

6. SENZORI U ROBOTICI

U prvoj glavi knjige, kada smo govorili o pojmu robota, istakli smo samostalnost kao bitnu karakteristiku ovih uređaja. Nivo samostalnosti menja se, pak, sa razvojem tehnologije. Dok se u početku radilo samo o automatskom ponavljanju zadatog kretanja, vremenom se došlo do robota koji su u stanju da obave niz složenih zadataka u radnoj sredini sa preprekama kao i da reše različite probleme koji su van uobičajenog radnog režima.

Da bi robot mogao raditi samostalno, bez obzira na nivo samostalnosti, on mora biti "svestan" sebe i svoje okoline. Preciznije rečeno, robot mora imati mogućnost merenja sopstvenog položaja i brzine kao i merenja različitih veličina u radnoj okolini čime stiče predstavu o spoljnom prostoru. Različiti merni uređaji i sistemi kojima robot dobija informacije o sebi i okolini nazivaju se senzori. Danas su to uređaji za merenje ugaonog i translatornog pomeranja, različiti senzori dodira, uređaji za merenje rastojanja, sile, ubrzanja i sl. Posebnu klasu senzorskih sistema čine vizuelni sistemi, danas već često u upotrebi. Kako se od robota u budućnosti očekuje izuzetna samostalnost, to je neophodan uslov značajan napredak u senzorskoj tehnici kao što je, na primer, čulo dodira sa mogućnošću određivanja glatkoće i mekoće površine, trodimenzionalna vizija, čulo sluha sa prepoznavanjem govora itd.

Već smo rekli da robot posredstvom senzora dobija podatke o sebi i o okolini. Podatke o sopstvenom položaju i brzini robot dobija merenjem pomeranja u zglobovima i brzina tih pomeranja. S obzirom na to da se mere takozvane unutrašnje koordinate i brzine, odgovarajuće merne uređaje nazivamo unutrašnjim sensorima. Postoje i uređaji koji mere različite veličine vezane za odnos robota i spoljašnje sredine (na primer, udaljenost od prepreke itd.). Takve uređaje nazivamo spoljašnjim sensorima.

Unutrašnji senzori postojali su već kod prvih tipova robota. Naime, merenje položaja i brzine neophodno je za realizaciju bilo kakvog servosistema. Takvi senzori i danas postoje kod svih robota. Ako pretpostavimo da savremeni robot ima upravljačku shemu sa više nivoa, tada unutrašnji senzori obezbeđuju informacije za rad najnižeg nivoa (servosistemski nivo). Spoljašnji senzori po pravilu daju informacije za više nivoa upravljanja i na osnovu njih se donose odluke.

Navedimo još jednu podelu senzora. Jedna vrsta su takozvani merni pretvarači (engl. transducers). To su uređaji koji jednu fizičku veličinu (onu koju želimo izmeriti) pretvaraju u drugu. Primer je potenciometar koji pomeranje prevodi u električni napon. Dobijeni napon po određenom zakonu odgovara merenom pomeranju. Tada kažemo da je dobijena informacija o pomeranju u analognoj formi. Da bi se utvrdila tačna zavisnost pomeranja i napona, neophodno je izvršiti kalibraciju ovakvih uređaja. Ukoliko se upravljanje sistemom realizuje digitalno, tada je neophodno analognu informaciju prevesti u digitalni oblik koji će prihvatiti upravljački računar. Elektronski sklopovi koji određenu vrednost napona (analogna informacija) prevode u digitalnu formu nazivaju se analogno-digitalni (A/D) konvertori. Oni na izlazu daju brojnu vrednost merene veličine u binarnom sistemu. Kada govorimo o analogno-digitalnoj konverziji napomenimo da postoji i obrnuti postupak, kada se brojni podatak o električnom naponu (digitalni podatak) prevodi u sam napon (analogna forma). Radi se, dakle, o digitalno-analognoj (D/A) konverziji, a elektronski sklopovi koji realizuju ovu konverziju nazivaju se D/A konvertori.

Druga vrsta senzora daje odmah digitalnu vrednost merene veličine.

6.1. A/D i D/A KONVERZIJA

A/D KONVERZIJA. Ova konverzija podrazumeva nalaženje brojne vrednosti u binarnom brojnem sistemu koja odgovara nekoj analognoj veličini (nekom naponu ili struji). Radi jednostavnosti objašnjenja smatraćemo da je analogna veličina električni napon. Shematski posmatrano, napon se dovodi na ulaz konvertora, a na izlazu dobijamo njegovu brojnu (digitalnu) vrednost u binarnom sistemu.

Uvedimo neke pojmove. Etaloni su određeni naponi čije brojne ekvivalente znamo. Sa njima se upoređuje ulazni napon radi nalaženja njegove brojne vrednosti. Kvant je najmanji etalon tj. najmanja veličina napona koji možemo meriti. Ulazni napon mora se izraziti preko određenog broja kvantova.

Prema konstruktivnom principu, A/D konvertori mogu se podeliti na kon-vertore sa otvorenom i zatvorenom petljom. Kod prvih se konverzija vrši direktnim upoređivanjem ulaznog analognog napona sa etalom. Kod konvertora sa zatvorenom petljom ulazni napon izaziva generisanje neke približne vrednosti napona koja predstavlja određeni broj kvantova. Ta vrednost se upoređuje sa ulaznim naponom. Razlika će izazvati novo generisanje približnog napona koji će biti bliže pravoj vrednosti. Zatim se ponovo vrši upoređivanje i takva petlja se ponavlja dok se ne postigne poklapanje generisanog napona sa ulaznim. Kako je generisani napon, u stvari, određeni broj kvantova, to smo dobili brojnu vrednost ulaznog napona.

Druga klasifikacija A/D konvertora vrši se prema tome da li se pri konverziji primenjuje princip direktnog ili posrednog određivanja digitalnog ekvivalenta ulaznog analognog napona. U prvom slučaju ulazni napon se upoređuje sa etalo-nima. U drugom slučaju koristi se kondenzator koji se puni i meri se vreme koje je potrebno da se kondenzator napuni do vrednosti ulaznog napona. Vreme se meri digitalno i na osnovu tog vremena, znajući brzinu punjenja, određuje se brojna vrednost napona. Najčešće se klasifikacija izvodi prema načinu kvantizacije ulaznog analognog napona. Sa tog aspekta, proces A/D konverzije se obavlja primenom principa: podatak po podatak, kvant po kvant ili pak bit po bit. U metodi podatak po podatak, ulazni napon upoređujemo sa svim etalonima odjednom. Tako u jednom koraku dobijamo brojnu vrednost napona. Tada mora biti onoliko etalona koliko različitih brojnih vrednosti možemo postići. Kako je najmanji etalon jedan kvant, dva su sedna etalona razlikuju se upravo za jedan kvant. Taj kvant istovremeno određuje i tačnost merenja. Ova konverzija se često naziva simultanom ili jednovremenom. Ovaj postupak je veoma brz jer se konverzija odvija u jednom koraku. Međutim, za istovremeno upoređivanje sa svim etalonima potreban je veliki broj komparatora (elektronski sklop za upoređivanje napona).

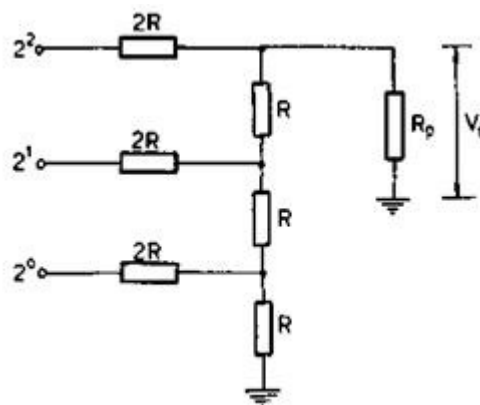
Konverzija metodom kvant po kvant zasniva se na brojanju kvantova. U svakom koraku formira se novi etalon tako što se prethodni uvećava za jedan kvant. Tako formirani etalon upoređuje se sa ulaznim naponom. Ovakvo povećanje etalona se vrši sve dok se ne stigne do vrednosti ulaznog napona. Pri tome se broje koraci i biće ih onoliko koliko puta se kvant sadrži u ulaznom naponu. Na ovaj način se dobija digitalna vrednost ulaznog napona. Ovakva konverzija naziva se još i brojačka. Pogodna je zbog toga što joj je potreban samo jedna komparator, a mana je u tome što se konverzija vrši u više koraka to je otuda potrebno i više vremena.

