8. UPRAVLJANJE ROBOTIMA

U glavi 3. opisali smo pogonske sisteme koji se koriste za pokretanje robota. U glavama 6. i 7. objasnili smo različite senzore koji čine takozvana čula. Prirodan nastavak ovih razmatranje je definisanje sistema koji će obezbediti da robotski uređaj, opremljen čulima i pokretačkim sistemom, ostvari željeno kretanje sa krajnjim ciljem izvršenja nekog postavljenog zadatka. To bi u najkraćem bio problem upravljanja robotom i sinteze upravljačkog sistema.

8.1. OPŠTI STAVOVI O UPRAVLJANJU ROBOTIMA

Razmotrićemo prvo pojam upravljanja u slučaju robotskog sistema, zatim nivoe upravljanja kao i neke pojmove značajne za primenu robota. Konačno, diskutovaćemo i o osnovnim tipovima upravljanja koji slede iz vrste postavljenog zadatka.

8.1.1. Pojam i nivoi upravljanja

U glavi 3. o pogonskim sistemima definisali smo upravljačke promenljive pojedinih vrsta pogona. U slučaju elektromotora jednosmerne struje u pitanju je napon na motoru, a u slučaju elektrohidrauličnog pogona, struja servorazvodnika. Sada zadatak upravljanja možemo definisati na sledeći način: *Obezbediti takvu promenu upravljačkih veličina koja će proizvesti zadato kretanje u zglobovima robota.* Dakle, zadatak se svodi na zadato pokretanje zglobova.

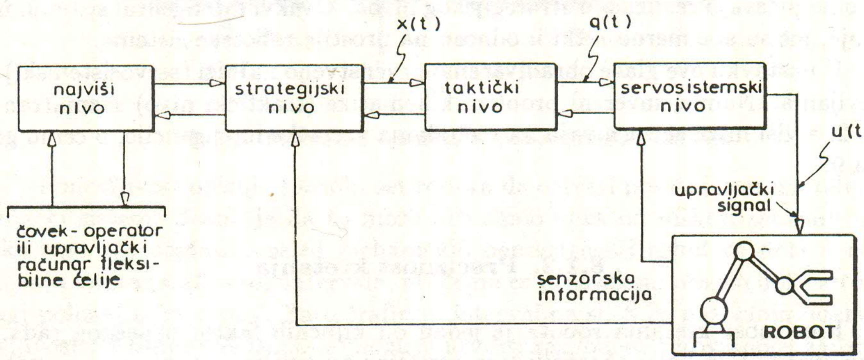
Ovakva definicija, međutim, često nas ne može zadovoljti. Radi se o tome da robot treba da vrši takozvano funkcionalno kretanje. Kako se funkcionalno kretanje, po pravilu, vezuje za završni uređaj robota, to zadatak upravljanja treba unekoliko preformulisati: *Potrebno je obezbediti takvu promenu upravljačkih promenljivih koja će proizvesti traženi funkcionalni pokret, tj. traženo kretanje završnog uređaja u prostoru.* Svakako, ovako formulisan upravljački problem uključuje i prethodnu definiciju. Naime, funkcionalni pokret treba raspodeliti na zglobove, a zatim zglobove pokrenuti.

Problem upravljanja robotom možemo postaviti još opštije. Umesto da zadatak formulišemo preko određenog kretanja, možemo napraviti kvalitativni skok i zadatak formulisati u vidu zahteva da robot izvrši neku složenu praktičnu operaciju. Na primer, zadatak može biti: zavrnuti zavrtanj u predviđeni otvor. Ovakav zadatak sadrži niz funkcionalnih pokreta. Prvi pokret hvatanja zavrtnja, drugi prinošenje zavrtnja otvoru, treći zavrtanje i četvrti povratak u polazni položaj. Zadatak bi mogao biti još složeniji ako je, na primer, potrebno sastaviti neki sklop od više delova. Tada bi i broj elementarnih funkcionanih pokreta bio znatno veći. Konačno, veoma čest problem ovog tipa je sakupljanje predmeta rasutih po podlozi.

Opisani način postavljanja zadatka predstavlja kvalitativni skok u odnosu na ranije zahteve. Zadatak više nije kinematički orijentisan (zadato kretanje) već problemski orijentisan (izvršenje određene radnje). Problem koji treba rešiti robot prvo raščlanjuje na elementarne zahvate, tj. na niz elementarnih funkcionalnih pokreta, a zatim ih izvršava. Očigledno, ovo raščlanjavanje problema i utvrđivanje redosleda elementarnih radnji zahteva određenu "inteligenciju" kao i određene informacije tj. odgovarajuća čula. Sada zadatak upravljanja može da se formuliše na sledeći način: *analizirati, a zatim izvršiti traženu radnu operaciju.*

U prethodnoj diskusiji podrazumevali smo rad u potpuno poznatim uslovima. Tu mislimo na precizno definisan radni prostor i radne operacije. Sledeće uopštenje predstavlja uvođenje veće doze neizvesnosti. Radi se, često, o pojavi prepreka u radnom prostoru. Izvršenje zadatka tada podrazumeva i stalno ispitivanje prostora oko robota i odlučivanje o tome kako u konkretnom slučaju postupiti da bi se izvršio zadatak. Formulacija zadatka upravljanja, ipak, ostaje ista kao malopre.

Na kraju, možemo zamisliti i naredno uopštenje: ne mora biti zadata čak ni radna operacija koju treba izvršiti. Postavimo, na primer, ovakav zadatak: Ispitati dati uređaj (ili sklop), naći kvar i otkloniti ga. U ovom slučaju robot će tek nakon analize zaključiti koje radne operacije treba izvršiti (npr. zameniti neki deo). Ovo uopštenje bi predstavljalo novi kvalitativni skok jer zadatak postaje orijentisan ka cilju i problem upravljanja formulišemo na odgovarajući način: *izvršiti operacije potrebne da bi se postigao traženi cilj.*



Sl. 8.1. Nivoi upravljačkog sistema

Sledeći opisanu logiku uopštavanja zadatka koji se robotu postavlja dolazimo do upravljanja u više nivoa (sl.8.1.) pri čemu svaki viši nivo priprema zadatak i upravlja radom nižeg nivoa. Takođe, svaki nivo će, u zavisnosti od potrebe, raspolagati određenim senzorskim informacijama.

Servosistemski nivo predstavlja najniži nivo upravljanja i on neposredno izvršava kretanje. Zato se, često, i naziva izvršni nivo. Zadatak mora biti u obliku zahteva za određenim kretanjem zglobova: q(t), gde je q vektor unurašnjih koordinata. Servosistemi u svakom zglobu obezbeđuju izvršavanje traženog kretnja.

Ovaj upravljački nivo prima zadatak od višeg nivoa ili pak, neposredno od čoveka–operatora ako viši nivo ne postoji.

Od mogućih senzorskih informacija servosistemski nivo koristi podatke o položaju i brzini pomeranja zglobova.

Taktički nivo je prvi viši nivo upravljanja i on vrši raspodelu kretanja na podsisteme zglobova. Zadatak se prima od višeg nivoa ili čoveka–operatora neposredno i to u obliklu zahteva za izvršenje određenog funkcionalnog pokreta X(t), gde je X vektor spoljašnjih koordinata. Na ovom nivou rešava se inverzni zadatak kinematike čime se nalaze kretanje zglobova q(t). Taktički nivo u principu ne zahteva dopunske senzorske informaije.

Strategijski nivo. Na ovom upravljačkom nivou, problemski orijentisan zadatak (formulisan u obliku zahteva za izvršenja određene radne operacije) raščlanjuje se na elementarne funkcionalne pokrete X(t). Pri tome je neophodno izvršiti i planiranje kretanja koje nekada uključuje i različite vrste optimizacije koja omogućava da se raščlanjavanje izvrši na jednoznačan način. Na primer: treba po nekom kriterijumu optimizirati redosled sakupljanja rasutih predmeta. Strategijski nivo često uključuje vizuelne sisteme, daljinare i sl. Problem obilaženja prepreka u radnom prostoru može se rešavati na strategijskom nivou ili ga prepustiti sledećem višem nivou.

Najviši nivo upravljanja prima zadatak orijentisan ka cilju, analizira ga, i formuliše radne operacije potrebne za njegovo postizanje.

Na kraju ove diskusije treba naglasiti da se većina današnjih robota zadržava na taktičkom nivou, mada se intenzivno razvijaju metode veštačke inteligencije koje omogućavaju realizaciju strategijskog nivoa. Ovakvi inteligentni sistemi, mada postoje, još su srazmerno retki u odnosu na prostije robotske sisteme.

