

## 1. UVOD

Robotika je primijenjena tehnička znanost koja predstavlja spoj strojeva i računarske tehnike. Ona uključuje različite oblasti kao što su projektiranje strojeva, teoriju upravljanja i regulacije, mikroelektroniku, kompjutersko programiranje, umjetnu inteligenciju, ljudski faktor i teoriju proizvodnje. Drugim riječima, robotika je interdisciplinarna znanost koja pokriva područja mehanike, elektronike, informatike i automatike. Ona se bavi prvenstveno proučavanjem strojeva koji mogu zamijeniti čovjeka u izvršavanju zadataka, kao što su razni oblici fizičkih aktivnosti i donošenje odluka (odlučivanje). Razvoj robotike je iniciran željom čovjeka da pokuša pronaći zamjenu za sebe koja bi imala mogućnost oponašanja njegovih svojstava u različitim primjenama, uzimajući u obzir i međudjelovanje sa okolinom koja ga okružuje.

U 20. stoljeću prvi se put susreće naziv robot: uveo ga je češki književnik K. Čapek 1920. g. u svojoj drami "RUR" (Rossumovi univerzalni roboti). Suvremeni roboti nastali su 1950-ih u SAD, a potječu od pronalaska teleoptera, s jedne strane, te numerički upravljanih alatnih strojeva, s druge strane. U Americi je Robot Institute of America, 1980 godine, definirao robota kao višefunkcionalnog manipulatora s mogućnošću reprogramiranja, projektiranog da prenosi materijale, dijelove, alatke i posebne naprave kroz različite programirane pokrete u svrhu obavljanje različitih zadataka. Ova definicija je prilično restriktivna, budući da isključuje mobilne robote, koji u današnje vrijeme doživljavaju ekspanziju. Općenitija definicija bi bila da je robot stroj koji posjeduje inteligentnu vezu između percepcije i akcije. S tim u vezi se može definirati pojam inteligentnog robota kao stroja sposobnog da prikuplja informacije iz okolnog svijeta i koristeći znanje o okolini uspijeva da se uspješno kreće u njoj.

Računarsko upravljanje robotskim sistemima teži primjeni ekspertnih sistema i umjetne inteligencije u području automatskog upravljanja.

Temeljni trend u robotici odnosi se na mobilnost, inteligenciju i autonomnost u nestrukturiranoj sredini. Ovaj trend je moguće postići upotrebom malih, jeftinih i visokoperformantnih računala. Termin *robot*, u ovom kontekstu, predstavlja sistem koji je sposoban ostvariti predviđena ponašanja u realnom svijetu. Robotski sistemi dobivaju signale (ulaze) iz okolne sredine preko senzora i djeluje na istu pomoću pogona (aktuatora). Veza između opažanja (eng. sensing) i djelovanja (eng. actuation) može biti ostvarena jednostavnom obradom signala ili pak može uključivati složene postupke odlučivanja, interpretaciju cilja i druge aspekte rasuđivanja. Većina autonomnih sistema pokazuju samo neke oblike mobilnosti: na zemlji, pod vodom, u zraku ili u svemiru. Mobilnost se može načiniti upotrebom kotača, nogu, peraja, rotora ili drugih pogona. Težište je na mogućnosti gibanja i samodovoljnosti, a ne na činjenici da li je sistem biološka imitacija. Naravno, biološki modeli robotskih sistema su od važnog interesa budući da su živi sistemi prototipovi autonomnih ponašanja.

Predmet izučavanja u nastavku je tzv. *Industrijska robotika* koja obuhvaća projektiranje robota, upravljanje i primjenu u industriji.

### 1.1 INDUSTRIJSKI ROBOT

Najčešće se pod pojmom robota podrazumijeva industrijski robot koji se još naziva robotski manipulator (eng. robotic manipulator) ili robotska ruka (eng. robotic arm). Postoji mnogo različitih definicija robota, ovisno o mjestu i načinu primjene. Industrijski robot posjeduje zadovoljavajuću fleksibilnost i okretljivost.

Glavni dijelovi industrijskog robota su:

1. Mehanička struktura ili manipulator sastoji se od niza krutih segmenata (eng. links) povezanih pomoću zglobova (eng. joints). Ponašanje manipulator je određeno rukom (eng. arm) koja osigurava pokretljivost, ručnim zglobom (eng. wrist) koji daje okretljivost i vrhom manipulatora (eng. end effector) koji izvršava operacije koje se zahtijevaju od robota.

2. Aktuatori (pogoni) postavljaju manipulator u određeno kretanje pomicanjem zglobova. Najčešće se upotrebljavaju električni i hidraulički motori, a ponekad i pneumatski .
3. Senzori detektiraju status manipulatora (proprioceptivni senzori) i , ako je potrebno, status okoline (heteroceptivni senzori).
4. Sistem upravljanja (računar) omogućuje upravljanje i nadzor kretanja manipulatora.

Zbog svojstava *rukovanje materijalima, manipulacije i mjerenja*, industrijski roboti imaju uspješnu primjenu u proizvodnim procesima.

U proizvodnim procesima svaki objekat (materijal) može se prenijeti sa jednog mjesta tvornice na drugi radi čuvanja, daljnje obrade, montiranja i pakiranja. Tijekom prijenosa, fizičke karakteristike objekta nisu podvrgnute nikakvim promjenama. Sposobnost robota da podigne objekat, prenese ga u prostoru po unaprijed definiranoj stazi i otpusti, čini ga idealnim kandidatom za rukovanje materijalima. Tipične primjene ove vrste su:

- paletiranje (smještanje objekata na palete po određenom poretku)
- utovar i istovar skladišta
- struganje
- sortiranje dijelova
- pakiranje

Proces proizvodnje sastoji se od transformiranja objekta iz sirovine u konačni proizvod, tijekom kojeg se mijenjaju fizička svojstva kao rezultat strojne obrade ili se mijenja izgled objekta uslijed montaže. Sposobnost robota da manipulira objektima (koji se obrađuju) i alatima čini ga prikladnim u procesima proizvodnje. Tipične primjene su :

