obzirom da se prvenstveno koristi u simulacijama. Međutim, efikasnost sračunavanja rešenja inverznog dinamičkog problema je od izuzetnog značaja kod upravljačkih algoritama za rad u realnom vremenu. U obimnoj literaturi iz oblasti robotike [5, 10, 13, 19, 20, 21], široka oblast dinamike manipulatora obuhvata veći broj metoda i algoritama izvođenja dinamičkih jednačina kretanja manipulatora. Na bazi ovih metoda su razvijeni i komercijalni softverski sistemi za dinamičku analizu mehaničkih sistema uopšte kao i softverskih sistema za dinamičku analizu manipulatora. Razvijene efikasne metode i algoritmi dinamičkog modeliranja manipulatora koje omogućavaju i rad u realnom vremenu su uglavnom bazirani na Lagranževim i Njutn-Ojlerovim jednačinama koje se i danas smatraju standardom u robotici. Od ostalih metoda ovde se još navodi i Kane-ov metod [8] koji zbog svoje opštosti ima sve značajniju ulogu i u oblasti dinamike manipulatora.

Lagranževa formulacija dinamike manipulatora se zasniva na kinetičkoj i potencijalnoj energiji manipulatora. S obzirom da se manipulator, kao sistem krutih tela, posmatra u celini to je Lagranževa formulacija konceptualno jednostavnija, elegantnija i efikasna pogotovu za serijske manipulatore sa manjim brojem stepeni slobode. Osnovna prednost ovog pristupa je eliminacija reakcija veza između segmenata i dobijanje dinamičkih jednačina kretanja manipulatora u simboličkoj ili tzv. zatvorenoj formi (analitički). Ovako dobijene dinamičke jednačine pružaju mogućnost analize uticaja pojedinih članova u njihovoj strukturi što je veoma važno za razvoj upravljačkih algoritama. Međutim, za potrebe dimenzionisanja, sile reakcija veza se moraju naknadno uspostaviti.

Njutn-Ojlerova formulacija odnosno metoda dinamičkog modeliranja na bazi Njutnove jednačine i Ojlerove jednačine se zasniva na ravnoteži svih sila i momenata koji deluju na izolovani segment manipulatora. To znači da dinamičke jednačine kretanja segmenata uključuju i sile i momente reakcija uklonjenih veza sa susednim segmentima. Ravnoteža svih sila i momenata koji deluju na svaki segment daje sistem jednačina čija

struktura omogućava rekurzivni način sračunavanja tako da ovaj pristup ima nekoliko prednosti. Uključivanje sila i momenata reakcija uklonjenih veza je od izuzetnog značaja pri projektovanju manipulatora odnosno za dimenzionisanje segmenata, sklopova i elemenata zglobova i izbor pogonskog sistema. Rekurzivno rešavanje jednačina numeričkim sračunavanjem takođe omogućava i veliku brzinu sračunavanja što je od velike važnosti za upravljačke algoritme. Eliminacijom sila i momenata reakcija uklonjenih veza mogu se dobiti dinamičke jednačine u zatvorenoj formi kao i u slučaju primene Lagranževe formulacije.

Zbog navedenih i široko prihvaćenih prednosti u ovom poglavlju će biti detaljnije razmatrana Njutn-Ojlerova formulacija dok će Lagranžova formulacija biti ukratko predstavljena na nivou koncepta kroz elementarne primere. Pored neophodnih osnova iz oblasti dinamike, u ovim razmatranjima će biti dat i kratak osvrt na strukturu opštih dinamičkih jednačina kretanja serijskih manipulatora kao i opšti osvrt na problematiku dinamičkog modeliranja manipulatora.

8.1 Osnovne postavke i zakoni

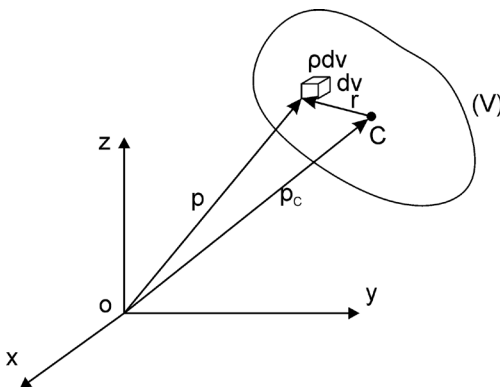
Dinamika manipulatora i mehanizama uopšte je široka i kompleksna oblast koja daleko prevazilazi okvire ove knjige. U ovoj tački se ukratko navode osnovne postavke i zakoni neophodni za razmatranje osnova dinamike manipulatora.

8.1.1 Geometrija masa – svojstva inercije krutog tela

Kao što je poznato iz mehanike krutog tela, pri translatorsnom kretanju krutog tela ili sistema krutih tela mera inercije je masa sistema (tela) a karakteristika rasporeda masa u tom slučaju je središte (centar) masa ili centar inercije. Pri obrtnom kretanju tela mera inercije su momenti inercije odnosno tenzor inercije ili matrica inercije kao karakteristika rasporeda masa.

Masa i centar inercije tela i sistema tela:

Neka kruto telo (V), slika 8.1, predstavlja oblast prostora koja je ispunjena neprekidno raspoređenom masom.



Slika 8.1 Centar inercije tela

9

PLANIRANJE TRAJEKTORIJE

- 9.1 Klasifikacija trajektorija
 - 9.2 Trajektorije u prostoru unutrašnjih koordinata – PTP kretanje
 - 9.3 Trajektorija u prostoru spoljašnjih koordinata
-

Planiranje kretanja je jedan od esencijalnih problema u robotici čije rešenje predstavlja osnovni pokazatelj mogućnosti primene jednog robota. Zadatak kretanja robota se definiše putem kojim robot odnosno end-efektor mora da se kreće. Put može biti definisan geometrijskom krivom ili nizom tačaka u unutrašnjim ili spoljašnjim koordinatama. Put kojeg robot odnosno end-efektor treba da prati po željenom zakonu kretanja čini trajektoriju. Problem planiranja odnosno generisanja trajektorije obuhvata određivanje upravljačkom sistemu željenih referentnih unutrašnjih ili spoljašnjih koordinata u funkciji vremena kako bi robot pratio željeni put. Razmatranja u ovom poglavlju obuhvataju osnovne tehnike generisanja trajektorije u prostoru unutrašnjih i spoljašnjih koordinata.

Razmatranja planiranja trajektorije u unutrašnjim koordinatama obuhvataju PTP kretanja (tačka po tačka – point-to-point motion), elementarne i kompozitne trajektorije kao i PTP kretanje sa međutačkama. U razmatranjima planiranja trajektorije u spoljašnjim koordinatama se polazi od osnovnih koraka u generisanju kretanja duž kontinualnog puta tzv. CP kretanje (Continuous path motion). Zatim se preko parametarskog opisa puta i tzv. primitiva kretanja razmatraju planiranje trajektorija pozicija i trajektorija orijentacija kao i njihovo sprezanje.