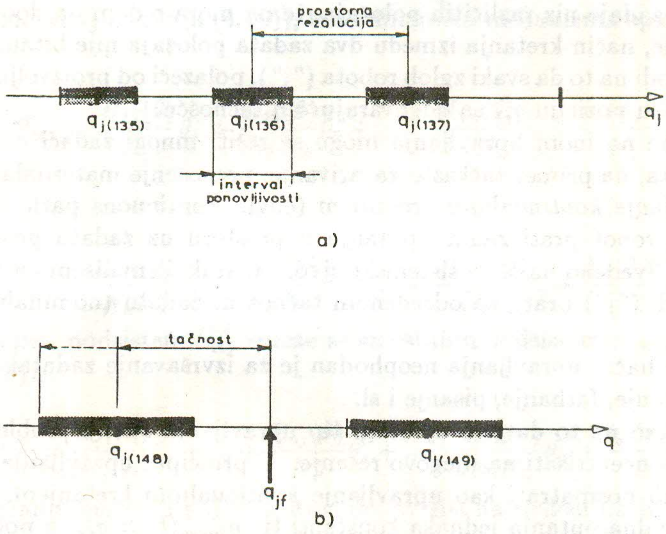
U nastavku ove glave obrađivaćemo prvenstveno najniži (servosistemski) nivo upravljanja. Naime, inverzni problem kinematike (traktički nivo) razmatran je u glavi 2, a viši nivoi se zasnivaju na metodama veštačke inteligencije, o čemu govori glava 9.

8.1.2. Preciznost kretanja

Preciznost kretanja robota je jedan od ključnih faktor uspešnog rada. Da bismo ovaj pojam bolje objasnili razmotrićemo tri veličine kojima se on u robotici opisuje: prostornu rezoluciju, tačnost pozicioniranja i ponovljivost. Sve ove veličine definisaćemo u odnosu na zadatak postizanja zadatog položaja robota u prostoru.

Prostorna rezolucija je najmanji pomeraj koji robot može izvršiti po nalogu upravljačkog sistema. To nam ukazuje da robot nema mogućnost kontinualnog pozicioniranja, već postoji skup diskretnih položaja u radnom prostoru u koje robot možemo dovesti. Ova diskretizacija posledica je digitalizacije podataka o položaju u memoriji upravljačkog sistema. Na primer, ako se jedna unutrašnja koordinata pamti u obliku 8-bitne informacije, to znači da će ta koordinata imati $2^8=256$ diskretnih položaja. Na slici 8.2a predstavljen je jedan deo diskretizovane koordinate q_j.

Dopunski problem javlja se usled mehaničkih efekata koji doprinose smanjenju mogunosti tačnog pozicioniranja. Jedan od takvih efekata je zazor u prenosnom sistemu, drugi je elastična deformacija elemenata prenosnog sistema, a postoji još niz faktora koji pojačavaju ove efekte. Tako dolazimo do situacije da posmatrani zglob q_j ne možemo pozicionirati tačno u neku od diskretnih tačaka već će se koordinata naći negde u šrafiranoj okolini diskretizacionih tačaka (sl. 8.2a). Granice štafiranog intervala određuju se po metodi najgoreg slučaja uzimajući u obzir zbirni uticaj pomenutih mehaničkih faktora.



Sl. 8.2. Prostorna rezolucija, ponovljivost i tačnost

Ponovljivost opisuje sposobnost robota da ostvari položaj koji mu odredi upravljački sistem. Jasno je da to može biti samo neka od diskretizacionih tačaka. Kako smo već naglasili, usled mehaničkih nepreciznosti robot će doći u neki od položaja unutar šrafiranog intervala, pri čemu će pri svakom novom dolasku zauzeti drugi položaj iz intervala. Zato šrafirani interval na sl. 8.2a nazivamo interval ponovljivosti. Eksperimentalno je moguće utvditi raspodelu verovatnoće zauzimanja pojedinih tačaka u intervalu ponovljivosti.

Tačnost pozicioniranja. Do sada smo razmatrali mogućnost robota da zauzme različite položaje u prostoru uzimajući u obzir diskretizaciju radnog prostora. Medjutim, u konkretnom zadatku, od robota se zahteva da dođe u položaj koji se u opštem slučaju ne poklapa sa nekim od diskretizacionih položaja. Primer za koordinatu q_j prikazan je na slici 8.2b. Traženi položaj q_{jf} nalazi se između dve diskvetizacione tačke koje upravljački sistem može definisati. Tačnost pozicioniranja pretstavlja odstupanje koordinate od q_{jf}. Očigledno da je gornja granica ovog odstupanja jednaka polovini prostorne rezolucije uvećane za poluinterval mehaničke nepreciznosti.

8.1.3. Tipovi upravljanja

Posmatrajući izvršni (servosistemski) nivo upravljanja možemo uočiti dva osnovna tipa upravljanja koji su tesno vezani i za tipove postavljenih zadataka. U pitanju su:

- upravljanje od tačke do tačke, i
- upravljanje kontinualnim kretanjem.

Upravljanje od tačke do tačke (engl. point–to–point control) podrazumeva da se robotu zadaje niz različitih položaja, te on mora redom da dođe u svaki od njih. Pri tome, način kretanja između dva zadata položaja nije bitan. Uprošćeno, zadatak se svodi na to da svaki zglob robota ("j"), polazeći od proizvoljnog položaja, postigne zadatu poziciju q_{jf} sa odgovarajućom tačnošću.

Ovakvim načinom upravljanja mogu se rešiti mnogi zadaci u industrijskoj primeni robota, na primer tačkasto zavarivanje, prenošenje materijala i sl.

Upravljanje kontinualnim kretanjem (engl. continuons path control) podrazumeva da robot prati zadatu putanju u prostoru uz zadatu promenu brzine duž putanje. Svedeno na servosistemski nivo, zadatak formulišemo u vidu zahteva da svaki zglob ("j") prati, sa određenom tačnošću, zadatu (nominalnu) promenu $q_{jnom}(t)$.

Ovakav način upravljanja neophodan je za izvršavanje zadataka kao što su: šavno zavarivanje, farbanje, pisanje i sl.

S obzirom na to da je ovaj drugi tip upravljanja opštiji problem, mi ćemo se pretežno koncentrisati na njegovo rešenje. U principu, upravljanje od tačke do tačke možemo posmatrati kao upravljanje kontinualnim kretanjem, pri čemu je zadata nominalna putanja jednaka konstanti tj. $q_{jnom}(t) = q_{jf}$, a početni položaj posmatramo kao početno odstupanje od zadate putanje.

8.2. UPRAVLJANJE RASPREGNUTIM SISTEMOM

Kada govorimo o upravljanju robotom kao raspregnutim sistemom, mislimo na to da se svakim zglobom robota upravlja kao izolovanim dinamičkim sistemom, dakle zanemarujući dinamički uticaj kretanja jednog zgloba na kretanje drugog. Razlog za ovo leži u složenosti proračuna dinamičkog sprezanja i težnji ka jednostavnosti upravljanja. Razmotrićemo mogućnosti ovakvog rasprezanja sistema.

U glavi 4. izveli smo dinamički model kompletnog robotskog sistema. Model smo doveli do kompaktne forme izražene jednačinom (4.23). Ovde ćemo se podsetiti da se kompletan model formira polazeći od modela dinamike motora i modela dinamike mehanizma. Dinamika motora zgloba "j" opisuje se jednačinom (4.15) tj.

$$S_{Aj}: \quad \dot{x}_j = C_j x_j + f_j P_{Mj} + d_j u_j \tag{8.1}$$

gde je x_j vektor stanja podsistema motora "j" i dimenzija mu je k_j. U daljem razmatranju usvojićemo k_j=2, tj. ograničiti se na model drugog reda čiji vektor stanja sadrži položaj (θ_j) i brzinu $(\dot{\theta}_j)$ motora:

$$x_j = [\theta_j \dot{\theta}_j]^T \tag{8.2}$$

P_{Mj} je izlazni moment motora (skalarna veličina), odnosno moment spoljašnjeg opterećenja, a u_j je skalarni upravljački ulaz. Matrice sistema (C_j, f_j, d_j) opisane su u glavama 3. i 4.