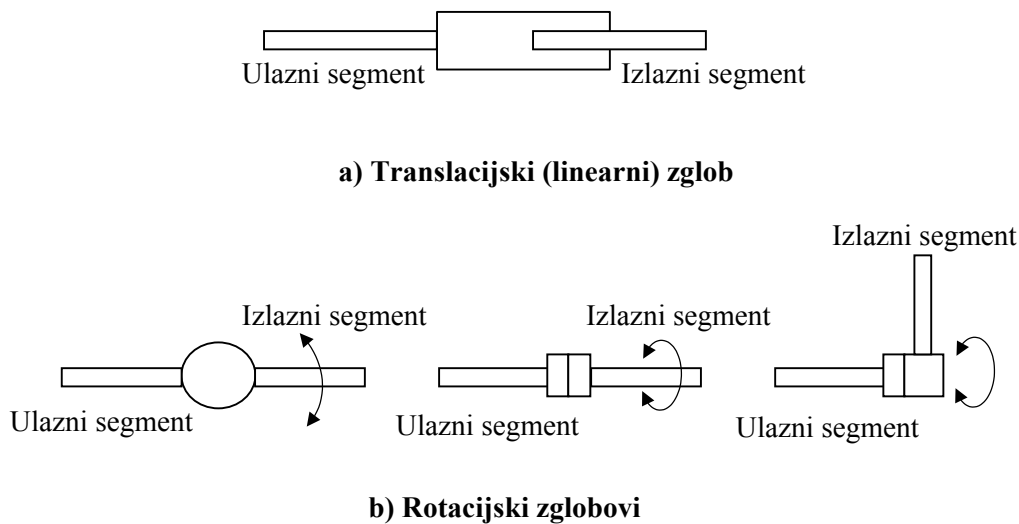
- lučno i tačkasto zavarivanje
- bojenje sprejom
- struganje i bušenje
- ljepljenje i pečenje
- lasersko rezanje i rezanje vodenim mlazom
- brušenje i ljuštenje
- montiranje mehaničkih i električnih grupa
- montiranje električnih ploča
- zašarafljivanje
- stavljanje žice.

Osim rukovanja i manipuliranja materijalima u procesu proizvodnje je neophodno vršiti mjerenja za testiranje kvalitete proizvoda. Sposobnost robota da istražuje trodimenzionalni prostor i dostupnost mjerenja statusa manipulatora omogućuju upotrebu robota kao mjernog uređaja. Primjene ove vrste su:

- nadziranje (inspekcija) objekta
- pronalaženje kontura
- detekcija proizvodnih nedostataka.

## 1.2 GRAĐA ROBOTA I OSNOVNE STRUKTURE MANIPULATORA

Robotski manipulator sastoji se od tijela (eng. body), ruke (eng. arm) i ručnog zgloba (eng. wrist). U proizvodnim procesima najčešće se koriste roboti pričvršćeni na podlogu. Na kraju ruke nalazi se ručni zglob sastavljen od mnogo komponenti koje mu omogućuju orijentaciju u različitim položajima. Relativna kretanja među različitim komponentama tijela, ruke i ručnog zgloba ostvaruju se pomoću niza zglobova. Kod industrijskih robota koriste se dva osnovna tipa zglobova: rotacijski (eng. revolute joint) i translacijski (eng. prismatic joint). Rotacijski zglob vrši rotaciju oko osi, a translacijski (linearni) linijsko kretanje po osi. Dva susjedna zgloba spojena su pomoću krutih segmenata. Na ručni zglob pričvršćena je šaka (eng. hand) koja se u tehničkom žargonu naziva vrh manipulatora (eng. end of effector), alat (eng. tool) i hvataljka (eng. gripper). Vrh manipulatora se ne smatra dijelom robota, već služi za obavljanje određenih zadataka koji se traže od robota. Neki od tipova zglobova prikazani su na Sl. 1.1.



**Slika 1.1.** Neki tipovi zglobova robotskog manipulatora.

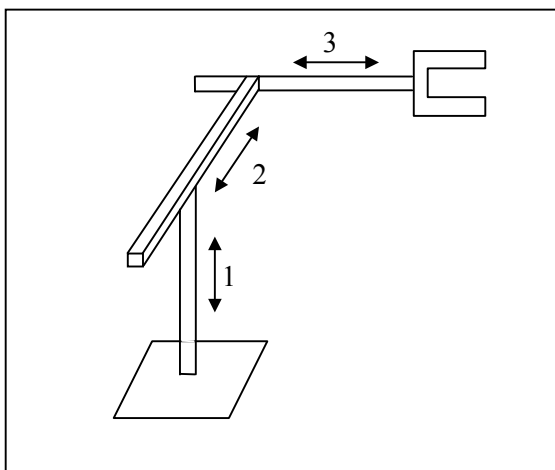
Za svaki robot karakterističan je broj osi za rotacijsko ili translacijsko kretanje njegovih segmenata. Kako se kretanje robota odvija u trodimenzionalnom prostoru, prve tri osi najčešće se koriste za određivanje pozicije ručnog zgloba, dok preostale osi određuju orijentaciju vrha manipulatora. Općeniti manipulator ima šest osi te može dovesti vrh manipulatora u bilo koju poziciju i orijentaciju unutar radnog prostora. Radni prostor robota predstavlja skup tačaka u trodimenzionalnom prostoru koje se mogu dohvatiti vrhom manipulatora. Oblik i zapremina radnog prostora ovise o strukturi manipulatora, kao i prisutnim ograničenjima mehaničkih zglobova.

Danas se najviše susreću sljedeće četiri osnovne strukture manipulatora :

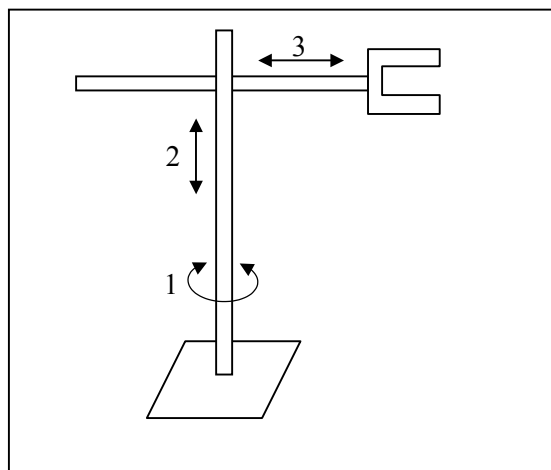
1. pravokutna (eng. Cartesian or rectangular) ili TTT,
2. cilindrična (eng. cylindrical) ili RTT,
3. sferna (eng. spherical) ili RRT,
4. rotacijska (eng. articulated) ili RRR.

Pravokutna konfiguracija robota ima tri translacijska zgloba čije su osi međusobno okomite (Sl. 1.2). S obzirom na jednostavnu geometriju, svaki stupanj pokretljivosti je korespondentan sa stupnjem slobode u Cartesianovom prostoru, budući da se radi o pravolinijskom kretanju. Struktura pokazuje dobru mehaničku čvrstoću. Tačnost pozicioniranja ručnog zgloba je konstantna u cijelom radnom prostoru. Nasuprot visokoj tačnosti, struktura ima slabu pokretljivost, jer su svi zglobovi translacijski. Radni prostor ovog robota je prizma. Cartesianov manipulator pristupa objektu "sa strane". Ukoliko želimo objektu pristupiti "odozgo", ovaj manipulator treba realizirati u obliku stalka (engl. Gantry manipulator). Cartesianova struktura omogućuje postizanje radnog prostora velikih dimenzija i manipuliranje glomaznim objektima. Zbog toga se najčešće primjenjuje u rukovanju materijalima i montaži. Motori za pokretanje zglobova manipulatora su električni, a rijetko pneumatski.

