

UVOD U INDUSTRIJSKU ROBOTIKU

Sadržaj:

1. UVOD.....	1
2. OSNOVNI POJMOVI.....	3
2.1 Definicija osnovnih koordinatnih sistema.....	5
2.2 Osnovni radni parametri.....	5
2.3 Osnovne konfiguracije.....	7
2.3.1 Antropomorfna konfiguracija.....	7
2.3.2 Sferna (polarna) konfiguracija.....	7
2.3.3 Cilindrična konfiguracija.....	8
2.3.4 SCARA konfiguracija.....	9
2.3.5 Dekartova konfiguracija.....	9
2.3.6 Paralelni roboti.....	10
3. KINEMATSKI MODEL INDUSTRIJSKOG ROBOTA.....	11
3.1 Direktni kinematski problem.....	11
3.2 Inverzni kinematski problem.....	11
4. OSNOVNI PODSISTEMI I KOMPONENTE INDUSTRIJSKIH ROBOTA.....	13
4.1 Mehanička konstrukcija.....	13
4.2.1 Koračni motori.....	13
4.2.2 Motori jednosmerne struje.....	15
4.2.3 Pneumatski pogonski elementi.....	18
4.2.4 Hidraulični pogonski elementi.....	19
4.3 Senzorski podsistem.....	21
4.3.1 Merenje položaja.....	21
4.3.2 Merenje sile.....	22
4.3 Kontroler industrijskog robota.....	23

Napomena: ovaj materijal je namenjen učenicima mašinske škole "Pančevo", i predstavlja, najvećim delom, sažetak udžbenika "Industrijska robotika" autora B. Borovca, M. Rakovića, G. Đorđevića, M. Rašića.

1. UVOD

Pojam robota se koristi veoma često u svakodnevnom životu. Reč robot potiče od češke reči "črobota" koja označava teški rad. Uprkos činjenici da postoji prećudna saglasnost o osobinama koje treba da poseduje (očekuje se da robot u svojoj okolini deluje autonomno, smisleno i uspešno) još uvek ne postoji opšte prihvaćena definicija robota. Iako se u prošlosti mogu naći primeri mehanizama koji su u stanju da realizuju veoma složene pokrete, oni se ne mogu nazvati robotima već samo automatima, jer mogu da realizuju samo onaj zadatak za koji su projektovani.

Za pojavu i početke razvoja robotike od suštinskog je značaja bio razvoj teorije upravljanja, računara i elektronike zbog čega su njihovi razvoji usko povezani.

1898.g. Nikola Tesla demonstrirao radijom upravljani model broda.

1946.g. Džordž Devol je razvio prvi magnetski kontroler: "Eniak", prvi savremeni računar

1952.g. Na MIT-u realizovana NC mašina.

1954.g. Osnovana je prva robotska kompanija "Junimejšn"

1956.g. Izraz "veštačka inteligencija" je uveden u naučnu terminologiju

1962.g. Instalacija prvog robota firme "Junimejšn" na poslovima opsluživanje mašine za livenje

1977.g. ASEA ponudila na tržištu dva dva industrijska robota na električni pogon.

1986.g. Na Vaseda univerzitetu na osnovu ZMP prilaza realizovan hod dvonožnog robota

2000.g. Realizovan prvi autonomni humanoidni robot ASIMO, firme Honda

2003.g. Robotizovane sonde Spirit i Oportjuniti lansirane na Mars

Postoji više definicija robota. Prema definiciji međunarodne organizacija za standardizaciju (ISO 8373) manipulacioni industrijski robot definisan je kao "automatsko upravljani reprogramabilni višenamenski manipulator sa tri ili više upravljanih osa, koji može biti nepokretan ili pokretan u odnosu na podlogu, i koji se koristi u zadacima industrijske automatizacije". Prema definiciji Japanske asocijacije za robotiku (JARA) roboti se mogu klasifikovati u šest klasa:

1. Ručno (pomoću operatora) upravljani uređaji za rukovanje materijalom,
2. Uređaj za rukovanje materijalom koji je tako konstruisan da može realizovati samo fiksni, unapred definisani, niz pokreta (eng. *fixed sequence robot*),
3. Uređaj za rukovanje materijalom koji je tako konstruisan da može ostavriti niz pokreta koji lako mogu da se modifikuju (eng. *variable sequence robot*),
4. Robot kod kojeg se kretanje može zapamtiti radi kasnijeg ponavljanje (eng. *playback robot*),

5. Numerički upravljani roboti koji imaju uređaj za ručno obučavanje prevođenjem kroz niz definisanih položaja,
6. Inteligentni roboti koji mogu da "razumeju" svoju okolinu i u stanju su da završe zadatak uprkos izmenjenim radnim uslovima.

Dok je u početku razvoj bio usmeren na primenu u industriji, danas to nije slučaj. Tako, danas, imamo: robote za domaćinstvo, robote koji se koriste u terapeutske svrhe, robote za negovanje starih i onemogućalih osoba, robote koji se upotrebljavaju za hirurške zahvate, robote čija je upotreba u industriji zabave itd.

Kada se govori o industrijskoj robotici, dva su osnovna pitanja na koja treba dati jasne odgovore. Prvo je zbog čega i kada treba koristiti robote, a drugo je kada ih ne treba koristiti. Odgovor na prvo je sledeće:

- Roboti poboljšavaju kvalitet proizvoda,
- Poboljšavaju uslove rada,
- Smanjuju troškove,
- Olakšavaju prelazak na proizvodnju drugog proizvoda.

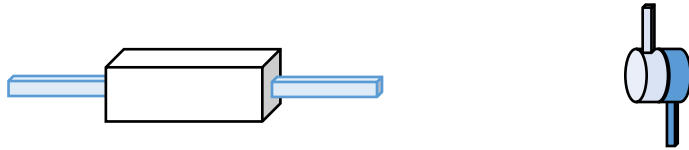
Robot postiže bolje rezultate u odnosu na čoveka u slučaju kada je u zadatku koji treba realizovati od posebnog značaja: pozicioniranje visoke tačnosti, visoka ponovljivost pri ponavljanju pokreta, eliminacija odstupanja usled zamora i pouzdano merenje i kontrola kvaliteta korišćenjem mernih pretvarača. Osim toga, na radnim mestima kojima je posao monoton i ponavljajući, na kojima se javlja potreba za čestim podizanjem teških predmeta, ukoliko je radni prostor kontaminiran (buka, isparenja, prašina...) ili ukoliko posao tokom dugog vremenskog perioda zahteva visok stepen koncentracije odnosno fokusa, treba razmišljati o uvođenju automatizacije i robotizacije. Odgovor na drugo pitanje je onda kada su prednosti čoveka u odnosu na robota značajne za realizaciju zadataka. To su:

- Čovek ima mnogo veći broj senzora koji su boljeg kvaliteta od onih koje koriste roboti. Čovek bolje koristi senzorske informacije,
- Čovek može da na osnovu svog iskustva donosi ispravne odluke čak i kada svi potrebni podaci ne postoje,
- Čovek je veoma fleksibilan i može se lako prilagoditi drugom zadatku (čak za programiranje),
- Čovek poseduje mobilnost u smislu jednostavnog prelaska sa jednog na drugo radno mesto,
- Novo radno mesto ne zahteva posebnu pripremu u smislu prilagođavanja čoveku.

Strah da će roboti zatvoriti mnoga radna mesta nije se pokazao u potpunosti opravdanim. Posle očekivanog otpuštanja na početku robotizacije u nekoj industrijskoj grani, ubrzani rast obično otvara nova radna mesta ili se, usled opšteg napretka društva, otvaraju investicije u drugim granama čime se povećava potreba za radnom snagom.

2. OSNOVNI POJMOVI

Mehanička struktura industrijskog robota se sastoji od segmenata spojenih zglobovima koji mogu biti rotacioni ili linearni (translatorni). Oba zgloba su prikazana na slici 1.



Slika 1. Translatorni i rotacioni zglob

Mehanička konstrukcija treba da omogući ostvarivanje potrebnog kretanja hvataljke (eng. *end effector*) robota tokom realizacije radnog zadatka. To znači da je potrebno da u svakoj tački putanje ostvari planiranu poziciju i orijentaciju, kao i odgovarajuću brzinu i ubrzanje. Konstrukcija realizacija zglobova koji se danas primenjuju kod industrijskih robota je takva da jedan zglob omogućava samo jedno relativno kretanje segmenata koje povezuje. Jedno kretanje koje zglob dozvoljava (translacija ili rotacija) se, po analogiji sa terminologijom u mehanici, naziva jednim stepenom slobode (SS). Obzirom da je za dostizanje proizvoljno zadate pozicije i orijentacije krutog tela u prostoru potrebno šest stepeni slobode (tri translacije duž osa koordinatnog sistema i tri rotacije oko njih) jasno je da mehanička struktura robota koja treba da obezbedi pozicioniranje vrha robota u bilo kojoj tački svog radnog prostora sa proizvoljnom orijentacijom mora da ima šest jednostrukih, odgovarajuće spregnutih, zglobova jer na taj način mehanička struktura robota obezbeđuje šest stepeni slobode kretanja vrha robota. Stoga je jasno da, kada je u pitanju mehanička struktura sa šest stepeni slobode, za proizvoljno zadatu poziciju i orijentaciju hvataljke u prostoru postoji samo jedno rešenje (samo jedan skup vrednosti pomeraja u zglobovima) koje obezbeđuje da hvataljka bude u zadatoj poziciji sa traženom orijentacijom. U slučaju da mehanička struktura ima više od šest stepeni slobode postoji više mogućih položaja zglobova (teoretski, beskonačno mnogo) sa kojima se ostvaruje tražena pozicija i orijentacija hvataljke. Roboti čija mehanička struktura koja nosi hvataljku ima više od šest, prostorno raspoređenih, zglobova (stepeni slobode) su uvek *redundantni*¹. Treba uočiti da se redundantnost definiše kao razlika u broju stepeni slobode koje zahteva realizacija radnog zadatka i broja stepeni slobode koje poseduje mehanička struktura robota. Ako robot poseduje "višak" stepeni slobode za određeni zadatak on je za taj zadatak redundantan. U suprotnom slučaju nije. Prema tome, za neki zadatak robot koji ima šest ili manje stepeni slobode može, dok za neki drugi zadatak ne mora biti redundantan.