Podsistemi S_{Aj}, j=1,...,n međusobno su spregnuti posredstvom dinamičkog modela mehanizma koji možemo napisati u formi (4.8). Ako pogone i kretanja zglobova povežemo sa pogonima i kretanjima odgovarajućih motora posredstvom reduktora odnosa N_j (relacija (4.16)), tada dinamiku mehanizma opisujemo modelom:

$$\begin{aligned} P_{M1} &= \frac{H_{11}(\theta)}{N_1^2}\ddot{\theta}_1 + \frac{H_{12}(\theta)}{N_1 N_2}\ddot{\theta}_2 + \ldots + \frac{H_{1n}(\theta)}{N_1 N_n}\ddot{\theta}_n + \frac{h_1(\theta,\dot{\theta})}{N_1} \\ &\ \vdots \\ P_{Mn} &= \frac{H_{n1}(\theta)}{N_n N_1}\ddot{\theta}_1 + \frac{H_{n2}(\theta)}{N_n N_2}\ddot{\theta}_2 + \ldots + \frac{H_{nn}(\theta)}{N_n^2}\ddot{\theta}_n + \frac{h_n(\theta,\dot{\theta})}{N_n} \end{aligned} \tag{8.3}$$

Konkretno, podsistem S_{Aj} spreže se sa ostalim podsistemima kroz momenat opterećenja P_{Mj}:

$$P_{Mj} = \frac{H_{j1}(\theta)}{N_j N_1}\ddot{\theta}_1 + \ldots + \frac{H_{jj}(\theta)}{N_j^2}\ddot{\theta}_j + \ldots + \frac{H_{jn}(\theta)}{N_j N_n}\ddot{\theta}_n + \frac{h_j(\theta,\dot{\theta})}{N_j} \tag{8.4}$$

Rasprezanje možemo najjednostavnije izvršiti na sledeći način. Koeficijente H_{ji}, j≠i zanemarićemo tj. proglasiti ih nulama. Koeficijent $H_{jj}(\theta)$ koji predstavlja funkciju svih koordinata θ_i, i=1,...,n smatraćemo konstantom i usvojiti vrednost $\bar{H}_{jj}$ koju dobijamo nekom vrstom usrednjavanja ili maksimizacijom. Konačno, sabirak $h_j(\theta,\dot{\theta})$ takođe ćemo smatrati konstantom čija je vrednost $\bar{h}_j$. Sada momenat opterećenja postaje

$$P_{Mj} = \frac{\bar{H}_{jj}}{N_j^2}\ddot{\theta}_j + \frac{\bar{h}}{N_j} \tag{8.5}$$

Na ovaj način podsistem S_{Aj} izolujemo od ostalih podsistema. Ukoliko $\bar{H}_{jj}/N_j^2$ dodamo inerciji rotora, tada model (8.1) postaje

$$S_{Aj}: \quad \dot{x}_j = C_j' x_j + f_j \frac{\bar{h}}{N_j} + d_j u_j \tag{8.6}$$

pri čemu C_j' označava izmenjenu matricu C_j usled uvećanja momenta inercije.

Postavimo sada zahtev da koordinata θ_j ostvari kretanje koje ćemo zvati nominalnim tj. $\theta_{jnom}(t)$. Takvom kretanju odgovaraće promena brzine $\dot{\theta}_{jnom}(t)$. Kako raspolažemo senzorima koji mere položaj θ_j i brzinu $\dot{\theta}_j$, to praćenje nominalnog kretanja realizujemo uvođenjem povratne sprege po koordinati θ_j i brzini $\dot{\theta}_j$. Upravljački ulaz motora (u_j) sastojaće se iz nominalne komponente $u_{jnom}(t)$ izračunate iz modela (8.6) za zadato nominalno kretanje i komponente povratne sprege Δu_j. Komponenta u_{jnom} se često i izostavlja. Usvojimo da je Δu_j linearna funkcija odstupanja. Tada je:

$$\Delta u_j = -K_{jP}\Delta\theta_j - K_{jD}\Delta\dot{\theta}_j \tag{8.7}$$

gde su:

$$\Delta\theta_j = \theta_j - \theta_{jnom} \tag{8.8}$$

$$\Delta\dot{\theta}_j = \dot{\theta}_j - \dot{\theta}_{jnom} \tag{8.9}$$

odstupanja položaja i brzine od nominalnih vrednosti, a K_{jP} i K_{jD} su pojačanja povratne sprege. Prvi sabirak u (8.7) nazivamo, obično, pozicionom povratnom spregom, a drugi brzinskom ili diferencijalnom spregom. Ukupno, ovaj način upravljanja nazivamo P-D regulatorom.

U modelu (8.6) uočavamo i sabirak $f_j\bar{h}_j/N_j$ koji predstavlja konstantni deo spoljašnjeg opterećenja. U takvom slučaju korisno je uvesti i integralnu povratnu spregu oblika $K_{jI}\int\Delta\theta_j dt$, zato što ova sprega ostvaruje upravljački signal čak i kada greška $\Delta\theta_j$ padne na nulu. Tako dolazimo do P-D-I regulatora

$$\Delta u_j = -K_{jP}\Delta\theta_j - K_{jD}\Delta\dot{\theta}_j - K_{jI}\int\Delta\theta_j dt \tag{8.10}$$

Način određivanja pojačanja povratne sprege (K_{jP}, K_{jD}, K_{jI}) koja će obezbediti zadovoljavajuće praćenje nominalnog kretanja predstavlja zaseban problem. Moguće je koristiti bilo koju od standardnih metoda poznatih iz teorije automatskog upravljanja, ali to već izlazi iz domena ove knjige.

8.3. DVOETAPNA SINTEZA UPRAVLJANJA

Glavni nedostatak pristupa upravljanju opisanog u prethodnom odeljku je potpuno rasprezanje sistema. Upravljanje sintetizovano na takvom raspregnutom modelu može biti u nekim slučajevima sasvim neprimereno realnom sistemu. Naime, nekada je sprezanje podsistema znatno i ne sme se na opisani način zanemariti.

U ovom odeljku pokazaćemo pristup koji u znatno većoj meri vodi računa o sprezanju.

Razdvojimo sintezu upravljanja na dve etape: etapu nominalnog kretanja i etapu poremećenog kretanja.

Smatraćemo da je zadatak dat u vidu traženog nominalnog kretanja robota koje je izraženo promenom unutrašnjih koordinata zglobova: $q_{jnom}(t), \dot{q}_{jnom}(t)$, j=1,...,n. Kako su pomeranja motora direktno srazmerna pomeranjima zglobova, to pod nominalnim kretanjem podrazumevamo i $\theta_{jnom}(t), \dot{\theta}_{jnom}(t)$, j=1,...,n. Ukoliko poznajemo dinamički model celog sistema (jednačine (8.1), (8.3) ili kompaktni model (4.23), biće: ...(4.23)), ... tada možemo izračunati upravljanja $u_{1nom}(t), ..., u_{nnom}$ (t) koja nazivamo nominalnim i koja će voditi sistem željenom putanjom. Ovaj proračun naziva se etapom nominalnog kretanja ili etapom nominalne dinamike.

Ukoliko robot izvršava neki zadatak u kome je kretanje $\theta_{jnom}(t)$, j=1,...,n poznato pre početka izvršavanja, tada je moguće unapred rešiti nominalnu dinamiku i izračunato nominalno upravljanje $u_{jnom}(t)$, j=1,..., n memorisati na nekoj od periferijskih jedinica kako bi se moglo čitati i koristiti prilikom izvršenja kretanja. Ovo je, uglavnom, slučaj kod rutinskih industrijskih primena robota kada se stalno ponavlja unapred dato kretanje. U nekom složenijem slučaju $q_{jnom}(t)$ pa otuda i $\theta_{jnom}(t)$ dobija se od taktičkog nivoa ali u realnom vremenu, dakle u toku izvršenja. Tada i u_{jnom} moramo računati u realnom vremenu, što podrazumeva da raspolažemo algoritmima za rešavanje dinamike u realnom vremenu.

Ako bismo na stvarni sistem primenili samo nominalno upravljanje, tada bismo dobili sistem sa otvorenom spregom koji ne bi mogao pratiti željeno kretanje. To je otuda što takav sistem nema osobinu samokorekcije. U tom slučaju, nakon bilo kakvog poremećaja koji ga izvede sa željene putanje, sistem će "odlutati". Dopunski razlog je što je i nominalno upravljanje samo približno onome što je realnom sistemu potrebno. To je otuda što dinamički model nikada ne može uzeti u obzir sve karakteristike realnog sistema.

Kretanje realnog sistema nazivamo etapom poremećenog kretanja i u toj etapi uvodimo povratne sprege i određujemo odgovarajuće komponente upravljanja: Δu_j, j=1,...,n. Ukupno, upravljanje će biti oblika:

$$u_j = u_{jnom} + \Delta u_j, \quad j = 1, ..., n, \tag{8.11}$$

ili vektorski:

$$u = u_{nom} + \Delta u \tag{8.12}$$

gde se pojavljuju vektori upravljanja (kolona matrice dimenzije n, npr $u = [u_1 ... u_n]^T$).

Komponenta upravljanja usled povratne sprege (Δu), u principu, je funkcija odstupanja $\Delta\theta$ i $\Delta\dot{\theta}$, gde je θ vektor koordinata položaja motora ($\theta = [\theta_1 ... \theta_n]^T$). Δu može biti još i funkcija vremena.

Sada ćemo podsetiti da je nominalno upravljanje sračunato na osnovu kompletnog modela dinamike, pa uzima u obzir sprezanje podsistema. Pri sintezi povratne sprege, na etapi poremećenog kretanja, možemo sistem raspregnuti, ili se, pak, i dalje držati spregnutog modela. Prvi pristup nazivaćemo decentralizovano upravljanje, a drugi pristup pokazaćemo na primeru sinteze linearnog optimalnog regulatora.