Ako se prvi zglob kod pravokutne strukture zamijeni rotacijskim zglobom, tada se dobiva robot cilindrične konfiguracije, prikazan na Sl. 1.3. Radni prostor takvog robota je volumen između dva vertikalna koncentrična plašta valjka (zbog ograničenog translatornog kretanja). Cilindrični manipulator pokazuje dobru mehaničku čvrstoću, ali se tačnost pozicioniranja ručnog zgloba smanjuje sa povećanjem horizontalnog hoda. Uglavnom se upotrebljava za prijenos objekata većih dimenzija i koristi hidrauličke motore za pogon zglobova više nego električne.



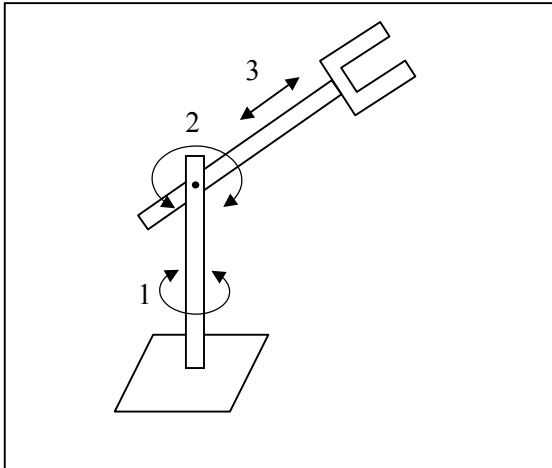
Slika 1.2. Pravokutna konfiguracija robota.



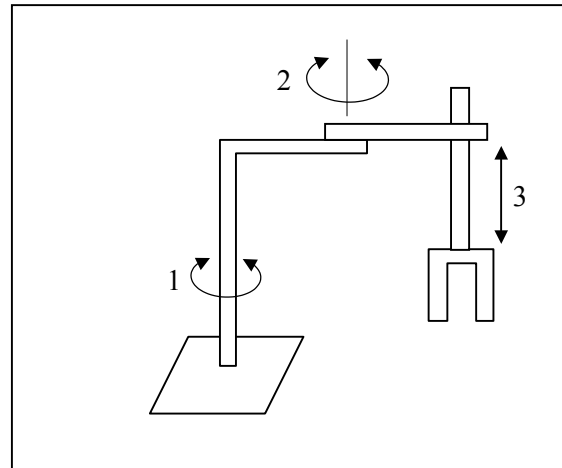
Slika 1.3. Cilindrična konfiguracija robota.

Zamjenom drugog zgloba cilindrične konfiguracije robota rotacijskim zglobom dobiva se robot sferne konfiguracije (Sl. 1.4). Ako postoji ograničenje translatornog kretanja, tada je radni prostor tog tipa robota volumen između dvije koncentrične sfere, a uz ograničenje svih kretanja, radni prostor je dio volumena između dvije koncentrične sfere. Mehaničke čvrstoća je manja u odnosu na prethodne strukture zbog složenije geometrijske i mehaničke konstrukcije. Tačnost pozicioniranja se smanjuje sa porastom radijalnog hoda. Sferični manipulator se uglavnom koristi u strojarскоj industriji. Obično se koriste električni motori za pokretanje zglobova manipulatora.

Robot tipa SCARA (eng. Selective Compliance Assembly Robot Arm) također ima dva rotacijska i jedan translacijski zglob, kao što je prikazano na Sl. 1.5. Kod ovog tipa robota su sve tri osi vertikalne. SCARA manipulator karakterizira visoka čvrstoća za opterećenja na vertikalnoj osi i popustljivost za opterećenja u horizontalnoj osi. Zbog toga se SCARA koristi za zadatke montiranja po vertikalnoj osi. Tačnost pozicioniranja se smanjuje sa porastom udaljenosti između ručnog zgloba i osi prvog zgloba.

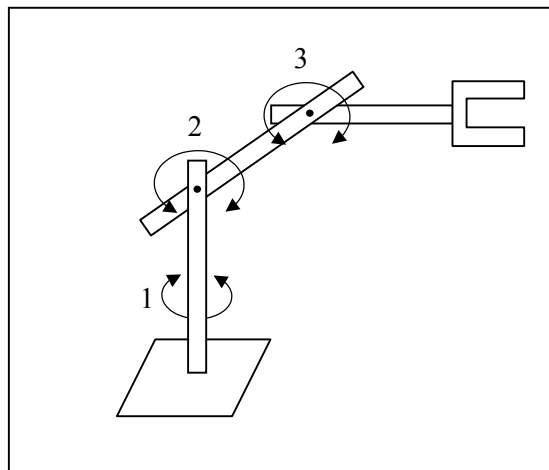


Slika 1.4. Sferna konfiguracija robota.



Slika 1.5. SCARA robot.

Ako su upotrebljena sva tri rotacijska zgloba dobiva se rotacijska struktura manipulatora, koja se još naziva laktasta, antropomorfna ili zglobna (Sl. 1.6). Osi rotacije drugog i trećeg zgloba su paralelne i okomite na os rotacije prvog zgloba. Ako ne postoje ograničenja rotacijskih kretanja, tada je radni prostor tog robota kugla, a uz ograničenja to je dio kugle složenog oblika čiji je presjek sa strane najčešće u obliku polumjeseca. Zbog sličnosti sa čovjekovom rukom, drugi zglob se zove vratni zglob, a treći zglob lakta jer povezuje gornji dio ruke sa podlakticom. Za pogon zglobova antropomorfne strukture koriste se električni motori. Područje primjene je jako široko.



Slika 1.6. Rotacijska konfiguracija robota.