Princip konverzije bit po bit karakterističan je po tome što se digitalni ekvivalent analognog ulaznog napona dobija postupnim određivanjem svakog bita posebno, polazeći od bita najveće pozicione vrednosti. Ovaj postupak zahteva onoliko koraka koliko digitalna vrednost ima bita odnosno binarnih cifara. Isto tako, i broj potrebnih etalona jednak je broju bita, a vrednosti etalona stoje u odnosu pozitivnih vrednosti odgovarajućih bita. Tako, na primer, ako se radi o konvertoru sa samo tri bita, odgovarajući etaloni E_1 , E_2 i E_3 stoje u odnosu $2^0 : 2^1 : 2^2$. Ulazni

napon V upoređuje se najpre sa etalonom E_3 i ukoliko je $V > E_3$ odgovarajući bit imaće vrednost 1, a ako je $V < E_3$ vrednost bita biće 0. Ako je dobijeno 0 tada se u sledećem koraku napon V upoređuje sa nižim etalonom E_2 . Ako je, međutim, dobijeno 1, tada se u sledećem koraku sa etalonom E_2 ne upoređuje celokupni ulazni napon V već samo razlika $\Delta V = V - E_3$. Upoređivanjem sa E_2 dobija se drugi bit, a treći se dobija korišćenjem etalona E_1 . Ovaj princip A/D konverzije svodi se na postupno određivanje digitalnog ekvivalenta pri čemu se u svakom koraku dobija sve veća tačnost. Otuda se često koristi naziv postupna konverzija. Upoređenju sa jednovremenom i brojačkom, postupna ili sukcesivna konverzija po brzini rada i komplikovanosti sistema nalazi se negde između njih.

D/A KONVERZIJA. Digitalno-analoga konverzija je prevođenje digitalne vrednosti signala u analogni. Ako je u pitanju električni napon, tada se na ulaz D/A konvertora dovodi brojni podatak o vrednosti napona (u binarnom brojnem sistemu), a na izlazu se dobija sam napon.

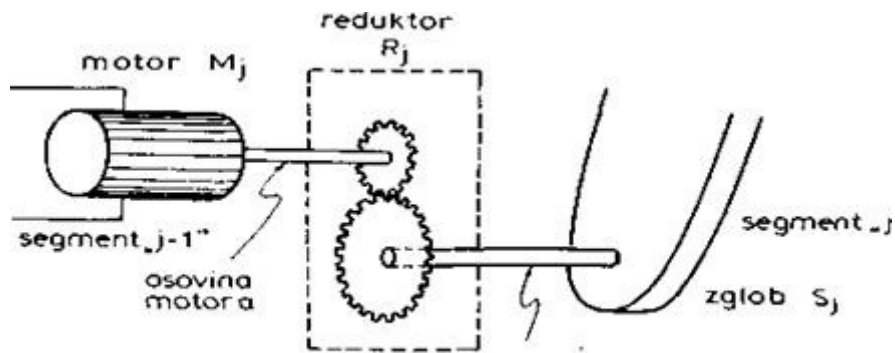
Princip funkcionisanja D/A konvertora objasnićemo na jednostavnom primeru konvertora sa lestvičastom otpornom mrežom (sl. 6.1). Mreža ima jedan izlaz i onoliko ulaza koliko ulazni podatak ima bita (binarnih cifara). Mreža na slici 6.1 predviđana je za ulazne podatke od tri bita.



Sl. 6.1. Lestvičasta otporna mreža za D/A konverziju

U digitalnom uređaju pod signalom 1 u nekom električnomvodu podrazumeva se određeni električni napon, a pod signalom 0 podrazumeva se da napona nema. Označimo sa V_r taj referentni napon koji definiše cifru 1. Tada se binarni broj 101 realizuje sa tri voda od kojih u prvom i trećem imamo napon V_r , a u drugom napona nema. Za podatak sa n bita treba nam n vodova. Tih n vodova priključujemo na ulaze otporne mreže i na taj način u otpornu mrežu uvodimo brojnu vrednost podatka. Može se pokazati da će se na izlazu dobiti napon V , koji je jednak onolikom broju kvantova V_k koji je doveden na ulaz, pod uslovom daje R_p otpor velike vrednosti. Na primer, ako na ulaz mreže dovedemo binarni broj 101 (tj. dekadni broj 5) tada će izlazni napon biti $V_i = 5V_k$ tj. sadržaće 5 kvantova. Kod lestvičaste otporne mreže kvant je $V_k = V_r/2^n$, gde je n broj ulaza tj. broj bita.

6.2. MERENJE POLOŽAJA I BRZINA U ZGLOBOVIMA ROBOTA



SI. 6.2. Rotacioni zglob pokretan elektromotorom

Ranije smo istakli daje za dobijanje kompletne informacije o položaju robota dovoljno izmeriti uglove obrtanja u rotacionim zglobovima i podužna pomeranja u translatorskim. Treba naglasiti da ugaona i podužna pomeranja u zglobovima merimo počevši od nekog položaja zgloba koji smatramo nulim položajem. 0 tome se više govorilo u glavi 2 kada su definisane unutrašnje koordinate robota (odeljak 2.2.5.). Da bismo uočili gde treba postaviti merače moraćemo uzeti u obzir i način prenosa pogona sa motora na zglob. Posmatrajmo prvo rotacioni zglob pokretan elektromotorom. Shema prenosa prikazana je na slici 6.2. Neka je u pitanju zglob S_j .

Osovina motora M_j obrće se velikom brzinom $\dot{\Theta}_j$ (na primer 2000-3000 obrtaja u minuti) pa otuda ima i veliki ugao obrtanja Θ_j . Nakon redukovanja pomoću reduktora R_j ugao obrtanja i ugaona brzina se smanjuju tako da se osovina zgloba obrće za ugao:

$$q_j = \Theta_j / N_j \quad k$$

i ima ugaonu brzinu:

$$\dot{q}_j = \dot{\Theta}_j / N_j \quad k$$

gde je N_j redukcioni odnos. Uloga reduktora objašnjena je detaljnije u glavi 3 gde je diskutovan prenos pogonskog momenta elektromotora (odeljak 3.2.).

Podatak o q_j možemo dobiti direktnim merenjem na osovini zgloba ili merenjem ugla Θ_j na osovini motora, a zatim izračunavanjem q_j pomoću relacije (6.1.). Za merenje ugla q_j koristi se potencijometar ili apsolutni enkoder. Za merenje velikog ugaonog obrtanja Θ_j koristi se inkrementalni enkoder. Sva tri uređaja biće opisana kasnije.

Ovu diskusiju možemo i uopštiti i reći da se podatak o pomeranju rotacionog ili translatorskog zgloba može dobiti postavljanjem senzora na sam zglob ili pak merenjem pomeranja na pogonskom motoru kada u obzir moramo uzeti i prenosni sistem.

Razmotrićemo različite vrste senzora unutrašnjeg položaja i brzine.

6.2.1. Potencijometar

Potenciometrom možemo meriti translatorna i ugaona pomeranja. Princip merenja je zasnovan na linearnoj zavisnosti električne otpornosti provodnika od njegove dužine. Zato se potenciometar sastoji od otpornika i klizača. Na slici 6.3 prikazani su potenciometri za merenje translatornog i ugaonog pomeranja. Prikazana shema omogućava merenje pozitivnih i negativnih pomeranja.

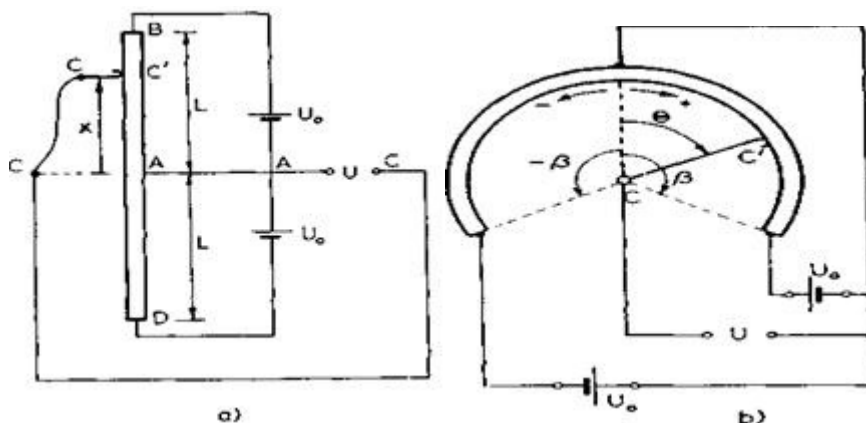
Ako je na slici 6.3a $R_{AD} = R_{AB} = R$ i ako kroz klizač $C'C$ ne protiče struja, tada je napon na klizaču

$$U = U_{AC} = R_{AC} I = \frac{x}{L} \frac{R}{R} U_0 = \frac{U_0}{L} x \quad (6.3)$$

$$U = kx \quad (6.4)$$

gde je konstantna proporcionalnosti

$$k = \frac{U_0}{L} \quad (6.5)$$



Sl. 6.3. Potenciometri

Kod kružnog potenciometra (sl. 6.3b) napon na klizaču je

$$U = k\Theta, \quad k = U_0/\beta.$$

Dakle, dobijamo napon koji linearno zavisi od pomeranja. Međutim, treba reći da je otpornik R mogao biti napravljen tako da mu se otpornost ne menja linearno sa dužinom. Tada bi se i napon U menjao po drugačijem zakonu. U opštem slučaju bilo bi $U = f(x)$.