8.3.1. Decentralizovano upravljanje

Ovaj pristup unekoliko sledi logiku rasprezanja izloženu u odeljku 8.2., međutim, ovde se radi o upravljanju koje na nivou nominala vodi računa o sprezanju, a kretanje oko nominala posmatra se raspregnuto.

Posmatraćemo model kompletne dinamike kao skup podsistema motora (8.1) koji su spregnuti posredstvom modela mehanizma (8.3). Kako nominalnu dinamiku smatramo rešenom, to nominalno kretanje i nominalno upravljanje smatramo poznatim: $\theta_{jnom}(t)$, $\dot{\theta}_{jnom}(t)$, $u_{jnom}(t)$. U tom slučaju modele (8.1) i (8.3) možemo napisati u formi odstupanja od nominala. Tako za podsistem "j" dobijamo:

$$\Delta\dot{x}_j = C_j\Delta x_j + f_j\Delta P_{Mj} + d_j\Delta u_j \tag{8.13}$$

gde je

$$\Delta x_j = x_j - x_{jnom}(t), \quad \Delta P_{Mj} = P_{Mj} - P_{Mjnom'}, \quad \Delta u_j = u_j - u_{jnom'}$$

a u slučaju modela drugog reda još i $\Delta x_j = [\Delta\theta_j \Delta\dot{\theta}_j]^T$.

Sprezanje ovog podsistema sa drugim podsistemima, na nivou poremećaja, vrši se posredstvom momenta ΔP_{Mj}. Kada model (8.3), odnosno (8.4) napišemo u formi odstupanja, dobija se:

$$\Delta P_{Mj} = \sum_{k=1}^{n} \frac{H^*_{jk}(t,\Delta\theta)}{N_j N_k}\Delta\ddot{\theta}_k + \frac{h^*_j(t,\Delta\theta,\Delta\dot{\theta})}{N_j}, \tag{8.14}$$

gde je:

$$H^*_{jk}(t,\Delta\theta) = H_{jk}(\theta)$$

$$h^*_j(t,\Delta\theta,\Delta\dot{\theta}) = (H_{jk}(\theta) - H_{jk}(\theta_{nom}(t)))\ddot{\theta}_{nom}(t) + h_j(\theta,\dot{\theta}) - \\ -h_j(\theta_{nom}(t), \dot{\theta}_{nom}(t)). \tag{8.15}$$

a θ označava vektor svih koordinata θ_j.

Uočimo da kod pisanja u formi odstupanja svaka funkcija položaja θ (npr. $F(\theta)$) postaje funkcija vremena t i odstupanja $\Delta\theta$ (npr. $F(t,\Delta\theta)$) zbog toga što položaj posmatramo u obliku $\theta = \theta_{nom}(t) + \Delta\theta$.

Jednačine (8.13) i (8.14), $j = 1,...,n$ određuju poremećajni model spregnutog sistema. Ukoliko želimo decentralizovano upravljanje, ovaj model je potrebno raspregnuti.

Prvo ćemo uočiti da se sprezanje podsistema "j" (model (8.13)) sa ostalim podsistemima izražava kroz momenat ΔP_{Mj} (8.14). U cilju rasrezanja, koeficijente H^*_{jk}, $j \neq k$ zanemarujemo. Zadržavmo samo H^*_{jj} i smatramo ga konstantom čija se vrednost određuje usrednjavanjem ili maksimizacijom. Označimo tu vrednost sa $\bar{H}_{jj}$.

Sabirak h_j^* možemo zanemariti ili smatrati linearnom funkcijom odstupanja $\Delta\theta_j$, što se može proceniti prethodnom simulacijom. Ukoliko uvedemo $\bar{H}_{jj}$ i zanemarimo h_j^*, iz (8.14) dobijamo:

$$\Delta P_{Mj} = \frac{\bar{H}_{jj}}{N_j^2}\Delta\ddot{\theta}_j \tag{8.16}$$

čime smo raspregnuli sistem.

Podsistem (8.13) sada postaje:

$$\Delta\dot{x}_j = C_j' x_j + d_j \Delta u_j, \tag{8.17}$$

pri čemu C_j' označava izmenjenu matricu C_j usled toga što je moment inercije rotora uvećan za $\bar{H}_{jj}/N_j^2$.

Sinteza upravljanja Δu_j za sistem (8.17) sada se može izvršiti korišćenjem bilo koje od standardnih metoda (npr. metode postavljanja poslova). Određuju se pojačanja K_{jP} i K_{jD} i formira povratna sprega:

$$\Delta u_j = -K_{jP}\Delta\theta_j - K_{jD}\Delta\dot{\theta}_j \tag{8.18}$$

Ukupno upravljanje za podsistem "j" je:

$$u_j = u_{jnom} + \Delta u_j \tag{8.19}$$

Očigledno je da se opisani način upravljanja razlikuje od pristupa izloženog u odeljku (8.2) prvenstveno po tome što je sada nominalno upravljanje izračunato iz spregnutog modela, dok je u prethodnom odeljku nominal računat iz raspregnutog modela, ili čak nije ni uziman u obzir.

Bez obzira na to što opisani postupak uzima u obzir sprezanje na nivou nominala, sintetizovano upravljanje u_j ipak ne garantuje stabilnost realnog sistema u svim slučajevima. Kako je poremećeno kretanje posmatrano kao raspregnuto, to u slučajevima jakog sprezanja upravljanje može biti neodgovarajuće i čak dovesti do nestabilnosti. Možemo reći da su ovakvi slučajevi jakog sprezanja prilično retki, no ipak, nakon sinteze upravljanja, neophodno je proveriti stabilnost analizom nelinearnog poremećenog modela (8.13), (8.14), $j = 1, ..., n$.

Upravljanje Δu_j sintetizovano na osnovu raspregnutog modela nazivamo lokalnom povratnom spregom. Ukoliko se na ovaj način stabilnost ne može postići, neophodno je uvesti dopunsku komponentu Δu_{jG} koju nazivamo globalnom povratnom spregom i koja vodi računa o uticaju sprezanja.

8.3.2. Linearni optimalni regulator

Ovaj pristup suštinski se razlikuje od prethodnog po tome što se i u etapi poremećenog kretanja posmatra spregnuti sistem.

Pošto sistem nećemo raspregzati, to ćemo se pri izvođenju regulatora koristiti modelom kompletne dinamike napisanim u kompaktnoj formi (4.23) tj.

$$\dot{x} = \hat{c}(x) + \hat{D}(x)u, \tag{8.20}$$

gde je x vektor stanja celog sistema (dimenzija N), a u vektor upravljanja (dimenzija n).

Ako kretanje razdvojimo na nominal $x_{nom}(t)$ i odstupanje Δx, tada model možemo napisati u formi:

$$\Delta\dot{x} = C^*(t, \Delta x) + D^*(t, \Delta x)\Delta u, \tag{8.21}$$

gde je:

$$\Delta\dot{x} = x - x_{nom}(t), \quad \Delta u = u - u_{nom}(t);$$

$$C^*(t, \Delta x) = \hat{C}(x) - \hat{C}(x_{nom}(t)) + (\hat{D}(x) - D(x_{nom}(t)))u_{nom}(t);$$

$$D^*(t, \Delta x) = \hat{D}(x) \tag{8.22}$$

Početno odstupanje $\Delta x(0)$ smatra se poznatim.

Izvođenje linearnog optimalnog regualatora zahteva niz složenih koraka (npr. linearizacija, rešavanje Rikatijeve jednačine, i sl.). Kako to prevazilazi obim ove knjige, to ćemo se na nekim mestima ograničiti samo na postavku problema i interpretaciju rezultata.

U cilju sinteze regulatora potrebno je linearizovati poremećajni model (8.21). Linearizacija se vrši oko nominalnog kretanja $x_{nom}(t)$ tj. oko nule poremaćaja Δx. Linearizacija se može izvršiti na različite načine: numeričkim metodama, simboličkim metodama ili, pak, metodama identifikacije. U postupke linearizacije ovde se nećemo upuštati. Naglasićemo, međutim, da se u svakom slučaju linearizovani model dobija u obliku:

$$\Delta\dot{x} = \bar{C}(t)\Delta x + \bar{D}(t)\Delta u, \tag{8.23}$$

gde se matrice $\bar{C}(t)$ i $\bar{D}(t)$ dobijaju linearizacijom i funkcije su vremena. Dakle, dobijeni linearni model je nestacionaran. Ako bismo sintetizovali optimalni regulator za takav sistem, došli bismo do vremenski promenljivih pojačanja povratne sprege. Kako je to u principu nepoželjno, izvršićemo uprošćenje modela (8.23) tako što ćemo ga usrednjiti tokom vremena, odnosno naći srednje vrednosti matrica $\bar{C}(t)$ i $\bar{D}(t)$. Ako su srednje vrednosti $\bar{\bar{C}}$ i $\bar{\bar{D}}$, tada (8.23) postaje stacionarni model:

$$\Delta\dot{x} = \bar{\bar{C}}\Delta x + \bar{\bar{D}}\Delta u. \tag{8.24}$$

Pretpostavimo sada da se sve koordinate stanja mere što omogućava da se povratna sprega uvede po svim odstupanjima Δx. Tada sintezu regulatora vršimo na osnovu minimizacije kvadratnog kriterijuma.

$$J(\Delta u) = \int_0^\infty e^{2\gamma t}(\Delta x^T Q \Delta x + \Delta u^T R \Delta u)dt, \tag{8.25}$$

gde su Q i R pozitivno definitne težinske matrice odgovarajućih dimenzija ($Q(N \times N)$; $R(n \times n)$), koje se, kao i stepen stabilnosti γ, biraju tako da se obezbedi praktična stabilnost sistema.