9.1 Klasifikacija trajektorija

Trajektorije robota mogu biti klasifikovane na različite načine. U literaturi je uobičajena klasifikacija na:

- trajektorije između dve tačke sa proizvoljnim (slobodnim) putem između njih (kretanje tačka po tačka, point-to-point motion, PTP kretanje),
- trajektorije između dve tačke kroz niz željenih međutačaka sa proizvoljnim putem između njih,
- trajektorije između dve tačke sa definisanim (ograničenim) putem između njih (npr. pravolinijski segment, kružni segment itd.) ili kako se još nazivaju CP trajektorije,

10

POGONSKI SISTEMI

10.1 Pneumatski pogoni

10.2 Hidraulički pogon

10.3 Elektromotori

10.4 Merni sistemi

10.5 Prenosnici

Pogonski sistemi zglobova obezbeđuju obrtna i/ili translatorna kretanja segmenata menjajući konfiguraciju robota odnosno poziciju i orijentaciju end-efektora. Pogonski sistem zgloba se u opštem slučaju sastoji od izvora energije (napajanja), pojačivača snage, motora (servomotora) i prenosnika.

U ovom poglavlju će se prvo razmatrati motori koji zavisno od energije koju koriste, mogu biti pneumatski, hidraulički i elektromotori. Pored uobičajenih zahteva u drugim oblastima primene, motori u robotici moraju ispunjavati sledeće zahteve:

- da imaju malu inerciju i visok odnos snaga/težina;
- da mogu ostvariti impulsni moment i veliko ubrzanje;
- da mogu ostvariti širok opseg brzina (npr. pri obrtnom kretanju $1-1000\text{min}^{-1}$);
- da mogu ostvariti kontinualnost kretanja pri malim brzinama.

Ovakvi zahtevi su neophodni za praćenje trajektorije i ostvarivanje dobre tačnosti pozicioniranja robota tako da motori u robotici, u najvećem broju slučajeva, funkcionišu kao servomotori. Ovo podrazumeva korišćenje mernih sistema pozicije (puta) i brzine u povratnim spregama. Zbog ove činjenice će se i merni sistemi puta i brzina razmatrati u ovom poglavlju iako su oni prema slici 1.4 razdvojeni od pogonskih sistema iz razloga što nemaju svi roboti servo pogone. U ove izuzetke spadaju pneumatski motori koji se teško regulišu kao i koračni motori koji mogu funkcionisati bez povratne sprege ali i kao servo motori.

Prenos obrtnog momenta ili sile sa pogonskog motora do ose zgloba robota, kao i kod drugih mašina, po pravilu uključuje i prenosnike o kojima će u ovom poglavlju takođe biti reči.

SENZORI

- 11.1 Zadaci, klasifikacija i osnovne karakteristike senzora
 - 11.2 Unutrašnji senzori
 - 11.3 Senzori sila i momenata
 - 11.4 RCC jedinice
 - 11.5 Spoljašnji senzori
-

Samostalnost i inteligencija robota omogućavaju visoku fleksibilnost i uspešnu primenu. Da bi robot bio inteligentan odnosno na neki način bio svestan sebe i svoje okoline mora imati mogućnost merenja svojih parametara, parametara okoline i opažanje. Različiti uređaji i sistemi kojima robot dobija informacije o sebi i okolini se nazivaju sensorima. Pored podataka sa većeg broja senzora, od posebnog značaja je i fuzija podataka sa većeg broja senzora (*Multi-Sensor Data Fusion*) ili tzv. senzorska fuzija (*sensor fusion*). Ovaj složen proces obuhvata kombinaciju informacija sa većeg broja senzora kako bi se obezbedio robustan i kompletan opis okruženja ili procesa od interesa. Fuzija podataka, koja izlazi iz okvira ove knjige, je veoma složen, hijerarhijski strukturisan proces koji ima široku i značajnu primenu u robotici. Polazeći od osnovnih zadataka senzora u robotici, klasifikacije i osnovnih karakteristika, u ovom poglavlju će se ukratko razmotriti najčešće korišćeni senzori kod industrijskih robota. Vizuelni sistem robota (robot vision system) kao najvažniji, najkompletniji i najkompleksniji sistem će se razmatrati u poglavlju 13.

11.1 Zadaci, klasifikacija i osnovne karakteristike senzora

Primenom senzora odnosno podizanjem nivoa inteligencije značajno se smanjuje skupa periferna tehnološka oprema koja stvara uređenu sredinu u kojoj još uvek većina današnjih robota radi u industriji. Senzori u robotici omogućavaju:

- merenje parametara u upravljačkim povratnim spregama,
- nalaženje objekata (prepoznavanje, pozicija i orijentacija objekta),
- korekciju grešaka u modelu robota i okoline,
- otkrivanje i rešavanje problema u pogrešnim situacijama,
- otkrivanje mogućnosti i izbegavanje kolizija,
- monitoring interakcije sa okolinom (npr. sile u toku montaže itd.),
- osmatranje promena u okolini koje mogu uticati na zadatak,
- inspekciju rezultata procesa, itd.

12

UPRAVLJANJE ROBOTIMA

- 12.1 Povratna sprega i upravljanje zatvorenim sistemom
 - 12.2 Linearni sistemi drugog reda
 - 12.3 Upravljanje kretanjem u unutrašnjim koordinatama
 - 12.4 Upravljanje kretanjem u spoljašnjim koordinatama
 - 12.5 Upravljanje silom
 - 12.6 Arhitektura upravljačkog sistema
-

Upravljanje robotima se formuliše kao određivanje ulaznih vremenskih funkcija zglobova potrebnih za izvršavanje postavljenih zadataka, zadovoljavajući pri tome uslove stabilnosti. Ulazne veličine zglobova mogu biti pogonske sile i/ili momenti ili to mogu biti ulazi aktuatora kao npr. napon ili struja u slučaju elektromotornog pogona.

Iz klasifikacije robota sa stanovišta funkcija i primene, slika 1.7, jasno je da se jedna grupa zadataka odnosi na izvršavanje zadatih kretanja end-efektora u slobodnom prostoru. Ova kretanja end-efektora se mogu odnositi npr. na zadatke manipulacije, odnosno premeštanje objekata iz jedne pozicije u drugu ili na ostvarivanje željenih trajektorija, kao npr. pri bojenju prskanjem. Druga grupa tzv. kontaktnih zadataka obuhvata izvršavanje specficiranih kretanja end-efektora uz odgovarajuću interakciju sa okolinom, kao npr. u slučaju montaže, obrade i sl. Upravljačke strategije za ove grupe zadataka su poznate kao *upravljanje kretanjem* (ili pozicijom), *upravljanje silom*, *hibridno upravljanje* (pozicijom i silom), kao i *vizuelno servo upravljanje* (o čemu će biti reči u poglavlju 13).

Upravljanje kretanjem robota može biti u unutrašnjim koordinatama ili u spoljašnjim koordinatama, odnosno operativnom prostoru. Tehnike upravljanja kretanjem robota u unutrašnjim koordinatama se odnose na tzv. decentralizovano i centralizovano upravljanje. U prvom slučaju je reč o nezavisnom upravljanju zglobovima, kao sistemima sa jednim ulazom i jednim izlazom (SISO: single input, single output). U drugom slučaju je reč o simultanom upravljanju zglobovima, uzimajući u obzir dinamičku interakciju između njih, odnosno, posmatrajući robot kao sistem sa više ulaza i više izlaza (MIMO: multi input, multi output). Centralizovano upravljanje se odnosi i na upravljanje u spoljašnjim koordinatama.