Navedene strukture manipulatora dobivene su na osnovu zahtjeva na poziciju ručnog zgloba i orijentaciju vrha manipulatora. Ako se želi postići odgovarajuća orijentacija u trodimenzionalnom prostoru, ručni zglob mora posjedovati najmanje tri stupnja pokretljivosti ostvarenih rotacijskim zglobovima. Budući da ručni zglob čini krajnji dio manipulatora on može biti stisnut (zbijen), što će imati za posljedicu kompliciranu mehaničku izvedbu. Bez ulaženja u konstrukcijske detalje, realizacija ručnog zgloba sa najvećom okretljivošću je ona gdje se osi sva tri rotacijska zgloba sijeku u jednoj tački. Ovaj zglob se zove *sferni*. Glavna osobina sfernog zgloba je razdvajanje pozicije i orijentacije vrha manipulatora; ruka je zadužena za zadatke pozicioniranja gornje točke presjeka, dok je ručni zglob zadužen za određivanje orijentacije vrha manipulatora. Realizacije u kojima zglob nije sferni su

jednostavne s mehaničke točke gledišta, ali su pozicija i orijentacija sjedinjene i to komplicira kordinaciju između kretanja ruke i obavljanja zadatka od strane ručnog zgloba.

Vrh manipulatora je određen u skladu sa zadatkom kojeg robot treba izvršiti. Za rukovanje materijalom, vrh manipulatora je sačinjen u obliku hvataljke određenog oblika i dimenzija koje ovise o objektu koji se hvata. Za zadatke montiranja, vrh manipulatora je alat(oruđe) ili određena sprava, kao npr. zavarivač, glodalica, bušilica, uređaj za zašarfljivanje.

Izbor robota je uvjetovan primjenom koju ograničava oblik i dimenzije radnog prostora, maksimalan iznos tereta, tačnost pozicioniranja i dinamičke performanse manipulatora.

## 1.3 PODJELA ROBOTA

Roboti se u osnovi razlikuju s obzirom na svoju veličinu, materijale kojima mogu rukovati, motore kojima pogone segmente (zglobove), vrste primijenjenih senzorskih sistema, te računarske sisteme koji ih opslužuju. Opća podjela manipulatora može se izvršiti u odnosu na vrstu pogona, geometriju radnog prostora i načine upravljanja kretanjem.

### 1.3.1 Vrste pogona

Pomicanje tijela, ruke i ručnog zgloba robotskog manipulatora omogućeno je upotrebom pogonskog sistema (mehanizma) robota. Pogonski sistem određuje brzinu pomicanja ruke, jakost i dinamičke performanse manipulatora. U stanovitoj mjeri, pogonski sistem određuje područja primjene robotskog manipulatora.

U upotrebi su najčešće jedan od tri slijedeća pogona:

1. Električni motor
2. Hidraulički motor
3. Pneumatski motor.

Za većinu robotskih manipulatora danas se koriste električni motori i to najčešće istosmjerni, izmjenični i koračni, jer su relativno jeftini, zauzimaju malo prostora, s velikom brzinom i tačnosti te je kod njih moguća primjena složenih algoritama upravljanja. Međutim, kod specifičnih primjena (npr. rukovanje užarenim čelikom ili sastavljanje dijelova automobila), kada se zahtijeva manipulacija velim teretima, češće se koriste roboti s hidrauličim motorom.

Hidraulički motor osim velike brzine (veća nego kod električnog motora) i snage, omogućuje mirno održavanje pozicije zbog nestlačivosti ulja. Koriste se kod robota većih dimenzija. Glavni nedostaci ovih motora su njihove visoke cijene i zagađivanje okolice zbog buke i mogućeg istjecanja ulja.

Pneumatski motori primjenjuju se kod malih robota. Prednost im je relativno niska cijena, velika brzina rada i nezagađivanje okoline, te su zbog toga pogodni za laboratorijski rad. Takvi motori nisu pogodni za rad s velikim teretima, jer je zbog stlačivosti zraka nemoguće mirno održavati željenu poziciju. Uz to je prisutna buka te je potrebno dodatno filtriranje i sušenje zraka zbog nepoželjne prašine i vlage. Ako se zahtijeva samo otvaranje i zatvaranje hvataljke (vrh manipulatora), tada se u završnom mehanizmu koristi pneumatski motor da se grubim stiskom ne bi oštetio lomljivi predmet.

### 1.3.2 Geometrija radnog prostora

Podjela manipulatora s obzirom na geometriju radnog prostora je :

1. pravokutna (eng. Cartesian or rectangular) ili TTT,
2. cilindrična (eng. cylindrical) ili RTT,
3. sferna (eng. spherical) ili RRT,
4. rotacijska (eng. articulated) ili RRR.

Ovi manipulatori su detaljno opisani u poglavlju 1.2.

### **1.3.3 Načini upravljanja kretanjem**

Postoje dva osnovna načina kretanja vrha manipulatora:

1. od tačke do tačke (eng. Point-to-point motion),
2. kontinuirano kretanje po putanji (eng. Continuous path).

Kod kretanja *od tačke do tačke* vrh manipulatora se kreće po diskretnim tačkama u radnom prostoru i pri tome nije bitna putanja između tačaka, ali je važna tačnost pozicioniranja. Takav način kretanja koristi se za diskretne operacije kao što su: tačkasto zavarivanje te podizanje i spuštanje predmeta.

Pri *kontinuiranom kretanju po putanji* vrh manipulatora mora se kretati po unaprijed određenoj putanji u trodimenzionalnom prostoru i pri tome su bitne trajektorija i tačnost pozicioniranja. Roboti kod kojih se upravlja trajektorijom kretanja mogu se koristiti za bojenje, šavno zavarivanje ili lijepljenje.

Osim vrsta pogona, geometrije radnog prostora i načina upravljanja kretanjem postoji niz dodatnih karakteristika robota: broj osi, maksimalna masa tereta, maksimalna brzina, dohvat, hod, orijentacija alata, ponovljivost, preciznost, tačnost te radna okolina.

## **1.4 KARAKTERISTIKE ROBOTA**

U prethodnom podpoglavljju navedene su neke od bitnih karakteristika robota, kao što su vrsta pogona, geometrija radnog prostora i način upravljanja kretanjem. Osim ovih, bitne su i slijedeće karakteristike robota: broj osi, maksimalna masa tereta, maksimalna brzina, dohvat, hod, orijentacija alata, ponovljivost, preciznost, tačnost i radna okolica.

### **1.4.1 Broj osi (eng. Number of Axes)**

Za svaki robot karakterističan je broj osi za rotacijsko ili translacijsko kretanje njegovih segmenata. Kako se kretanje robota odvija u trodimenzionalnom prostoru, prve tri osi najčešće se koriste za određivanje pozicije ručnog zgloba, dok preostale osi određuju orijentaciju vrha manipulatora. Općeniti manipulator ima šest osi te može dovesti vrh manipulatora u bilo koju poziciju i orijentaciju unutar radnog prostora. Pri tome se mehanizam otvaranja i zatvaranja prstiju ne smatra nezavisnom osi jer ne utječe niti na poziciju niti na orijentaciju hvataljke.