Usvojeni postupak vodiće rešavnju Rikatijeve jednačine. Ukoliko upravljanje pretpostavimo u obliku:

$$\Delta u = -R^{-1}\bar{\bar{D}}^T K \Delta x, \tag{8.26}$$

tada je K matrica dimenzija $N \times N$ i predstavlja rešenje Rikatijeve jednačine:

$$K(\bar{\bar{C}} + \alpha I) + (\bar{\bar{C}}^T + \alpha I)K - K\bar{\bar{D}}R^{-1}\bar{\bar{D}}^T K + Q = 0, \tag{8.27}$$

gde je I jedinična matrica odgovarajućih dimenzija.

Ukupno upravljanje sada je:

$$u = u_{nom} + \Delta u. \tag{8.28}$$

Prilikom sinteze linearnog optimalnog regulatora uveli smo niz uprošćenja (linearizacija, usrednjavanje). Zbog toga rešenje (8.26) uz (8.28) ipak ne garantuje stabilnost realnog sistema. Zato bi trebalo izvršiti analizu stabilnosti nelinearnog modela poremećaja (8.21).

Dopunska nepogodnost leži u pretpostavci o merljivosti svih koordinata stanja i uvođenju povratne sprege po svakoj od njih. Naime, u praksi se, po pravilu, uvode povratne sprege samo po položaju i brzini motora. Na primer, ne uvodi se sprega po struji rotora iako je to jedna od koordinata stanja elektromotora (ako je opisan modelom trećeg reda).

8.4. DIGITALNA SHEMA UPRAVLJANJA

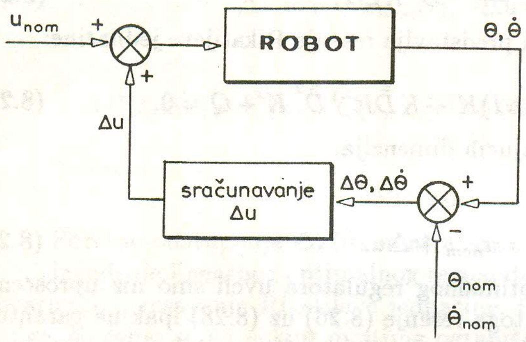
U prethodnim odeljcima izveli smo postupak upravljanja zasnovan na korišćenju nominalnog upravljanja i povratne sprege po položaju i brzini zglobova $(q, \dot{q})$. Preciznije rečeno, povratnu spregu smo uveli po položaju i brzini motora koji pokreću zglobove (dakle θ, $\dot{\theta}$) . S obzirom na jednoznačnu i prostu vezu između koordinata motora θ i koordinata zglobova q, u principu je svejedno koja od ovih veličina će učestvovati u formiranju povratne sprege. Kako se u praktičnim realizacijama najčešće meri položaj i brzina motora, to smo u prethodnim odeljcima uveli odstupanje, pa i povratnu spregu po ovim veličinama (θ , $\dot{\theta}$). Svakako, postoji i mogućnost merenja koordinate q umesto θ (npr. ako se koristi potenciometar).

Prethodno razmatranje ipak nije u potpunosti tačno. Radi se o tome da u nekim slučajevima moramo uzeti u obzir elastične deformacije u sistemu za prenos pogona, a tada koordinate θ i q postaju nezavisne (vidi odeljak 4.6). U takvom slučaju više nije svejedno da li se meri jedna ili druga veličina. Štaviše, u principu bi bilo poželjno meriti obadve, međutim, to bi nas vodilo specijalnim tipovima regulatora o čemu ovde nećemo govoriti.

Razmotrimo sada mogućnost praktične realizacije upravljačke sheme sa povratnom spregom prikazane na sl.8.3.

Blok za izračunavanje Δu na osnovu odstupanja $\Delta\theta$ i $\Delta\dot{\theta}$ može se izvesti na različite načine, o čemu je govoreno u prethodnim odeljcima. Mi ćemo usvojiti da je u pitanju linearna forma tj.

$$\Delta u = -K_P \Delta\theta - K_D \Delta\dot{\theta} - K_I \int \Delta\theta \, dt. \tag{8.29}$$



Sl. 8.3. Upravljanje sa povratnom spregom

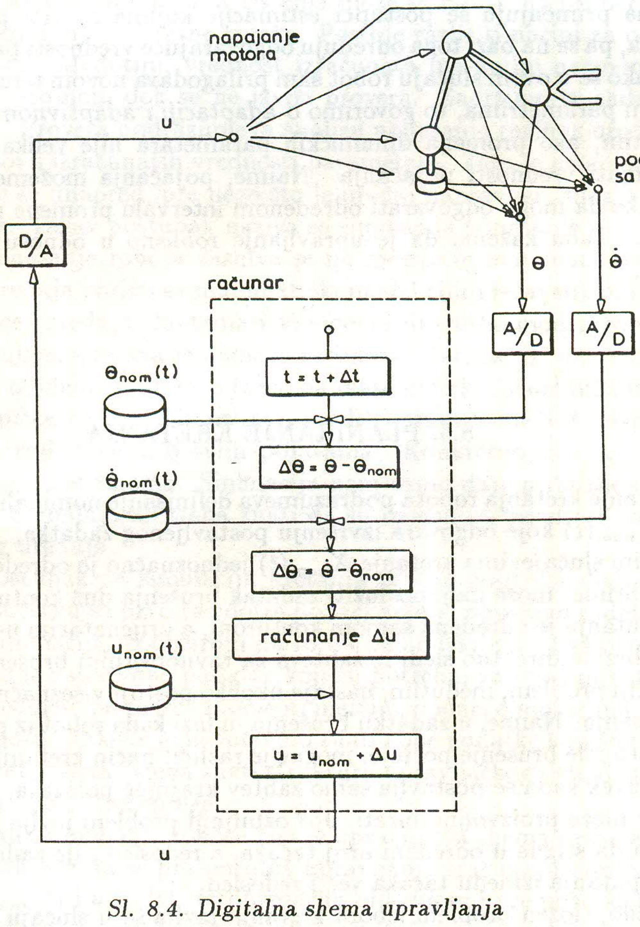
Ukoliko ovu shemu realizujemo digitalno, dolazimo do detaljnije sheme koja je prikazana na sl. 8.4. Pri formiranju ove sheme smatrano je da se nominal izračunava unapred, a u toku izvršenja zadatka čita se sa diska.

U nekom trenutku (t) senzori položaja mere koordinate θ i $\dot{\theta}$. Nakon A/D konverzije podaci ulaze u upravljački računar. Sada se sa diska čita vrednost nominalnog položaja $\theta_{nom}(t)$ i brzine $\dot{\theta}_{nom}(t)$ i izračunavaju se greške $\Delta\theta = \theta - \theta_{nom}$ i $\Delta\dot{\theta} = \dot{\theta} - \dot{\theta}_{nom}$. Na osnovu tih grešaka formira se signal povratne sprege Δu. Nakon sabiranja sa nominalnim upravljanjem ($u = u_{nom} + \Delta u$) i D/A konverzije, dobijeni napon primenjujemo na motore.

Od trenutka očitavanja senzora, pa do trenutka primene upravljanja prošlo je izvsno vreme Δt. Dakle, upravljanje realizujemo ponavljajući opisani ciklus sa korakom Δt koji nazivamo vreme razdvajanja. Dok se ne izračuna nova vrednost upravljanja primenjuje se vrednost izračunata u prethodnom koraku. Sledi da upravljanje ima stalnu vrednost tokom Δt, a zatim se skokovito menja na novu izračunatu vrednost. Naglasimo još da u robotskim sistemima interval razdvajanja ne bi trebalo da bude duži od $20ms$.

Pri primeni opisane sheme upravljanja uočavamo neminovno kašnjenje. Naime, upravljenje (u) koje odgovara stanju θ, $\dot{\theta}$ tj. trenutku t, biće izračunato i primeniće se na motore tek u trenutku $t+\Delta t$ i vodiće motore sve dok ne stigne nova vrednost, a to je trenutak $t+2\Delta t$. Ovo kašnjenje, pogotovo u slučaju suviše velikog Δt, može bitno uticati na kretanje robota. Ukoliko se pokaže potreba, ovo kašnjenje možemo korigovati postupkom *predikcije* (predviđanja).