Da bi se dobila informacija o položaju, potrebno je izmeriti napon U. Za takvo merenje potrebno je vezati voltmetar između tačaka A i C. Voltmetar mora imati veliku unutrašnju otpornost da bi se zadovoljila pretpostavka da kroz klizač CC' ne protiče struja. Potenciometar daje podatak o položaju zgloba u analognoj formi.

6.2.2. Rezolver

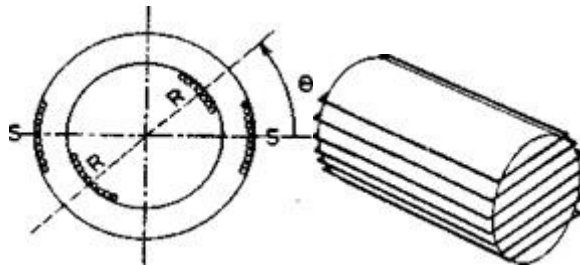
Osnovne ideje rada rezolvera objasnimo na primeru rezolvera sa dva namotaja, jedan na statoru (S — S) i jedan na rotoru (R — R). Namotaji su motani kako je to prikazano na slici 6.4a. Sa slike 6.4.b. vidimo da se magnetno sprezanje namotaja menja pri obrtanju rotora. Ako na stator dovodimo naizmenični napon:

$$u_s = U \sin \omega t \quad (6.7)$$

tada ce se na rotoru indukovati napon:

$$u_r = u_s \cos \Theta = U \cos \Theta \sin \omega t \quad (6.8)$$

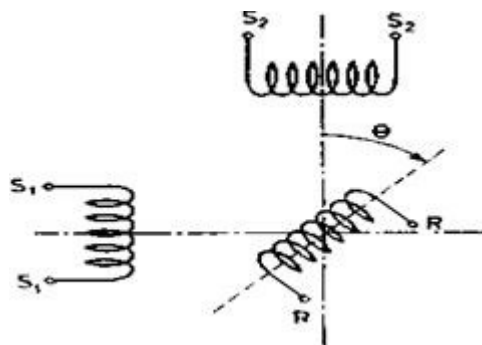
tj. dobiće se naizmenični napon čija amplituda zavisi od ugla obrtanja rotora Θ . Na ovaj način je, dakle, moguće meriti ugao Θ .



Sl. 6.4. Rezolver sa dva namotaja

Češće se, međutim, sreću rezolveri koji imaju dva namotaja na statoru (S1 — S1 i S2 — S2) i jedan na rotoru (R — R). Namotaji statora postavljeni su pod uglom od 90° kao što je prikazano shematski na slici 6.5.

Namotaji statora napajaju se naizmeničnim naponima



Sl. 6.5. Rezolver sa tri namotaja

$$u_{s1} = U \sin \omega t \quad (6.9)$$

$$u_{s2} = U \sin(\omega t + \pi/2) \quad k$$

U rotoru će se sada indukovati

$$u_r = u_{s1} \cos \Theta + u_{s2} \sin \Theta \quad (6.10)$$

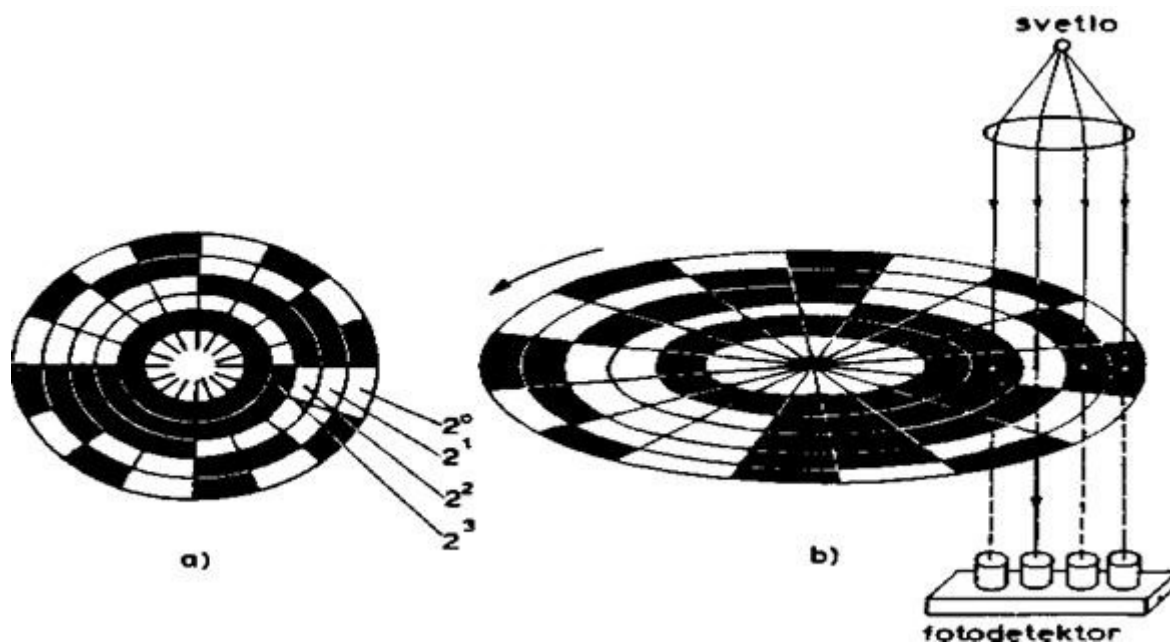
Zamenom (6.9) u (6.10) može se, nakon sređivanja ,
Dobiti izraz za napon rotora

$$u_r = U \sin(\omega t + \Theta) \quad (6.11)$$

Dakle, na izlazu se dobija naizmenični napon konstantne amplitude čiji je fazni pomeraj jednak merenom uglu Θ . Merenjem faznog pomeraja dobijamo traženu vrednost ugla.

6.2.3. Apsolutni i inkrementalni enkoder

a) Apsolutni enkoder. Objasnimo princip rada ovog uređaja za merenje ugla. Glavni deo uređaja je disk koji je vezan za ulaznu osovinu čiji se ugao obrtanja meri. Potrebno je izmeriti ugao obrtanja diska. Na disku se nalazi nekoliko koncentričnih putanja, a na svakoj od njih smenjuju se prozirna i neprozirna polja (sl. 6.6.) Pri tome, na raznim putanjama razmaci su različiti.



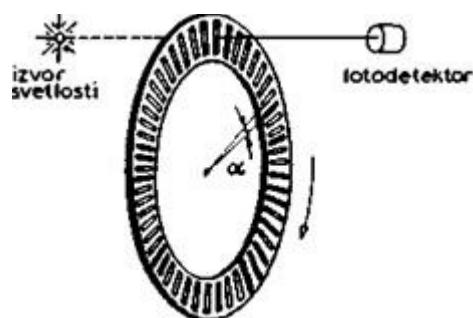
Sl.6.6 Princip rada apsolutnog enkodera

Na jednom mestu na disk pada svetlosna linija koja ide od centra na obodu i preseca sve koncentrične putanje (si. 6.6b). Duž iste linije, ali ispod diska, postavljen je niz foto-detektora tako da se po jedan nalazi ispod svake koncentrične putanje. Sa slike se vidi da će, duž svetlosne linije, negde da se nade prozirno, a negde neprozirno polje. Kroz neku od koncentričnih putanja svetlost će proći, a kroz neke ne. Foto-detektori registruju da li je kroz neku putanju prošla svetlost ili ne. Ako sa 0 označimo detektor koji nije registrovao svetlost, a sa 1 onaj koji jeste i ako detektore posmatramo od oboda ka centru, tada ćemo dobiti niz nula i jedinica. U primeru na slici 6.6b, dobićemo niz 0 10 0. Ovaj niz predstavlja traženu vrednost ugla izraženu u binarnom brojnem sistemu. Ako se sada ulazna osovinu i disk obrnu, promeniće se raspored prozirnih i neprozirnih polja na koje pada svetlost. Tada ćemo dobiti drugačiji niz nula i jedinica, odnosno drugu vrednost ugla. Na izlazu uređaja dobijamo vrednost izmerenog ugla u binarnom kodu, dakle, informaciju o uglu u digitalnom obliku.

