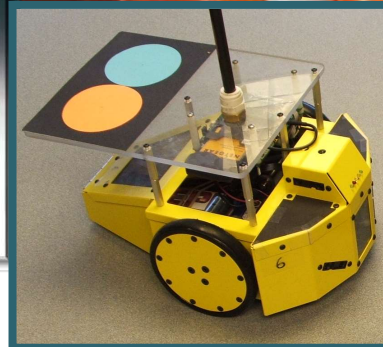


ROBOTIKA I FLEKSIBILNI PROIZVODNI SISTEMI



U ovom semestru razmatraćemo razne aspekte robotike i fleksibilnih proizvodnih sistema



Opštu strukturu robota

Geometriju i kinematiku

Modelovanje robota

Direktnu Kinematiku

Inverznu Kinematiku

Aktuatore u robotici

Senzore

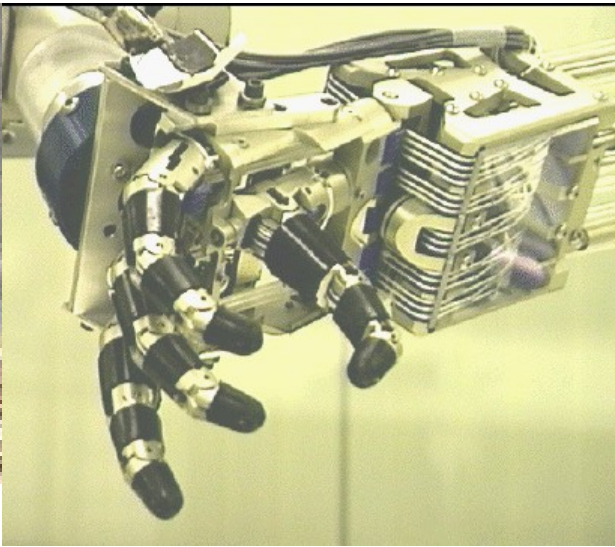
Završni uređaji

Dinamiku Robota

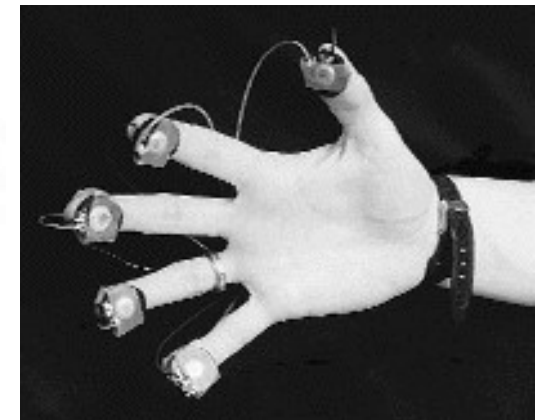
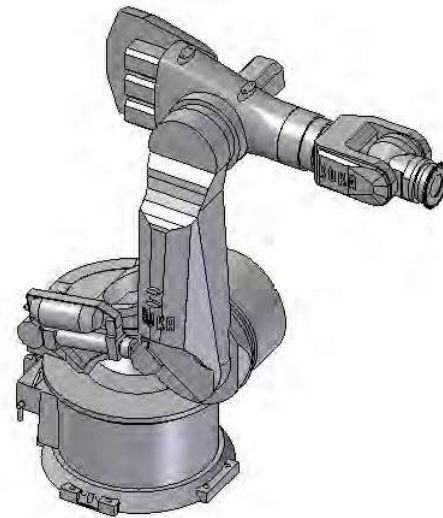
Upravljanje robotima

Primjenu Robota u industriji

Fleksibilni proizvodni sistemi



UVOD U ROBOTIKU



LITERATURA

1. **ROBOTIKA - Veljko Potkonjak**
2. **Uvod u robotiku – Miomir Vukobratović**
3. **Slajdovi sa predavanja**
4. **HANDBOOK of ROBOTICS, Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds.)**

Svi materijali potrebni za pripremu ispita biće dostupni na web stranici predmeta.

Način polaganja ispita

- Ispit se polaže iz dva dijela:
 - Prvi kolokvijum 50 bodova i
 - Završni ispit 50 bodova

UVOD

Robotika (2+0+1)

- Inteligentne mašine i sistemi različitog nivoa složenosti su danas sve prisutniji za obavljanje različitih procesa. Inteligentne mašine sisteme kao što su: roboti, tehnološke ćelije i slično čine stub CIM-sistema (Computer Integrated Manufacturing) koji predstavlja temelj svake koncepcije fabrike budućnosti.
- Industrijski roboti su automatizovani sistemi koji koriste računar kao inteligentni dio upravljanja.



UVOD

Robotika je multidisciplinarna i interdisciplinarna naučna i tehnološka oblast koja se bavi istraživanjem, razvojem, projektovanjem i primjenom robota.

To je oblast koja obuhvata primijenjene inžinjerske nauke (mašinstvo, proizvodno mašinstvo, elektrotehniku, elektroniku), računarske nauke kao i matematiku i mehaniku.

What is a robot?



ROBOT JE :

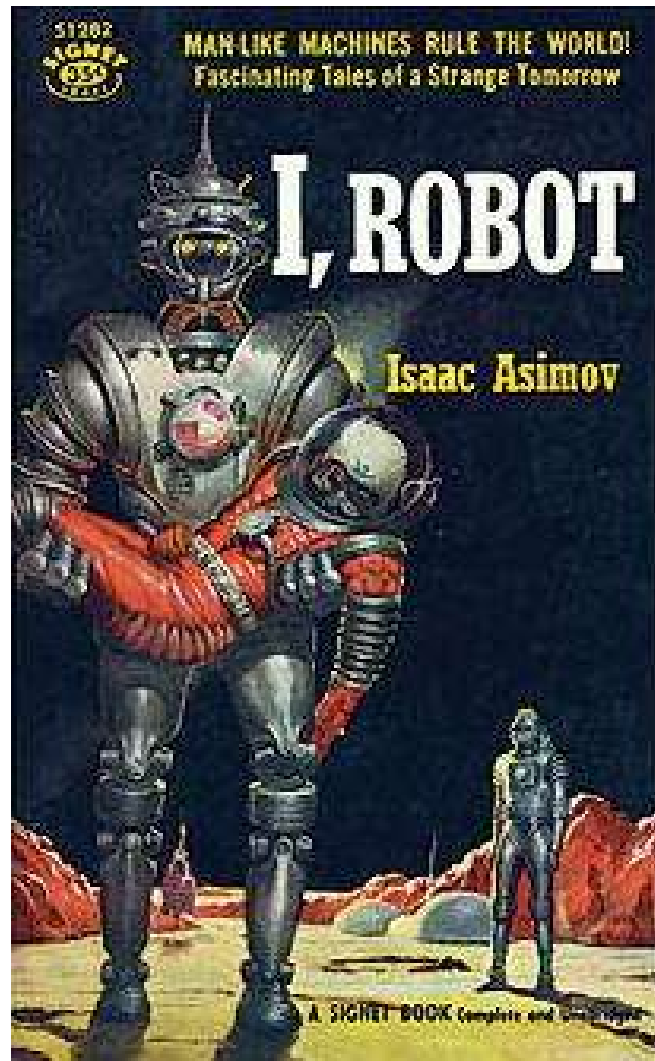
ELEKTROMEHANIČKI UREĐAJ sa osobinama:

- Reprogramabilnosti
- Multifunkcionalnosti
- Osjetljiv na okruženje

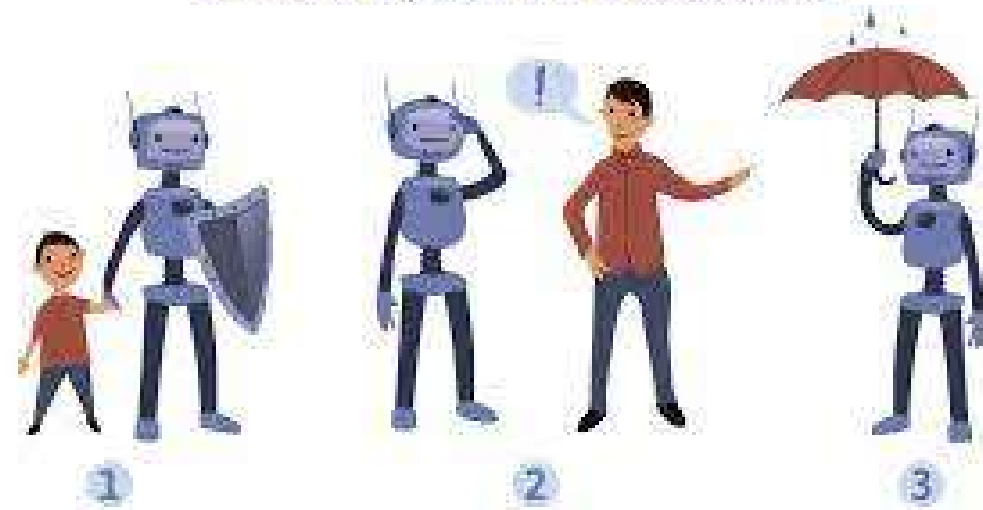
Pisac naučne fantastike Isac Asimov u svojim djelima koristi pojam robota. On je i definisao, u svom djelu Runaround objavljenom 1942. godine, prvi put tri zakona robotike koji glase:

1. robot ne smije ozlijediti ljudsko biće, niti zbog svoje neaktivnosti smije dozvoliti da ljudsko biće bude ozlijeđeno;
2. robot mora slušati naredbe koje mu daju ljudska bića, osim u slučaju kada bi te naredbe kršile prvi zakon;
3. robot mora štiti svoju egzistenciju, osim ako bi to kršilo prvi i drugi zakon.