Razmotrimo šta bi bilo neophodno uraditi u intervalu $(t,\ t+\Delta t)$ kako bi se korigovalo kašnjenje. Ako imamo u vidu da će upravljanje (u), izračunato u ovom intervalu, biti primenjeno tek od trenutka $t+\Delta t$, onda zaključujemo da bi ono trebalo da odgovara tom trenutku, dakle $u(t+\Delta t)$. Kako je nominalna komponenta smeštena na disk, to njenu vrednost $u_{nom}(t+\Delta t)$ možemo pročitati tokom intervala $(t,\ t+\Delta t)$. Međutim, povratna sprega $\Delta u(t+\Delta t)$ zahteva poznavanje greški $\Delta\theta(t+\Delta t)$, $\Delta\dot{\theta}(t+\Delta t)$, a to ne možemo izračunati budući da tokom intervala $(t,\ t+\Delta t)$ ne znamo položaj i brzinu koje će motori imati na kraju intervala (tj. $\theta(t+\Delta t)$ i $\dot{\theta}(t+\Delta t)$). Da bismo opisanu ideju ipak sproveli izvršićemo predikciju i predvideti tražene vrednosti u trenutku $t+\Delta t$ na osnovu vrednosti u trenutku t (tj. na osnovu $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$) i niza prethodnih vrednosti. Tako dobijamo prediktovane vrednosti $\theta_p, \dot{\theta}_p$ koje koristimo za izračunavanje greški: $\Delta\theta(t+\Delta t) = \theta_p - \theta_{nom}(t+\Delta t)$ i $\Delta\dot{\theta}(t+\Delta t) = \dot{\theta}_p - \dot{\theta}_{nom}(t+\Delta t)$. Sam postupak predikcije ovde nećemo opisivati.



Sl. 8.4. Digitalna shema upravljanja

Na slikama 8.3 i 8.4 uveli smo blok koji izračunava povratnu spregu Δu u zavisnosti od greški $\Delta\theta$ i $\Delta\dot{\theta}$. Pri tome smo rekli da se obično radi o linearnoj formi (8.29) tj. P–D ili P–D–I regulatoru.

Sa stanovišta realizacije najpovoljnije je da pojačanja povratne sprege (K_P, K_D, K_I) budu konstantna. Međutim, u nekim slučajevima to nije moguće. Posmatrajmo, na primer, zadatak u kome robot prenosi neke predmete sa jednog mesta na drugo. U fazi nošenja robot (njegovi motori) je znatno više opterećen nego u fazi kada se prazan vraća. Dakle, menjaju se dinamički parametri, pa će jednoj fazi odgovarati jedne vrednosti pojačanja, a drugoj fazi druge vrednosti. Tako dolazimo do promenljivih pojačanja koja menjaju vrednost u određenim trenucima, ali su to poznate i zadate vrednosti izračunate unapred na osnovu poznatih tereta koji će biti prenošeni.

Složeniji problem nastaje ako robot prenosi terete koji nisu unapred poznati. Dakle, radi se o promeni dinamičkih parametara u obimu koji nije zadat. U takvim slučajevima primenjuju se postupci *estimacije* kojima se vrši procena vrednosti opterećenja, pa se na bazi toga određuju odgovarajuće vrednosti pojačanja povratne sprege. Kako se u ovom slučaju robot sam prilagođava novom teretu tj. izmenjenim dinamičkim parametrima, to govorimo o *adaptaciji* i *adaptivnom upravljanju.*

Međutim, ako promena dinamičkih parametara nije velika, tada nije neophodno menjati vrednosti pojačanja. Naime, pojačanja možemo već na početku odrediti tako da mogu odgovarati određenom intervalu promene nekog dinamičkog parametra. Tada kažemo da je upravljanje *robusno* u odnosu na promenu tog parametra.

8.5. PLANIRANJE KRETANJA

Planiranje kretanja robota podrazumeva definisanje nominalnog funkcionalnog kretanja $X_{nom}(t)$ koje odgovara izvršenju postavljenog zadatka.

U nekim slučajevima kretanje $X_{nom}(t)$ jednoznačno je određeno samim zadatkom. Kao primer može nam poslužiti zadatak brušenja duž konture nekog vara (sl. 10.24b). Putanja je određena samom konturom, a orijenatacija uslovom normalonsti. Profil brzine direktno sledi iz zahteva za ravnomernim brušenjem.

Složeniji problem, međutim, nastaje ukoliko postoji višeznačnost rešenja nominalnog kretanja. Naime, u zadatku brušenja, u fazi kada robot iz početnog položaja prilazi mestu gde brušenje počinje, moguć je različit način kretanja $X_{nom}(t)$. Slično se događa uvek kada se postavlja samo zahtev krajnjeg položaja, a do tog položaja kretanje se može proizvoljno birati. Još ozbiljniji problem javlja se u slučaju kada robot mora da stigne u određeni broj tačaka, a redosled nije zadat. Tada ne samo da se bira putanja između tačaka već i redosled.

Konačno, složen problem izbora kretanja javlja se u slučaju kada je potrebno da robot izbegne prepreke u radnom prostoru. Pri tome ne samo da hvataljka mora zaobići prepreku već ni bilo koji deo ruke ne sme da udari u prepreku.

Ceo opisani skup problema i načina za njihovo rešavanje naziva se planiranjem kretanja. Planiranje se, u principu, vrši na strategijskom nivou upravljanja i često uključuje različite postupke optimizacije.

Problematika planiranja kretanja prilično je složena i raznovrsna sa stanovišta pitanja koja obrađuje. Zato ćemo se zadovoljiti time što smo naznačili probleme kojima se ova oblast bavi.

8.6. SIMULACIJA KRETANJA ROBOTA

Pri projektovanju robota i to kako mehaničke konstrukcije tako i upravljačkog sistema postavlja se problem određivanja čitavog niza važnih parametara. Kod mehaničke konstrukcije u pitanju su, na primer, dimenzije poprečnih preseka segmenata mehanizma, a kod upravljačkog sistema može se raditi, na primer, o određivanju vrednosti pojačanja povratne sprege. Postoje različiti načini za određivanje ovakvih parametara. Međutim, vrednost izračunata ma kojim načinom ne može se smatrati verodostojnom dok se ne izvrši provera. Zadržimo se sada na ovom problemu provere. Provera podrazumeva analizu ponašanja realnog uređaja koji je napravljen na osnovu izračunatih vrednosti parametara. Zato je neophodno razviti postupak kojim bi se unapred, pre nego što je uređaj napravljen, moglo analizirati njegovo ponašanje. Takav postupak naziva se simulacija ponašanja.

Simulacija ponašanje robota zasniva se na njegovom matematičkom modelu. Umesto realnog uređaja koristi se matematički model čijim rešavanjem izračunavamo kretanje budućeg uređaja. Matematički model (dinamički model) robota opisan je u glavi 4. ove knjige, a rešava se pomoću računara. Tačnost izračunatog kretanja zavisi od tačnosti modela. Radi se o tome da matematički model nikada ne uzima u obzir sve dinamičke efekte. Na primer, model opisan u glavi 4, iako je veoma detaljan, ipak ne vodi računa o svim pojavama. Konkretno, u obzir nije uzeto trenje u zglobovima mehanizma. Simulacija nam samo daje približne odgovore o ponašanju budućeg uređaja ali treba znati da su izračunati rezultati veoma bliski ponašanju realnog uređaja.

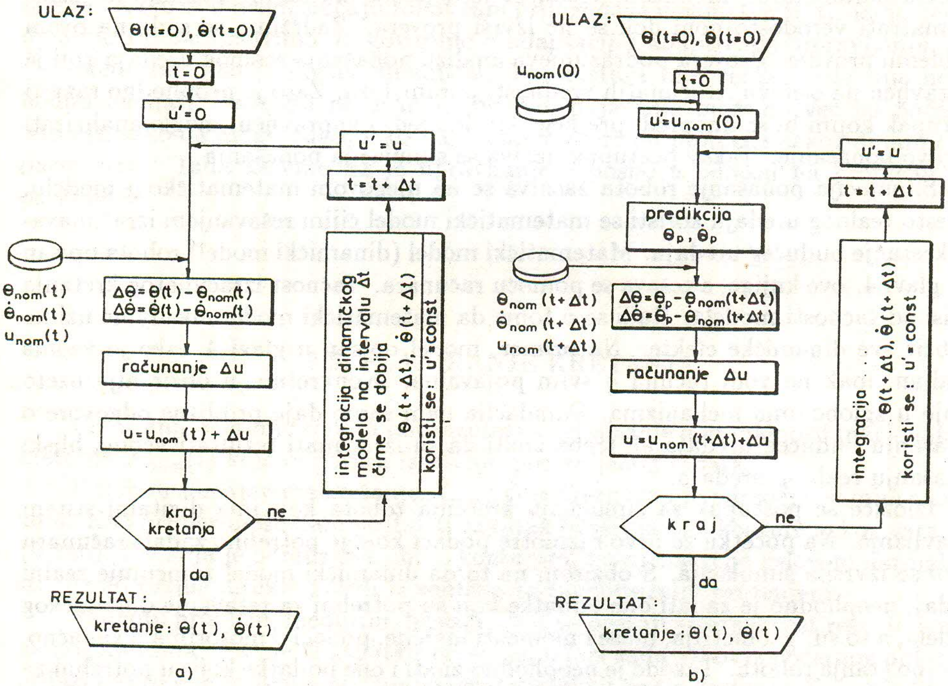
Izložiće se postupak za simulaciju kretanja robota koji ima digitalni sistem upravljanja. Na početku se prvo razmotre podaci koje je potrebno zadati računaru da bi se izvršila simulacija. S obzirom na to da dinamički model zamenjuje realni uređaj, neophodno je zadati one podatke koji su potrebni za rešavanje dinamičkog modela, a to su: geometrija, mase i momenti inercije, podaci o motorima, i konačno, početno stanje robota. Takođe je neophodno znati i one podatke koji su potrebni za upravljanje robotom. Dakle, treba znati strukturu upravljačkog sistema uključujući vrednost pojačanja povratne sprege.