Ako manipulator ima više od šest osi, tada se redundantne osi mogu koristiti za izbjegavanje prepreka unutar radnog prostora.

### **1.4.2 Maksimalna masa terete (eng. Load-Carrying Capacity)**

Maksimalna masa tereta koju robot može prenijeti ovisi o veličini, konfiguraciji i konstrukciji robota, te o pogonskom sistemu koji pogoni zglobove robota. Masa tereta može biti od nekoliko kilograma do nekoliko tona.

Maksimalna masa tereta treba biti određena uz uvjet da robotska ruka bude u svojoj slaboj poziciji. U slučaju polarne ili cilindrične konfiguracije, ovo znači da je robotska ruka maksimalno ispružena.

### **1.4.3 Brzina kretanja (eng. Speed of Motion)**

Brzina robota veoma ovisi o tipu robota i njegovoj primjeni, a kreće se u području od 10 cm/s do 10 m/s. Najveće brzine postižu veliki roboti čija je ruka proširena na maksimalnu udaljenost od vertikalne

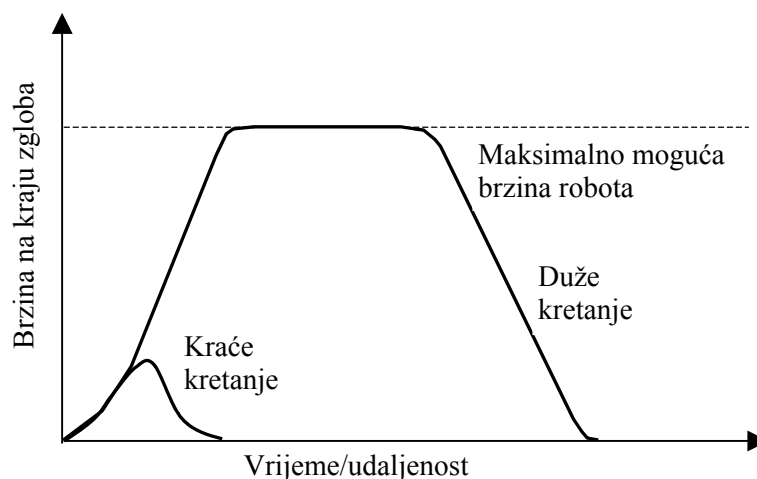
osi robota. Roboti pogonjeni hidrauličkim motorom brži su od robota pogonjenih električnim motorom.

Brzina, naravno, određuje kako brzo robot može obaviti zadani radni ciklus. Vrijeme radnog ciklusa je definirano kao vrijeme potrebno za izvođenje periodičkog kretanja sličnog jednostavnoj operaciji podizanja i spuštanja predmeta. Tada se uz poznatu duljinu putanje može izračunati prosječna brzina kretanja manipulatora. U proizvodnji je poželjno minimizirati vrijeme trajanja postavljenog zadatka. Gotovo svi roboti imaju neki mehanizam s kojim se može podešavati brzina. Određivanje najpoželjnije brzine, s ciljem smanjenja vremena proizvodnog ciklusa, ovisi o više faktora, kao što su:

- a) Tačnost s kojom se vrh manipulatora mora pozicionirati
- b) Težina objekta kojim se manipulira
- c) Udaljenost na koju se prenosi objekat

Brzina kretanja robota i tačnost su općenito u inverznoj vezi. Ako se zahtijevana tačnost povećava, robot mora više smanjiti greške u svojim zglobovima kako bi se postigla ciljna pozicija. Masa objekta koji se prenosi također utječe na brzinu. Teži objekti znače veće inercije i momente i robot zbog sigurnosnih uvjeta mora s njima sporije operirati.

Utjecaj udaljenosti na koju robot prenosi objekat na brzinu kretanja prikazana je na Sl. 1.7.



Slika 1.7. Utjecaj udaljenosti na brzinu kretanja.

Zbog principa akcije i reakcije, robot je sposoban vrhom manipulatora preći duži put za manje vrijeme nego sekvencom kraćih puteva, čija je suma jednaka dužem putu. Kraća rastojanja ne dozvoljavaju robotu da dostigne veće brzine.

#### 1.4.4 Prostorna rezolucija (eng. *Spatial Resolution*)

Prostorna rezolucija robota je najmanji prirašaj kretanja u kome robot može podijeliti svoj radni volumen. Ona ovisi o dva faktora: rezolucije upravljačkog sistema i robotske mehaničke nepreciznosti. Ove faktore je jednostavno konceptualizirati u slučaju robota s jednim stupnjem slobode.

Upravljačka rezolucija je određena upravljačkim sistemom pozicije robota i njegovom povratnom vezom unutar koje se nalazi sistema mjerenja. To je sposobnost regulatora da podijeli ukupno područje kretanja za pojedini zglob u individualne priraštaje. Mogućnost podjele područja zgloba u priraštaje



ovisi o kapacitetu pohrane (bita) u upravljačkoj memoriji. Priraštaji se ponekad nazivaju *adresibilne tačke*. Broj odvojenih, identificiranih priraštaja za pojedinu os dana je sa:

$$\text{Broj priraštaja} = 2^n$$

gdje je  $n$  broj bita u upravljačkoj memoriji.

Npr. robot sa mogućnošću pohrane 8 bita može podijeliti područje u 256 diskretnih pozicija. Upravljačka rezolucija se može definirati kao ukupno područje kretanja podijeljeno sa brojem priraštaja. Pretpostavlja se da je moguće načiniti sve priraštaje jednakim.

*Primjer 1.* U slučaju robota sa jednim stupnjem slobode, pretpostavimo da on ima jedan klizni (translacijski) zglob sa ukupnim područjem od 1 m. Pretpostavka je da upravljačka memorija robota ima kapacitet 12-bitne pohrane. Potrebno je odrediti upravljačku rezoluciju za ovu os kretanja.

Ukupan broj upravljačkih priraštaja može se odrediti na slijedeći način:

$$\text{Broj priraštaja} = 2^{12} = 4096$$

Ukupno područje od 1 m podijeljeno je u 4096 priraštaja. Svaka pozicija će biti odvojena od susjedne za

$$1 \text{ m}/4096 = 0.000244 \text{ m ili } 0.244 \text{ mm.}$$

Prema tome, upravljačka rezolucija iznosi 0.244 mm.