Ovi zakoni su važeći za konstruktore robota i danas.



Three Laws of Robotics



The Three Laws of Robotics

1 - A robot may not injure a human being, or, through inaction, allow a human being to come to harm.

2 - A robot must obey the orders given it by human beings except where such orders would conflict with the First Law.

3 - A robot must protect its own existence as long as such protection does not conflict with the First or Second Law.

HANDBOOK OF ROBOTICS,
56TH EDITION, 2018 A.D.

UVOD

- Definiciju robota-reprogramabilne i multifunkcionalne mehaničke strukture daje Internacionalna organizacija za standardne:

„Robot je mašina koja se sastoji od mehanizama sa više stepeni slobode kretanja, a sposoban je da vrši manipulaciju sa alatom, radnim predmetom ili nekim drugim sredstvom“.

UVOD

- Komercijalna primjena industrijskih robota sa računskim upravljanjem - kompjuterizovanih industrijskih robota počinje 70-tih godina XX vijeka.
- Automatizacija procesa i mašina nalazi primjenu prvenstveno kod izvođenja proizvodnih procesa i upravljanjem mašinama a manje kod drugih takođe važnih proizvodnih aktivnosti kao što su: opsluživanje radnog mjesta, pozicioniranje radnog komada i slično.

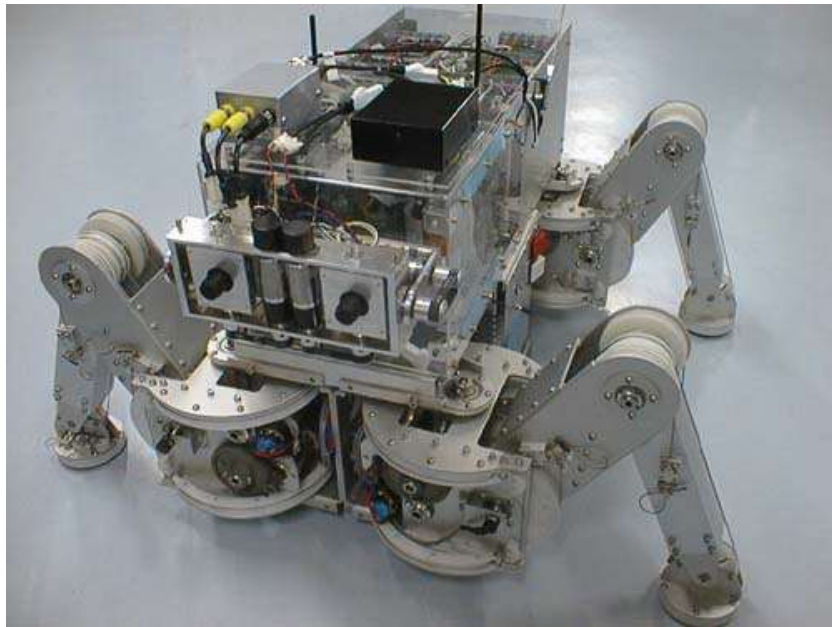
Industrijski roboti nalaze primjenu za :

- Opsluživanje radnog mjesta,
- Držanje materijala u radnoj poziciji u raznim fazama izrade i operacioni transport,
- Tehnološke operacije (tipični primjeri ove kategorije su postali zavarivanja, bojenja, brušenja, lemljenja, lijepljenja, čišćenja, poliranja itd.)
- Automatsku montažu i
- Predprocesnu, procesnu i poslijepocesnu kontrolu.

Manipulator



Legged Robot



Wheeled Robot



Autonomous Underwater Vehicle



Unmanned Aerial Vehicle



- Industrijski roboti su idealni za poslove koji se smatraju teškim i nepogodnim za ljude.
- Koriste se za poslove koji se ponavljaju više puta i kao takvi se smatraju monotonim. U onim procesima gdje se traži visok kvalitet i velika produktivnost takođe se koriste industrijski roboti.