Umesto ploče sa prozirnim i neprozirnim poljima može se koristiti ploča sa prorezima ili, pak, ploča sa ogledalima kada detektor registruje odbijeni zrak.

Treba ukratko objasniti i način funkcionisanja fotodetektora. To je element koji, ako se osvetli, proizvodi električni napon od na primer 2,5 V. Uređaj meri napon na svakom detektoru i ako se pojavi 2,5 V smatraše daje detektor osvetljen i pridružuje mu se binarna cifra 1. Ako napona nema, onda tome detektoru odgovara cifra 0.

b) Inkrementalni enkoder. Ovaj enkoder je takođe optički uređaj za merenje ugla. Osnovni deo uređaja je disk koji je vezan za ulaznu osovinu čiji ugao obrtanja merimo. Na disku se nalazi niz zareza (ili prozirnih površina) kao što je prikazano na slici 6.7. Uglovni razmak između svaka dva zareza je $\alpha = 2\pi/K$, gde je K ukupni broj zareza.



Sl. 6.7. Princip rada inkrementalnog enkodera.

Sa jedne strane diska nalazi se svetlosni izvor, a sa druge strane foto-detektor. Disk je neprozirnog materijala dok kroz zareze svetlosni snop može da prođe. Disk se obrće zajedno sa ulaznom osovinom i pri tom obrtanju foto-detektor će registrovati svetlost svaki put kad snop svetlosti naiđe na zarez. Na taj način dobija se signal u obliku naponskog impulsa svaki put kada se ugao obrtanja poveća za α . Sam optički deo instrumenta ne daje vrednost ugla, već samo signalizira priraštaj ugla. Zato se uz optički deo dodaje elektronski brojač koji broji impulse dobijene od foto-detektora. Ako je pri obrtanju diska iz nekog nultog položaja brojač izbrojao m impulsa, tada je vrednost ugla jednaka $m\alpha$.

Inkrementalni enkoder daje na izlazu brojnu vrednost ugla, dakle digitalni oblik merene veličine.

6.2.4. Senzori brzine

U prethodnim odeljcima razmotrili smo ukratko i prenos pogona od motora do zgloba. To je bilo neophodno da bismo uočili mesta za postavljanje mernih uređaja. Ukazano je i na relacije koje omogućavaju posredno merenje ugla q_j i brzine \dot{q}_j , npr. relacije (6.1.) i (6.2.).

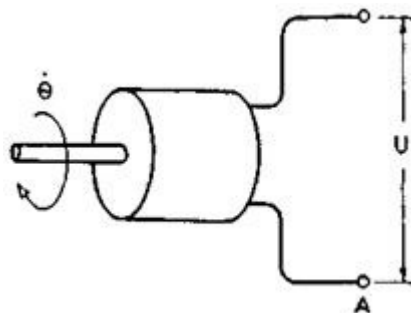
Ovde ćemo razmotriti uređaje koji služe za merenje ugaonih brzina obrtanja u zglobovima. Ukoliko je zglob translatorski, njegova brzina produženog pomeranja ne meri se direktno, već se pretvara u odgovarajuće obrtanje koje se može meriti.

a) Tahogenerator. Ovaj uređaj je po konstrukciji sličan motoru jednosmerne struje sa stalnim magnetima. Funkcija mu je, međutim, obratna, ovde radi kao generator. Radi se o tome da svaki motor može biti istovremeno i generator. S obzirom na to da je konstrukcija ista, to će i

jednačine koje opisuju ponašanje ovog uređaja biti iste kao za motor jednosmerne struje. Krenimo zato od jednačina izvedenih u odeljku 3.2.1.

Posmatrajmo jednačinu (3.5.) koja opisuje električne pojave u ovakvom uređaju. Ako su krajevi A i B na slici 6.8. slobodni, tada nemamo zatvoreno kolo i kroz uređaj ne protiče struja. Ako u jednačini (3.5.) stavimo $i=0$ tada će napon u na krajevima uređaja biti jednak indukovanj elektromotornoj sili tj.

$$u = C_E \dot{\theta} \quad (6.12)$$



Sl. 6.8. Tahogenerator

Kako je u pitanju generator, to pod ulazom podrazumevamo ugaonu brzinu obrtanja osovine tj. veličinu koju treba izmeriti, a pod izlazom podrazumevamo napon u . S obzirom na relaciju (6.12.) napon u sadrži informaciju o merenoj brzini $\dot{\theta}$, ili preciznije, napon je proporcionalan brzini. Dakle, tahogenerator daje podatak o brzini u analognoj formi.

b) Digitalni tahometri. Ovi uređaji rade na principu brojača, dakle slično kao inkrementalni enkoder. Broje se impulsi dobijeni od fotodetektora na koji pada svetlost nakon prolaska kroz zareze na obrtnom disku. Tako se meri ugaon, a kada se podeli sa vremenskim intervalom dobija se ugaona brzina. Na ovaj način, na izlazu uređaja dobija se podatak o ugaonoj brzini u digitalnom obliku.

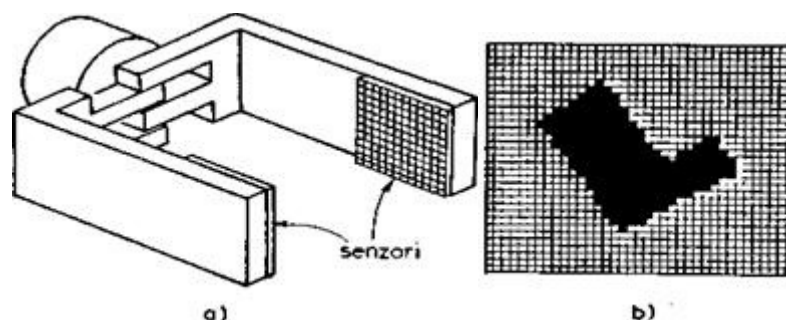
6.3. SENZORI DODIRA I SILE

U ovom odeljku razmatramo senzore koji donekle spadaju u dve različite kategorije. Senzori dodira su binarni uređaji tj. daju informaciju o dodiru u obliku 0 ili 1. Senzori sile, pak, imaju namenu da mere različite sile i momente. Veza ovih kategorija senzora ostvaruje se u poslednje vreme tako što senzori dodira prestaju da budu binarni i počinju da mere silu dodira.

6.3.1. Binarni senzori dodira

Ovi uređaji signaliziraju dodir sa nekim predmetom. Konstruktivno, u pitanju su najčešće različite vrste mikroprekidača. To su, posle senzora položaja i brzine, prvi senzori korišćeni u robotici. Najčešće se koriste kao senzori hvatanja tako što se postavljaju na unutrašnju stranu prstiju hvataljke. Robot sada "zna" da li je uhvatio predmet ili ne. Ovi senzori se mogu koristiti i kao spoljašnji senzori. Postavljeni na spoljašnju stranu hvataljke oni omogućavaju robotu da pipajući iz-begava prepreke ili pronalazi traženi predmet. Međutim, za ove namene razvijeni su znatno savršeniji sistemi, pa binarni senzori dodira uglavnom ostaju u upotrebi kao senzori hvatanja. Ipak, i tu dobijaju veće mogućnosti. Površinski raspoređeni, oni formiraju senzorski sistem koji omogućava i identifikaciju oblika uhvaćenog predmeta. Na slici 6.9a. prikazana je

hvataljka opremljena površinskim binarnim sistemom dodira. Slika 6.9b. prikazuje senzorsku sliku uhvaćenog predmeta.



Sl. 6.9. Površinski binarni sistem dodira

6.3.2. Podela senzora sile

Merenje sile može se zasnivati na dva različita pristupa. U prvom pristupu, koriste se materijali koji pod dejstvom sile, dakle, kada su mehanički napregnuti, menjaju neke svoje fizičke osobine, na primer, električnu otpornost, dielektričnu konstantu itd.

Drugi pristup zasniva se na merenju elastične deformacije. Ovakvi merni uređaji sadrže bar jedan elastični elemenat. Pod dejstvom sile elastični elemenat se deformiše, pa se tako dobija pomeranje koje sadrži podatak o primenjenoj sili. Često je deformacija proporcionalna sili. Tako, merenjem pomeranja merimo posredno silu. Uređaji koji na ovaj način mere silu veoma se razlikuju zbog toga što se merenje pomeranja može izvesti na niz različitih načina.