Prvi zglob, računato od osnove je fiksiran za podlogu, dok je na poslednji pričvršćena hvataljka. Ukupna mehanička konfiguracija se uobičajeno deli na dve celine: prva tri segmenta sa

¹ Redundantnost daje slobodu da zahtevanu poziciju i orijentaciju hvataljke ostvarimo sa više položaja mehaničke strukture tj. možemo da odaberemo položaj koji nam najviše odgovara.

pripadajućim zglobovima (računato od podloge) se nazivaju *minimalnom konfiguracijom* dok druga tri zgloba čine *zglob hvataljke*. Adekvatnim izborom uglova minimalne konfiguracije se hvataljka pozicionira u željenu tačku radnog prostora dok se zglobom hvataljke obezbeđuje zahtevana orijentacija. Celina koju formiraju poslednja tri zgloba u kinematskom lancu mehaničke strukture robota se naziva zglobom hvataljke. Uobičajeno je da su sva tri zgloba rotaciona i realizovani tako da se sve tri ose seku u jednoj tački. Obzirom da se zglob hvataljke direktno nadovezuje na minimalnu konfiguraciju jasno je da se ta tačka ne pomera u odnosu na poslednji segment minimalne konfiguracije.

Robotski manipulacioni sistem, prikazan na slici 2, se minimalno sastoji od:

- mehaničke konfiguracije osnažene aktuatorima,
- odgovarajućeg upravljačkog uređaja (kontrolera) za upravljanje kretanjem izvršnih organa, koji se obično nalazi u istom kućištu sa energetske delom sistema za napajanje aktuatora,
- uređaja za ručno navođenje robota, koji se često naziva uređajem za obučavanje (engl. *Teaching box*) tj. programiranje robota.

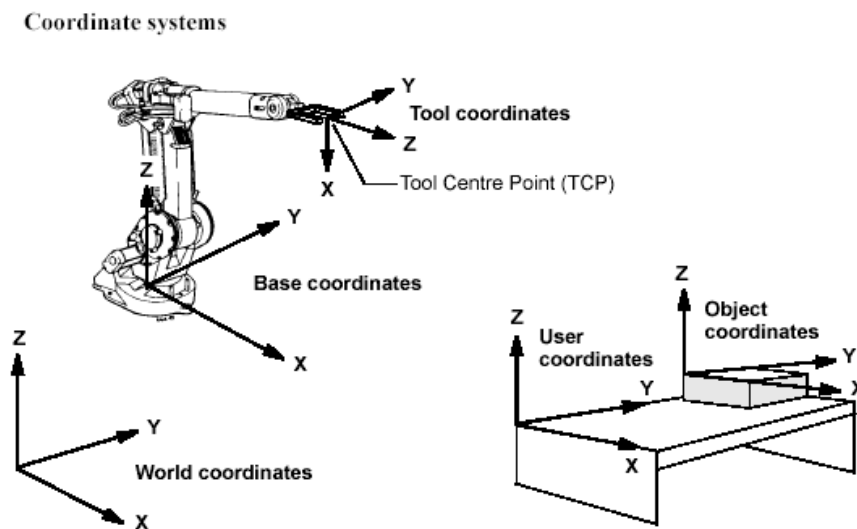


Slika 2. Industrijski robot sa kontrolerom i uređajem za ručnim navođenjem²

² <https://www.machines4u.com.au/view/advert/Panasonic-TM1400G3-Industrial-Robot-System-/385340/>

2.1 Definicija osnovnih koordinatnih sistema

U odnosu na osnovni (spoljašnji) koordinatni sistem (eng. *world coordinates*) se definiše globalni položaj robota i radnog mesta. Globalni položaj robota se opisuje položajem koordinatnog sistema osnove robota (engl. *base coordinates*). Spoljašnji koordinatni sistem i koordinatni sistem osnove robota su nepokretni i ne menjaju svoj položaj tokom realizacije zadatka. Položaj hvataljke (ili alata ukoliko ga robot nosi) se definiše posebnim koordinatnim sistem koji se postavlja u TCP (eng. *Tool Center Point*) ili u tačno definisanu tačku čiji položaj se precizira u odnosu na TCP. Položaj TCP-a definiše proizvođač robota. Koordinatni sistemi kojima se definiše položaj radnog mesta i radnog predmeta su: korisnički koordinatni sistem (eng. *user coordinates*) koji se odnosi na položaj radnog mesta i koordinatni sistem objekta (eng. *object coordinate system*) koji se odnosi na radni predmet. Ovi koordinatni sistemi prikazani su na slici 3.



Slika 3. Koordinatni sistemi³

2.2 Osnovni radni parametri

Najvažniji parametri robota su: ponovljivost, tačnost, rezolucija, veličina radnog prostora, kao i raspodela funkcije nosivosti u okviru radnog prostora.

Ponovljivost je rastojanje između ostvarene i željene pozicije ukoliko je robot u željenoj poziciji prethodno bio i zapamtio unutrašnje koordinate koji toj poziciji odgovaraju.

Tačnost je rastojanje u prostoru između ostvarene i zadate (komandovane) pozicije ukoliko robot u komandovanoj poziciji nije prethodno bio.

Ponovljivost i tačnost su pojmovi koji se često zamenjuju jedan za drugi, te je na sledećoj slici 4 prikazana kombinacija dobre i loše tačnosti odnosno preciznosti.

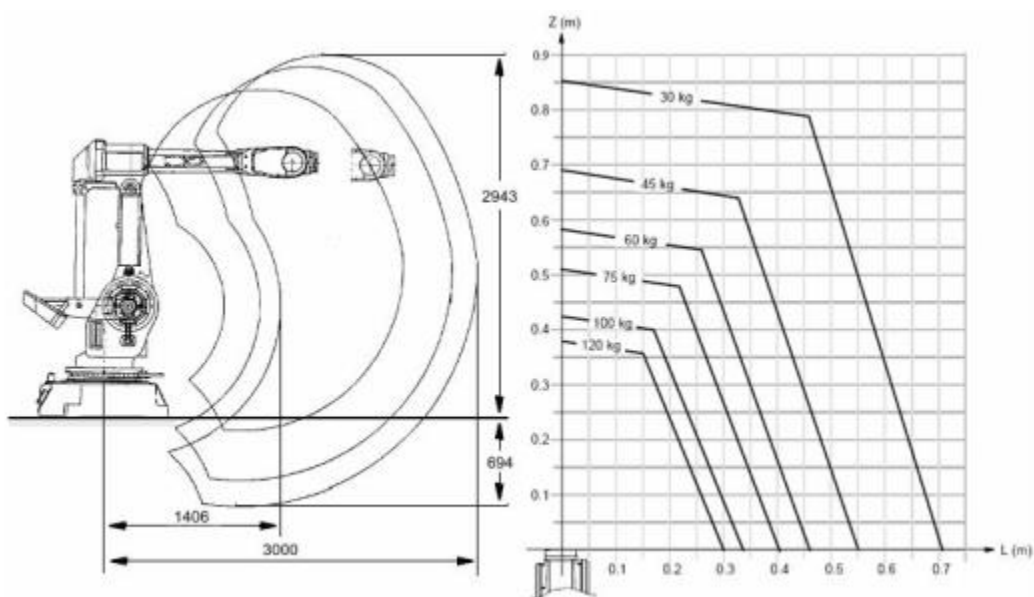
³ <http://www.ipacv.ro/proiecte/robotstudio/textbooks/file/structure.htm>



Slika 4. Dobra tačnost i loša preciznost, dobra preciznost i loša tačnost, loša preciznost i loša tačnost, i na kraju dobra preciznost i dobra tačnost

Rezolucija je najmanji pomeraj komandovanog pokreta koji se može realizovati. Veličina rezolucije je posledica ograničenog broja bitova digitalnog upravljačkog sistema robota.

Deo prostora u kome se hvataljka robota može naći, naziva se radnim prostorom (eng. *workspace*). Oblik radnog prostora zavisi od vrste i rasporeda zglobova minimalne konfiguracije, dimenzija segmenata i opsega kretanja svakog zgloba. Potpuno operativnim radnim prostorom (eng. *versatile workspace*) nazivamo radni prostor u okviru kojeg robot može u svakoj tački da ostvari bilo koju zahtevanu orijentaciju hvataljke. Maksimalnim radnim prostorom nazivamo deo prostora u okviru koga robot može da dohvati svaku tačku makar sa samo jednom mogućom orijentacijom hvataljke. U slučaju da je potrebno da se vodi računa o održavanju željene tačnosti položaja pod opterećenjem radni prostor se deli na koncentrične prostore kojima se pripisuju vrednosti nosivosti robota. Tako je radni prostor pri najvećoj nosivosti (a da je i dalje obezbeđena željena tačnost pozicioniranja) daleko manji od radnog prostora neopterećenog manipulacionog robota.