Oblasti primene, zahtevane performanse, konfiguracija manipulatora, nesavršenost modela (usled trenja, zazora, deformacija itd) su doveli do razvoja brojnih metoda i

tehnika upravljanja u prethodno navedenim strategijama. Na primer, u slučaju kretanja u slobodnom prostoru, upravljanje CP kretanjem (praćenje trajektorije u spoljašnjim koordinatama) se značajno razlikuje od upravljanja PTP kretanjem (kretanje od tačke do tačke). Konfiguracija manipulatora takođe značajno utiče na upravljanje. Npr. upravljanje robotima Dekartove konfiguracije se značajno razlikuje od upravljanja robotima antropomorfne konfiguracije. Vrste pogonskih sistema, kao i načini njihove ugradnje, imaju veliki uticaj na izbor metoda upravljanja. Ako je robot osnažen elektro motorima sa prenosnicima velikog prenosnog odnosa (što je danas najčešći slučaj), njegova dinamika se značajno linearizuje kroz smanjenje efekata spreznja, ali se povećavaju uticaji trenja, zazora i deformacija. Sa druge strane, primenom motora za direktni pogon (DD motori) se eliminišu prethodno navedeni nedostaci, koje izazivaju prenosnici, ali se ne mogu zanemariti nelinearni članovi, odnosno efekti dinamičkog spreznja između segmenata.

Upravljanje robotima je složena i kompleksna oblast koja, pored stečenih znanja u prethodnim razmatranjima, vezanih za kinematiku, dinamiku i generisanje trajektorija, podrazumeva i visok nivo znanja iz oblasti klasične i savremene teorije automatskog upravljanja (zasnovane na konceptu prostora stanja), koje su takođe kompleksne i složene.

Upravljanje robotima se obično klasifikuje na linearno i nelinearno. Linearne tehnike upravljanja mogu biti primenljive kod robota sa malim brzinama kretanja i kada matematički modeli mogu biti opisani linearnim diferencijalnim jednačinama sa konstantnim koeficijentima. U ovom slučaju je u suštini reč o aproksimativnim metodama, s obzirom da su dinamičke jednačine kretanja nelinearne i veoma spregnute diferencijalne jednačine, kao što je pokazano u poglavlju 8. Međutim, teorija linearnog upravljanja predstavlja i osnovu za kompleksnije nelinearne upravljačke sisteme. S obzirom da se i danas u mnogim praktičnim primenama robota zahtevaju relativno male brzine, to je primena linearnih tehnika upravljanja zadovoljavajuća. Detaljnije razmatranje brojnih pristupa i metoda u prethodno pomenutim strategijama upravljanja, kao i neophodnih osnova iz oblasti automatskog upravljanja za njihovo razumevanje, bi izašlo iz postavljenog okvira ove knjige. Iz ovih razloga, razmatranja ove problematike na elementarnom nivou u ovom poglavlju obuhvataju četiri dela.

Prva dva dela se odnose na upravljanje kretanjem u unutrašnjim i spoljašnjim koordinatama. U prvom delu će se prvo razmotriti osnove linearnog upravljanja na primeru linearnog sistema drugog reda sa jednim ulazom i jednim izlazom. Zatim će se, u okviru upravljanja u unutrašnjim koordinatama, prvo razmotriti decentralizovano upravljanje, odnosno nezavisno upravljanje jednim zglobom.

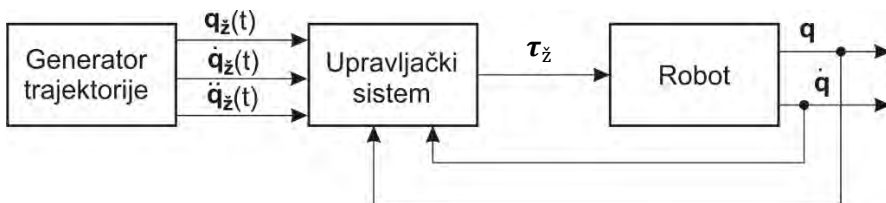
Drugi deo izlaganja se odnosi na nelinearno, odnosno centralizovano upravljanje robotom, kao sistemom sa više ulaza i više izlaza. U okviru centralizovanog upravljanja u unutrašnjim koordinatama, prvo će se ukratko razmotriti dve osnovne šeme, odnosno upravljanje sa kompenzacijom dejstva gravitacionih članova i upravljanje na bazi inverzne dinamike. Zatim će se, u okviru upravljanja kretanjem u spoljašnjim koordinatama, na nivou koncepta razmotriti tzv. intuitivne šeme na bazi inverznog i transponovog Jakobijana.

U trećem delu ovog poglavlja će se, takođe na nivou koncepta, razmotriti upravljanje silom, koje će obuhvatiti aktivnu popustljivost, impedansu, prirodna i veštačka ograničenja i hibridno upravljanje pozicijom i silom.

Na kraju, u četvrtom delu ovog poglavlja će se razmotriti osnove arhitekture upravljačkog sistema robota.

12.1 Povratna sprega i upravljanje zatvorenim sistemom

Kretanje zglobova robota u cilju praćenja željene trajektorije se realizuje upravljanjem njihovih aktuatora, odnosno obrtnim momentima, i/ili silama koje oni ostvaruju. Upravljački sistem po pravilu koristi povratne sprege sa senzora u zglobu za sračunavanje zahtevanih sila i/ili momenata. Na slici 12.1 je pokazan grubi blok dijagram sistema upravljanja robotom, koji pokazuje odnos između generatora trajektorije i robota. Kao što se vidi na slici, robot prihvata vektor momenata zglobova τ_z iz upravljačkog sistema. Merni sistemi robota omogućavaju kontroleru da očita vektore pozicija $q(t)$ i brzina $\dot{q}(t)$ zglobova



Slika 12.1 Blok dijagram upravljačkog sistema robota

dimenzija $n \times 1$. Jedna od mogućnosti realizacije upravljačkog sistema je primena neke od dinamičkih jednačina iz poglavlja 8 za izračunavanje potrebnih momenata za zadatu trajektoriju. Za date vektore q_z , \dot{q}_z i \ddot{q}_z iz generatora trajektorije se npr. primenom jednačine (8.75) vektor momenata zglobova može izračunati kao

$$\tau = \mathcal{M}(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + G(q) \quad (12.1)$$

Ako je dinamički model tačan i uz uslov da nema „šuma“ ili drugih poremećaja, kontinuiranom primenom jednačine (12.1) duž željene trajektorije, ona bi bila i realizovana. Međutim, nesavršenost dinamičkog modela i neizbežno prisustvo poremećaja čine ovaj pristup neupotrebljivim u praktičnim primenama, osim u retkim izuzecima. Ovakvo upravljanje se naziva otvorenim, jer ne koristi povratne sprege sa mernih sistema zglobova, odnosno jednačina (12.1) je samo funkcija željene trajektorije q_z i njenih izvoda, a ne i funkcija stvarne trajektorije q .