What Can Robots Do: I

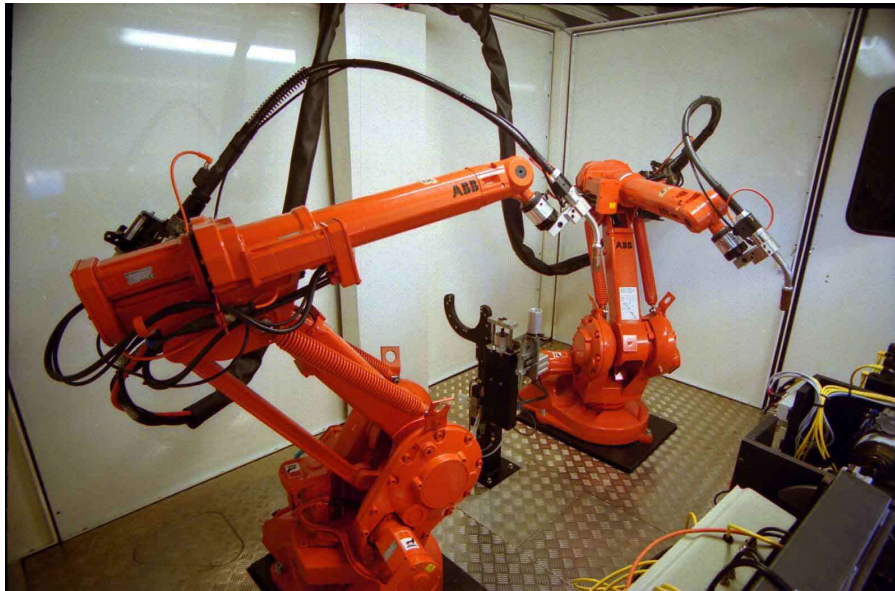


Jobs that are dangerous
for humans

Decontaminating Robot

Cleaning the main circulating pump housing
in the nuclear power plant

What Can Robots Do: II



Repetitive jobs that are boring, stressful, or labor-intensive for humans

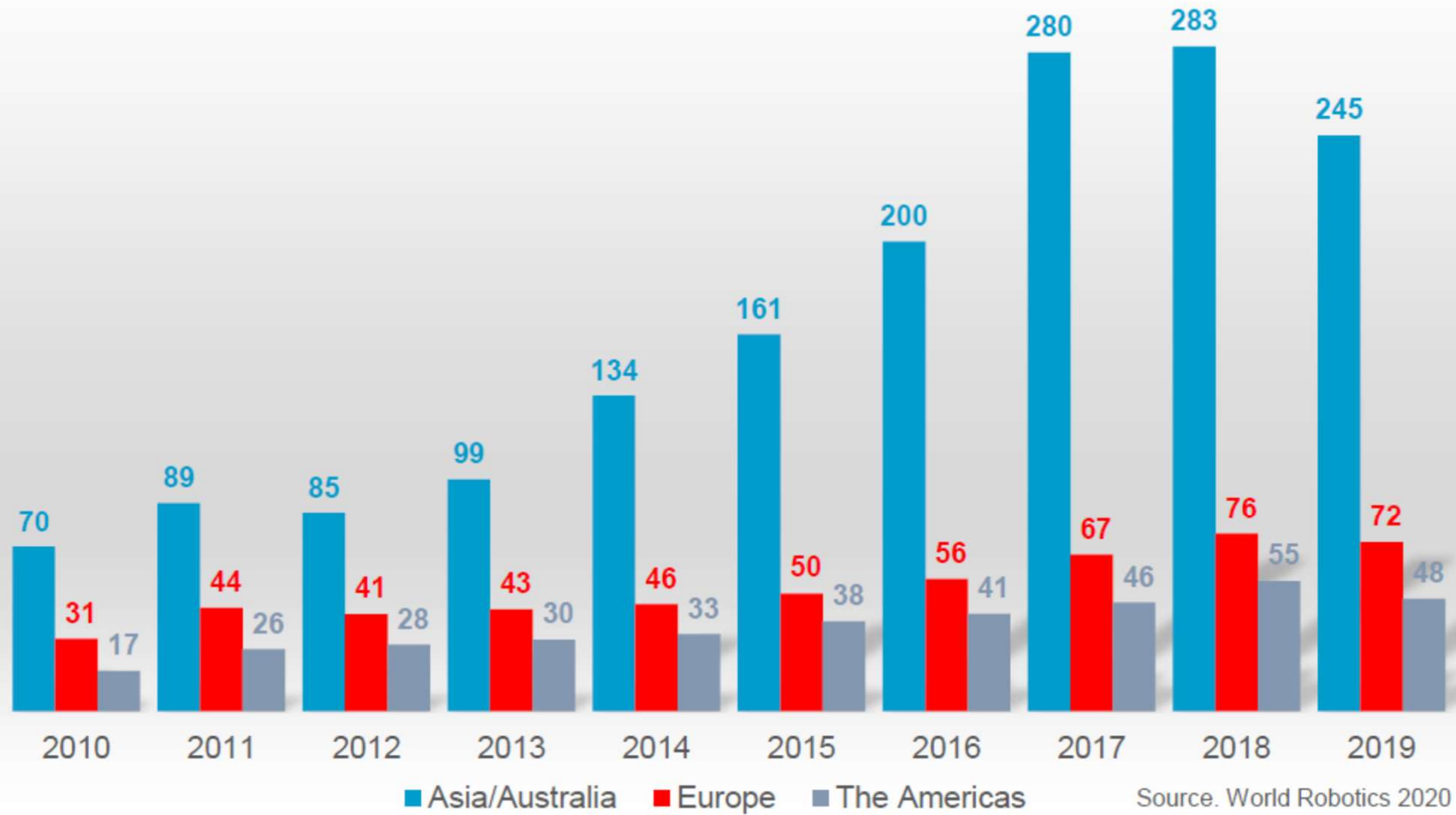
Welding Robot - zavarivanje



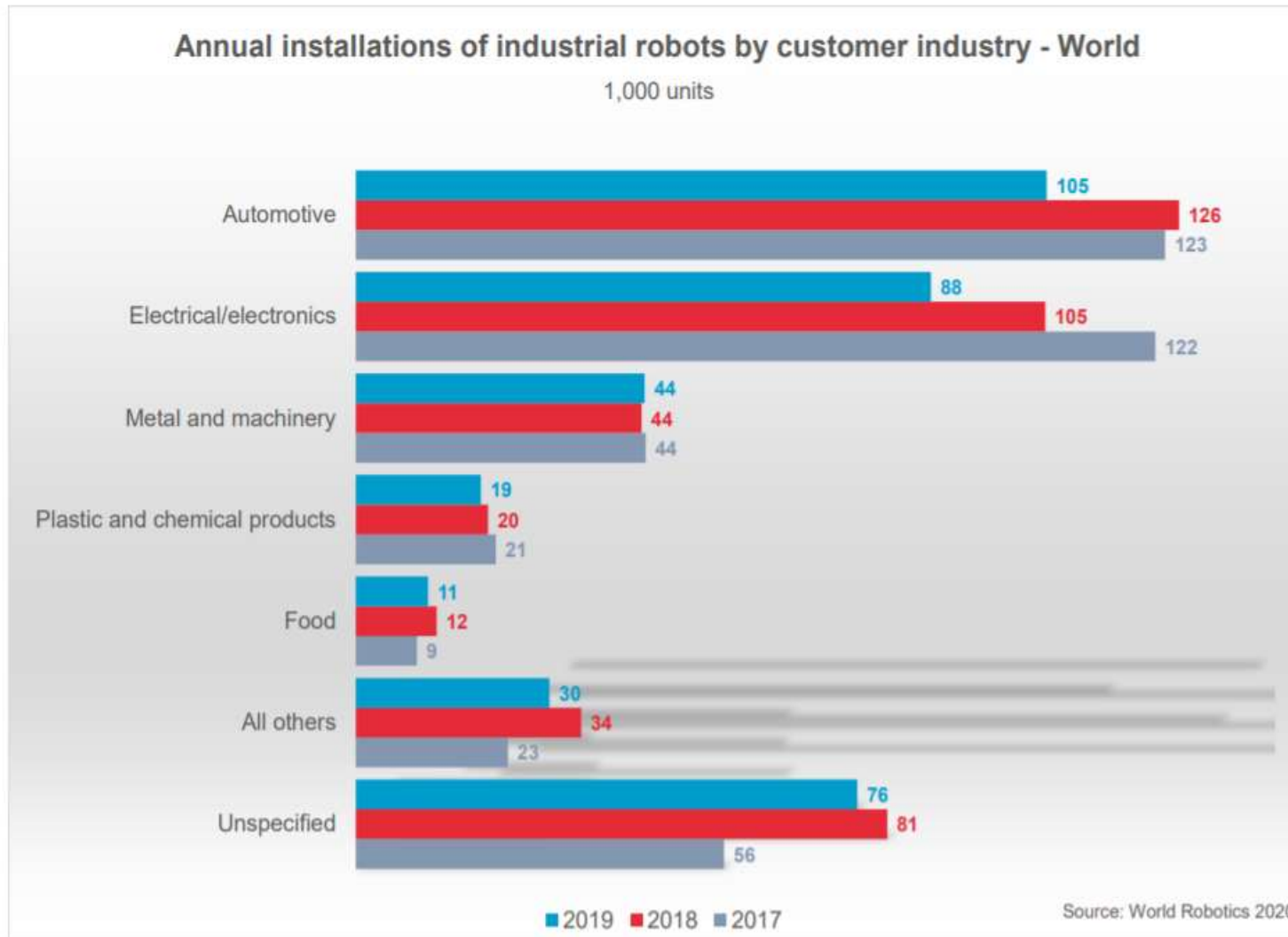
- Savremena industrijska proizvodnja u većini svojih grana uspješno koristi robotske sisteme.
- Kada je u pitanju pokretljivost pojedinih elemenata robota, mogućnost izvođenja različitih putanja, sposobnost dosezanja u bilo koju tačku manipulacijskog prostora sa postizanjem određene orijentacije, može se reći da su mogućnosti primjene robota u proizvodnji praktično neograničene.

- Ono što ograničava primjenu robota u pojedinim operacijama jeste pitanje ekonomičnosti.
- Nije rentabilno da jedna robotska struktura velikog volumena radnog prostora, velikih brzina i snage, obavlja radne zadatke za koje u potpunosti ne iskorištava svoje sposobnosti. Iz tog su razloga dizajnirani proizvodni raznovrsni industrijski roboti specijalno za određenu vrstu radnih zadataka.

Annual installations of industrial robots ('000 of units)



<https://ifr.org/>



1. Istorijski razvoj robota

- Roboti su ljudima bili i uvijek će biti vječita preokupacija. Želja čovjeka da neko drugi radi umjesto njega, uglavnom teške i zamorne poslove, kroz istoriju se rješavala na razne načine - robovi, kmetovi, ali bilo je i onih nastojanja koja su išla u pravcu da se taj problem riješi primjenom tehnike

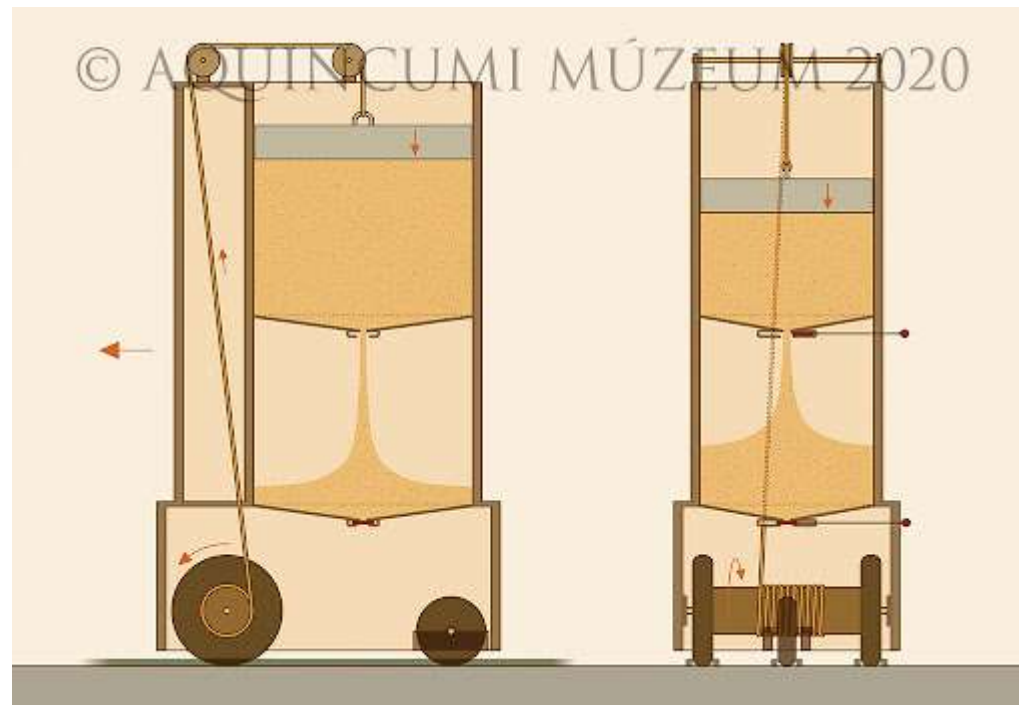
- Ideje i izvedbe mehaničkih automata su dosta stare, počev od antičkog doba 880. god. p.n.e. Homer opisuje pokretne tronošce u *Ilijadi*, zatim Aristotel, 350. god. p.n.e., "mašta" o mehanizmima čiji će se rad temeljiti na "pokornosti i predosjećanju" da bi se 1350. god. montirao mehanički pijetao na vrh Katedrale u Strasbourgu (Francuska).
- Bilo je potrebno gotovo petsto godina (1801. Joseph-Marie Jacquard) do pronalazka automatskog tekstilnog razboja koji je upravlján bušenim karticama.
- Nakon toga Seward Babbitt projektuje motorizirani kran i hvatače za vađenje čeličnih ingota iz visokih peći.