6.3.3. Senzori sa materijalima koji reaguju na mehanička naprezanja

Materijali koji pod dejstvom mehaničkog napona i deformacije menjaju svoje fizičke osobine omogućavaju direktno merenje sile. Najčešće se koriste tzv. piezorezistivni materijali tj. oni koji menjaju specifičnu električnu otpornost kada su izloženi mehaničkom naponu i deformaciji.

Jedan od piezorezistivnih materijala je silicijum i on se koristi za izradu senzora koji se nazivaju poluprovodničke merne trake. Silicijum se oblikuje u male trake koje se izlažu istezanju. Pri tome dolazi do povećanja dužina trake (l) i to je jedan od uzroka promene njene otpornosti. Drugi uzrok leži u promeni specifične otpornosti (ρ) silicijuma. Ovaj drugi efekat je kod poluprovodničkih traka znatno važniji od prvog. Promena otpornosti usled promene ρ višestruko je veća od promene otpornosti usled promene l .

Silicijumu koji se koristi za izradu traka dodaju se različite primese (dopiranje) čime se smanjuje osetljivost senzora na temperaturu ali se istovremeno smanjuje i osetljivost za merenje malih sila.

Postoje i drugačije merne trake - otporničke, kod kojih je dominantan uticaj promene dužine. One će biti opisane u odeljku 6.3.5. Način korišćenja jednih i drugih mernih traka je isti i biće objašnjen u odeljku 6.3.5.

Osim silicijuma, postoje i drugi piezorezistivni materijali. Obično su u pitanju različiti izolatori ili slabi poluprovodnici kojima se dodaju čestice provodnika. Koristi se, na primer, guma impregnirana zrcima grafita. Piezorezistencija se manifestuje na sledeći način: Kada se guma pritisne, dolazi do njenog ugibanja i grafitna zrnca se zbiju jedno uz drugo, što izaziva smanjenje električne otpornosti. Promene otpornosti zavisi od deformacije, pa tako i od primenjene sile. Osnovni nedostatak ovakvog sistema je njegova prilično strma karakteristika. Naime, do određene vrednosti sile grafitna guma se ponaša kao izolator, da bi nakon prelaska te vrednosti (praga) senzor dosta brzo stigao u zasićenje i ponašao se kao provodnik konstantne otpornosti. Zbog ovakve karakteristike smanjena je mogućnost merenje različitih sila. Tako se ovaj senzor približava karakteristikama binarnih senzora koji detektuju samo prisustvo sile.

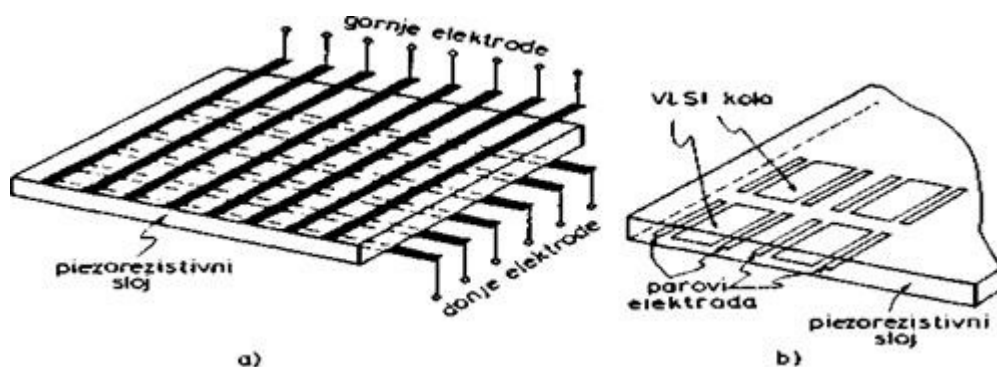
Druga grupa materijala (različite polimerne plastike) pokazuje osobinu promene dielektrične konstante u prisustvu mehaničkog napreznja. Ovi materijali koriste se za izradu kapacitivnih senzora sile, no oni još nisu u široj primeni.

Specifičnu grupu senzora sile čine senzori zasnovani na korišćenju piezoelektričnog efekta. Ovaj naziv označava pojavu da određeni materijali, kada se izlože dejstvu sile, proizvode na svojim krajevima potencijalnu razliku - električni napon. Merenjem ovog napona možemo odrediti i silu. Ovde, međutim, treba biti precizniji: piezoelektrični materijali reaguju na promenu sile. U dopuni još treba naglasiti da dobijeni napon relativno brzo opada i konačno nestaje. Na primer, ako senzor opteretimo silom F , pojaviće se na njegovim krajevima napon U , koji će potom opadati do nule, iako sila još uvek dejstvuje. Ako sada ukinemo silu, senzor će na ovu promenu reagovati stvarajući napon $-U$. Tako detektujemo promenu sile $-F$. Zbog ovakvih karakteristika, piezoelektrični senzori koriste se uglavnom za različita dinamička merenja.

6.3.4. Površinski senzorski sistem sile — veštačka koža

U prethodnom odeljku opisani su senzori sile kao pojedinačni elementi. Funkcionalnim raspoređivanjem većeg broja elemenata mogu se dobiti linijske ili površinske strukture osetljive na silu. Ove strukture obično nazivamo linijskim ili površinskim senzorskim sistemom za silu. Ovakvi sistemi pružaju kvalitativno nove mogućnosti u odnosu na pojedinačne senzorske elemente. Oni, u određenoj meri, zamenjuju čulo dodira i omogućavaju saznavanja oblika predmeta, neravnina na površini i sl.

Površinski senzorski sistem može se sastaviti od pojedinačnih elemenata od kojih svaki funkcioniše samostalno, a dobijeni podaci se zatim obrađuju radi dobijanja skupne informacije. Drugačiji pristup je formiranje jedinstvenih površinskih struktura kojima se upravlja kao celinom. Jedan način za dobijanje ovakve strukture prikazan je na slici 6.10a.



Sl. 6.10. Površinski senzorski sistem sile

Sistem se sastoji od niza paralelnih provodnika (elektroda) koji je od drugog niza provodnika odvojen slojem napravljenim od materijala koji menja električnu otpornost kada se izloži mehaničkom pritisku. Kako su "gornji" provodnici postavljeni pod pravim uglom u odnosu na "donje", onda svaka tačka ukrštaja predstavlja jedan senzorski elemenat. Kada se gornja površina pritisne, tada se, u zavisnosti od raspodele sile, pojavljuje određena raspodela mehaničkog napona i deformacije u međusloju. Zavisno do veličine mehaničkog napona u pojedinim tačkama menja se i električna otpornost. Očitavanje senzorskog sistema vrši se na sledeći način. Pobuđuje se električnim impulsom jedan od gornjih provodnika i posmatraju se od-zivi na donjim provodnicima. Time se očitava jedan linijski niz elemenata. Zatim se pobuđuje drugi gornji provodnik, i tako redom dok se ne očita cela površina. Očitani podaci se sada obrađuju kako bi se dobila celovita informacija.

Jedan od zahteva koji se postavljaju pri izboru piezorezistivnog materijala za međusloj je njegova savitljivost. Senzorska površina će tada moći da se savija i deformiše i tako nalaže, po potrebi, na krive površine. Zbog svih opisanih svojstava i mogućnosti koje pruža ovakav senzorski sistem nekada nazivamo veštačka koža.

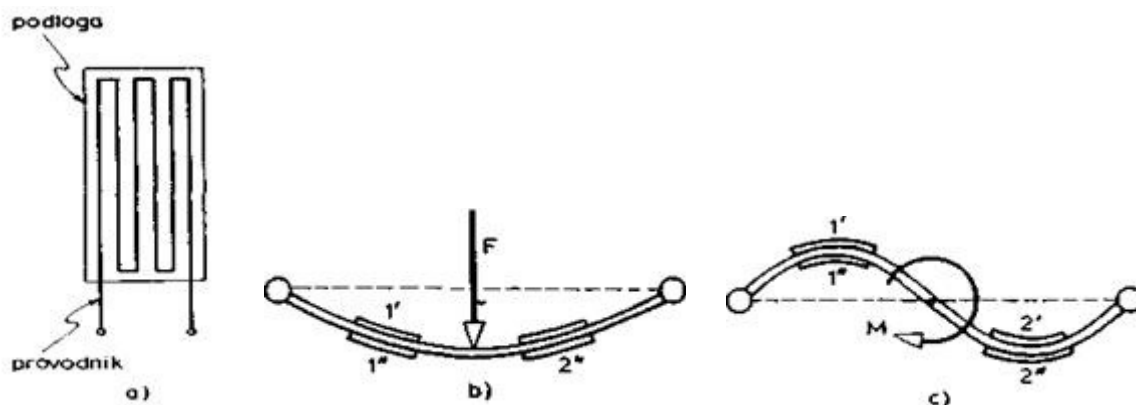
Jedan od problema koji se javljaju kod opisane konstrukcije senzorske površine leži u relativno složenom načinu očitavanja i obrade podataka. Zato se ide za tim da se obrada vrši lokalno, na samom mestu senzorskog elementa. Elektronska kola koja vrše obradu izrađuju se u VLSI ("very large scale integrated")1 tehnici i ugrađuju u samo senzorsko polje (slika 6.10b).