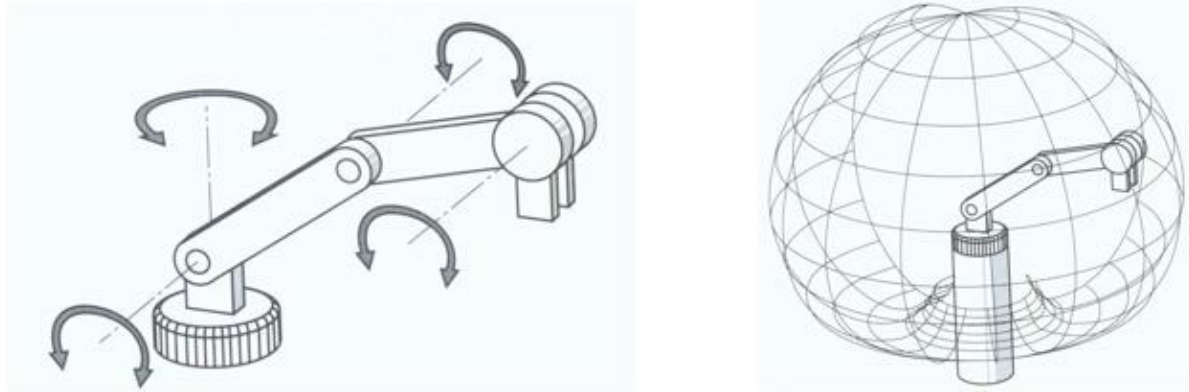
Slika 5. Radni prostor robota i maksimalno dozvoljeno opterećenje na prirubnici hvataljke na različitim pozicijama u koordinatnom sistemu osnove

2.3 Osnovne konfiguracije

2.3.1 Antropomorfna konfiguracija

Kod većine robotskih konfiguracija, pa i kod ove, prvi stepen slobode (računato od podloge) je rotacioni i osa prvog zgloba je vertikalna. Ovaj zglob obezbeđuje rotaciju kompletnog robota oko vertikalne ose. Ose drugog i trećeg zgloba su međusobno paralelne, horizontalne i upravne na osu prvog zgloba. Kretanjem drugog i trećeg zgloba se obezbeđuje da se vrh minimalne konfiguracije pozicionira u proizvoljnu tačku u vertikalnoj ravni koja sadrži osu prvog zgloba. Mehanička struktura robota antropomorfne konfiguracije podseća na strukturu ruke čoveka pa se stoga za drugi segment minimalne konfiguracije često koristi naziv nadlaktica, a za treći podlaktica. Osnovna karakteristika robota antropomorfne konfiguracije je da može da pređe iznad prepreke koja mu se nađena putu. Ako pogledamo kinematsku čemu ove konfiguracije jasno je da se pokretanjem npr. trećeg zgloba utiče na intenzitet momenta oko ose drugog zgloba čak i u slučaju da se ovaj zglob ne pomera. Ovaj uticaj se naziva sprežanjem. Stoga se kaže da, ukoliko kretanje jednog zgloba utiče značajno na pogonske momente (ili pogonske sile ukoliko su zglobovi translatorni) drugih zglobova, posmatrana konfiguracija ima značajno sprežanje među zglobovima. Roboti antropomorfne konfiguracije su karakteristični po tome što imaju veliko sprežanje među zglobovima. Robot ove konfiguracije prikazan je na slici 6.

Napomena, slike sledećih konfiguracija preuzete su sa sajta http://my.ilstu.edu/~kldevin/Introduction_to_robotics2/Introduction_to_robotics7.html.

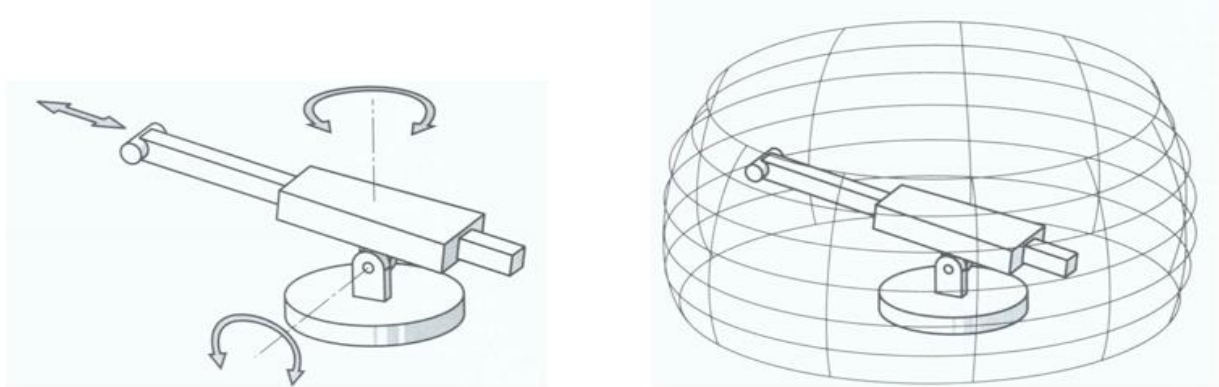


Slika 6. Antropomorfna konfiguracija

2.3.2 Sferna (polarna) konfiguracija

I kod sferne konfiguracije osa prvog zgloba je usmerena vertikalno naviše dok je osa drugog horizontalna i upravna na osu prvog zgloba. Treći zglob je translatorni. Prema tome, kod sferne konfiguracije vrsta i raspored prva dva zgloba su istovetni kao kod antropomorfne. Kao i ranije drugi i treći zglob omogućavaju pozicioniranje vrha minimalne konfiguracije u bilo kojoj tački vertikalne ravni, dok se rotacijom vertikalne ravni oko ose prvog zgloba vrh robota može

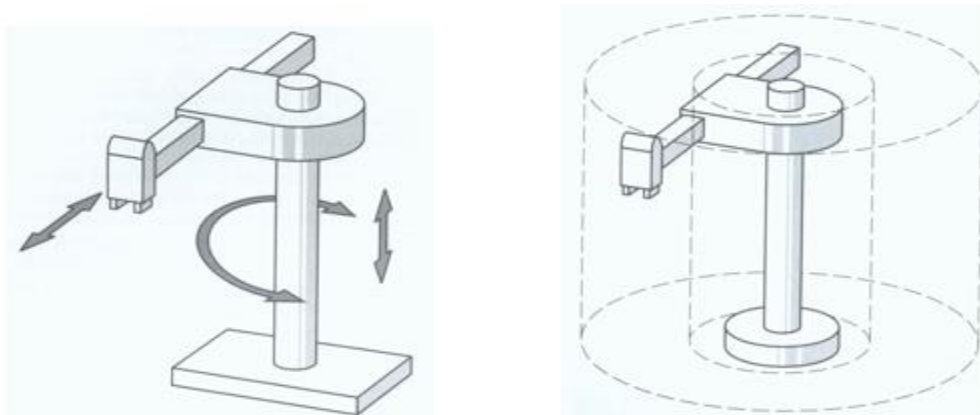
pozicionirati bilo gde u okviru radnog prostora. Ova konfiguracija je nazvana sfernom po obliku radnog prostora koji predstavlja deo sfere, a polarnom obzirom da ugao rotacije drugog zgloba i izduženje trećeg zgloba odgovaraju polarnim koordinatama. Treba primetiti da, pošto je treći zglob translatoran, prilaz radnom mestu treba da bude bez prepreka obzirom da ih robot ove konfiguracije ne može zaobići. Robot ove konfiguracije prikazan je na slici 7.



Slika 7. Sferna konfiguracija

2.3.3 Cilindrična konfiguracija

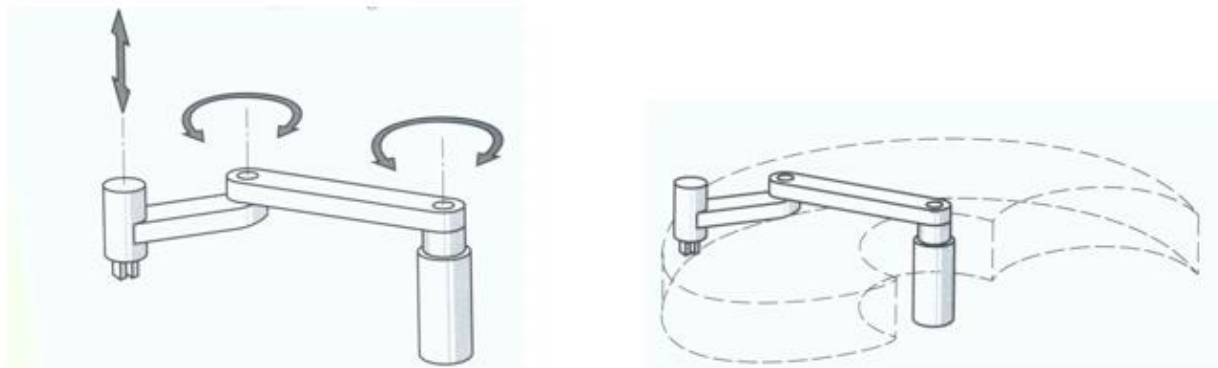
Minimalna konfiguracija robota cilindrične konfiguracije ima jedan rotacioni i dva translatorna zgloba. I kod ove, kao i kod prethodnih konfiguracija, prvi segment predstavlja obrtni stub oko vertikalne ose pa je prvi zglob rotacioni i postavljen na isti način kao i u prethodnim konfiguracijama. Drugi i treći zglob su translatorni (linearni). Osa drugog zgloba je vertikalna što znači da se njegovim kretanjem vrši podizanje odnosno spuštanje kompletne strukture koja se nalazi dalje od zgloba, prema vrhu robota. Osa trećeg zgloba je horizontalna tako da se njegovim pokretanjem vrši primicanje odnosno odmicanje hvataljke u odnosu na vertikalni stub robota. Ova konfiguracija se naziva cilindričnom prema obliku radnog prostora koji predstavlja deo cilindra. Roboti ove konfiguracije imaju veoma malo sprezanje među zglobovima. Robot ove konfiguracije prikazan je na slici 8.



Slika 8. Cilindrična konfiguracija

2.3.4 SCARA konfiguracija

Roboti SCARA konfiguracije (eng. *Selective Compliance Assembly Robot Arm*), imaju dva rotaciona i jedan translatorni zglob. Dva međusobno paralelna rotaciona zglobova sa vertikalnim osama obrtanja su postavljeni na stubnu osnovu tako da se oba segmenta kreću u horizontalnoj ravni. Na kraju drugog segmenta se nalazi translatorni zglob čija osa je takođe vertikalna. Zglob hvataljke ima najčešće samo jedan stepen slobode i to obrtanje oko vertikalne ose. Prema tome, roboti SCARA konfiguracije uobičajeno imaju samo četiri stepena slobode. Kretanjem rotacionih zglobova se vrši pozicioniranje translatornog zgloba u željenu tačku horizontalne ravni, a zatim se spuštanjem translatornog zgloba dovodi hvataljka do željenog položaja u okviru radnog prostora. SCARA konfiguracija ima veoma malo sprezanje među zglobovima obzirom da gravitaciono opterećenje u potpunosti prima sama mehanička struktura rotacionih zglobova. Odlikuju se velikom tačnošću pozicioniranja i brzinom rada, kao i relativno velikom nosivoću. Najveći nedostatak SCARA robota potiče od njegove konstrukcije - postavljen je visoko i zauzima veliki deo prostora iznad prostora u kome se obavljaju radni zadaci, tako da taj prostor mora da bude slobodan. Robot ove konfiguracije prikazan je na slici 9.