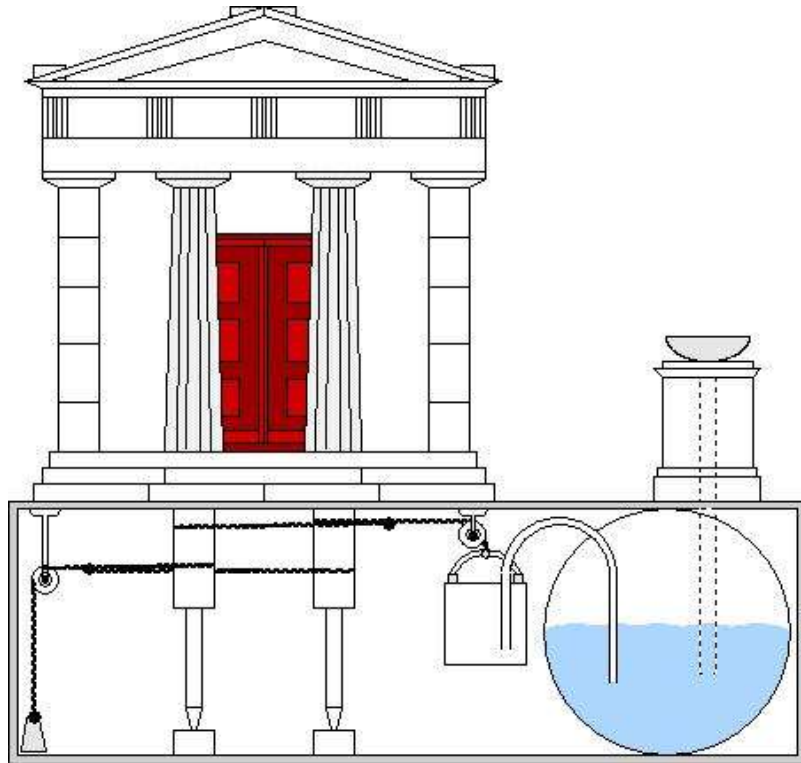
≈250 BC - Ctesibius, starogrčki inženjer i matematičar, izumio je vodeni sat koji je bio najprecizniji gotovo 2000 godina.



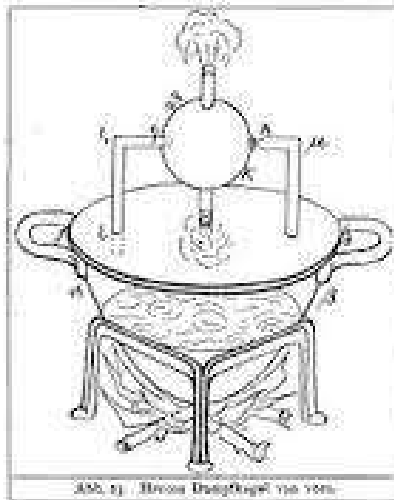
Hydraulic clock of Ctesibius, reconstruction at the Technological Museum of Thessaloniki

≈ 60 A.D. - **Hero of Alexandria** dizajnira prvu automatizovanu programabilnu mašinu. Ovi „Automati“ su napravljeni od posude za postepeno oslobađanje pijeska, spojenog na vreteno nizom. Korišćenjem različitih konfiguracija ovih remenica bilo je moguće ponoviti pomeranje statue na unapred definisanoj putanji.





Mehanizam za otvaranje vrata hrama
Hero of Alexandria



the steam engine by the Hero of Alexandria

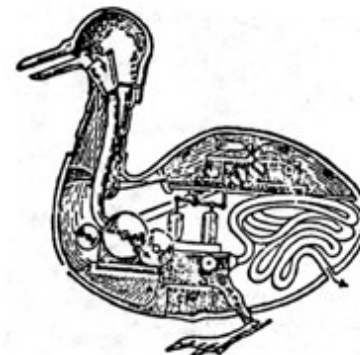
≈ 1250 - Biskup Albertus Magnus održava banket na kojem su goste poslužile metalne sluge. Kad je ovo vidio, sveti Toma Akvinski razbio je poslužitelje na komade i nazvao episkopa čarobnjakom.



1640 - Descartes gradi ženski automat koji naziva „Ma fille Francine“. Ona je pratila Dekarta na putovanju, a kapetan ju je izbacio sa broda, smatrajući da je to delo Sotone.



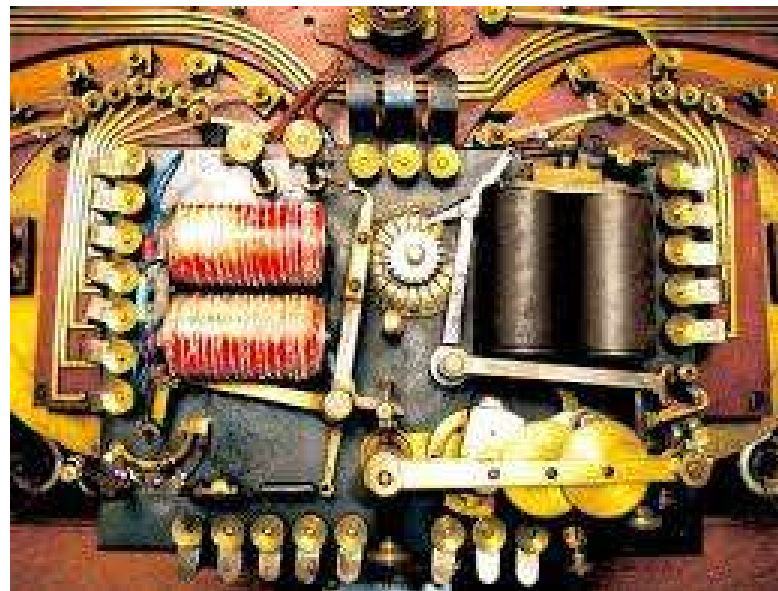
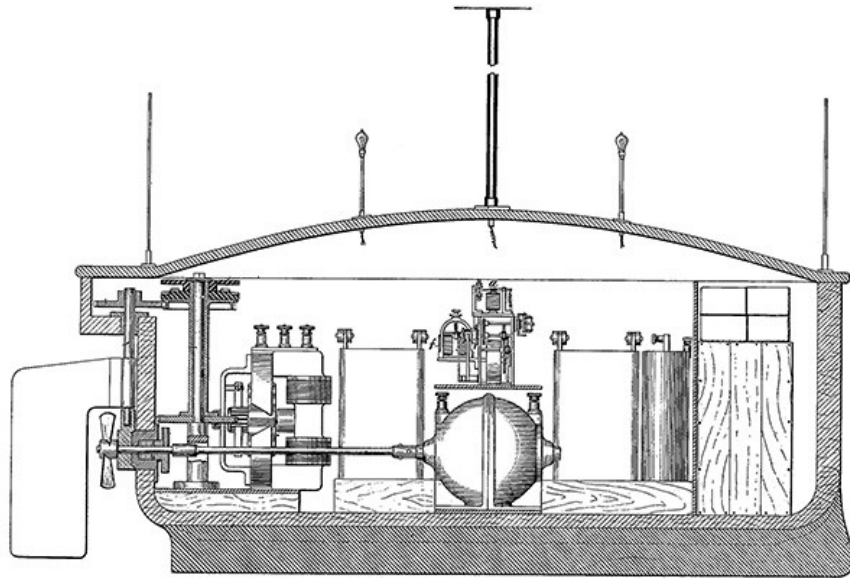
1738 - Žak de Vaukanson napravio je mehaničku patku napravljenu od više od 4.000 delova. Patka je mogla kvocati, kupati se, piti vodu, jesti žito. Gde se patka nalazi danas nije poznato.



1805. - Lutka Maillardet, koja je pisala na francuskom ili engleskom jeziku i mogla je crtati pejzaže.



1898. - Prvi radio -upravljeni čamac izumio je Nikola Tesla.



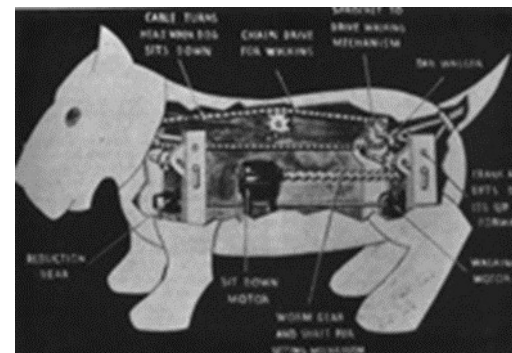
Naziv robot se prvi put susreće u XX vijeku. Ovaj naziv uveo je češki književnik Karel Čapek 1921. godine u svojoj drami "R.U.R." (Rossum's Universal Robots).

U ovoj drami su opisana bića slična ljudima, ali bez emocija. Izraz robot potiče od češke riječi "robota", što znači najamnik, kmet.



Karel Čapek

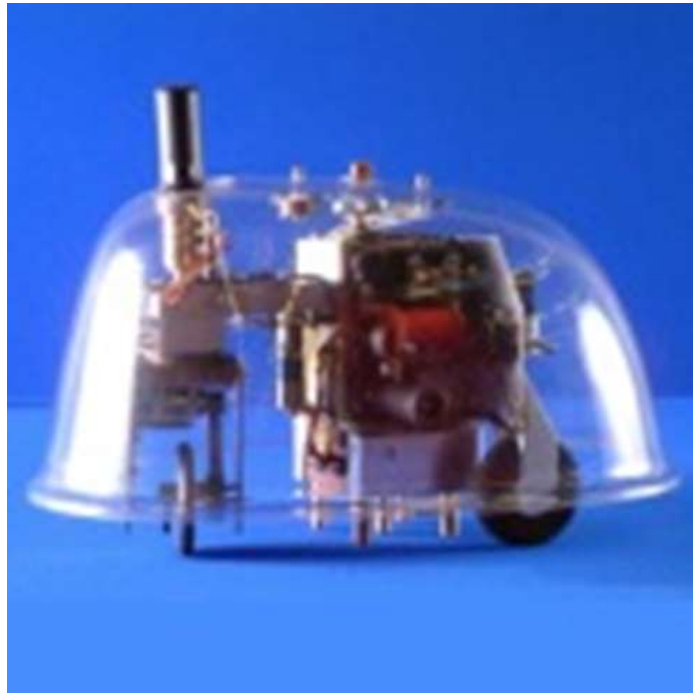
1940. - Sparko, pas Vestinghouse, koristi i mehaničke i električne komponente.