6.3.5. Merenje sile na osnovu elastične deformacije

Već je ranije istaknuto da ovakvi merni uređaji sadrže bar jedan elastični elemenat. To može biti opruga, neki konzolni elemenat ili bilo koja druga defor-mabilna struktura. Sila koja se meri deluje na taj elemenat izazivajući njegovu deformaciju. Ovu deformaciju najčešće merimo tako da je svedemo na neko translatorno pomeranje ili promenu neke dužine. Senzori ove vrste razlikuju se međusobno po načinu merenje ovih pomeranja. Navešćemo nekoliko karakterističnih načina.

a) Otporničke merne trake²

Ovi senzori mere pomeranje na osnovu promene električne otpornosti pri promeni dužine otpornika. Traka se sastoji od otporne žice savijene kao što je prikazano na slici 6.11a i zatim postavljene na savitljivu podlogu oblika trake. Ukoliko se traka isteže, povećava se dužina žice, a time i otpornost. Otpornost dopunski raste i usled promene specifične otpornosti ali je prvi efekat dominantniji. Promena otpornosti meri se mernim mostom.



SI. 6.11. Otpornička merna traka i njeno postavljanje

U odeljku 6.3.3. govorili smo o poluprovodničkim mernim trakama kod kojih se pod dejstvom mehaničkog napona menjala specifična otpornost. Za razliku od njih, kod otporničkih mernih traka promena otpornosti je većim delom posledica promene dužine otpornika. Međutim, primena obe vrste traka je veoma slična. Na slici 6.11 b,c prikazan je jedan mogući način merenja sile i momenta. Kao elastični elemenat koristi se elastična greda, a trake se postavljaju u parovima (par 1,1 i par 2,2). Primer pokazuje da se isti uređaj može koristiti i za merenje sile i za merenje momenta. U slučaju dejstva sile (sl. 11b), trake 1 i 2 će se izdužiti, a trake 1 i 2 skratiti. Par 1—1 određuje deformaciju levog dela grede, a par 2—2 defomraciju desnog dela. Trake koje sačinjavaju par vezuju se, pri merenju otpornosti, diferencijalno kako bi se postigla temperaturska i druga kompenzacija. Promena otpornosti je tada

$$\Delta R = R'' - R' = R + \Delta R'' - (R - \Delta R) = \Delta R'' + \Delta R' \quad (6.13)$$

Na ovaj način par 1'—1" daje očitavanje δ_1 , a par 2'—2" očitavanje δ_2 . Tako, u slučaju dejstva sile F očitavanja δ_1 i δ_2 su oba pozitivna ($\delta_1 > 0$, $\delta_2 > 0$) i zavisna od veličine sile.

Ako na gredu deluje spreg momenta M (sl. 6.11c) tada će se trake 1' i 2" izdužiti, a 1" i 2' skratiti. Takve promene dužina manifestovaće se preko negativnog očitavanja δ_1 i pozitivnog očitavanja δ_2 ($\delta_1 < 0$, $\delta_2 > 0$). Veličine očitavanja zavisice od veličine momenta M .

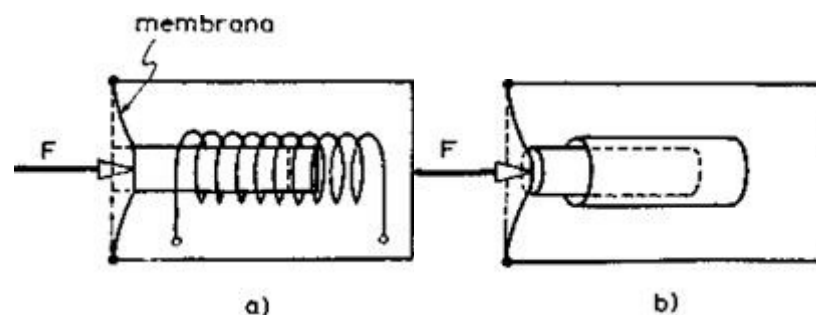
U slučaju jednovremenog dejstva sile i momenta, njihove veličine se određuju na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{F1} & a_{F2} \\ -a_{M1} & a_{M2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix}$$

gde se koeficijenti a_{F1} , a_{F2} , a_{M1} i a_{M2} određuju kalibracijom senzora. Pri ovome je pretpostavljena linearna karakteristika senzora (zavisnost F , M od očitavanja δ_1 , δ_2).

b) Induktivni i drugi pretvarači

Na slici 6.12a prikazan je princip merenja sile zasnovan na merenju pomeranja induktivnim pretvaračem. Kao elastični elemenat koristi se elastična membrana. Pod dejstvom sile, membrana se ugiba i time se pomera jezgro kalema. Pomeranjem jezgra menja se induktivnost kalema. Tako se merenjem induktivnosti određuje vrednost sile.



SI. 6.12. Princip rada induktivnog i kapacitivnog pretvarača

Na sličan način može se formirati i kapacitivni pretvarač. Radi se o promeni kapacitivnosti kondenzatora pri pomeranju unutrašnje obloge (sl. 6.12b).

6.3.6. Šestokomponentno merenje sile

Pod šestokomponentnim merenjem sile podrazumevamo, zapravo, merenje vektora sile F koji sadrži tri skalarne komponente i istovremeno merenje vektorskog momenta M koji takođe sadrži tri skalarne komponente. Dakle, radi se o silama duž tri ose i momentima oko te tri ose. Tako dolazimo do šestokomponentnog vektora koji ćemo označavati sa (FM).

$$(FM) = [F_x F_y F_z M_x M_y M_z]^T \quad k$$

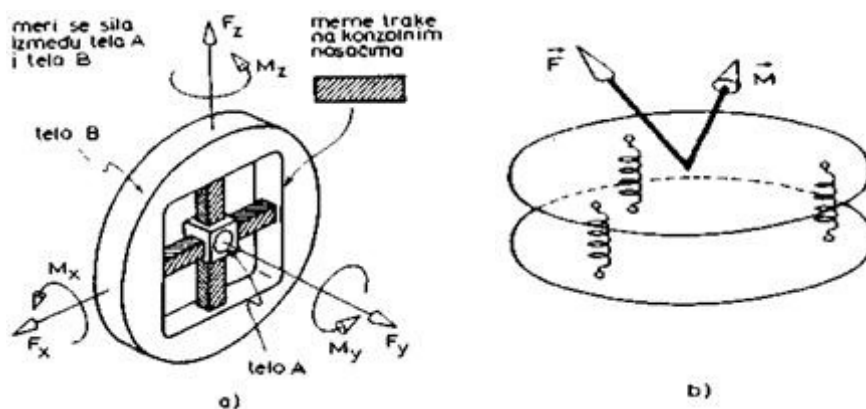
Jedan od načina da se izvrši šestokomponentno merenje prikazan je na slici 6.13a. Osmam parova mernih traka postavlja se na četiri međusobno normalna konzolna nosača. Pri dejstvu sile F i momenta M dolazi do deformacija ovih nosača i do promena dužina mernih traka. Očitavanjem parova traka dobija osam podataka $\delta_1, \dots, \delta_8$ koji formiraju vektor očitavanja

$$\Delta = [\delta_1 \dots \delta_8]^T \quad k$$

Izračunavanje tražene sile i momenta sada je analogno postupku opisanom u prethodnom odeljku. U slučaju linearne karakteristike senzora, očitavanja $\delta_1, \dots, \delta_8$ se po određenoj shemi međusobno sabiraju i oduzimaju, a zatim množe sa koeficijentima proporcionalnosti koji su određeni kalibracijom. Ova transformacija može se predstaviti matrično:

$$(FM) = A \Delta \quad (6.16)$$

gde je A matrica transformacije dimenzija (6 x 8).



Sl. 6.13. Dva načina vektorskog merenja sile i momenta

Drugi način za šestokomponentno merenje sile koristi tri elastična elementa kojima su povezana dva kruta tela (sl.6.13b). Pri dejstvu sile i momenta gornje telo se pomera u odnosu na donje. Sila i moment se određuju na osnovu međusobnog položaja dva tela. Kako je taj položaj određen sa šest parametara to je potrebno najmanje šest mernih elemenata. U jednoj praktičnoj realizaciji međusobno pomeranje mereno je induktivnim pretvaračima.