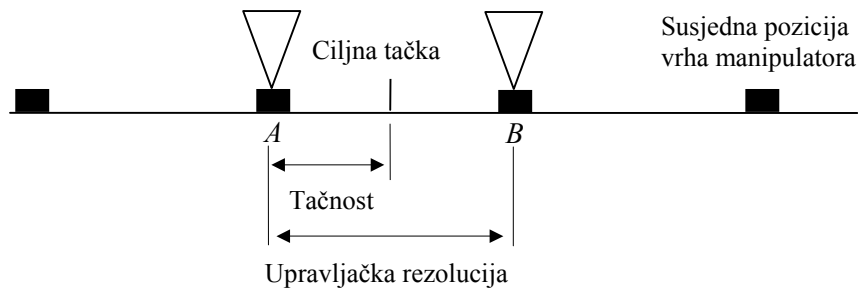
U slučaju robota sa više stupnjeva slobode potrebno je imati upravljačku rezoluciju za svaki pojedini zglob kretanja. Ukupna upravljačka rezolucija ovisi o kretanju ručnog zgloba, jednako kao i kretanju ruke i cijelog tijela robota. Određivanje upravljačke rezolucije je znatno usložnjeno u slučaju robota koji u svojoj strukturi sadrže i translacijske i rotacijske zglobove.

Mehanička nepreciznost u robotskim segmentima i zglobovima i sistem mjerenja u povratnoj vezi upravljačkog sistema robota su drugi faktor koji utječe na prostornu rezoluciju. Mehaničke nepreciznosti proizilaze iz elastičnih odstupanja u strukturalnim članovima, zazor zubčanika, rastezanje kotura užeta, istjecanje ulja u hidrauličkim pogonima, i druge nesavršenosti u mehaničkom sistemu. Ove nepreciznosti su izraženije kod većih robota zbog činjenice da se veće pogreške javljaju kod robota sa dužim komponentama (segmenti, zglobovi). Nepreciznosti također mogu biti prouzrokovane veličinom tereta kojim se rukuje, brzinom kretanja ruke, uvjetima održavanja robota, i drugim sličnim faktorima.

Na temelju svega navedenog, može se reći da je prostorna rezolucija ustvari upravljačka rezolucija degradirana navedenim mehaničkim nepreciznostima. Prostorna se rezolucija može poboljšati povećavanjem kapaciteta upravljačke memorije.

#### **1.4.5 Tačnost (eng. Accuracy)**

Tačnost je mjera sposobnosti robota da dovede hvataljku (vrh manipulatora) u proizvoljan položaj radnog prostora, tj, razlika između moguće i željene pozicije (Sl. 1.8). Tačnost se također može definirati preko prostorne rezolucije budući da sposobnost postizanja zadane ciljne tačke ovisi o tome kako pažljivo robot može definirati upravljačke priraštaje za kretanje svakog zgloba. Pretpostavimo da se vrh manipulatora nalazi u tački  $A$  i da je tačka  $B$  najbliža slijedeća pozicija u koju on može doći. Na Sl. 1-8. se jasno vidi razlika između tačnosti i upravljačke rezolucije (preciznosti), uz pretpostavku da su mehaničke nepreciznosti jednake nuli.



**Slika 1.8.** Prikaz tačnosti i upravljačke rezolucije (preciznosti) kada su mehaničke nepreciznosti jednake nuli.

Međutim, uzimajući u obzir mehaničke nepreciznosti dovodi se u pitanje mogućnost dostizanja ciljne pozicije. S tim u vezi definira se tačnost robota kao polovica prostorne rezolucije.

#### 1.4.6 Ponovljivost (eng. *Repeatability*)

Ponovljivost je mjera sposobnosti robota da vrh vrh manipulatora ponovo dovede u isti položaj. Tačnost i ponovljivost su dva različita aspekta preciznosti robota. Prvi definira sposobnost robota da postigne zadanu ciljnu tačku, a drugi sposobnost ponovnog dolaska u istu tačku. Pogreška koja može nastati pri ponovnom povratku u isti položaj najčešće je manja od 1 mm, a javlja se zbog zazora zupčanika i elastičnosti segmenata.

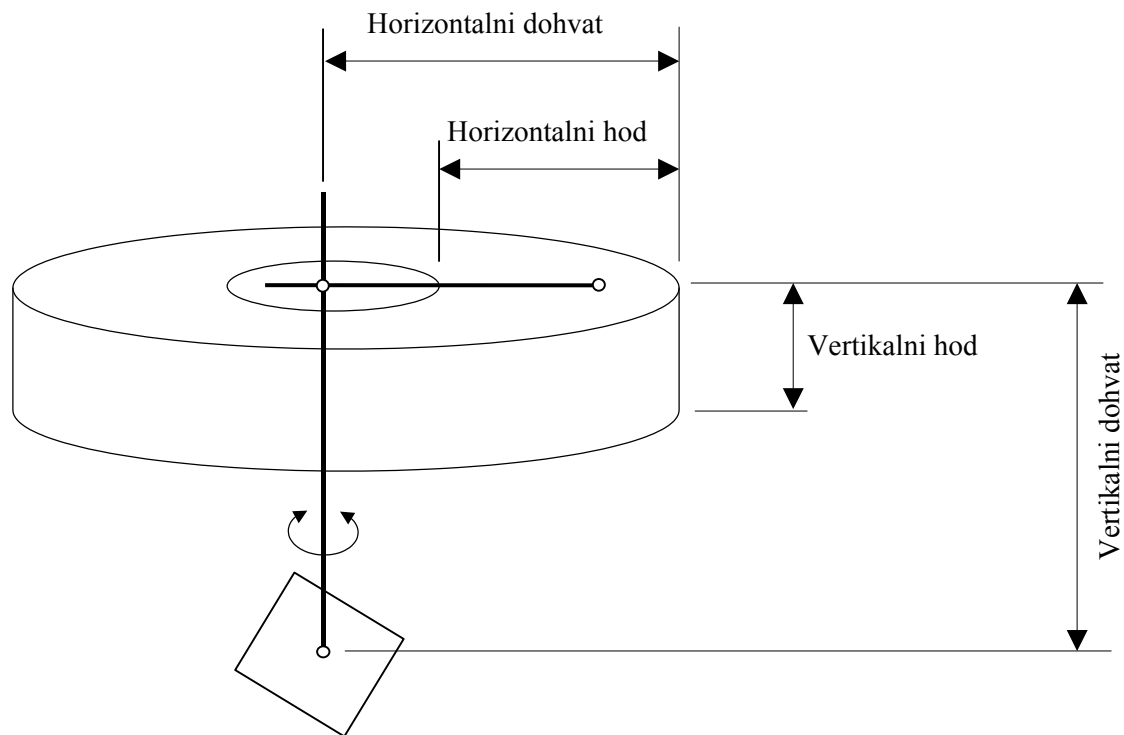
#### 1.4.7 Dohvat i hod (eng. *Reach & stroke*)

Veličina radnog prostora robota može se približno odrediti pomoću dohvata i hoda.