Kao što se može uočiti sa slike 12.1, praktično jedini način za realizaciju sistema upravljanja visokih performansi je korišćenje povratnih sprege sa mernih sistema zglobova. Korišćenjem povratnih sprege je moguće izračunati svaku servo grešku, nalaženjem razlika između željenih i stvarnih pozicija i brzina kao

13

VIZUELNI SISTEM ROBOTA

- 13.1 Funkcionalna struktura vizuelnog sistema robota**
 - 13.2 Konfiguracije vizuelnog sistema robota**
 - 13.3 Formiranje slike – geometrijski model nastanka slike**
 - 13.4 Modeliranje perspektivne kamere**
 - 13.5 Kalibracija kamere**
 - 13.6 Obrada slike**
 - 13.7 Izdvajanje karakteristika**
 - 13.8 Prepoznavanje objekata**
 - 13.9 Određivanje pozicije i orijentacije objekta/kamere**
 - 13.10 Vizuelno servo upravljanje**
-

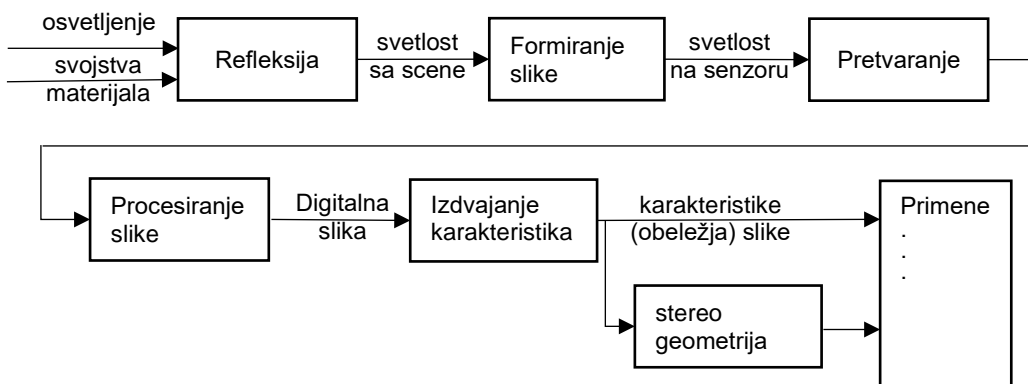
Kompjuterska ili veštačka vizija (Computer Vision, Artificial Vision) se uobičajeno neformalno definiše kao naučna disciplina koja istražuje mogućnosti davanja mašinama sposobnost vida sa ulogom slično ljudskom čulu vida. Kompjuterska vizija od samog svog početka šezdesetih godina prošlog veka predstavlja jednu od najznačajnijih tema istraživanja u oblasti veštačke inteligencije. Kompjuterski vid, kao veoma složen informaciono-procesni zadatak, se bazira na trima bliskim oblastima: procesiranju slike (Image Processing), prepoznavanju likova (Pattern Recognition) i analizi scene (Scene Analysis) odnosno razumevanju slike (Image Understanding), koje uključuju različita znanja iz oblasti kompjuterskih nauka, matematike, elektronike, optike, biologije, psihologije, kognitivnih nauka itd. Potrebe za primenom kompjuterske vizije u vrlo različitim oblastima kao što su npr. robotika i industrijska automatizacija, medicina, vojne potrebe, saobraćaj, bezbednost itd., kao i doprinosi istraživanja u ovim oblastima, su doveli do razvoja vrlo različitih pristupa, metoda, tehnika i algoritama kao i senzora i hardversko-softverskih rešenja u oblasti kompjuterske vizije.

Imajući u vidu činjenicu da se termini kompjuterska vizija (Computer Vision), mašinska vizija (Machine Vision) i robotska vizija (Robot Vision) često koriste kao sinonimi ovde se, bez detaljnog razmatranja finisa ovog problema, navodi da su mašinska i robotska vizija orijentisane na industrijske primene. Struktura, procesi, metode i tehnike u mašinskoj i robotskoj viziji su manje više slične s tim što mašinska vizija ne podrazumeva obaveznu primenu robota, ako se npr. radi samo o kontroli, inspekciji i sl.

Vizuelni sistem kao najkompleksniji ali i najkompletniji pa samim tim i najznačajniji senzorski sistem robota, kao što je pomenuto u Poglavlju 11, izuzetno podiže fleksibilnost i inteligenciju robota. Evolucija razvoja i primene vizuelnih sistema u robotici

je bila i ostala u stalnoj interakciji sa razvojem kompjuterske vizije generalno. Primena vizuelnih sistema u robotici je započela prepoznavanjem objekata/delova i/ili njihovih stabilnih stanja i određivanjem njihove pozicije i orijentacije što upravljačkom sistemu omogućava ne samo uzimanje objekata iz proizvoljne pozicije i orijentacije već i planiranje trajektorije pri njihovoj manipulaciji. Ovim se praktično eliminiše potreba za komplikovanim, skupom i u principu nefleksibilnom perifernom opremom (pribori, dodavači, punjači i sl.) koja stvara uređenu sredinu. Planiranje trajektorije na osnovu vizuelne informacije, koja može uključiti i izbegavanje prepreka, se može koristiti i kod jednostavnijih upravljačkih sistema (na kinematičkom nivou). Ovaj pristup se obično naziva „gledaj i kreći se“ (look-and-move, ili static look-and-move). S obzirom da se dobijene informacije o poziciji i orijentaciji delova u ovom pristupu praktično koriste u otvorenoj petlji to sistem čini veoma osetljivim na poremećaje (tačnost robota, naknadno neplanirano pomeranje objekata i sl). Savremeni vizuelni sistemi robota omogućavaju vizuelnu povratnu spregu upravljačkom sistemu – vizuelno servo upravljanje (vision-based control ili visual servoing). Ključna karakteristika vizuelnog servo upravljanja je da robot ne mora imati *a priori* koordinate (pozicije i orijentacije) objekata manipulacije i drugih objekata u radnom prostoru. U industrijskim uslovima vizuelno servo upravljanje može eliminisati potrebu, često dugotrajnog, obučavanja i omogućiti izvršavanje zadataka koji nisu striktno ponovljivi kao npr. u slučaju montaže bez pomoćnih pribora i sa neorijentisanim nailazećim delovima. Vizuelno servo upravljanje takođe potencijalno omogućava i relaksiranje zahteva za mehaničkom tačnošću i krutošću robota što značajno utiče na cenu robota.