Šestokomponentni senzori sile se u literaturi na engleskom često nazivaju "wrist sensors". To je otuda što se često pojavljuju na spoju završnog uređaja i poslednjeg zgloba. Tako postavljen,

on omogućava određivanje sile i momenta koje robot ostvaruje prema predmetu čiju obradu vrši ili prema svojoj okolini uopšte.

6.4. SENZORI BLIZINE I RASTOJANJA

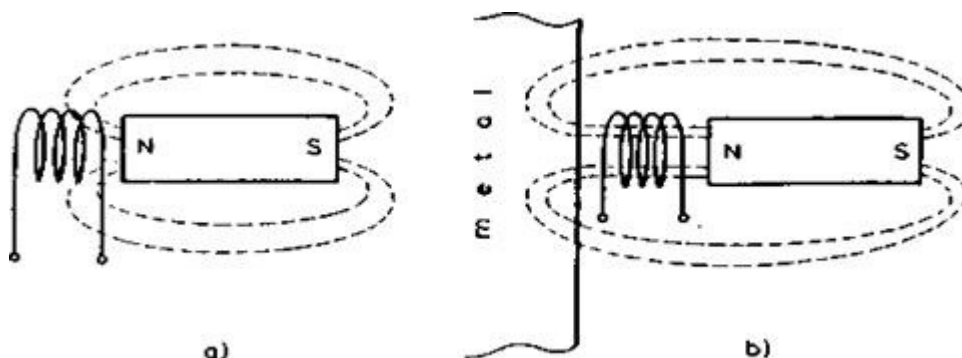
6.4.1. Senzori blizine

Senzori blizine detektuju prisutnost nekog objekta u svojoj blizini. Oni su predviđeni da rade kao binarni uređaji koji daju signal ukoliko je neki predmet unutar zadate zone. Granično udaljenje na kome senzor daje signal može biti različito, od nekoliko milimetara, pa do jednog metra i više.

Radna karakteristika senzora ne mora biti binarna. Njihov izlazni signal često je funkcija udaljenja ali, po pravilu, nedovoljno pogodna da bi omogućila merenje udaljenja. Zato se prateća elektronika projektuje tako da se istakne binarni karakter senzora.

Naznačićemo nekoliko pristupa detektovanju blizine.

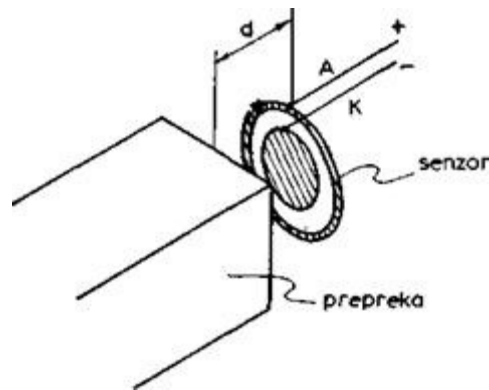
Induktivni senzori detektuju prisustvo metalnih predmeta na osnovu promene induktivnosti. Funkcionisanje senzora može se objasniti slikom 6.14. Ako u blizini nema metalnih predmeta slučaj (a) formira se određeno magnetno polje stalnog magneta karakterisano magnetnim linijama. Ako se približi, na primer, gvozdeni predmet slučaj (b), magnetne linije se izdužuju. Pri tome one presecaju namotaje kalema i u kalemu se indukuje elektromotorna sila koju možemo detektovati.



SI. 6.14. Induktivni senzor blizine

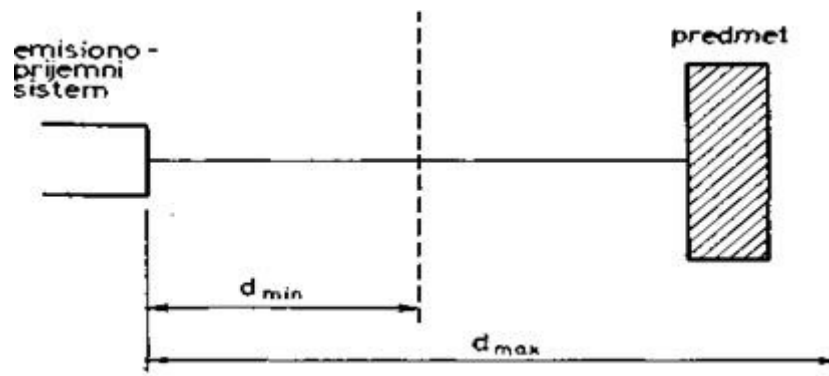
Kapacitivni senzori rade na principu detektovanja promene kapacitivnosti kondenzatora. Jedna mogućnost za izvođenje kapacitivnog senzora prikazana je na slici 6.15. Kapacitivnost između elektroda A i K menjaće se pri promeni rastojanja d .

Ultrazvučni senzori detektuju blizinu na osnovu prijema odbijenog zvučnog talasa. Ako je poznata brzina ultrazvuka u radnom prostoru, ultrazvučni uređaji omogućavaju merenje udaljenja na osnovu merenja vremena koje protekne od trenutka emitovanja zvuka do trenutka prijema odbijenog signala. Ovde ćemo, međutim, posmatrati ultrazvučni uređaj kao binarni senzor. Prvo zadajemo zonu u kojoj želimo da detektujemo predmet.



SI. 6.15. Kapacitivni senzor blizine

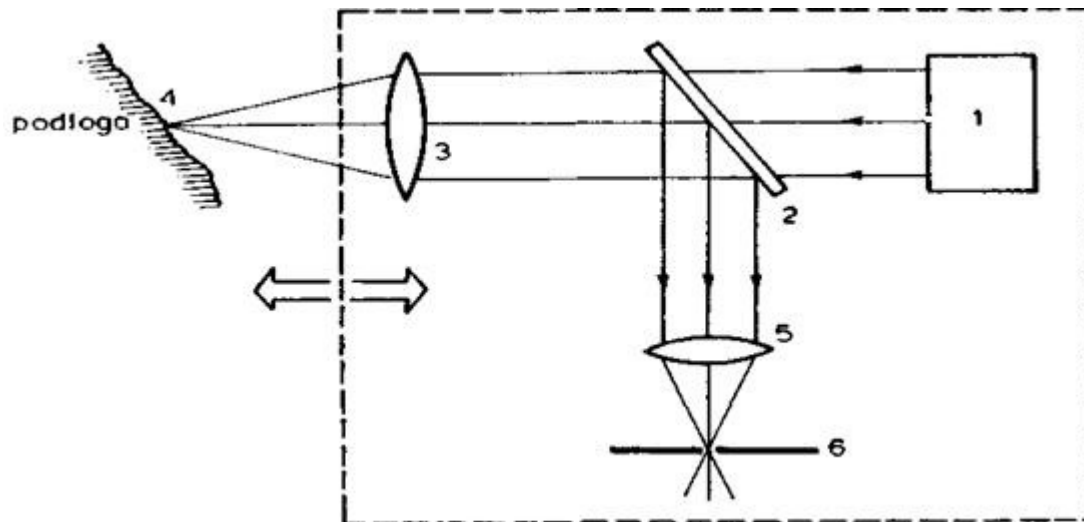
Neka je zona određena rastojanjima d_{min} i d_{max} (sl.6.16). Na osnovu poznate brzine ultrazvuka određujemo vreme t_{min} i t_{max} za koje zvuk može stići i vratiti se sa ovih rastojanja. Ultrazvuk se emituje u obliku kratkih talasnih paketa. Prijemni uređaj uključuje se u trenutku t_{min} nakon polaska paketa, a isključuje se u trenutku t_{max} . Tako, odbijeni signal će se registrovati samo ako se predmet nalazi na rastojanju koje je između d_{min} i d_{max}



SI. 6.16. Ultrazvučni detektor blizine

Optički senzori rade na principu odbijanja laserske svetlosti od podloge čiju blizinu detektujemo. Laserski uređaji najčešće se koriste kao senzori za merenje udaljenja ali ovde ćemo prikazati jednu mogućnost za izvođenje laserskog detektora blizine (sl.6.17).

Snop svetlosti iz lasera 1 prolazi kroz polupropustljivo ogledalo 2, a zatim se fokusira sočivom 3. Odbijeni snop, nakon prelaska kroz sočivo 3 i odbijanja od ogledala 2, fokusira se sočivom 5. Ukoliko je fokus 4 bio baš na podlozi, tada fokus 6 pada na dijafragmu čije oscilovanje vrši modulaciju signala. Uređaj može biti tako konstruisan da u slučaju ako fokus 4 ne padne na podlogu poseban motor vrši pomeranje uređaja sve do poklapanja fokusa sa podlogom. Na taj način održava se konstantno udaljenje od podloge.