Horizontalni dohvat je maksimalna udaljenost koju može dosegnuti ručni zglobov mjerena od vertikalne osi oko koje robot rotira, dok horizontalni hod predstavlja ukupnu udaljenost od vertikalne osi po kojoj se ručni zglobov može kretati. Razlika između horizontalnog dohvata i hoda je minimalna udaljenost ručnog zgloba od glavne vertikalne osi, a kako je ta veličina pozitivna, tada je dohvat uvijek veći ili jednak hodu.

Vertikalni dohvat robota je maksimalna udaljenost ručnog zgloba robota od baze, a vertikalni se hod slično može definirati kao ukupna vertikalna udaljenost po kojoj se ručni zglobov može kretati. Pri tome je vertikalni hod robota manji ili jednak vertikalnom dohvatu.

Na primjeru prikazanom na Sl. 1.9. može se vidjeti da je horizontalni dohvat robota cilindrične konfiguracije polumjera vanjskog plašta valjka radnog prostora, a horizontalni hod je razlika polumjera vanjskog i unutrašnjeg valjka. Također se može vidjeti da će vertikalni dohvat cilindričnog robota biti veći od njegovog vertikalnog hoda ako se, pomoću ograničenja u kretanju drugom osi, ručnom zglobov ne dopusti doticanje granice radnog prostora.



**Slika 1.9.** Dohvat i hod cilindričnog robota.

Kod rotacijskih robota dohvat je često jednak hodu pa takvi roboti imaju pun radni prostor. Pri tome je potrebno zaštititi robot od samoranjavanja jer se rotacijski robot može programirati tako da udari sam sebe ili da se sudari s predmetima u svojoj radnoj okolici.

#### **1.4.8 Orijentacija alata (vrha manipulatora) (eng. Tool Orientation)**

Oblik radnog prostora određen je pomoću prve tri osi robota, a preostale osi određuju orijentaciju koju završni mehanizam može zauzeti (ako su to tri osi, tada alat može imati proizvoljnu orijentaciju u trodimenzionalnom prostoru).

Za određivanje orijentacije vrha manipulatora (alata) potrebno je definirati tri rotacije oko različitih osi: osi skretanja (eng. yaw), poniranja (eng. pitch) i valjanja (eng. roll), kako je prikazano na Sl. 1.10. Na toj slici može se vidjeti da je vrhu manipulatora pridružen pokretni koordinatni sistem  $S=[x,y,z]$  koji se giba zajedno sa vrhom manipulatora. U tom koordinatnom sistemu os  $z$  odgovara osnovnoj osi alata i usmjerena je od ručnog zgloba, a os  $y$  je paralelna zamišljenoj liniji koja se dobiva otvaranjem i zatvaranjem prstiju. Preostala os  $x$  određuje desnu orijentaciju koordinatnog sistema  $S$ .

U početku je pokretni koordinatni sistem  $S$  jednak fiksnom koordinatnom sistemu  $S = \{x', y', z'\}$  koji se nalazi na kraju podlaktice. Sada je potrebno određenim redoslijedom definirati skretanje, poniranje i valjanje.

Skretanje predstavlja rotaciju vrha manipulatora oko osi  $x'$ , zatim slijedi poniranje kao rotacija vrha manipulatora oko osi  $y'$  te na kraju valjanje, tj. rotaciju vrha manipulatora oko osi  $z'$ . Pri tome su pozitivni uglovi definirani kao zakreti u smjeru suprotnom od smjer kretanja kazaljke na satu.

Konačna orijentacija vrha manipulatora određena je i redoslijedom skretanja, poniranja i valjanja.

Ako se osi potrebne za orijentaciju vrha manipulatora sijeku u jednoj tački, tada robot ima sferni (eng. spherical) ručni zglob.



Kinematička analiza strukture manipulatora odnosi se na opis kretanja manipulatora s obzirom na fiksni koordinatni sistem (Cartesian), ne uzimajući u obzir sile i momente koji su prouzrokovali kretanje. To je značajno zbog razlikovanja kinematike i diferencijalne kinematike. Kinematika opisuje analitičke relacije između pozicije zgloba i pozicije i orijentacije vrha manipulatora. Diferencijalna kinematika opisuje analitičke relacije između kretanja zglobova i kretanja manipulatora izražene pomoću brzina.

Postoje dva ključna problema za formuliranje kinematičkih veza u robotici:

1. problem direktne kinematike
2. problem inverzne kinematike.

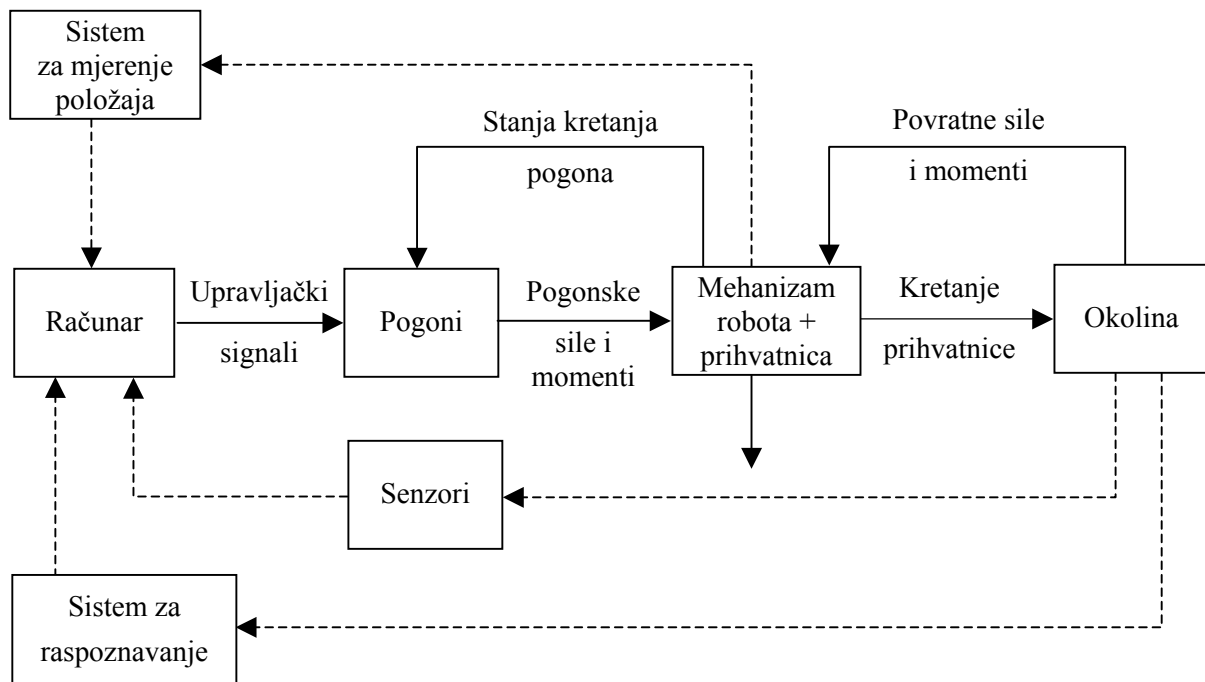
Općenit postupak koji opisuje kretanje vrha manipulatora kao funkcije kretanja zglobova temelji se na teoriji linearne algebre. Rješenje inverznog problema je od ključne važnosti za transformiranje željenog kretanja vrha manipulatora iz radnog prostora u odgovarajuće kretanje u prostoru zgloba. Dostupnost kinematičkog modela manipulatora je korisna za određivanje veza između sila i torzije (zakretnog momenta) primijenjenih na zglobove i sila i momenata primijenjenih na vrh manipulatora u konfiguracijama statičke ravnoteže. Kinematika manipulatora predstavlja osnovu za dobivanje jednadžbi dinamike, tj. jednadžbi kretanja manipulatora kao funkcije sila i momenata koji djeluju na manipulator. Dostupnost dinamičkog modela je korisno za mehaničko projektiranje strukture, izbor aktuatora, određivanje upravljačke strategija i računarske simulacije kretanja manipulatora.