Kompjuterski vizuelni sistemi u opštem slučaju, pored različitih senzorskih sistema za dobijanje digitalne slike, sadrže veći broj različitih hardversko-softverskih podsistema za ostvarivanje vizuelne percepcije u različitim oblastima primene. Imajući u vidu činjenicu da vizuelni sistemi robota rešavaju probleme u industriji, koji su po svojoj složenosti jednostavniji od drugih oblasti primene, to se za definisanje sadržaja ovih razmatranja polazi od opšte pojednostavljene strukture procesnih koraka vizuelnog sistema robota, slika 13.1, koja obuhvata:



Slika 13.1 Procesni koraci u vizuelnom sistemu robota

osvetljenje scene, refleksiju odnosno reflektovanu svetlost sa objekta prikupljenu (fokusiranu) sočivom, dobijanje digitalne slike, njeno procesiranje u cilju izdvajanja potrebnih informacija za podršku robotu u izvršavanju prethodno navedenih primena od prepoznavanja objekata do vizuelnog servo upravljanja. Razmatranja ovih procesnih koraka u vizuelnim sistemima robota su u ovim izlaganjima vezana za niz ograničenja u odnosu na iste ili slične korake u drugim oblastima primene. Kako je nastanak slike u opštem slučaju posledica registrovane radijacije^{*)} od strane senzora, osnovno ograničenje je da se u ovim razmatranjima pod slikom podrazumeva registrovanje reflektovane svetlosti sa scene (kao vidljivog dela spektra elektromagnetne radijacije) od strane kamere, slika 13.1. Iz ovog ograničenja proističu i druga, o kojima će biti reči.

Razmatranja u prvom delu ovog poglavlja obuhvataju kratak opis strukture i konfiguracija vizuelnih sistema robota, osnovne pojmove o kamerama i osvetljenju scene, koncept digitalne slike, geometrijski model nastanka slike i model kamere, osnove kalibracije kamere i stereo vizije. U okviru obrade (procesiranja) i analize slike ukratko će se razmotriti problemi segmentacije slike i izdvajanje karakteristika u cilju prepoznavanja objekata i određivanje njihove pozicije i orijentacije u slici. Deo ovog poglavlja takođe obuhvata i određivanje pozicije i orijentacije kamere u odnosu na objekte i obrnuto. Na kraju poglavlja se konceptualno razmatraju dva osnovna pristupa vizuelnog servo upravljanja.

13.1 Funkcionalna struktura vizuelnog sistema robota

Vizuelni sistem robota se sastoji od većeg broja komponenata odnosno hardversko-softverskih podsistema za izvršavanje procesnih koraka datih na slici 13.1. Šematski prikaz uopštene funkcionalne strukture vizuelnog sistema robota je prikazan na slici 13.2. Sa slike je lako uočiti da osvetljenje scene, kamera i odgovarajući hardver (A/D konverzija i matična memorija) čine podsistem za dobijanje digitalne slike. Procesiranje slike, izdvajanje karakteristika (obeležja) slike i analiza odnosno interpretacija i razumevanje slike obuhvataju različite metode i algoritme kao i specijalizovani hardver. Ovi procesni koraci, o kojima će kasnije biti reči, su uobičajeno strukturisani kao koraci nižeg nivoa (low-level), srednjeg (mid-level) i višeg (high-level) nivoa. S obzirom da su u procesnim koracima nižeg nivoa i ulaz i izlaz slike, a u procesima srednjeg nivoa ulazi su slike a izlazi izdvojene karakteristike (obeležja), to se danas, zbog integrisanog hardvera, oba nivo često nazivaju „low-level vision“, slika 13.2. U procesima višeg nivoa (high-level vision) ulaz su izdvojene karakteristike, a izlaz razumevanje ili interpretacija slike odnosno scene.

^{*)} Pored slika iz vidljivog i infracrvenog dela spektra elektro-magnetne radijacije(EM) u pojedinim oblastima primene su od interesa i slike iz drugih delova spektra EM radijacije kao što su: ultraviolette slike, mikrotalasne, radarske i slike magnetne rezonance (MRI), rendgenske i slike u kompjuterskoj tomografiji (CAT ili CT, x i y zruci). Od slika koje ne pripadaju EM talasima su još od interesa i ultrazvučne slike.

PROGRAMIRANJE INDUSTRIJSKIH ROBOTA

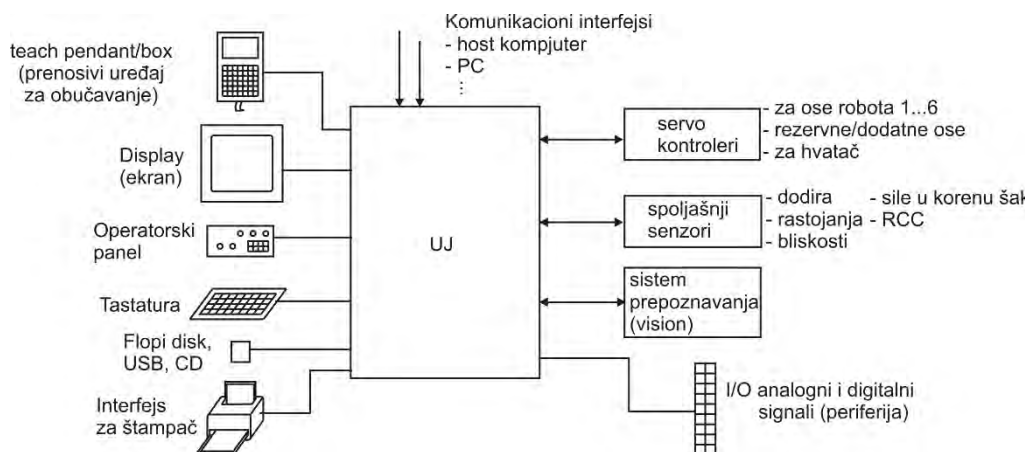
- 14.1 Metode programiranja
 - 14.2 On-line metode programiranja
 - 14.3 Off-line metode programiranja
-

Iz same definicije industrijskog robota kao višefunkcionalne programabilne mašine za izvršavanje različitih zadataka u industriji, vidi se da je programabilnost jedna od osnovnih karakteristika. Programabilnost ili mogućnost reprogramiranja, znači da se programirana kretanja i ostale funkcije mogu menjati bez fizičkih promena, odnosno intervencija. U opštem slučaju, kombinacija kretanja 6 osa u nekortezijanskim koordinatama (što je slučaj kod većine robota) čini zadatak programiranja mnogo težim nego što je to, npr. slučaj sa CNC mašinama alatkama. Ovaj zadatak se još više usložnjava uvođenjem i obradom senzorskih informacija iz okoline, informacija o interakciji sa okolinom i potrebom za sinhronizovanjem rada robota sa tehnološkim okruženjem, odnosno periferijom (konvejeri, mašine itd).

Programiranje robota je od izuzetne važnosti za uspešnu primenu robota, pogotovo u malim i srednjim preduzećima. Programiranje, u osnovi, obuhvata izradu programa, njegovu verifikaciju, unošenje u upravljačku jedinicu i kontrolu tačnosti izvršavanja zadataka robota. Programiranje robota se, i pored izvesnih sličnosti sa računarskim programiranjem, zbog prethodno navedenih funkcija, veoma razlikuje. Okruženje za programiranje robota zavisi od metoda programiranja, odnosno nivoa upravljačkog sistema, pa samim tim i složenosti zadataka koje robot izvršava.