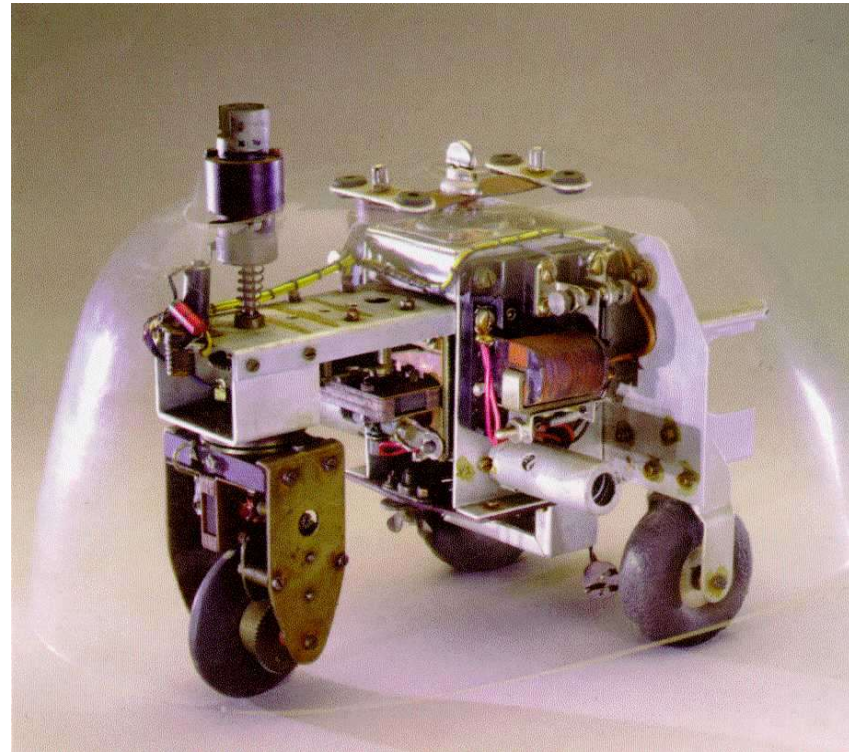
1941. - Isak Asimov uveo je reč „Robotika“ u naučnofantastičnu pripovjetku „Lažov!“

1948. - Villiam Grei Valter izgradio je Elmera i Elsie, dva najranija autonomna robota sa izgledom kornjača. Roboti su koristili jednostavna pravila za stvaranje složenih ponašanja.





Turtle robot



1960 -ih - stvoreni su industrijski roboti. **Robotic Industries Association** navodi da je „industrijski robot reprogramibilan, višenamjenski manipulator dizajniran za pomicanje materijala, dijelova, alata ili specijaliziranih uređaja kroz promjenjive programirane pokrete za obavljanje različitih zadataka“.



1961. - Prvi **Unimate** robot instaliran je u fabrici u Trentonu, NJ General Motors, za mašinu za livenje pod pritiskom. Ključ je bio reprogramiranje i preuređivanje mašine za obavljanje različitih zadataka. Robot Unimate bio je inovativan mehanički dizajn zasnovan na konzolnoj gredi sa više stepena slobode. Fleksibilnost snopa predstavljala je izazove za kontrolu. Hidraulična akcija je na kraju korišćena za ublažavanje problema sa preciznošću.

June 13, 1961

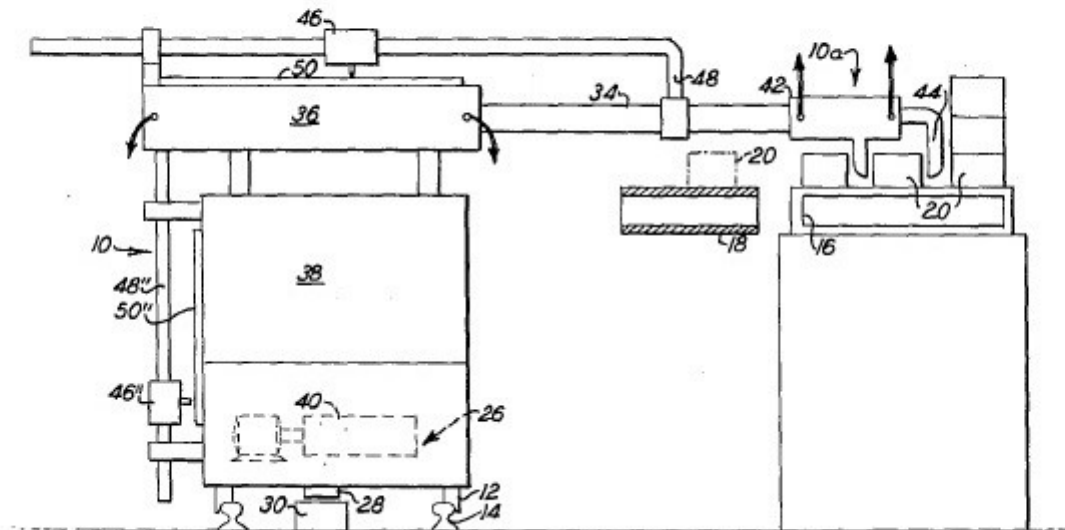
G. C. DEVOL, JR

2,988,237

PROGRAMMED ARTICLE TRANSFER

Filed Dec. 10, 1954

3 Sheets-Sheet 1



1962. - 1963. - Uvođenje senzora smatra se načinom za poboljšanje rada robota. Ovo uključuje detekciju sile za slaganje blokova (Ernst, 1961), sistem vida za binarno odlučivanje o prisustvu prepreka u okruženju (McCarthy 1963), senzore pritiska za hvatanje (Tomovic i Boni, 1962). Interakcija robota sa nestrukturiranim okruženjem u MIT -ovoj AI laboratoriji (čovjek i računar - MAC projekat).



BEOGRADSKA ŠAKA



Unimate 1



Moon Walk



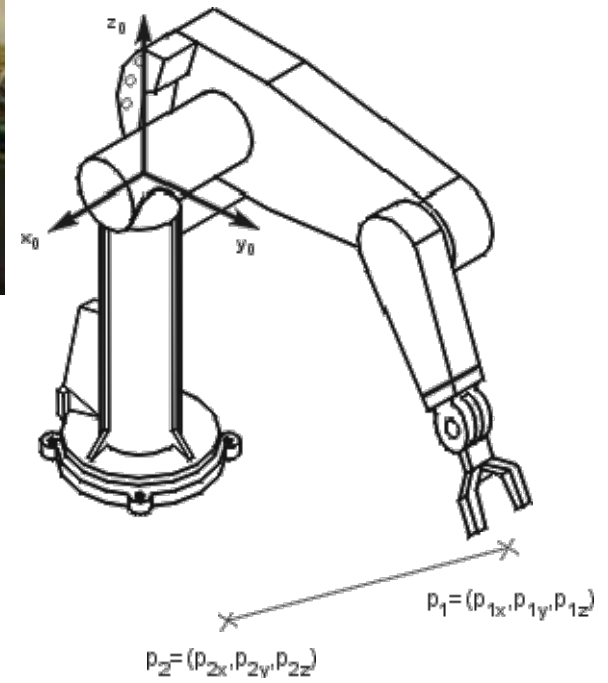
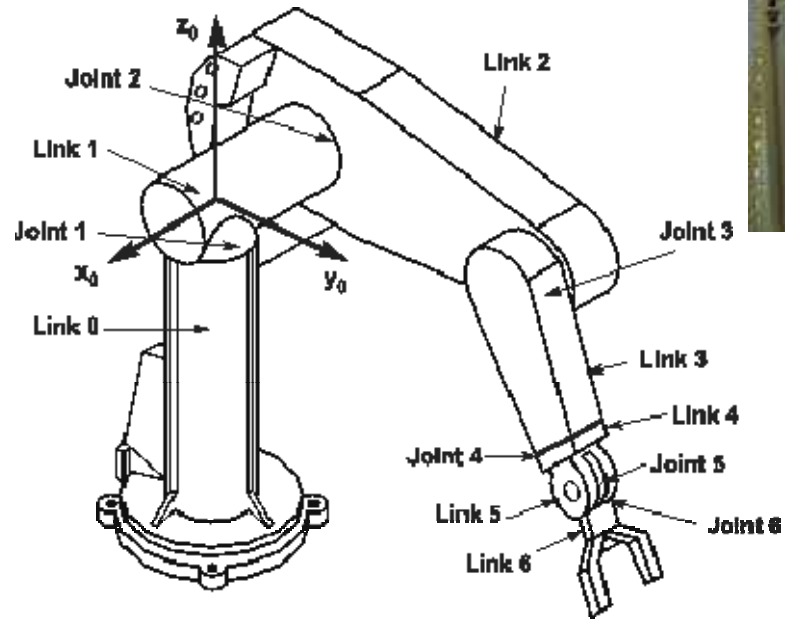
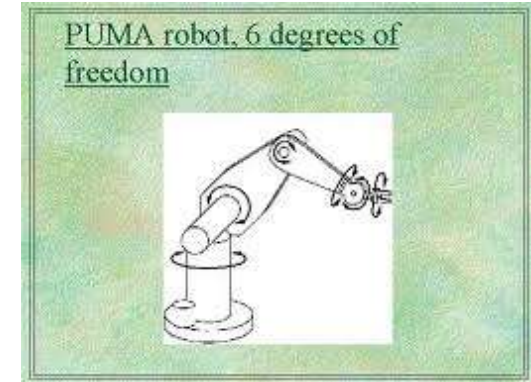
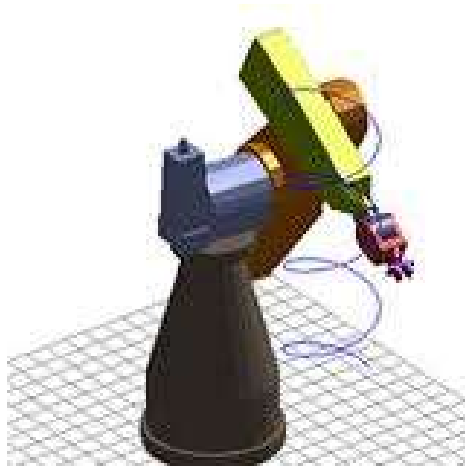
Shakey

Dva najznačajnija industrijska manipulatora:

1978- Puma (Programmable Universal Machine for Assembly), proizvođač Unimation.