### ***1.5.2 Upravljanje***

Na osnovu dodijeljenih zadataka manipulatoru proizlazi da li se kretanje odnosi na zglobove ili direktno na vrh manipulatora. Kod zadataka rukovanja materijalima neophodno je da vrh manipulatora slijedi željenu putanju (trajektoriju). Planiranje trajektorije predstavlja osnovu za proces upravljanja manipulatorom.

Problem upravljanja sastoji se iz određivanja sila i momenata narinutih na zglobove manipulatora koji osiguravaju kretanje po željenoj (unaprijed utvrđenoj) putanji. Ovaj problem je jako složen, budući da je manipulator povezan sistem kod kojeg kretanje jednog segmenta utječe na kretanje drugih segmenata. Ako određeni zadatak zahtijeva međudjelovanje između vrha manipulatora i okoline, problem upravljanja se znatno uslošnjava budući da treba uzeti u obzir i sile na dodirnom mjestu (sile dodira, eng. contact forces). Da bi se izvršilo traženo kretanje nužna je upotreba aktuatora i senzora.

Poopćena blok-shema industrijskog robota dana je na Sl. 1.11. Upravljački uređaj (računar) djeluje na pogone (motori) koji pokreću mehanizam robota da bi njegov vrh manipulatora (prihvatač, hvataljka, alat) došao u određeni položaj u odnosu prema objektu odnosno okolini. Mjerenjem položaja i brzine vrha manipulatora (sistem za mjerenje položaja), preko unutrašnje povratne veze dobije se informacija kojom se može ispravljati kretanje. Crtkano je prikazano kako se preko vanjske povratne veze mogu dobiti informacije iz okoline (senzori), a sistem za raspoznavanje u kombinaciji s moćnim računarom osigurava mnogo višu razinu informacija (umjetna inteligencija).



Slika 1.11. Funkcionalna blok-shema industrijskog robota.

Industrijski roboti mogu se podijeliti u četiri skupine s obzirom na način upravljanja :

1. Sekvencom ograničeni roboti
2. Roboti s upravljanjem od tačke do tačke
3. Roboti s upravljanjem kontinuirano po putanji
4. Inteligentni roboti

Od navedene četiri kategorije, roboti ograničeni sekvencom predstavljaju najnižu razinu upravljanja, za razliku od inteligentnih robota koji posjeduju najsofisticiranija svojstva.

Prva skupina robota ne koristi servo upravljanje za indicaciju relativnih položaja zglobova. Umjesto toga, oni su upravljajni podešavanjem graničnih prekidača i/ili mehaničkih blokada kako bi se postigle ciljne tačke putanje za svaki zglob. Uspostavljanje položaja i sekvence navedenih blokada obuhvaća mehaničko namještanje manipulatora. S ovim postupkom upravljanja, pojedinačni se zglobovi mogu pomjerati do krajnjih granica putanje. Ovo ima efekat strogo ograničenog broja jasnih tačaka koje se mogu specificirati u programu za ove robote. Sekvenca u kojoj se ciklus kretanja odigrava određena je koračnim prekidačem ili drugim uređajem s mogućnošću odabira. Ovaj uređaj je sastavni dio robotskog regulatora i signalizira svakom od pojedinih pogona da uspješno obavlja postavljene mu zadatke. Općenito ne postoji pridružena povratna veza sekvencom ograničenom robotu s ciljem indicacije postignuća željene pozicije. Bilo koji od pogonskih sistema (električki, hidraulički i pneumatski) može se koristiti u ovom sistemu upravljanja. Međutim, najviše su u upotrebi pneumatski pogoni. Roboti ovog tipa primjenjuju se za obavljanje jednostavnih kretanja, kao što su operacije podizanja i spuštanja.

U podpoglavlju 1.3.3 navedene su osnovne karakteristike druge i treće skupine robota. U nekom od narednih poglavlja posvetit će se ovim robotima posebna pažnja.

Roboti koji posjeduju svojstva umjetne inteligencije nazivaju se inteligentni roboti. Inteligentni roboti čine klasu industrijskih robota koji osim posjedovanja mogućnosti ostvarivanja programiranih kretanja

mogu i međudjelovati s okolinom na način ispoljavanja inteligentnih svojstva. Osim toga, ovi roboti mogu tijekom obavljanja određenih radnji mijenjati programske cikluse kao odgovor na promjene uvjeta u radnom prostoru. Jedna od najvažnijih karakteristika inteligentnih robota jeste donošenje odluka na temelju podataka dobivenih od senzora. Tijekom obavljanja operacija inteligentni roboti mogu komuniciranja s čovjekom ili kompjuterskim sistemom. Inteligentni roboti se programiraju upotrebom simboličkih jezika, koji se razlikuju od klasičnih računarskih programskih jezika. Primjena inteligentnih robota proizlazi iz upotrebe jezika visoke razine za izvršavanje složenih i sofisticiranih aktivnosti. Tipične su primjene zadaci montaže i operacije lučnog zavarivanja.

Na kraju se nameću neka etička pitanje glede primjene robota u suvremenoj proizvodnji:

- *Hoće li roboti istisnuti ljude s posla?*
- *Postaje li uvođenje robotizacije samo sebi svrhom?*
- *Služe li roboti ljudima ili ljudi robotima?*