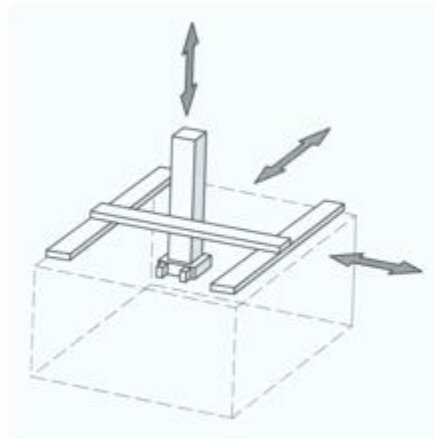


Slika 9. SCARA konfiguracija

2.3.5 Dekartova konfiguracija

Minimalnu konfiguraciju kod ovih robota čine tri translatorna zglobova čije su ose paralelne osama Dekartovog pravouglog koordinatnog sistema. Odatle potiče i naziv ovakve konfiguracije (može se sresti još nekoliko naziva: pravouglav, kartezijanska (engl. *Cartesian*) ili portalna (engl. *gantry*) konfiguracija ukoliko se robot postavi na postolje kojim se nadnosi nad radni prostor kojem pristupa odozgo). Obzirom na vrstu i raspored zglobova kod robota ove konfiguracije jasan je doprinos kretanja u svakom od zglobova kretanju hvataljke, čime je programiranje, pa čak i ručno vođenje znatno olakšano. Radni prostor predstavlja paralelepiped čije dimenzije zavise od opsega kretanja svakog zgloba. Roboti ove konfiguracije imaju veoma malo sprezanje među zglobovima. Radi smanjenja zauzetog prostora u pogonu roboti ovakve konfiguracije se veoma često postavljaju na postolje kojim se izdižu iznad radne mašine (portalni ili gantry robot). Naravno, u ovakvim slučajevima pristup radnom prostoru radne mašine mora biti slobodan odozgo.

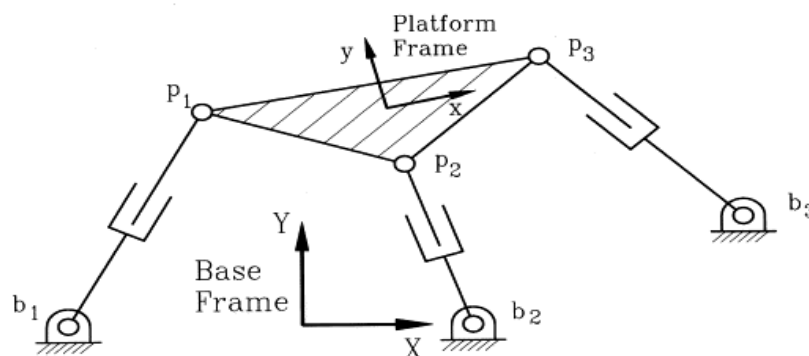
Dimenzije postolja mogu biti takve da robot može da opslužuje i po nekoliko mašina. Robot ove konfiguracije prikazan je na slici 10.



Slika 10. Dekartova konfiguracija

2.3.6 Paralelni roboti

Oni predstavljaju dve platforme (u nominalnom položaju ove platforme su paralelne) koje su povezane segmentima promenljive dužine. Jedna platforma se smatra bazom ili osnovom a druga je radna čijim položajem i orijentacijom se upravlja i na njoj se nalazi hvataljka. Promenom rastojanja između odgovarajućih zglobova na baznoj i radnoj platformi menja se položaj i orijentacija radne platforme na koju se postavlja hvataljka ili alat koji robot nosi. Promena rastojanja između zglobova na baznoj i radnoj platformi se može realizovati ili segmentima promenljive dužine (teleskopski segmenti sa translatorskim zglobovima) ili kao dvosegmentnim elementima sa rotacionim zglobovima. Roboti ove konfiguracije se odlikuju izuzetnom agilnošću (brzinom kretanja pri prelasku iz jednog položaja u drugi), velikom krutošću držanja položaja i relativno malom masom u odnosu na nosivost obzirom da svaki segment (ruka) nosi samo jednu trećinu opterećenja. Robot ove konfiguracije prikazan je na slici 11.



Slika 11. Konfiguracija jednog paralelnog robota⁴

⁴ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X99000063>

3. KINEMATSKI MODEL INDUSTRIJSKOG ROBOTA

Radi matematičkog opisa kretanja segmenata koji simultanim kretanjem određuju ponašanje hvataljke, za svaki segment se, prema određenim pravilima, postavlja koordinatni sistem koji se kreće zajedno sa njim. Pošto svaki od zglobova dopušta samo jedno relativno kretanje (rotaciono ili translatorno), položaj hvataljke je rezultat niza sukcesivnih rotacionih ili translatornih transformacija nad koordinatnim sistemima. Na taj način je moguće, poznavajući geometrijske karakteristike robota i trenutne veličine uglova u zglobovima, jednoznačno odrediti položaj i orijentaciju poslednjeg segmenta robota u odnosu na početni. Obrnut zadatak, odrediti vrednosti uglova u zglobovima tako da hvataljka bude u tačno određenoj poziciji i sa željenom orijentacijom je mnogo složeniji i nije uvek jednoznačno rešiv. Ono što se često koristi je tzv. rasprezanje robota na minimalnu konfiguraciju i zglob hvataljke. Ovo se može uraditi zahvaljujući činjenici da se u industriji često koriste sferni zglobovi za hvataljku⁵ i bez obzira na bilo koju vrednost ovih uglova položaj centra zgloba se neće promeniti. Na ovaj način se olakšava računanje dva glavna problema u robotici, već pomenuti direktni i inverzni kinematski problem.

Koordinatni sistemi se na segmente mogu postaviti na razne načine. Opšte prihvaćen dogovor o načinu postavljanja koordinatnih sistema na segmente robota je poznat kao Denavit-Hartenbergova notacija ili DH notacija. Parametri koji sačinjavaju ovu notaciju su: dužine segmenta, ugao između osa zglobova istog segmenta, smaknutost trenutnog od prethodnog koordinatnog početka i ugao međusobne zakrenutosti trenutnog i prethodnog koordinatnog sistema. Saglasno DH notaciji zaključuje se:

- koordinatni sistemi se postavljaju u zglobove robota,
- na svakom segmentu se nalaze po dva koordinatna sistema,
- prvi koordinatni sistem (posmatrano od baze) kinematskog lanca pripada prethodnom segmentu, drugi koordinatni sistem je vezan za dotični segment i njegov položaj se menja sa promenom položaja segmenta.

3.1 Direktni kinematski problem

Pod direktnim kinematskim problemom podrazumevamo određivanje pozicije i orijentacije koordinatnog sistema poslednjeg segmenta kinematskog lanca u odnosu na nepokretni (bazni) koordinatni sistem ukoliko su poznate vrednosti pomeraja u zglobovima (ugao zakretanja za rotacioni i izduženje za translatorni zglob). To se može postići postavljanjem koordinatnih sistema po pravilima DH notacije i određivanjem odgovarajućih motrica homogenih transformacija.

3.2 Inverzni kinematski problem

Inverzni kinematski problem je zadatak određivanja koordinata u zglobovima robota (uglova u rotacionim i izduženja u translatornim) koje obezbeđuju da hvataljka robota ostavi unapred zahtevanu poziciju i orijentaciju u odnosu na bazni koordinatni sistem. Ovaj problem je znatno

⁵ Tri ose tri zgloba hvataljke se seku u jednoj tački – centar zgloba

složeniji od direktnog i ne daju uvek jednoznačno rešenje. Postoje dva osnovna načina rešavanja: analitički i numerički. Analitički način računanja ima svojih prednosti poput dobijanja krajnjih izraza kao i uočavanje nekih specijalnih slučajeva, ali je znatno komplikovanije od drugog načina. Numeričko zahteva korišćenje računara ali kao rezultat dobijamo samo broj koji ne možemo koristiti kao rešenje u analitičkom obliku.

4. OSNOVNI PODSISTEMI I KOMPONENTE INDUSTRIJSKIH ROBOTA

Osnovni podsistemi i komponente koji se mogu sresti kod većine industrijskih robota su:

- mehanička struktura (specifičnosti pojedinih konfiguracija),
- pogonski podsistem,
- senzorski podsistem,
- upravljački podsistem,
- alat i/ili hvataljka.

4.1 Mehanička konstrukcija

Kod industrijskih robota najčešća mehanička konfiguracija je oblika jednostrukog kinematskog lanca kod koje se na svakom segmentu, osim na posljednjem, nalaze dva zgloba koje su vezani prethodni i naredni segment.

Osnovna karakteristika savremenih industrijskih robota se ogleda u tome što je svaki zglob mehaničke konfiguracije osnažen „sopstvenim“ aktuatorom. Sa druge strane, mada je konstrukciono najjednostavnije nije uvek opravdano postavljati motore naposredno u zglobove kinematskog lanca (pogotovu one koji su bliže hvataljci) jer oni svojom težinom mogu značajno uvećati opterećenje koje treba da savladaju motori koji su u kinematskom lancu bliže osnovi. Stoga je poželjno da se motori izmeste iz zglobova koji su udaljeni od osnove robota, i pozicioniraju što bliže vertikalnoj osi obrtanja kako bi moment inercije ukupnog sistema pri rotaciji oko vertikalne ose bio što manji.