1979 - SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) uveden u Japanu i USA , proizvođač Adept Technologies.

PUMA



SCARA

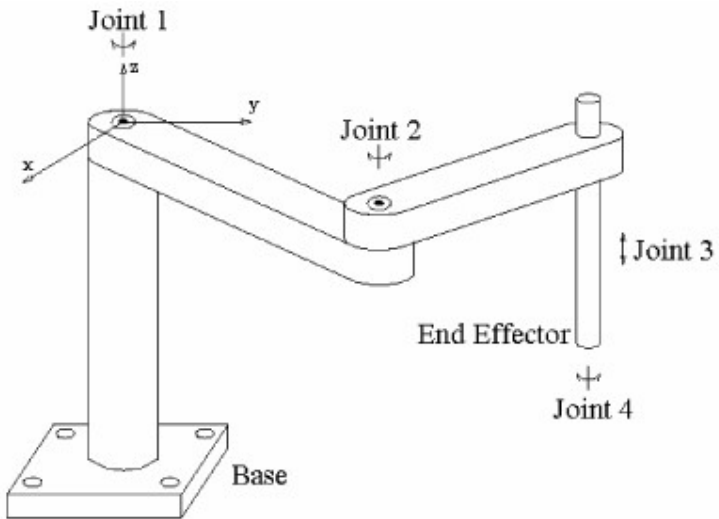
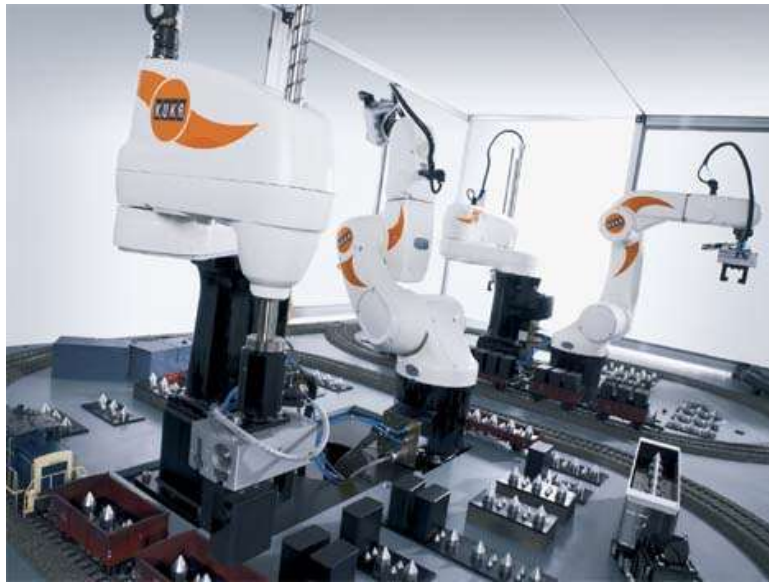


Figure 5. SCARA - Selective Compliance Assembly Robot Arm.



E2L SCARA Robots

E2L853S **E2L653S**

EPSON **EPSON**

Longer Reach for the Larger Jobs!

Cycle Times Down to 0.38 secs!

UL LISTED CE



Lunokhod 1



Intel 4004



R2-D2 and C-3PO



Asimo



Sojourner



Lego Mindstorms



Sony AIBO



Sony QRIO



MQ-1 Predator



Actroid



Mars Exploration Rover



Robonaut-2

Robotika je multi-disciplinarno polje istraživanja.

Najbolji istraživači i inženjeri robotike dodirnuće sve ove discipline:

- **Mašinski inženjering** – koji se prvenstveno bavi dizajnom manipulatora/mobilnog robota, kinematikom, dinamikom, usklađenošću i aktuacijom.
- **Elektro inženjering** – koji se prvenstveno bavi aktuacijom robota, elektronskim povezivanjem sa računarima i senzorima i upravljačkim algoritmima.
- **Kompjuterskim inženjeringom (ICT)** – koji se prvenstveno bavi programiranjem, planiranjem i inteligentnim ponašanjem robota.

ŠTA je Robot?

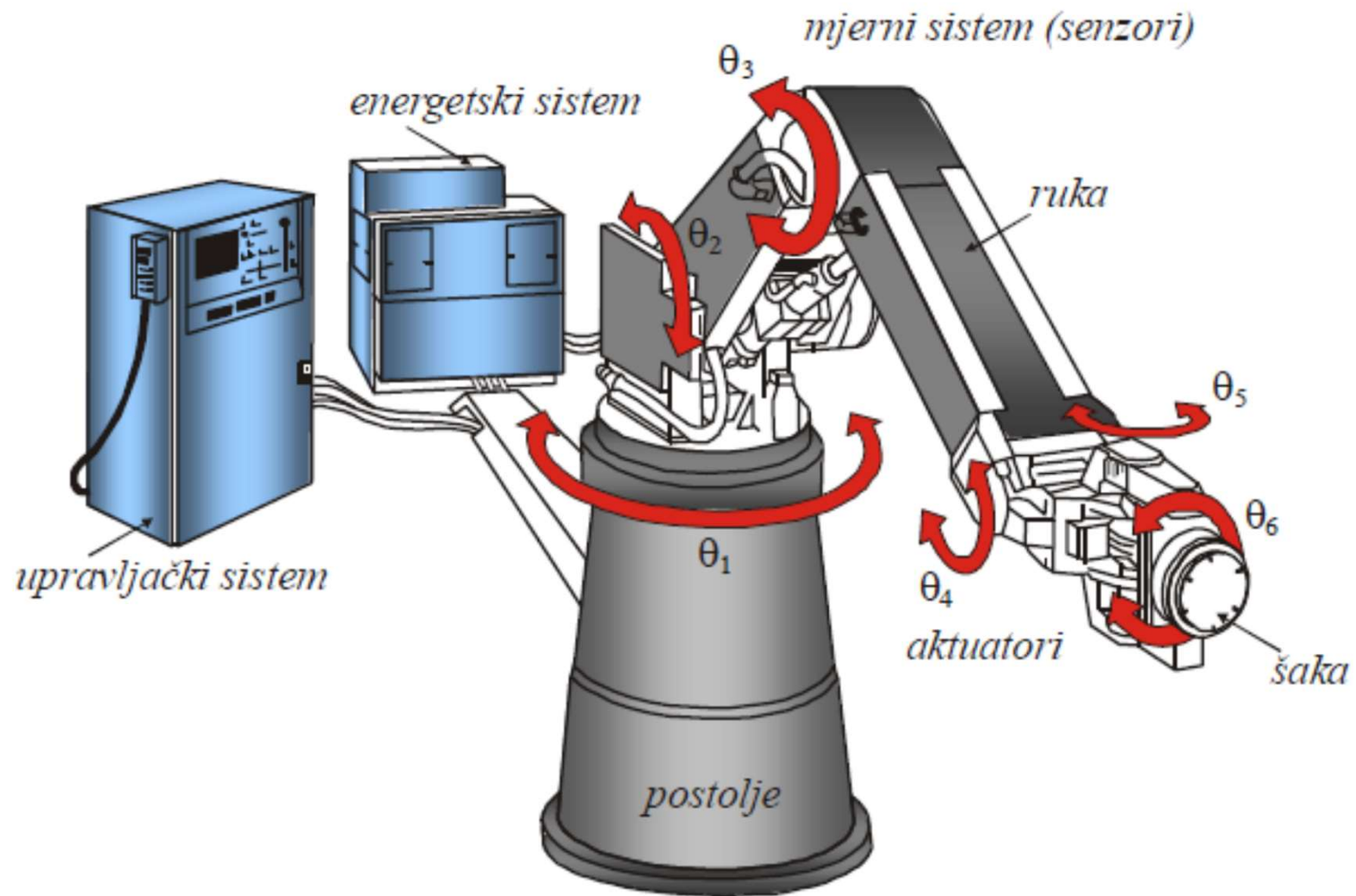


GEOMETRIJA I KINEMATIKA ROBOTA

Osnovni pojmovi

Industrijski robot je uređaj koji se koristi za poslove manipulacije materijala na bazi upravljanja. Sama konstrukcija robota sadrži sljedeće neophodne sisteme:

- mehanički sistem,
- energetski sistem,
- mjerni sistem,
- upravljački sistem.



GEOMETRIJA I KINEMATIKA MEHANIZMA ROBOTA

Razmatraćemo probleme geometrije mehanizma robota, i na početku dati kratak pregled sadržaja .

Kako je mehanička struktura robota, u stvari, jedan zglobni mehanizam, to ćemo najprije definisati i objasniti neophodne pojmove iz teorije mehanizama. Zatim ćemo definisati geometriju manipulacionih robota a posebno ćemo obraditi slučajeve koji se javljaju u praktičnim realizacijama.