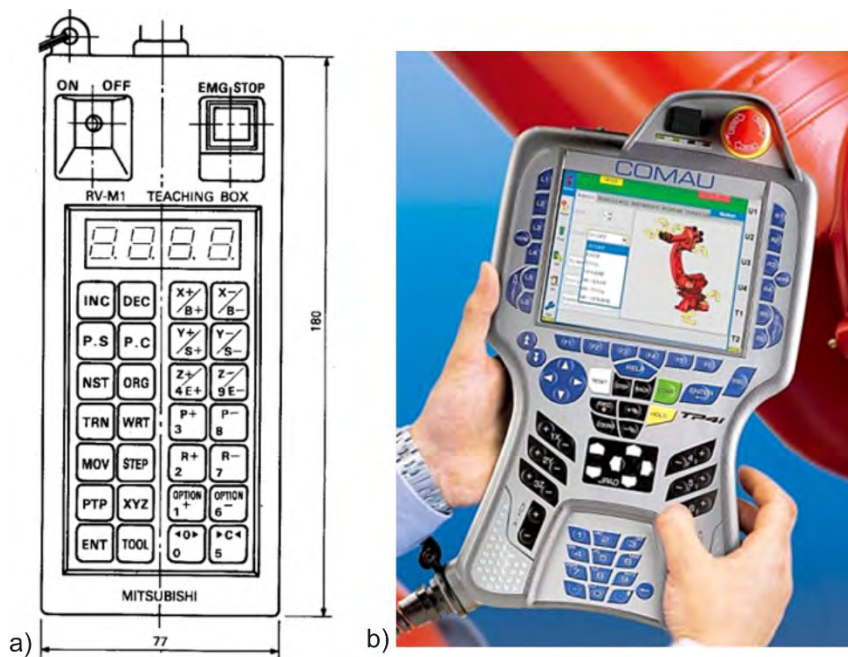
Na slici 14.1 prikazana je opšta arhitektura jedne savremene upravljačke jedinice robota (sa aspekta programiranja) koja, pored upravljanja samim robotom, mora da obezbedi i funkcije upravljanja i/ili nadgledanja ćelije sa robotom, vezu sa višim nivoima (PC, host kompjuter), vezu sa operaterom i programiranje.

S obzirom na prethodno objašnjenu hijerarhisku strukturu odnosno nivoa upravljanja, nemaju svi roboti ovako složenu upravljačku jedinicu. Međutim, operatorski panel i uređaj za obučavanje (teach pendant), kao primarni interfejsi za inicijalizaciju i programiranje robota, su njihovi praktično obavezni delovi.



Slika 14.1 Opšta arhitektura upravljačke jedinice robota

Uređaj za obučavanje (teach pendant ili box) u opštem slučaju obezbeđuje upravljanje robotom u toku inicijalizacije i obučavanja, nadgledanje operacija i podršku korisničkim programima. Tokom pedesetogodišnjeg razvoja uređaji za obučavanje su se menjali po mogućnostima, obliku i dimenzijama kao i načinu veze sa upravljačkom jedinicom robota (kablom ili bežično, slika 1.32). Na slici 14.2 prikazana su dva primera uređaja za obučavanje različitih mogućnosti.



Slika 14.2 Primeri uređaja za obučavanje

Kao što se vidi sa slike, ovi uređaji, pored obaveznog ekrana različitih mogućnosti i obaveznog prekidača za hitno zaustavljanje (E – stop) sadrže različite tastature i prekidače, signalna LED svetla itd. Pored jednostavnih ekrana, kao na slici 14.2a), ekrani mogu biti osetljivi na dodir sa slikovnim prikazima („ikonicama“) različitih funkcija kao i da podržavaju simulacionu grafiku, slika 14.2b). Pored obaveznih tastera za unos podataka, modove upravljanja kretanjem, aktivnosti end–efektora itd., postoje i programabilni funkcijski tasteri kao i različita signalna svetla, pokazivači itd.

14.1 Metode programiranja

Značaj sistema programiranja robota generalno, a posebno industrijskih robota, je doveo do razvoja brojnih pristupa i metoda programiranja. Klasifikacija metoda programiranja robota je moguća po različitim kriterijumima^{*)} kao što su interakcija između operatora i robota [7,11], nivoi apstrakcije korisničkog programa [7], nivoi automatizacije programiranja [1] itd.

Uobičajeni način klasifikacije, koji se ovde navodi, se bazira na interakciji između operatora i robota. Ako se izuzme tzv. manuelno^{**)} programiranje jednostavnih pneumatskih robota (tzv. Pick & Plase), klasifikacija bazirana na interakciji operatora i robota deli metode programiranja robota u tri osnovne grupe (slika 14.3).

Kao što se vidi sa slike, pored tradicionalnih on-line metoda programiranja robota obučavanjem, u kojima se sam robot koristi u fazi programiranja ovde se ubraja i tzv. intuitivno programiranje. U off-line metode se ubrajaju programiranje tekstualnim jezicima, vizuelnim jezicima i CAD softverskim paketima (tzv. programiranje simulacijom). Hibridne metode predstavljaju kombinaciju on-line i off-line programiranja.

U ovom poglavlju će se dalje razmotriti osnovne tzv. tradicionalne metode on-line i off-line metode programiranja i navesti osnovni pravci istraživanja u razvoju novih tehnologija primenljivih za tzv. intuitivno programiranje tradicionalnih i kolaborativnih industrijskih robota.

^{*)} Klasifikacija metoda programiranja po nivoima apstrakcije korisničkog programa je kompatibilna sa klasifikacijom na bazi interakcije između operatora i robota. Klasifikacija po nivoima automatizacije programiranja deli metode na ručne, automatske i softverske arhitekture [1].

^{**)} Kod ovih jednostavnih robota, čije se ose kreću između fiksnih tačaka, zadatak programiranja se svodi na postavljanje fiksnih graničnika ili mikro-prekidača, dok se redosled kretanja i aktivnosti end–efektora zadaju preko programabilnog automata ili table sa pinovima.

15

ZAVRŠNI UREĐAJI – END EFEKTORI

15.1 Hvatači

15.2 Uređaji, mašine i alati

15.3 Veza robota i end efektora

Univerzalne mašine kao npr. mašine alatke koriste različite standardne, univerzalne i specijalne alate, pribore i uređaje za izvršavanje odgovarajućih zadataka. Industrijski roboti su takođe opremljeni različitim završnim uređajima (*terminal devices*) ili end-efektorima (*end-effectors*) za izvršavanje različitih tehnoloških zadataka. Geometrijski posmatrano završni uređaji se vezuju za poslednji segment u kinematičkom lancu (*end-of-arm-tooling*).

End-efektori su veoma važan podsistem industrijskih robota za njihovu efikasnu primenu. Mogu biti vrlo različiti od najjednostavnijih kuka ili pasivnih vakumskih hvatača do čovekolike šake ili složenih uređaja i mašina za obavljanje procesnih operacija. Zbog interakcije sa okolinom opremljeni su različitim senzorima. Čest je slučaj da je moguća i automatska izmena end-efektora.

End-efektori se obično isporučuju od proizvođača robota koji uglavnom imaju specijalizovane grupe za analizu zahteva kupca i kompletno projektovanje radnog mesta uključujući i end-efektore i perifernu opremu. Međutim, zbog sve veće primene robota postoje i specijalizovane firme koje proizvode end-efektore i perifernu opremu kao i kompletno projektovanje radnih mesta (tzv. sistem integratori).

End-efektori se u osnovi mogu podeliti na:

- hvatače,
- uređaje i mašine (sa odgovarajućim alatima) za obavljanje procesa, i
- merne i kontrolne uređaje.