Kod robota projektovanih samo za uske klase zadataka mehanička rešenja se mogu potpuno prilagoditi specifičnim zahtevima čime se postižu dodatni efekti kao što je npr. ušteda energije ili značajno pojednostavljanje upravljanja pri realizaciji zadataka. Tako je npr. kod robota za paletiranje neophodno da poslednja osa zgloba hvataljke bude upravna na horizontalnu ravan pri hvatanju predmeta i pri njihovom odlaganju.

4.2 Pogonski podsistem

U savremenoj industrijskog robotici se kao aktuatori dominantno koriste elektromotori jednosmerne struje. Pri njihovom korišćenju se susrećemo sa dva problema koji zahtevaju posebna rešenja.

Osim pomenutih pogonskih elemenata mogu se koristiti i koračni motori, kao i pneumatski odnosno hidraulični aktuatori.

4.2.1 Koračni motori

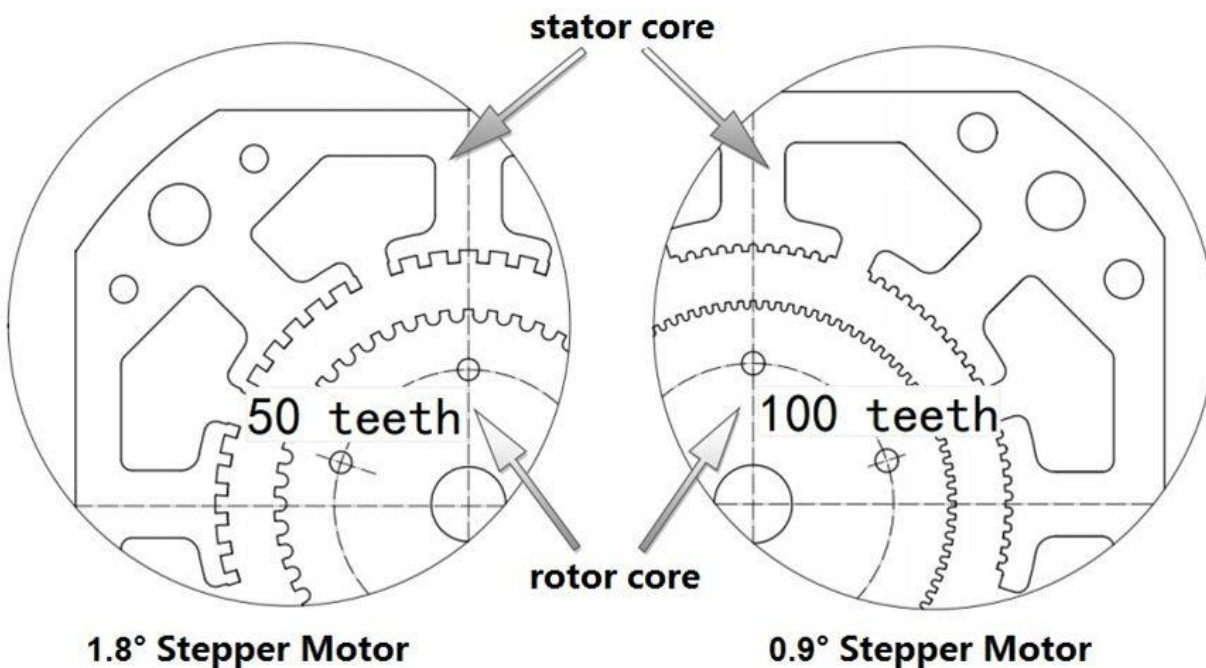
Koračni motor je vrsta elektromotora bez četkica koji pretvara digitalne impulse u konstantne ugaone pomeraje – korake. Ovi motori obezbeđuju precizno pozicioniranje vratila motora i s

tim u vezi i dalje konstrukcije, dok se upravljanje vrši računarom ili kontrolerom. Poznati su po izdržljivosti i pouzdanosti.

Po konstrukciji, koračni motori se mogu podeliti na dvofazne, trofazne i četvorofazne. To znači da će posedovati dva, tri odnosno četiri namotaja na statoru koji će obrazovati elektromagnet. U zavisnosti od oblika i broja zubaca na rotoru može se izračunati koliki će biti ugaoni pomeraj izlaznog vratila.

$$\text{Ugaoni pomeraj} = \frac{360^\circ}{\text{broj zubaca} \cdot \text{broj faza statora}}$$

Prema ovoj formuli, koračni motor koji ima 50 zubaca na rotoru i 4 faze na statoru, i prikazan je na slici 12, će imati ugaoni pomeraj ili korak od 1,8 stepena.



Slika 12. Koračni motor sa 4 faze na statoru i 50 zuba na rotoru (levo), odnosno 100 zuba (desno)⁶

U zavisnosti od upravljanja računara se pun korak (ugaoni pomeraj) ukoliko su aktivirana dva namotaja koja čine elektromagnet; polukorak, ukoliko su aktivirana dva susedna para namotaja; i mikrokorak, ukoliko je vrednost struje u namotajima podesiva.

⁶ <https://www.instructables.com/id/4-5-6-and-8-wire-Stepper-Motors/>

4.2.2 Motori jednosmerne struje

Prednosti motora jednosmerne struje su da se brzina može podešavati u širokim granicama podešavanjem napona napajanja. Ujedno se motori napajaju iz izvora jednosmernog napona, znači može i iz baterija. Mana je što imaju mehaničku komutaciju, što ograničava vek eksploatacije bez održavanja. Dalje, mehanička komutacija dovodi do dodatnih gubitaka i nesigurnosti u kontaktima pri niskim naponima napajanja, izazivaju električne smetnje (varničenje) i šum.

Glavni tipovi motora jednosmerne struje razlikuju se po načinu pobude. Ako je pobuda elektromagnetna, napajanjem namotaja statora, podela je sledeća:

- nezavisno napajanje, namotaj statora se napaja iz izvora nezavisnog kola napajanja rotora;
- paralelno napajanje, namotaj statora je vezan na isti naponski izvor koji uzrokuje i struju u namotaju rotora;
- redno napajanje, namotaj statora je redno vezan sa namotajem tako da ista struja prolazi kroz njih;
- Kombinovana pobuda, deo polja pobude se osigurava iz paralelnog deo iz rednog namotaja.

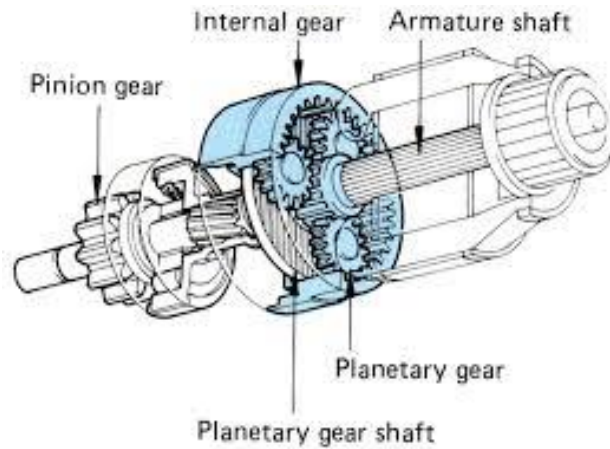
Problem mehaničke komutacije rešen je na sledeći način, razvojem efikasnih motora jednosmerne struje bez četkica (BLDC, eng. *brushless dc*). Ovakvi motori se sastoje od rotora od stalnog magneta sa nekoliko namotaja na statorskim polovima koji se mogu elektronski prekidati (vezivati na napajanje) u skladu sa pozicijom rotora. Ovi motori poseduju mehaničku robusnost višefaznih motora naizmenične struje sa dobrim osobinama motora jednosmerne struje u pogledu upravljanja po brzini. Dodatne prednosti su ravnomerno obrtanje, dug vek eksploatacije, dobre startne osobine, rad bez varničenja.

4.2.1.1 Redukcija

Elektromotori imaju daleko veći broj obrtaja a znatno manji pogonski moment od potrebnog za pogon. Da bi se taj problem prevazišao između motora i segmenata koji kotor pokreće postavljaju se posebni uređaji, reduktori, kojima se smanjuje broj obrtaja pri čemu se pogonski moment povećava.

Reduktori su mehanički prenosnici koji prenose mehaničku energiju od izlaznog vratila pogonske mašine (elektromotora) do uređaja kojem se ova energija predaje (u ovom slučaju zglob robota) pri čemu se broj obrtaja smanjuje a obrtni moment povećava. Kod realizacije industrijskih robota najčešće sesreću zupčasti reduktori i to planetarni i talasni.

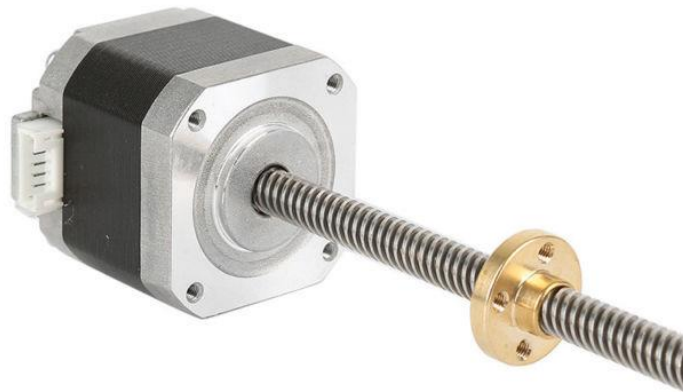
Na slici 13 prikazan je redukcionni sistem koji se direktno montira na vratilo motora. Na ovaj način se štedi prostor, što je od vitalnog značaja pri projektovanju robotskog sistema. Ovo je omogućeno zahvaljujući malim dimenzijama samog redukcionnog sistema.



Slika 13. Prikaz redukcije planetarnim reduktorom⁷

4.2.1.2 Konverzija rotacionog u translatorno kretanje

Pored ravnog cilindričnog zupčastog para (zupčanik i zupčasta letva) koji je pogodan za prenos relativno malih snaga, za pretvaranje rotacionog u translatorno kretanje se najčešće koristi navojno vreteno sa navrtkom. Navrtka uobičajeno ima pogodan oblik i danas se skoro isključivo koristi recirkulacione navrtke sa kuglicama zbog smanjenja trenja i dužeg veka trajanja. Obrtanjem navojnog vretena za jedan obrt navrtka se pomeri aksijalno za jedan korak zavojnice. Pri tome je neophodno sprečiti obrtanje navrtke. Na slici 14 je dat prikaz jedne konverzije rotacionog u linearno kretanje.