U okviru izlaganja o kinematici govorićemo o brzini i ubrzanju u zglobovima mehanizma i pokazati vezu sa tzv. korisnom brzinom prenošenja radnog predmeta.

Tokom razmatranja kinematike najviše ćemo se baviti pitanjem određivanja položaja i kretanja robota preko takozvanih **unutrašnjih** i **spoljašnjih** koordinata.

Tu se obrađuje i način preračunavanja kretanja iz jednih koordinata u druge, odnosno direktni i inverzni problem kinematike robota.

Kinematički parovi

Teorija mehanizama, kao oblast nauke i tehnike, proučava sisteme tela međusobno povezanih raznim tipovima veza. Iz ove veoma široke oblasti izvući ćemo one pojmove koji su bitni za proučavanje robotike. Pri tome, zadržaćemo određeni nivo strogosti u definicijama tih pojmova, a istovremeno ćemo se rukovoditi time da objašnjenja budu što jednostavnija i jasnija.

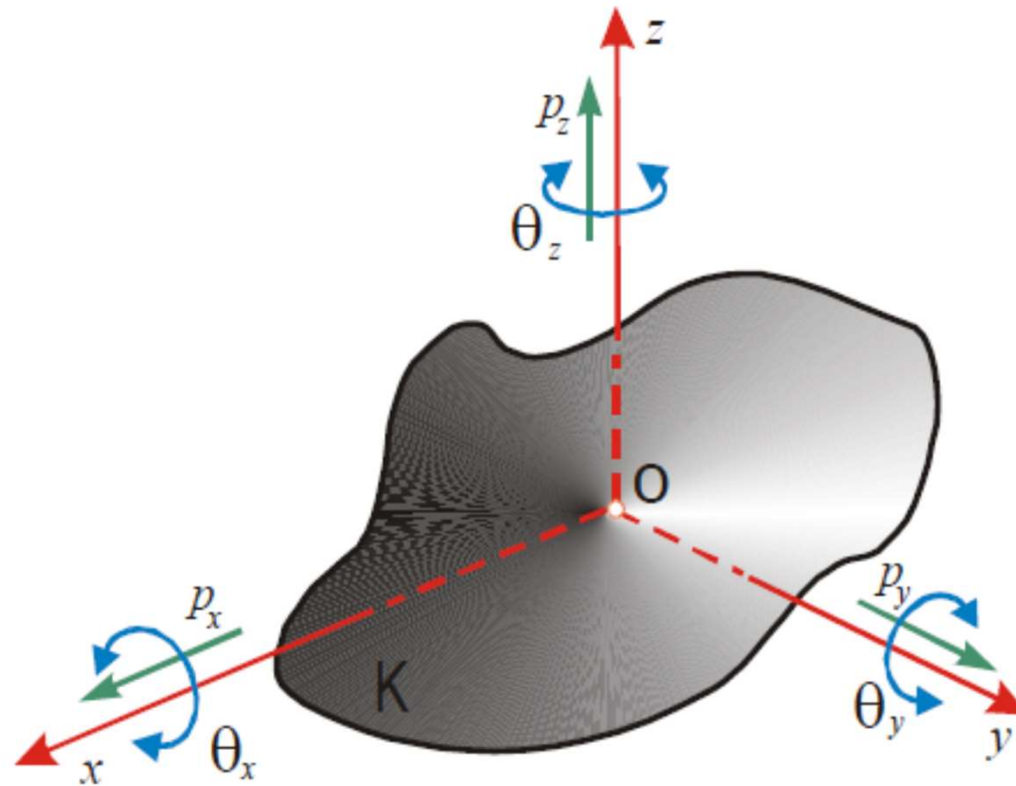
Prvo, potrebno je proučiti tipove veza tijela koja obrazuju mehanizam, a zatim različite strukture mehanizama koji se javljaju u robotici.

Kinematički par podrazumijeva dva međusobno povezana tijela. U zavisnosti od veze od načina vezivanja ta dva tijela, kinematičke parove dijelimo na određene klase.

Ako se međusobno povežu dva tijela, od kojih je barem jedno pokretno, tad nastaje zglob, odnosno kinematički par.

KINEMATIČKI PAROVI

Posmatračemo prvo jedno slobodno tijelo. Ono može da se kreće na šest nezavisnih različitih načina: može da se kreće translatorno duž osa x , y , z i može da se obrće oko svake od tih osa dakle ima tri moguće, odnosno slobodne translacije i tri slobodne rotacije.



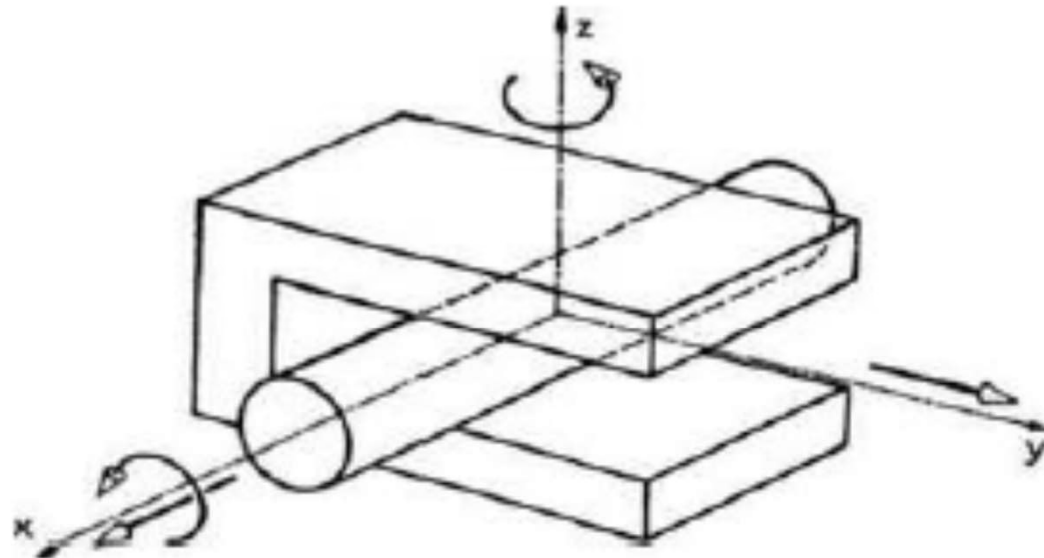
KINEMATIČKI PAROVI

- Iz toga zaključujemo da je potrebno šest veličina (koristićemo izraz parametri) da bi se jednoznačno odredio položaj tijela: tri parametra da bi se odredilo translatorno kretanje i tri da bi se odredilo rotaciono kretanje, odnosno orijentacija tela.
- Broj stepeni slobode je broj slobodnih (odnosno mogućih) nezavisnih kretanja, ili drugačije rečeno, to je broj nezavisnih parametara koji su potrebni da bi se jednoznačno odredio položaj tijela.
- Nastajanjem zgloba dolazi do smanjenja mogućnosti kretanja, pa je i stepen slobode kretanja manji tj. $DOF < 6$.

KINEMATIČKI PAROVI

Posmatrajmo sada dva tijela, valjak i kliješta, međusobno vezana na način kako je to pokazano na slici.

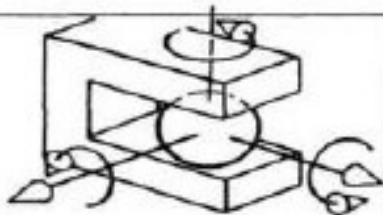
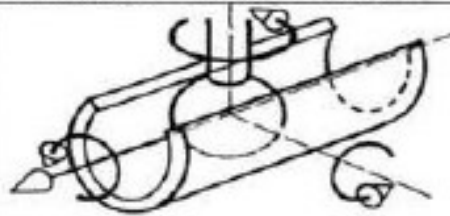

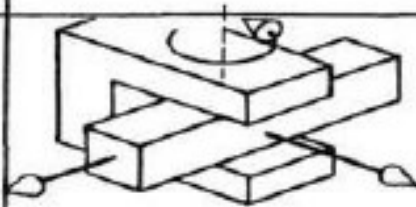



Valjak, u odnosu na kliješta ima dvije slobodne translacije (duž x i y ose) i dvije slobodne rotacije (oko x i z ose), dakle postoje ukupno 4 slobodna međusobna kretanja ova dva tijela. Zato kažemo da ovaj kinematički par ima 4 stepena slobode..



Sl. 2.2. Primer kinematičkog para sa 4 stepena slobode

Izgled kinematičkih parova

U tabeli na slici dati su neki slučajevi kinematičkih parova, njihova moguća kretanja, broj stepeni slobode i klasa kinematičkog para.