Objasnimo sada simulaciju robota čija je upravljačka shema prikazana na slici 8.4. Ova shema zahteva da se pre početka upravljanja sračunaju nominalne vrednosti $\theta_{nom}(t)$, $\dot{\theta}_{nom}(t)$ i $u_{nom}(t)$. Isti proračun obavlja se i pre početka simulacije.

Za vreme simulacije upravljački deo sheme ostaje isti, a realni mehanizam robota treba zameniti matematičim modelom. Tokom objašnjenja upravljačke sheme videli smo da nakon svakog vremenskog intervala Δt upravljački računar uzima od senzora podatke o položaju i brzini. Posmatrajmo neki trenutak t. Nakon dobijanja podataka θ i $\dot{\theta}$ računar izračunava upravljanje $u(t)$ i primenjuje ga na pogonske motore. Kako je za A/D konverziju i izračunavanje upravljanja potrebno vreme

Δt to će se izračunato upravljanje primeniti na motore tek u trenutku $t + \Delta t$. U međuvremenu (od t do $t + \Delta t$) primenjuje se upravljanje iz prethodnog trenutka tj. $u(t - \Delta t)(u'$ na sl. 8.5a). U trenutku $t + \Delta t$ ponovo se uzimaju podaci od senzora i ponavlja ceo ciklus. Da bi se pri simulaciji realni uređaj zamenio dinamičkim modelom moramo pomoću tog modela izačunati vrednosti θ i $\dot{\theta}$ u trenutku $t + \Delta t$ tj. izračunati ono što bi trebalo meriti senzorom na realnom uređaju. Potrebno je izvršiti numeričku integraciju dinamičkog modela na intervalu $(t,\ t + \Delta t)$ i dobiti $\theta(t + \Delta t)$ i $\dot{\theta}(t + \Delta t)$ polazeći od vrednosti $\theta\,(t)$ i $\dot{\theta}\,(t)$, a pri tome primenjujući konstantno upravljanje u'. Shema postupka simulacije prikazana je na slici 8.5a.

Na slici 8.5b prikazana je shema simulacije u slučaju upravljanja sa predikcijom.



Sl. 8.5. Shema postupka simulacije

Kao rezultat simulacije dobijamo od računara funkcije $\theta(t)$ i $\dot{\theta}\,(t)$tj. zakon kretanja koje bi ostvario realni robot koji bismo napravili prema zadatim podacima. Treba reći da se početno stanje $\theta\,(t_0)$. $\dot{\theta}\,(t_0)$ može zadati tako da se uklapa u željeno kretanje, međutim, češće se zadaje tako da postoji neko odstupanje od željenog položaja u početnom trenutku. Ovo odstupanje uvodi se zato da bi se videlo kojom brzinom će izabrana upravljačka shema poništiti to odstupanje i dovesti robot na željenu putanju.

Sličnim postupkom može se pomoću računara izvršiti simulacija ponašanja robota koji ima bilo koju drugu strukturu upravljačkog sistema. Mogućnost simulacije ponašanja robota pruža velike šanse za usavršavanje procesa projektovanja. Moguće je brzo analizirati ponašanje velikog broja različitih konfiguracija robota radi izbora najpovoljnije. Moguće je i isprobati razne upravljačke sheme, razne vrednosti pojačanja itd.

8.7. PROGRAMIRANJE ROBOTA I ROBOTSKI PROGRAMSKI JEZICI

U ovom odeljku, pod naslovom "programoranje robota" govorićemo o nešto široj problematici. Razmotrićemo mogućnost zadavanja zadatka industrijskom robotskom sistemu ili, još opštije, mogućnosti komunikacije sa takvim sistemom.

Ako posmatramo robota čiji upravljački sistem raspolaže izvršnim (servosistemskim) i taktičkim nivoom upravljanja, tada zadavanje zadatka podrazumeva specificiranje kretanja mehanizma robota i radnog režima završnog uređaja. Pod ovim drugim podrazumevamo npr. otvaranje i zatvaranje hvataljke, uključivanje i brzinu obrtanja uređaja za zavrtanje zavrtnja, uključivanje i isključivanje pištolja za prskanje boje i sl. Razmotrićemo različite mogućnosti za zadavanje ovakvog zadatka. Preciznije rečeno, radi se o postupcima kojima se robot osposobljava da izvrši traženi zadatak. Zato se često i koristi termin obučavanje robota.

U uvodnoj glavi knjige (glava 1) spomenuli smo neke prostije sisteme kao što su industrijski manipulatori kojima se kretanje određuje mehaničkim graničnicima ili uz pomoć prekidača. Svaka izmena kretanja zahteva pomeranje graničnika i takav postupak samo uslovno možemo zvati programiranjem kretanja. Kod nešto složenijih sistema, robota prve generacije, kretanje se zadavalo u obliku niza tačaka pri čemu je svaka od njih određena tj. "pamćena" uz pomoć skupa potenciometara. Svaki potenciometar pamtio je položaj jednog zgloba i to u obliku analogne naponske informacije. Mi ćemo se, međutim, u ovoj glavi posvetiti savremenim načinima obučavanja robota i zadavanja manipulacionog zadatka.

Kod savremenih industrijskih robota srećemo dva osnovna načina programiranja kretanja:

- programiranje vođenjem,
- tekstualno programiranje.

Ova dva načina, međutim, ne treba razdvajati kao dva potpuno različita koncepta koji se međusobno isključuju. Oni se često dopunjuju da bi se iskoristile prednosti svakog od njih.

8.7.1. Programiranje vođenjem

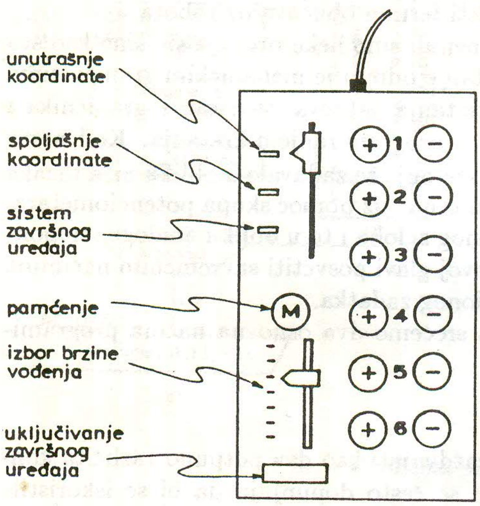
Ideja ovog pristupa je da se u fazi obučavnja robot vodi putanjom koja se zahteva pri izvršenju zadatka. Tada robot pamti izvršeno kretanje i ponavlja ga kada se to od njega zahteva tj. u fazi praktičnog rada.

Ovo je bila osnovna ideja, dakle obučavanje pokazivanjem, međutim pri realizaciji ovog pristupa pojavljuje se niz razlika. Tako, prema načinu vođenja razlikujemo ručno vođenje i posredno vođenje.

Ručno vođenje podrazumeva da čovek-oprator ručno vodi završni uređaj robota onako kako on u praktičnom radu treba da se kreće. Pogodan primer je problem farbanja prskanjem. U fazi obučavanja operator pištoljem koji je učvršćen na vrhu robota radi one pokrete koje bi radio i pri ručnom farbanju. Na taj način on vodi robot koji kretanje pamti i tako se vrši obučavanje. Tokom ručnog vođenja operator uključuje i isključuje završni uređaj (npr. pištolj za prskanje) što robot takođe pamti.

U slučaju da je robot masivan i nepogodan za ručno vođenje projektuje se poseban mehanizam čija je geometrija identična sa geometrijom robota ali su mase značajno manje. Sada u fazi obučavanja operator ručno vodi ovu laganu "kopiju" robota.