Slika 14. Prikaz motora čije se rotaciono kretanje vratila može pretvoriti u linearno kretanje

⁷ https://www.rollclub.com/wiki/index.php?title=Tech:Electrical/Starter_Motor/Planetary_Type

4.2.1.3 Kočnice

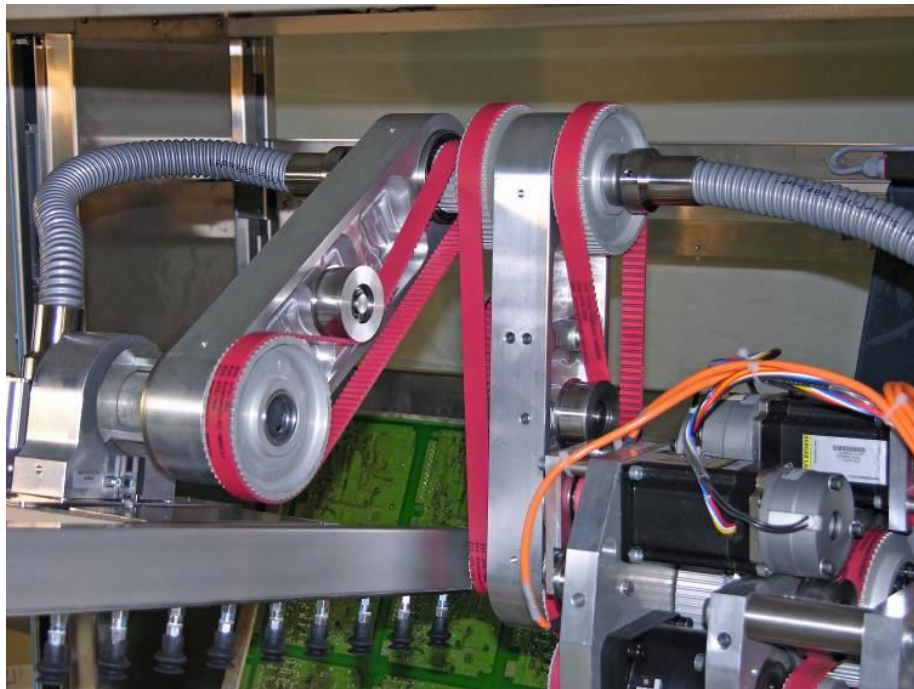
Elektromagnetne kočnice su standardni deo opreme industrijskih robota. Njihova osnovna namena je da zaustave kretanje zgloba konvertovanjem kinetičke energije u termičku, putem kočionih pločica ili diskova. Načelno se razlikuju dva rešenja:

- kočenje se obavlja kada je dovedena električna energija,
- kočenje se obavlja kada nema električne energije.

Vreme aktivacije kočnice je konačno i mora se uzeti u obzir kada se planira bezbednosna procedura. Kočnice koje se koriste kod robota su držećeg tipa (eng. *hold on*) i koriste se u dva slučaja: da obezbede održanje položaja robota kada dođe do namernog ili slučajnog prekida napajanja i da obezbede trenutni prekid rada kada se za to steknu uslovi kao što je npr. izlazak izvan granica radnog opsega, ili kada se nekim od spoljašnjih bezbednosnih prekidača naloži hitan prestanak rada.

4.2.1.4 Primeri transmisije

Motora i njihovi reduktori su veoma često relativno velikih masa i zapremina. Oni bi značajno opterećivali pogonski sistem robota i umanjivali njegove performanse ukoliko bi bili montirani direktno u zglobovima koje pokreću. Zbog toga se izmeštaju po pravilu bliže osnovi i vertikalnoj osi obrtanja prvog zgloba. U pojedinim slučajevima motori se mogu tako izmestiti da doprinose statičkom uravnoteženju pojedinih segmenata. Na slici 15 je prikazan klasičan način izmeštanja motora i prenos momenta kaišnim prenosom.



Slika 15. Prikaz izmeštenog motora i kaišnog prenosa momenta do zgloba⁸

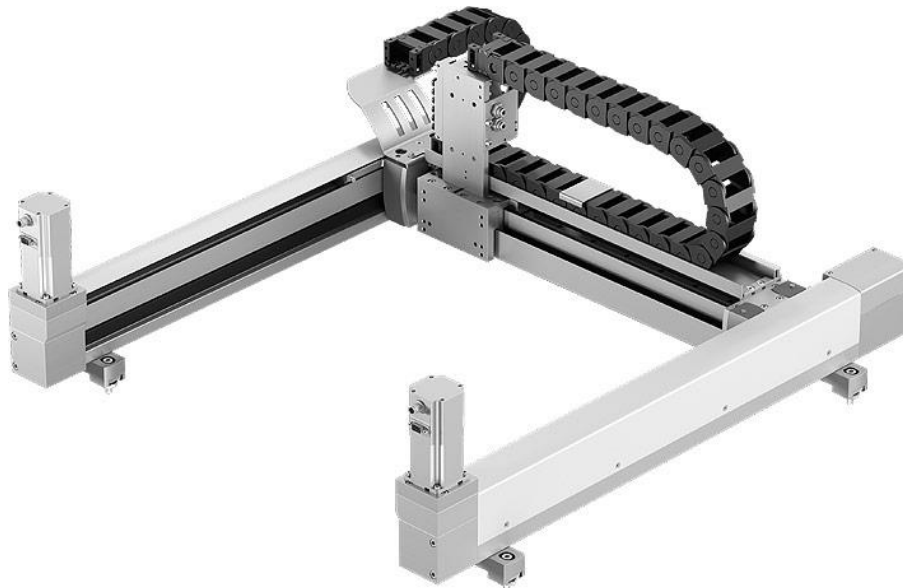
⁸ <http://pubs.sciepub.com/ajme/1/7/11/figure/4>

4.2.3 Pneumatski pogonski elementi

Drugačiji pristup implementacije linearnih zglobova je svakako korišćenje linearnih aktuatora, u ovom slučaju pneumatskih cilindara. Nije novina da se pneumatski cilindri koriste kao aktuatori za razne automatizovane sisteme, te se mogu i iskoristiti i za manipulatore.

Klasična pneumatika omogućuje dva stanja, dve precizne pozicije klipnjače cilindra. To su uvučeni i izvučeni položaj. Na osnovu ovoga moguće je napraviti translatorni zglob isključivo sa dve pozicije. Često to nije dovoljno. Praktični i često korišćeni pristup povećavanja preciznih pozicija je korišćenje standardnih višepoložajnih cilindara ili samostalnim spajanjem dva ili više cilindara te manufakturom novog cilindra. U zavisnosti od dužine klipnjače mogu se dobiti tri položaja (ukoliko se koristi višepoložajni cilindar sa dve klipnjače iste dužine), četiri položaja (ukoliko se koristi višepoložajni cilindar sa dve klipnjače različiti dužina), ili, pak, više, ukoliko se koriste više cilindara redno vezanih.

Proporcionalna ili servo pneumatika omogućuje pozicioniranje klipnjače u bilo kojoj poziciji⁹. Pri korišćenju proporcionalne pneumatike potrebno je koristiti specijalne elektropneumatske razvodnike koji će upravljati radom cilindra, kao i odgovarajući softverski alat koji će imati mogućnost unosa, provere i pamćenja određene ostvarene pozicije. Povezivanjem dva ovakva segmenta pod odgovarajućim uglom (najčešće osama opravnim jedna na drugu) dobija se manipulator koji operiše u određenoj površi, ograničenoj dimenzijama radnih hodova segmenata. Lako se može dobiti manipulator pravouglo konfiguracije dodavanjem još jednog segmenta tako da obrazuje desni koordinatni sistem. Na slici 16 je prikazan standardni servopneumatski manipulator, proizvođača Festo.