U ovom poglavlju će se polazeći od klasifikacija end-efektora razmotriti osnove mehaničkih, vakumskih i magnetnih hvatača i navesti mašine, alati i uređaji za obavljanje procesnih zadataka.

16

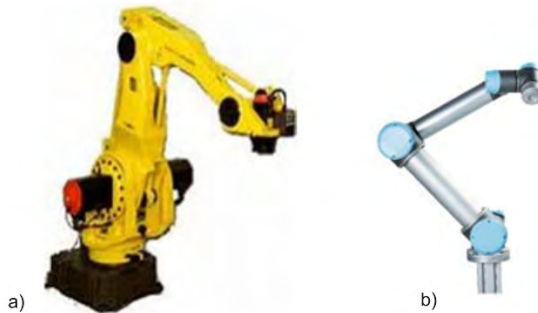
KOLABORATIVNI INDUSTRIJSKI ROBOTI

16.1 Koncepti podsistema kolaborativnih robota

16.2 Klasifikacija odnosa čovek - robot

16.3 Osnovne definicije i bezbednosni zahtevi u primeni kolaborativnih robota prema ISO standardima

Konvencionalne ili tzv. tradicionalne industrijske robote projektovane za izvršavanje različitih zadataka u industriji karakteriše robusnost, slika 16.1a), kako bi se zadovoljili zahtevi za velikim brzinama, visokom tačnošću, velikom nosivošću itd. Da bi ovakvi industrijski roboti zadovoljili prvi zakon robotike*) njihova radna mesta moraju biti ograđena sigurnosnim ogradama i opremljena senzorskim zaštitama kako bi se sprečio eventualni ulazak ljudi u njih, slika 16.2. Takođe, važna ograničenja tradicionalnih robota su što zahtevaju inženjere specijaliste od projektovanja radnih mesta i instalisanja do programiranja.



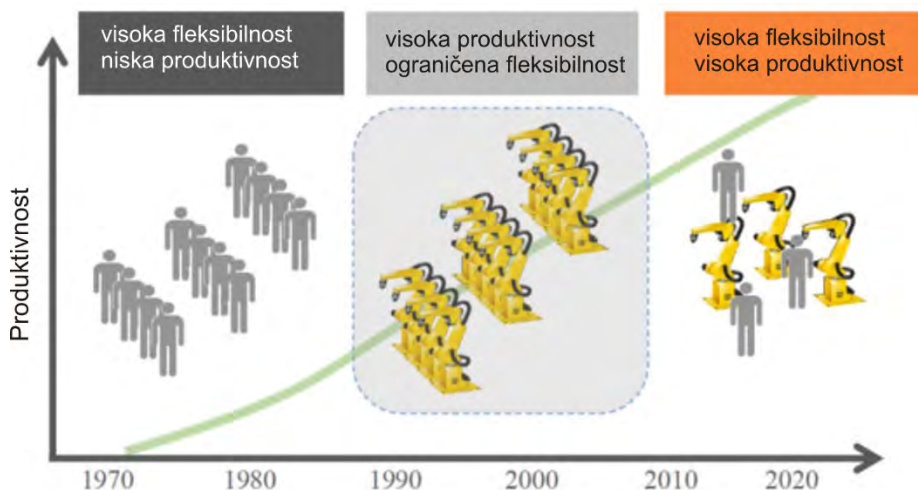
Slika 16.1 Razlika između tradicionalnih i kolaborativnih robota

*) Prvi od tri fundamentalna zakona robotike u knjizi Asimova, pomenutoj u poglavlju 1, glasi: "Robot ne sme da povredi ljudsko biće, niti svojim nečinjenjem dozvoliti da ljudsko biće bude povređeno".



Slika 16.2 Radno mesto tradicionalnog industrijskog robota

Činjenica da mala i srednja preduzeća sve više koriste robote kao i koncept Industrije 4.0, su nametnuli potrebu zajedničkog rada ljudi i robota u cilju daljeg podizanja kako produktivnosti tako i fleksibilnosti, slika 16.3.



Slika 16.3 Period nastanka koncepta zajedničkog rada čoveka i robota u cilju podizanja fleksibilnosti i produktivnosti

Za ovako zamišljeni koncept zajedničkog rada definisana je nova paradigma industrijskih robota – kolaborativni roboti ili koboti (od engl. Colaborative Robot – cobot), slika 16.1b) koji sa čovekom dele isto okruženje i resurse i na različite načine sarađuju na istom zadatku, slika 16.4.

17

PRIMENA ROBOTA

- 17.1 Čelije sa robotom
 - 17.2 Primena robota u manipulacionim zadacima
 - 17.3 Procesni zadaci
 - 17.4 Primena robota u montaži
 - 17.5 Metodologija uvođenja robota
-

Primena robota u industriji je započela još 60-tih godina prošlog veka pojavom prvog komercijalnog industrijskog robota (UNIMATE, slika 1.8). Danas je njihova primena u industriji velika od zadataka manipulacije i opsluživanja mašina do obavljanja različitih procesa uključujući i montažu. Ove primene su već bile pomenute kada je bilo reči o klasifikaciji robota po ovom osnovu. Smatra se da je danas u industriji “zaposleno“ preko 3 miliona robota svih generacija. Primena robota u industriji ima za cilj povećanje produktivnosti, podizanje i održavanje konstantnog nivoa kvaliteta proizvoda, podizanje fleksibilnosti proizvodne opreme i humanizaciju rada. Smatra se da je primena robota opravdana i uspešna ukoliko je ispunjen jedan ili više od ovih ciljeva.

Različite oblasti primene robota u industriji kao i raznolikost tehnoloških zadataka u okviru njih su nametnule niz specifičnosti kako u pogledu izbora robota (struktura, upravljanja, programiranja) i njihovih karakteristika (nosivost, brzina, tačnost itd.) tako i u pogledu end-efektora, senzora i periferne opreme. Međutim i pored ovih razlika i specifičnosti, o kojima će kasnije biti reči, primena robota podrazumeva njihovu integraciju i interakciju sa drugim mašinama i opremom oko njih. Ovo praktično znači da roboti sa drugim mašinama i opremom čine ćelije sa robotima koje se mogu organizovati na različite načine i povezati u složenije sisteme. U ovim izlaganjima će se prvo ukratko objasniti opšti principi planiranja, organizovanja i projektovanja ćelija sa robotom, analiza ciklusnog vremena i vremena otplate, a zatim specifičnosti primene po pojedinim oblastima. Na kraju će ukratko biti i opisana i metoda uvođenja robota.