Posredno vođenje je savremeniji način programiranja robota. Robot se kreće sledeći komande koje čovek–operator zadaje pomoću jedne vrste daljinskog upravljača (najčešći engleski termin je: teach pendant). Na ovom uređaju za obuku, koji je oblika kutije i veličine šake, nalaze se prekidači i dugmad kojima se upravlja radom robota (sl. 8.6). Način vođenja posredstvom ovog uređaja bitno je vezan sa sledećom diskusijom.



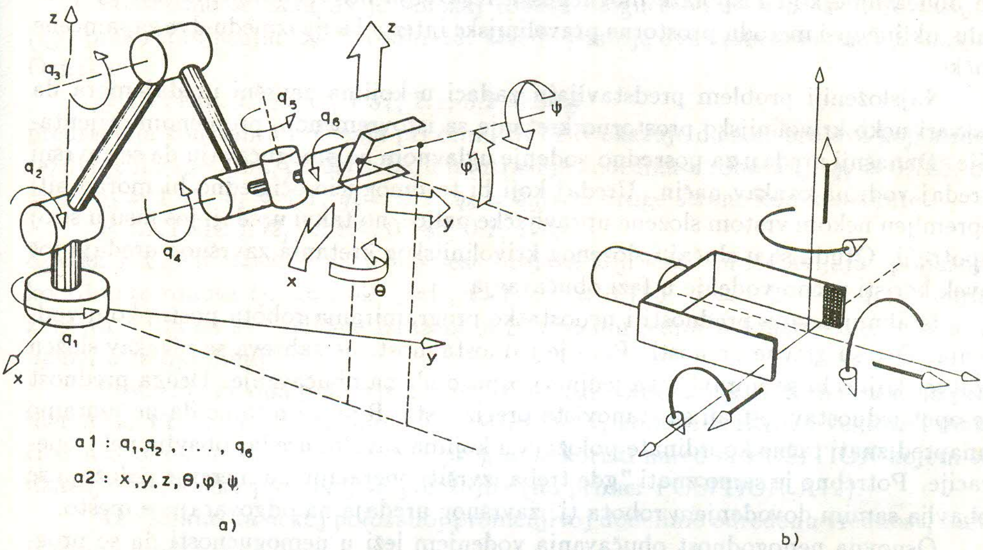
Sl 8.6. Uređaj za obuku

Prema razmatranjima u glavi 2 (geometrija i kinematika) jedan od načina za zadavanje položaja i kretanja robota je korišćenje unutrašnjih koordinata tj. pomeranja u zglobovima (sl. 8.7a1). Ako želimo da obučavamo robot na ovaj način, tada ćemo na uređaju za obuku uočiti prekidač za izbor koordinata i postaviti ga u položaj "unutrašnje koordinate". Za vođenje robota koristićemo šest parova dugmadi[1]. Svakim parom dugmadi vodimo po jedan zglob robota. Pritiskom na dugme "+" zglob se obrće u pozitivnom smeru, a pritiskom na dugme "-" u negativnom. Na ovaj način, vođenjem jednog po jednog zgloba, doveššćemo završni uređaj u položaj koji se zahteva. Taj položaj robot će zapamtiti kada se na uređaju za obuku pritisne određeno dugme ili se, pak, na tastaturi upravljačke jedinice otkuca odgovarajuća naredba za pamćenje. Sada robot vodimo do drugog položaja koji se pamti, a postupak se ponavlja dok

[1]Umesto dugmadi može se koristiti upravljačka palica.

se u potpunosti ne definiše zadatak. Brzina vođenja može se podešavati posebnim regulatorom. Uključivanje i isključivanje završnog uređaja zadaje se pomoću odgovarajućeg prekidača na uređaju za obuku ili, pak, kucanjem naredbe na tastaturi upravljačke jedinice.

U fazi izvršenja zadatka robot se kreće od jednog do drugog zapamćenog položaja pri čemu brzina nije određena brzinom vođenja tokom obuke, već se zadaje proizvoljno korišćenjem tastature. Pri kretanju od jednog do drugog zapamćenog položaja robot pokreće sve zglobove istovremeno.



Sl. 8.7. Način vođenja robota

Drugi način definisanja položaja i kretanja robota je korišćenje tzv. spoljašnjih koordinata (sl. 8.7a2). U pitanju su tri Dekartove koordinate "vrha" završenog uređaja (x, y, z) i tri ugla koji određuju njegovu orijentaciju u prostoru (θ, φ, ψ). Ako želimo da robot vodimo na ovaj način, tada prekidač za izbor koordinata stavljamo u položaj "spoljašnje koordinate". Šest parova dugmadi na uređaju za obuku sada dobija drugačije značenje. Pritiskanjem nekog dugmeta prvog para ("+" ili "-") menja se koordinata x, a sve ostale (y, z, θ, φ, ψ) ostaju konstantne. Tako se svakim parom dugmadi podešava po jedna spoljašnja koordinata dok se završni uređaj ne dovede u traženi položaj koji se tada zapamti.

Očigledno je da vođenje robota u spoljašnjim koordinatama zahteva rešavanje inverznog zadatka kinematike i to u realnom vremenu.

Treći način vođenja robota u fazi obučavanja je korišćenje koordinatnog sistema vezanog za završni uređaj (sl. 8.7b). Tada se kretanje ostvaruje u obliku translacija duž osa ovog sistema i rotacija oko tih osa. Svakako, opet se koristi istih šest parova dugmadi pri čemu se prekidač za izbor koordinata postavlja u položaj "sistem završnog uređaja".

Razmotrimo sada tipove upravljanja. Ukoliko zadatak zahteva upravljanje od tačke do tačke (bez zadatog kretanja između) tada je obučavanje moguće izvršiti i ručnim i posrednim vođenjem. Takvi su, na primer, zadaci prenošenja, zadaci opsluživanja mašina, tačkasto zavarivanje i sl.

Kada je u pitanju praćenje kontinualne putanje, tada je problem obučavanje složeniji. Krenimo od jednog jednostavnijeg slučaja iz ove kategorije. Zahtevamo da se završni uređaj kreće pravolinijski između dve tačke. Obučavanje se u ovakvom slučaju može efikasno realizovati posrednim vođenjem. Naime, sistem za obučavanje koji raspolaže mogućnošću rešavanja inverzne kinematike, po pravilu, uključuje i metodu prostorne pravolinijske interpolacije između dve zapamćene tačke.

Najsloženiji problem predstavljaju zadaci u kojima završni uređaj mora da ostvari neko krivolinijsko prostorno kretanje sa istovremenom promenom orijentacije. Današnji uređaji za posredno vođenje uglavnom ne omogućavaju da se završni uređaj vodi na ovakav način. Uređaj koji bi to omogućio očigledno bi morao biti opremljen nekom vrstom složene upravljačke palice, no takvi uređaji još nisu u široj upotrebi. Otuda se u slučaju složenog krivolinijskog kretanja završnog uređaja još uvek koristi ručno vođenje u fazi obučavanja.

Istaknimo sada prednosti i nedostatke programiranja robota postupkom vodjenja. Dve su glavne prenosti. Prva je jednostavnost: ne zahteva se nikakav složen softver kojim bi se upravljačka jedinica osposobila za obučavanje. Druga prednost je opet jednostavnost ali sa stanovišta preciznosti. Radi se o tome da ne moramo unapred znati tačne koordinate položaja u kojima završni uređaj obavlja neke operacije. Potrebno je samo znati "gde treba izvršiti operaciju", a merenje položaja se obavlja samim dovođenjem robota tj. završnog uređaja na odgovarajuće mesto.

Osnovna nepogodnost obučavanja vođenjem leži u nemogućnosti da se programiranje robota izvrši unapred. Naime, programiranje se može izvršiti tek kada se robot postavi na proizvodnu liniju. To međutim, predstavlja priličan gubitak vremena, pogotovo ako se proizvodnja obavlja u malim serijama.

8.7.2. Robotski programski jezici

Kada govorimo o tekstualnom programiranju kretanja robota, obično podrazumevamo programski jezik pomoću koga čovek–operator komunicira sa robotom i zadaje mu manipulacioni zadatak.

Danas je u upotrebi čitav niz robotskih programskih jezika različitog nivoa složenosti i različite opštosti. Dok su neki jednostavniji prilagođeni određenim primenama, dotle složeniji jezici dostižu priličnu univerzalnost i mogu se koristiti za programiranje niza zadataka u robotici. Ovu prilično raznovrsnu problematiku izložićemo na sledeći način. Zamislićemo jedan robotski jezik (nazvaćemo ga FOROB) tako što ćemo poznati programski jezik opšte namene – FORTRAN dopuniti određenim naredbama i osobinama koje će ga napraviti robotskim jezikom. Jezik koji ćemo na ovaj način formirati imaće određene sličnosti sa nekim postojećim robotskim jezicima i to nekada po formi pisanja naredbi, a nekada i po njihovom