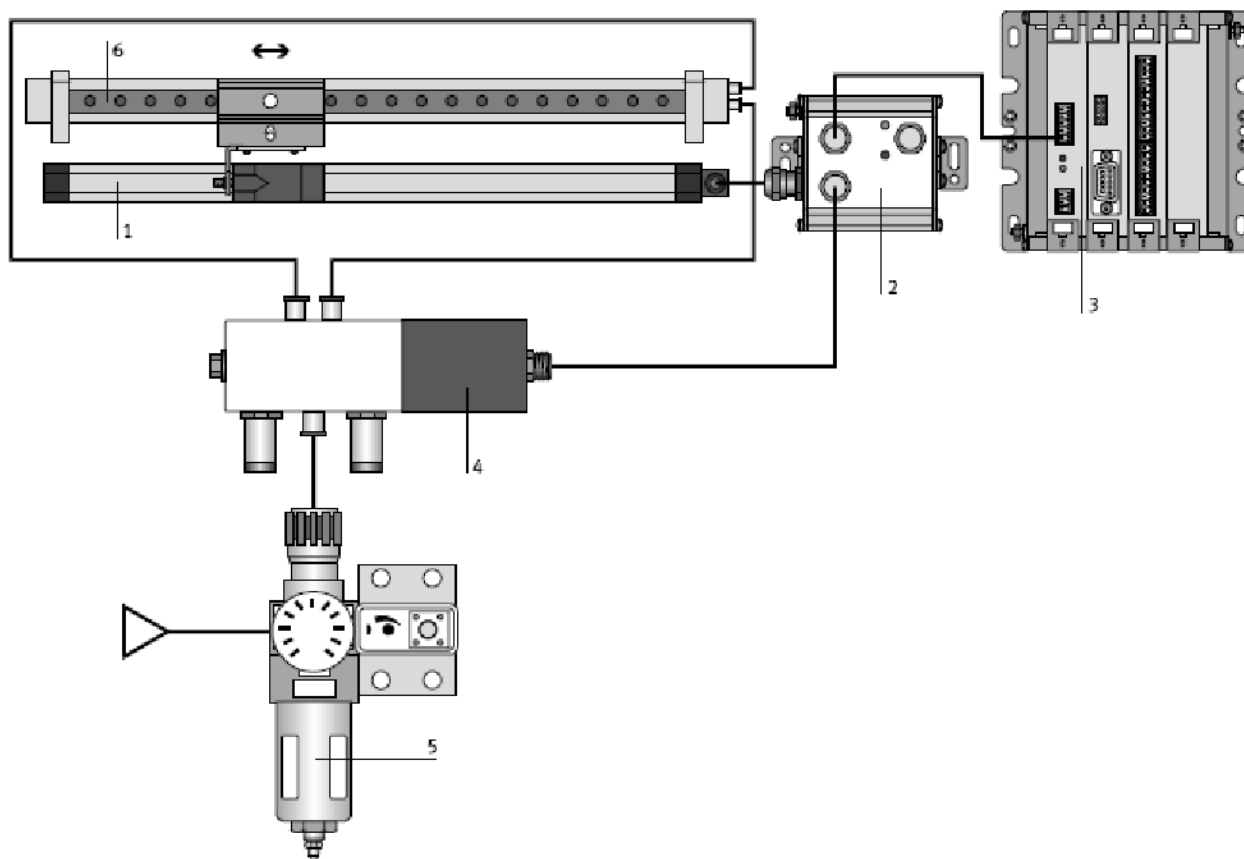


Slika 16. XYZ servopneumatski manipulator¹⁰

⁹ Pozicija klipnjače zavisi od njene dužine i od tačnosti digitalno-analognog konvertera

¹⁰ https://www.festo.com/cms/nl-be_be/21917.htm

Na sledećoj slici, 17, je prikazan uprošćen prikaz jednodimenzionog sistema proporcionalne pneumatike. Brojem 1 je označena merna letva, odnosno merni pretvarač koji će poziciju klipa cilindra pretvoriti u električni signal i time će se znati tačnost pozicioniranja. Brojem 2 je označen interfejs između kontrolera, označen brojem 3, i (proporcionalnog) elektromagnetnog razvodnika, označenog brojem 4. Takođe, vidimo pripremnu grupu, grubo, u kombinaciji sa kompresorom kao izvor vazduha pod pritiskom, označenu brojem 5 i na kraju cilindar dvosmernog dejstva, brojem 6.



Slika 17. Prikaz servopneumatskog sistema¹¹

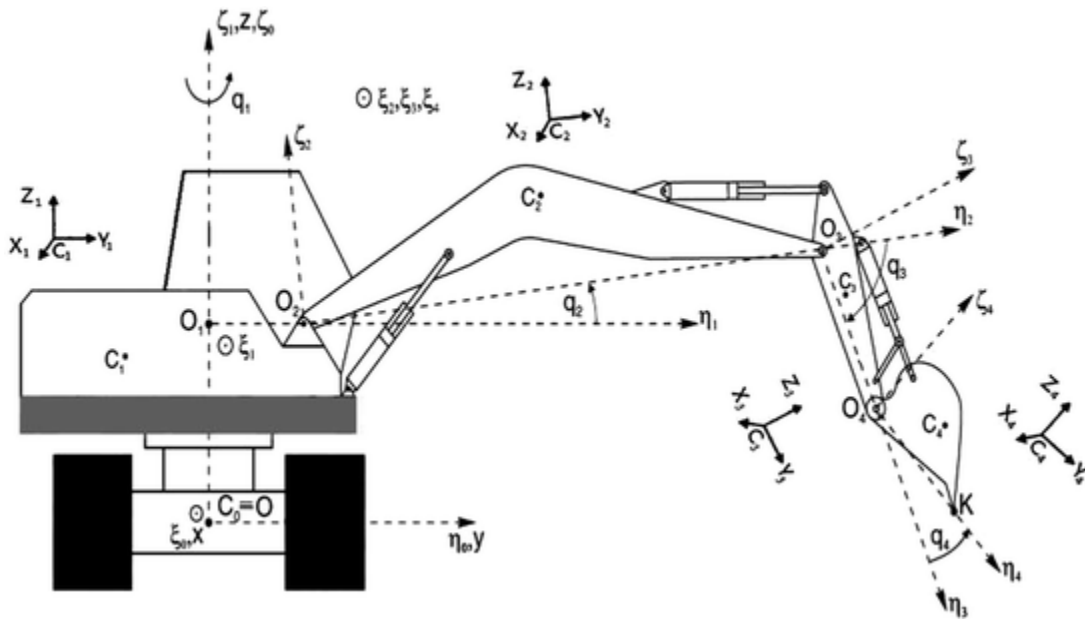
4.2.4 Hidraulični pogonski elementi

Zbog svojih prednosti hidraulika se često koristi u neautomatizovanim i automatizovanim sistemima. Moderni hidraulički aktuatori prave se u integrisanom obliku sa inteligentnim upravljanjem, energetski efikasnim izvorima snage i računarski upravljanim sensorima. U većini primena najznačajnije je upravljanje brzinom, koje je postignuto zahvaljujući razvoju elektrohidrauličkih servo ventila, programabilnih kontrolera, interfejsa i sistema sa hardverskim komponentama u povratnoj sprezi. Razvojem obrtnih elektromotora koji se ugrađuju u

¹¹ https://www.researchgate.net/figure/The-servo-pneumatic-system-components-for-X-axis-1-Measuring-system-2-Axis_fig2_221911632

upravljačke ventile omogućemo je pretvaranje električnih signala u hidrauličke. Takođe, zahvaljujući, mogućem, sporom kretanju radnih organa može se ostvariti bilo koja pozicija sa klasičnim komponentama¹². Kao hidraulični aktuatori koriste se ili hidraulični cilindri, za linearno kretanje ili rotacioni motori za ugaono kretanje. Hidraulički uređaji mogu se direktno povezati sa opterećenjem, dodatna oprema (npr. zupčanici ili reduktori) za prilagođavanje nije potrebna. Pošto hidraulički aktuatori koriste snagu radne tečnosti koja je pod pritiskom, sa njima je moguće razviti velike sile, kao i momente, pri velikim snagama.

Građevinske mašine poput bagera, slika 18, imaju glavna kretanja podeljena u četiri stepena slobode: rotaciju kabine i kašike u odnosu na podlogu, i tri translacije, koje će obavljati zakretna kretanja da bi se kašikom obavio koristan rad. Drugim rečima, ova četiri stepena slobode postavljenih na ovaj način predstavljaju minimalnu konfiguraciju antropomornog robota kome se dodaje još jedna translacija za upravljanje hvataljkom, u ovom slučaju kašikom.

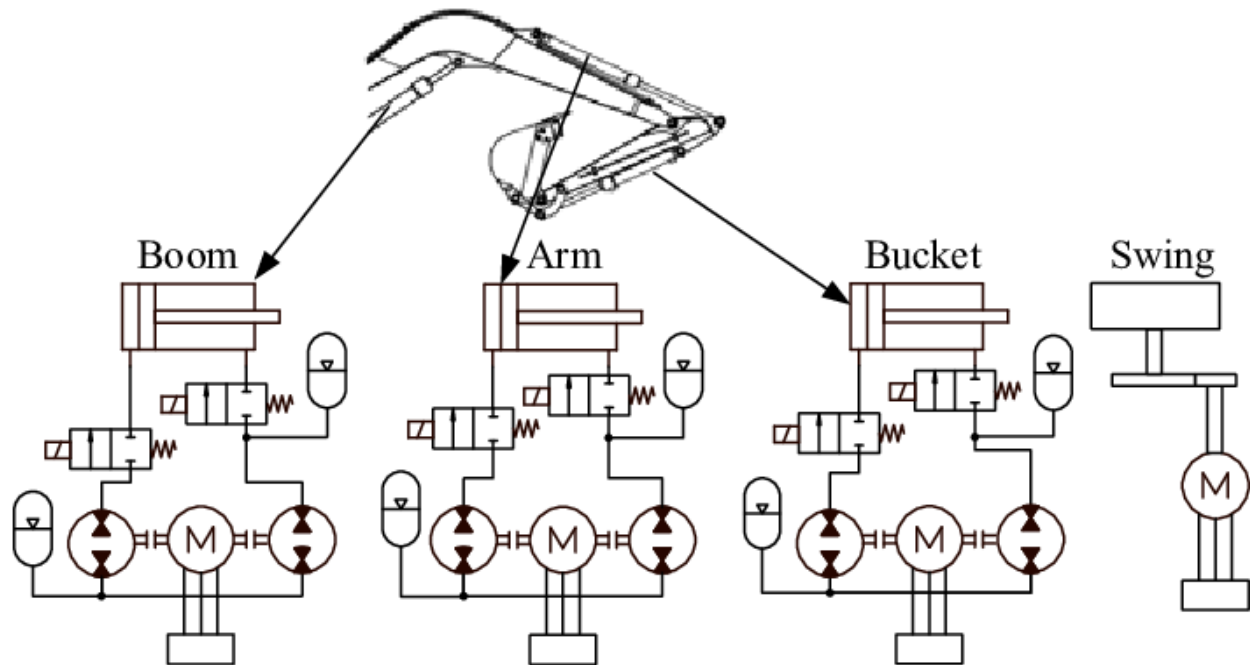


Slika 18. Četiri stepena slobode rada bagera¹³

Na slici 19, prikazana je hidraulična šema ovakvog sistema. Na donjoj strani šeme se vidi pretvaranje mehaničke energije u hidrauličnu – motor sa unutrašnjim sagorevanjem je direktno spregnut sa hidrauličnim pumpama, po jedna sa leve i desne strane. Hidraulične pumpe guraju radni fluid iz rezervoara dalje u sistem. Upravljanje kretanjem, odnosno zglobovima, se vrši preko hidrauličnih cilindara dvosmernog dejstva. Upravljanje kretanjem klipa i klipnjače cilindra se vrši preko dva elektromagnetna razvodnika 2/2, monostabilnih, normalno zatvorenih.