17.1 Čelije sa robotom

U opštem slučaju industrijski roboti se nalaze u tehnološkom okruženju druge opreme kao što su konvejeri, mašine alatke i druge proizvodne mašine, pribori itd. Robot i oprema oko njega čine radnu ćeliju (ili samo ćeliju). Radna stanica sa robotom takođe može biti odgovarajući termin ali može da znači i radno mesto na liniji sa više robota. Ponekad i čovek može biti uključen u ćeliju za zadatke koje nije lako automatizovati (inspekcija,

OSVRT NA PROJEKTOVANJE, ISPITIVANJE I KALIBRACIJU INDUSTRIJSKIH ROBOTA

18

18.1 Projektovanje industrijskih robota

18.2 Ispitivanje robota

18.3 Kalibracija robota

Cilj ovog poglavlja je da samo informativno ukaže na značaj ovih važnih praktičnih tema kojima bi se zaokružila razmatranja serijskih industrijskih robota. Ove teme su naročito bile aktuelne krajem osme i početkom devete decenije prošlog veka kada je došlo do ekspanzije kako proizvodnje tako i primene robota. S obzirom da u to vreme ni kod proizvođača robota ni kod korisnika nije bilo dovoljno inženjera sa iskustvom u oblasti industrijske robotike, ove teme su neko vreme bile atraktivne za istraživanje. Rezultati ovih istraživanja kao i iskustva proizvođača i korisnika robota su doprineli razvoju metoda projektovanja, standarda za ispitivanje (testiranje) robota i metoda kalibracije.

18.1 Projektovanje industrijskih robota

Projektovanje industrijskih robota, pored teorijskih znanja iz ove oblasti, zahteva znanja i iskustva iz različitih inženjerskih oblasti kao što su mašinstvo u širem smislu, proizvodno mašinstvo, elektrotehnika, elektronika i kompjuterske nauke. Iako su roboti nominalno univerzalne programabilne mašine oni se iz ekonomskih i praktičnih razloga u principu projektuju za određene klase zadataka kao što su manipulacija, zavarivanje, bojenje, montaža itd. Za svaku od ovih primena su u prethodnim razmatranjima navedene zahtevane karakteristike robota.

Slično kao i u projektovanju drugih složenih sistema, u jednoj od najkompletnijih metoda projektovanja [5] navedeni su sledeći osnovni koraci u procesu projektovanja:

- analiza stanja razvoja i proizvodnje robota, proizvoda konkurencije i moguće promene na tržištu,
- studija tržišta i postavljanje zahteva analizom radnih mesta,
- specifikacija performansi,
- koncept sistema i vrednosna analiza,
- koncipiranje podsklopova sa izborom mogućih rešenja,
- izbor osnovnog rešenja i početak detaljnog projektovanja,
- nabavka komponenata i testiranje novo razvijenih komponenata,
- ispitivanje prototipova i eliminacija grešaka i slabih mesta,

19

ROBOTI I MAŠINE SA PARALELNO KINEMATIKOM

- 19.1 Osvrt na karakteristike serijskih struktura robota i mašina alatki i pojava novog koncepta
 - 19.2 Osvrt na istorijski razvoj paralelnih mehanizama i mašina baziranih na njima
 - 19.3 Generalizovana definicija paralelnih mehanizama
 - 19.4 Pasivni zglobovi
 - 19.5 Kinematički lanci za vezu baze i platforme
 - 19.6 Klasifikacija paralelnih mehanizama prema vrstama nogu i načinima pogona aktivnih zglobova
 - 19.7 Predstavljanje strukture paralelnih mehanizama
 - 19.8 Klasifikacija paralelnih mehanizama prema karakteristikama kretanja i broju stepeni slobode
 - 19.9 Upporedne karakteristike serijskih i paralelnih mehanizama
-

Mašine sa paralelnom kinematikom ili tzv. paralelne mašine koje se ovde razmatraju su industrijski roboti i mašine alatke. Paralelni roboti i paralelne mašine alatke (ili tzv. robotske mašine alatke [37]), kao što je pomenuto u poglavlju 2 su bazirane na mehanizmima sa paralelnom kinematikom. Za razliku od pojave paralelnih robota, pojava paralelnih mašina alatki se smatra za jedan od najznačajnijih prodora u ovoj oblasti od pojave numeričkog upravljanja pa se i danas ubrajaju u tzv. mašine alatke nove generacije.

Razmatranja u ovom poglavlju se odnose na definicije, klasifikacije i analizu mehanizama sa paralelnom kinematikom koji se pre svega od interesa za industrijske robote i mašine alatke. Pri ovome su za sve razmatrane mehanizme pokazane i njihove primene u komercijalnim rešenjima robota i mašina alatki.

19.1 Osvrt na karakteristike serijskih struktura robota i mašina alatki i pojava novog koncepta

Manipulatori odnosno mehanizmi današnjih robota i mašina alatki uglavnom imaju serijsku strukturu, slika 19.1.

MODELIRANJE MANIPULATORA PARALELNIH ROBOTA I MAŠINA ALATKI

20

20.1 Kinematičko modeliranje paralelnih manipulatora

20.2 Statika paralelnih manipulatora

20.3 Dinamika paralelnih manipulatora

Zbog specifičnosti paralelnih mehanizama i mašina baziranih na njima, istraživanja u ovim oblastima su i dalje veoma intenzivna i bazirana su na visokom nivou kooperacije univerziteta, istraživačkih instituta i industrije. Ova istraživanja se odnose na sintezu novih mehanizama, modeliranje i projektovanje paralelnih robota i mašina alatki. Bez obzira na suštinske razlike u zahtevanim performansama između paralelnih robota i mašina alatki metode modeliranja su im zajedničke i predstavljaju logičku celinu sa prethodno razmatranim modeliranjem serijskih robota.

S obzirom da su u prethodnim poglavljima detaljnije razmotrene osnove mehaničke strukture manipulatora generalno, prostorni odnosi i transformacije i modeliranje serijskih manipulatora u ovom poglavlju će se, na sličan način, razmotriti modeliranje kinematike, statike i dinamike paralelnih manipulatora.

20.1 Kinematičko modeliranje paralelnih manipulatora

Slično kao i kod serijskih manipulatora i kinematika paralelnih manipulatora se bavi izučavanjem problema određivanja pozicije i orijentacije platforme (odnosno end-efektora vezanog za nju) preko unutrašnjih i spoljašnjih koordinata kao i određivanjem brzina i ubrzanja platforme i osnaženih zglobova. Zbog niza specifičnosti i suprotnosti paralelnih mehanizama u odnosu na serijske, njihovo kinematičko modeliranje je još uvek izazovan istraživački zadatak. S obzirom na značaj sa aspekta projektovanja, dinamike, upravljanja i programiranja dalje se razmatra rešavanje inverznog i direktnog kinematičkog problema, Jakobijan matrice i određivanje oblika i dimenzija radnog prostora paralelnih manipulatora.

20.1.1 Unutrašnje i spoljašnje koordinate

Slično kao i kod serijskih manipulatora, pomeranja u osnaženim zglobovima se nazivaju generalisanim ili **unutrašnjim koordinatama** i obeležavaju se sa

$$q_1, q_2, \dots, q_n \leq 6$$

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека
Србије, Београд

62-52(075.8)
621.865.8(075.8)
007.52(075.8)

МИЛУТИНОВИЋ, Драган, 1952-
Industrijski roboti / Dragan S. Milutinović. - Beograd :
Univerzitet, Mašinski
fakultet, 2024 (Beograd : Planeta print). - XII, 761 str. : ilustr.
; 24 cm

Tiraž 200. - Napomene i bibliografske reference uz tekst. -
Bibliografija uz svako
poglavlje.

ISBN 978-86-6060-175-1

а) Индустијски роботи

COBISS.SR-ID 136799241