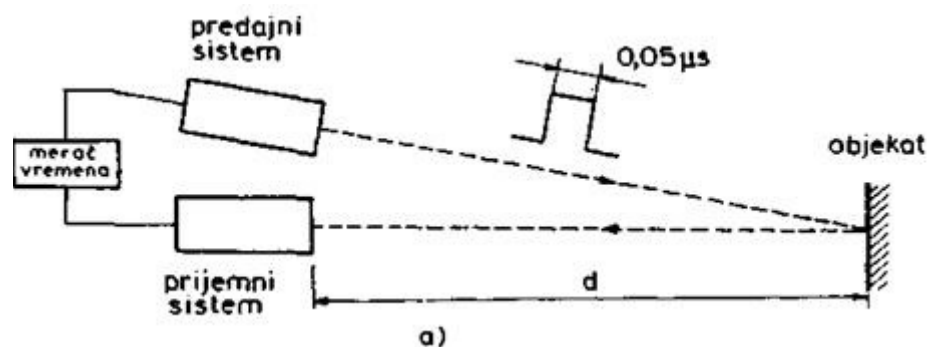
Sl. 6.17. Laserski senzor blizine

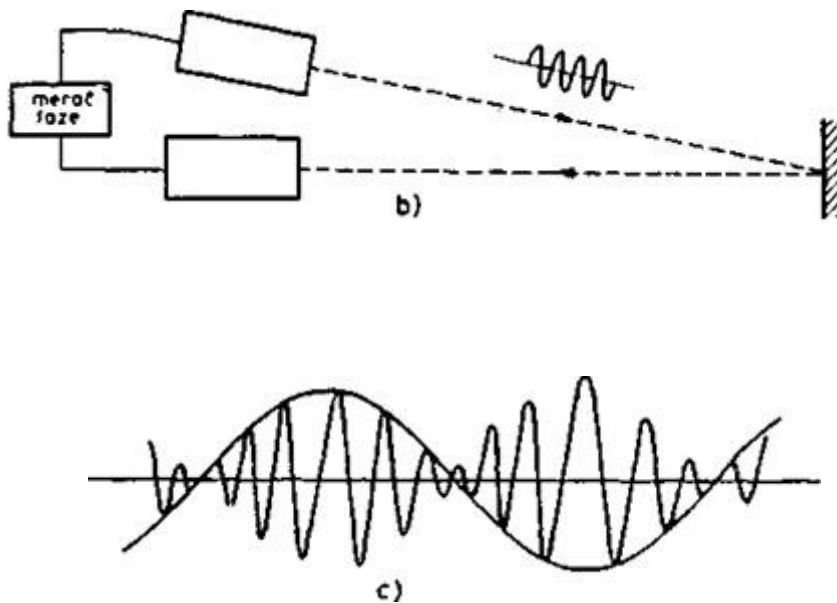
6.4.2. Senzori rastojanja

Merenje rastojanja u tesnoj je vezi sa opštim problemima vizuelnih sistema. U ovom odeljku, međutim, obradićemo neke uređaje ističući, pre svega, njihovu funkciju daljinara (merenje rastojanja) bez obzira na to što se uz određene dopune ovi sistemi mogu koristiti i za dobijanje kompletne vizuelne informacije.

Udaljenost nekog predmeta ili podloge efikasno možemo meriti na bazi emi-tovanja talasa, a zatim prijema odbijenog signala. Upotreba ultrazvuka već je naznačena u prethodnom odeljku, pa ćemo se ovde ograničiti na uređaje koji koriste lasersku svetlost. Razmotrićemo dva načina korišćenja lasera: daljinare koji rade u impulsnom režimu i daljinare sa kontinualnim režimom rada.

Laserski daljinar sa impulsnim režimom sastoji se od predajnog i prijemnog optičkog sistema i merača vremena. Pomoću predajnog sistema laserski snop se usmerava na objekat čije se udaljenje meri. Laserska svetlost šalje se u impulsima. Jedan impuls, odnosno jedan kratki osvetljaj traje približno $0,05 \mu\text{s}$. Deo svetlosti odbijene od objekta vraća se i prihvata je prijemni optički sistem (sl.6.18a). S obzirom na to da je brzina svetlosti poznata, merenjem vremena T koje protekne od trenutka slanja svetlosnog impulsa do trenutka njegovog povratka dolazimo do zaključka kolika je udaljenost posmatranog objekta: $d = cT/2$. Način merenja vremena je specifičnost svakog konkretnog tipa daljinara. Zajedničko im je to da merenje mora biti veoma precizno s obzirom na veliku brzinu svetlosti, zbog čega su vremenski intervali koje treba meriti kratki. Na primer, da bi se postigla tačnost od 1 mm pri merenju daljine, rezolucija merača vremena mora biti čak 6,7 ps.





Sl.6.18. Laserski daljinari

Ovi uređaji koji rade na principu impulsnog režima veoma su efikasni, ali se ne mogu koristiti za merenje manjih rastojanja. Ako bi, na primer, rastojanje bilo 3m, tada bi vreme putovanja svetlosti bilo $0,2 \mu\text{s}$ što je već uporedivo sa dužinom trajanja samog svetlosnog impulsa, te se dovodi u pitanje tačnost merenja. Zato se za merenje manjih rastojanja koriste laserski uređaji sa kontinualnim režimom rada.

Laserski daljinar sa kontinualnim režimom rada sastoji se od predajnog i prijemnog optičkog sistema i merača faze (sl.6.18b). Ovoga puta predajni sistem neprekidno emituje lasersku svetlost. Ako se izmeri fazna razlika \ominus između signala koji se emituju i primljenog odbijenog signala, može se odrediti pređeni put $2d$. Faza signala koji se emituje je $2\pi ft$, gde je f frekvencija, a t vreme. Faza primljenog odbijenog signala je $2\pi ft + 2\pi x/\lambda$, gde je x pređeni put, a λ talasna dužina. Kako je u trenutku prijema $x = 2d$, to je razlika faza jednaka

$$\ominus = 4\pi d / \lambda \quad (6.17)$$

odakle se izračunava udaljenje

$$d = \frac{\ominus}{4\pi} \lambda \quad (6.18)$$

Pri ovakvom određivanju rastojanja neophodno je zadovoljiti uslov $\ominus < 2\pi$ da bismo obezbedili jednoznačno rešenje. Iz ovog uslova sledi $d < \lambda/2$ čime je određena najmanja udaljenost koja se može meriti. S obzirom na to da su talasne dužine laserske svetlosti male, ovakvo ograničenje bi onemogućilo praktičnu upotrebu uređaja. Zato se daljinari sa kontinualnim režimom rada projektuju tako da predajni sistem emituje modulisanu svetlost (sl.6.18c) i vrši se merenje fazne razlike kod modulišućeg signala čija je talasna dužina znatno veća od talasne dužine laserske svetlosti.

6.5. OSTALA MERENJA

Opisaćemo merenje još nekih fizičkih veličina. Merenje ubrzanja može se izvršiti posredno, merenjem inercijalne sile. Takav senzor sadrži teg koji, u slučaju ubrzanja, svojom inercijalnom silom opterećuje element za merenje sile. Budući da je inercijalna sila proporcionalna ubrzanju, njenim merenjem smo omogućili izračunavanje ubrzanja. Kao element za merenje sile može se koristiti, na primer, piezorezistivni poluprovodnik. Uređaji (senzori) kojima se meri ubrzanje nazivaju se akcelerometri.

Merenje temperature može se izvršiti na različite načine. Spomenućemo dve mogućnosti. Jedna se zasniva na korišćenju metalnih (na primer; platinskih) termometara kod kojih se koristi efekat promene otpornosti sa temperaturom. Druga mogućnost je upotreba termosprega. Tu se koristi efekat pojave elektromotorne sile u kolu sastavljenom od dva različita metala kada se spojevi nalaze na različitim temperaturama. Pored ovih klasičnih metoda koristi se i niz savremenijih postupaka merenja temperature.

Brzina pokretnog objekta može se meriti ultrazvučnim sistemom na bazi Doplerovog efekta. Prostorna orijentacija (ugaona) pri kretanju (npr. odstupanje od vertikale) vrši se na osnovu takozvanih žiroskopskih merenja.

Spomenimo, konačno, da se nekada ukazuje potreba za merenjem i raznih drugih fizičkih veličina kao što je, na primer, brzina fluida (merenje Pitoovom cevi) koncentracija nekog gasa ili pare, itd.