¹² U pneumatici ovo nije slučaj

¹³ <http://imdl.gatech.edu/jfrankel/docs/Kin-Dyn.pdf>



Slika 19. Prikaz hidrauličke šeme rada bagera: četiri stepena slobode¹⁴

4.3 Senzorski podsistem

Primena senzora kod savremenih industrijskih robota je još uvek veoma oskudna. Standardno se jedino ugrađuju merači pozicije svakog zgloba. U robotizovan sistem je moguće ugraditi i dodatne senzore, kao što je robotska vizija ali i senzori za merenje intenziteta i pravca sile ili momenata koji se javlja između hvataljke i predmeta, prihvaćenog predmeta i okoline i slično.

4.3.1 Merenje položaja

Za merenje pozicije u zglobovima robota mogu se koristiti uređaji koji daju informaciju o njenoj apsolutnoj vrednosti (apsolutni) ili o njenoj promeni tokom kretanja (inkrementalni). U ovu svrhu se najčešće koriste optički enkoderi i rizolveri.

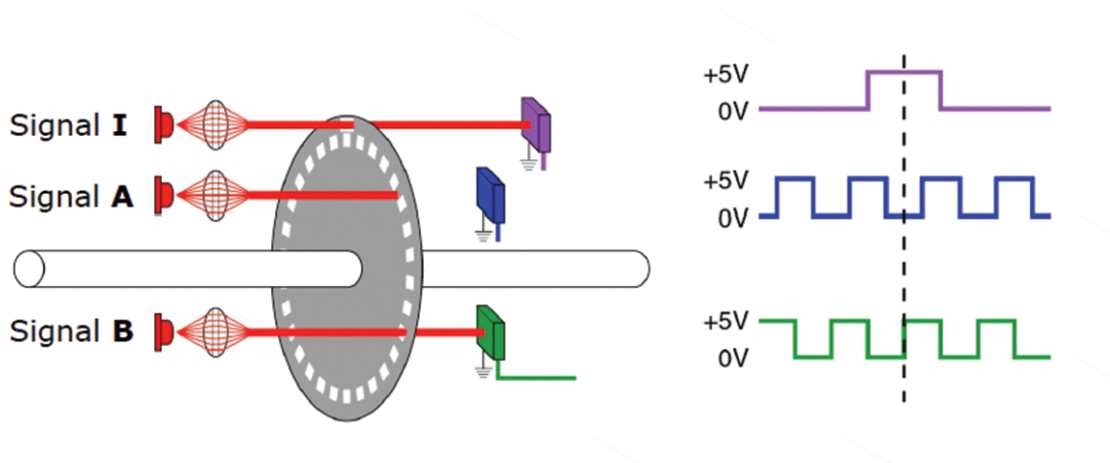
Enkoderi mogu biti apsolutni ili inkrementalni, dok rizolveri uvek daju apsolutnu vrednost pozicije zgloba. U slučaju kada se očitava apsolutna vrednost koordinate zglobova, informacija o koordinati zgloba se može dobiti i nakon isključivanja i ponovnog uključivanja napajanja. To je posebno pogodno prilikom pokretanja robotskog sistema obzirom da robotski kontroler mora imati informaciju o vrednostima uglova u zglobovima. U slučaju da je senzor u zglobu apsolutni ova vrednost se čita direktno, a ako je inkrementalni ova informacija se može obezbediti na jedan od sledećih načina: Prvi je stalno merenje trenutne pozicije i njeno zapisivanje u memoriju, pa sa slučaj nestanka napajanja aktiviraju se končnice u zglobovima koje obezbeđuju statičnu poziciju dokle god je robot isključen. Onog trenutka kada je ponovo uključi, vrednost u memoriji odgovara

¹⁴ https://www.researchgate.net/figure/Simplified-schematics-of-DDH-excavator_fig2_318899637

stvarnoj poziciji te se može nastaviti sa zadatkom. Drugi slučaj je da se pri svakom uključivanju robota obavezno prvo dovede u unapred definisanu početnu poziciju (eng. *home position*) za koju robotski kontroler ima informaciju o vrednostima uglova. Tek nakon toga je moguće započeti zadatak.

Rezolucija senzora (enkodera) određena je brojem proreza na obrtnom disku. Uobičajena rezolucija optičkih enkodera koji se koriste u robotici kreću se oko 1000 inkremenata po jednom obrtaju diska.

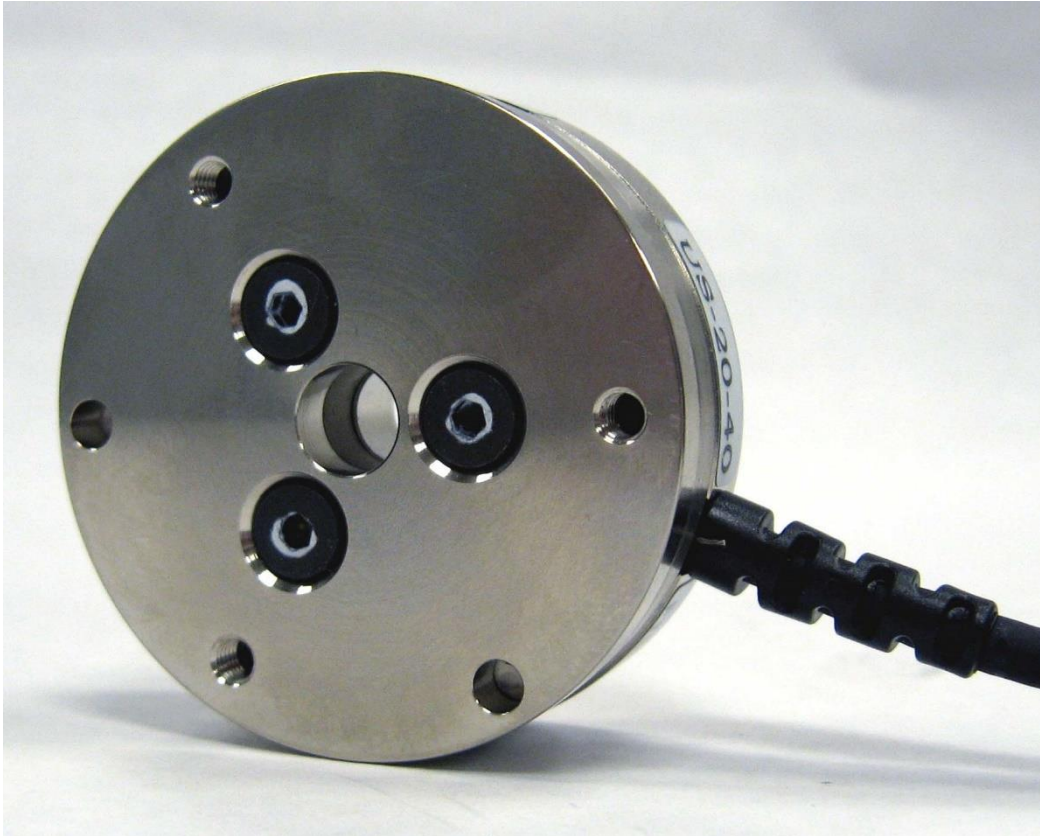
Na slici 20 je prikazan rad jednog enkodera.



Slika 20. Prikaz rada enkodera

4.3.2 Merenje sile

U slučaju da robot stupa u kontakt sa okolinom neminovno se na mestu kontakta javljaju sile. Kod nekih zadataka silu treba održavati na zadatom nivou (npr. obaranje ivica radnog predmeta, bušenje itd.) ili silu treba minimizirati kao što je slučaj kod montažnih zadataka. U oba slučaja je potrebno obezbediti informaciju o silama koje se u procesu realizacije zadatka javljaju. Jedino komercijalno dostupno rešenje je višekomponentni senzor sile i momenata koji se smešta u zglobov hvataljke robota (između prirubnice poslednjeg segmenta robota i hvataljke). Na slici 21 je prikazan jedan takav senzor.



Slika 21. Prikaz šestokomponentnog senzora za merenje sile i momenata¹⁵

4.3 Kontroler industrijskog robota

Upravljački sistem je u početku bio preuzet od CNC mašina, nadograđen tako da može upravljati sa više osa od broja osa uobičajenog za tadašnje CNC mašine. Zbog složenosti zadatka za koje su roboti bili namenjeni, skupovi komandi su sastavljeni u celine, koje će predstavljati osnovu za programiranje robota.

Kontroler industrijskog robota uobičajeno sadrži:

- glavni računar,
- računare za upravljanje pojedinim stepenima slobode,
- elektroenergetski deo za pogon motora,
- merne kartice,
- ulazno-izlazne kartice
- periferijske uređaje
- napajanje i modul za besprekidno napajanje,

¹⁵ https://www.e-motionsupply.com/product_p/mini40.htm

- konzolu za programiranje robota,
- panel za programiranje na samom kontroleru itd.

Glavni računar obavlja zadatke komunikacije sa korisnikom, obradu senzorskih informacija sa spoljašnjim sensorima, komunikacije sa drugim računarima, nadgleda celokupni sistem itd. U glavnom računaru robota je objedinjeno nekoliko kartica. Tu spadaju kartice za upravljanje pojedinim stepenima slobode, izmenjiva FLASH memorija, portovi za povezivanje sa periferijskim uređajima i kartice za standardne komunikacione protokole.

Računari sa pojedinim stepenima slobode obavljaju preračunavanje komandi koje stižu sa glavnog računara i generišu upravljački signal za pogon motora. Elektroenergetski sistem za pogon motora (drajver) predstavlja posebno projektovane jedinice koje konvertuju signal sa računara po pojedinim stepenima slobode u upravljački napon motora.

Napajanje je posebno izdvojeno za analogni i za digitalni deo kontrolera robota. Poseban modul u sklopu napajanja je i baterijsko napajanje za pouzdan i bezbedan završetak rada i za slučaj kada dođe do prekida spoljašnjeg napajanja.

10. LITERATURA

1. „Industrijska robotika“ – B. Borovac, M. Raković, G. Đorđević, M. Rašić.