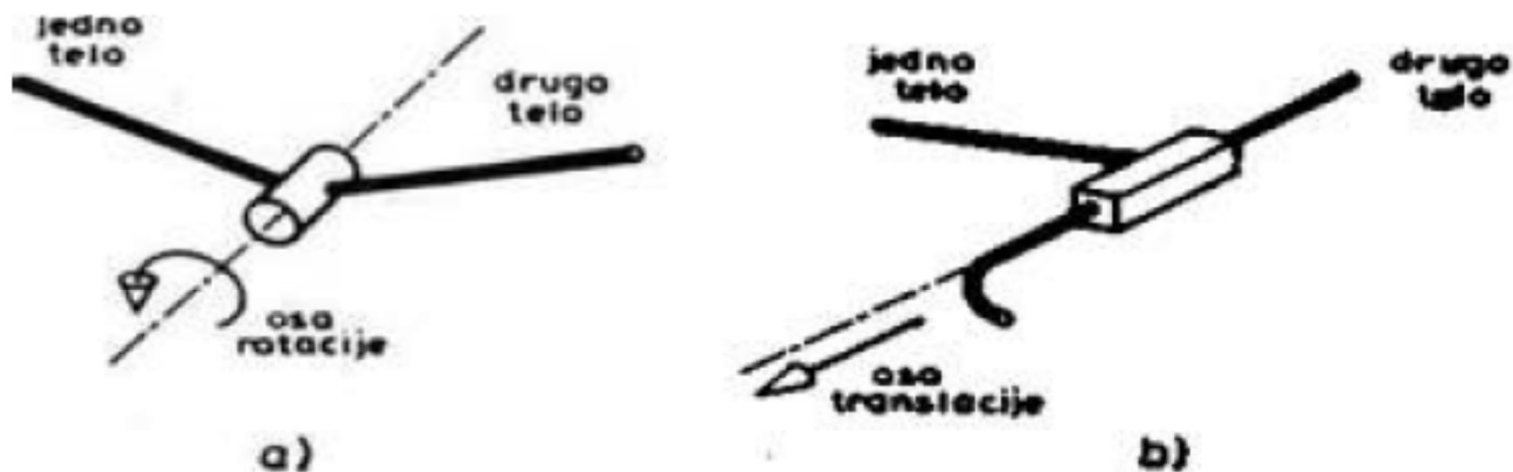
klasa kinem. para	broj stepeni slobode		
I	5	 <p>3 rotacije + 2 translacije</p>	
II	4	 <p>3 rotacije + 1 translacija</p>	
III	3	 <p>3 rotacije + 0 translacije</p>	 <p>1 rotacija + 2 translacije</p>
IV	2	 <p>1 rotacija + 1 translacija</p>	
V	1	 <p>1 rotacija + 0 translacije</p>	 <p>0 rotacije + 1 translacija</p>

Klasa kinematskog para	Broj stepeni slobode kretanja f	Prikaz kinematskog para
I klasa	$f=5$ 3 rotacije + 2 translacije	
II klasa	$f=4$ 3 rotacije + 1 translacije	
III klasa	$f=3$ a) 3 rotacije + 0 translacija b) 1 rotacija + 2 translacije	
IV klasa	$f=2$ 1 rotacija + 1 translacija	
V klasa	$f=1$ a) 0 rotacija + 1 translacija b) 1 rotacija + 0 translacija	

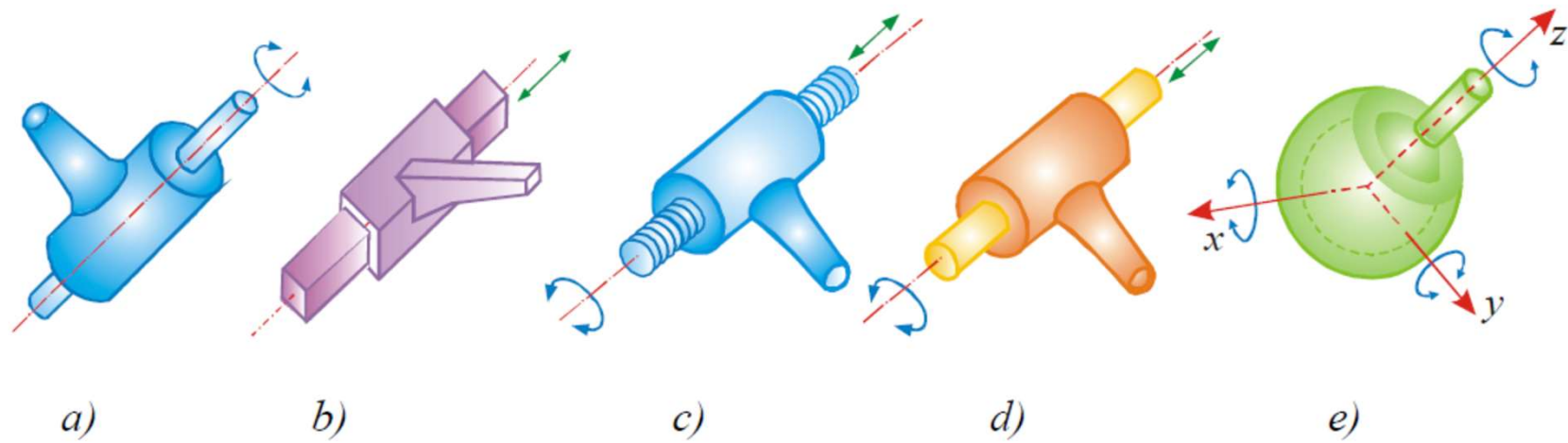
Za primjenu u robotici najvažniji su kinematički parovi pete klase.

Kinematički par pete klase koji dozvoljava samo jednu rotaciju zvaćemo **rotacionim parom ili rotacionim zglobovom**, a par koji dozvoljava samo jednu translaciju zvaćemo **translatorskim parom ili translatorskim zglobovom**.

Te parove ćemo shematski crtati kao na slici.



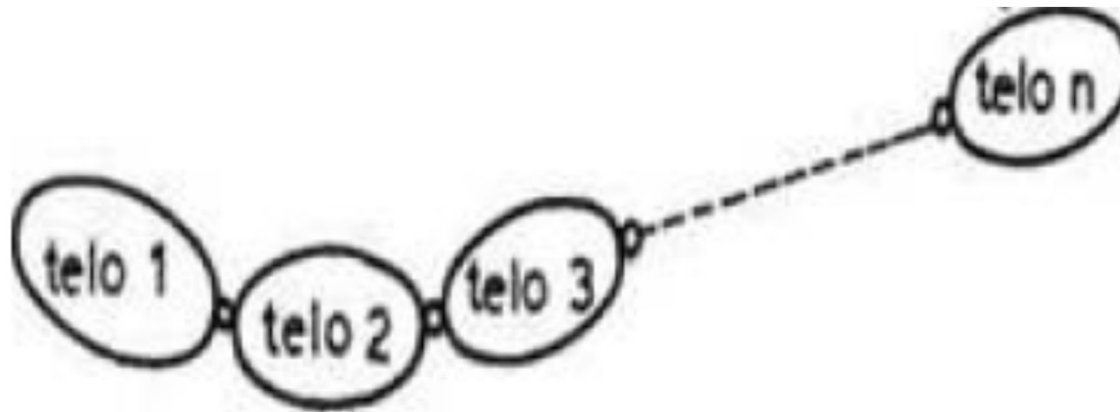
Sl. 2.4. Rotacioni (a) i translatorski (b) zglob



Vrste zglobova : a) rotacioni, b) translatorni, c) vijčasti, d) valjkasti, e) kuglasti

Kinematički lanci

Nizove tijela povezanih kinematičkim parovima nazivamo kinematičkim lancima. Ovdje ćemo podrazumijevati da su veze oblika rotacionih ili translatorskih zglobova. Shematski, kružić između dva predstavlja bilo koji od zglobova. Složeniji zglobovi razlažu se na zglobove pete klase između kojih se nalaze kratki segmenti.

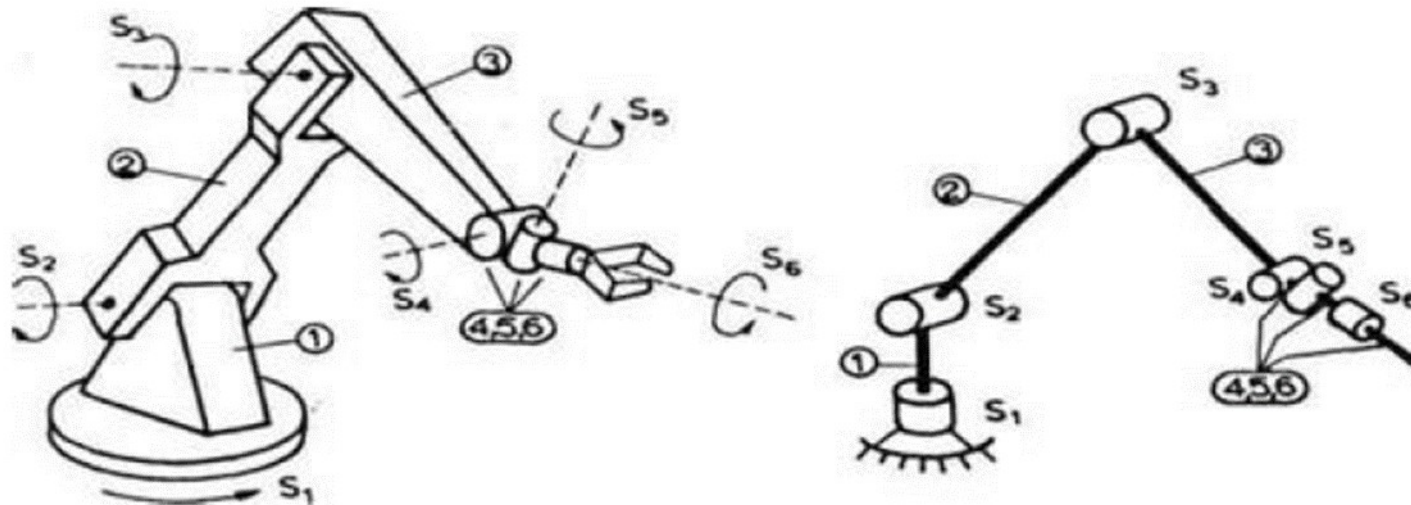


Segment – link

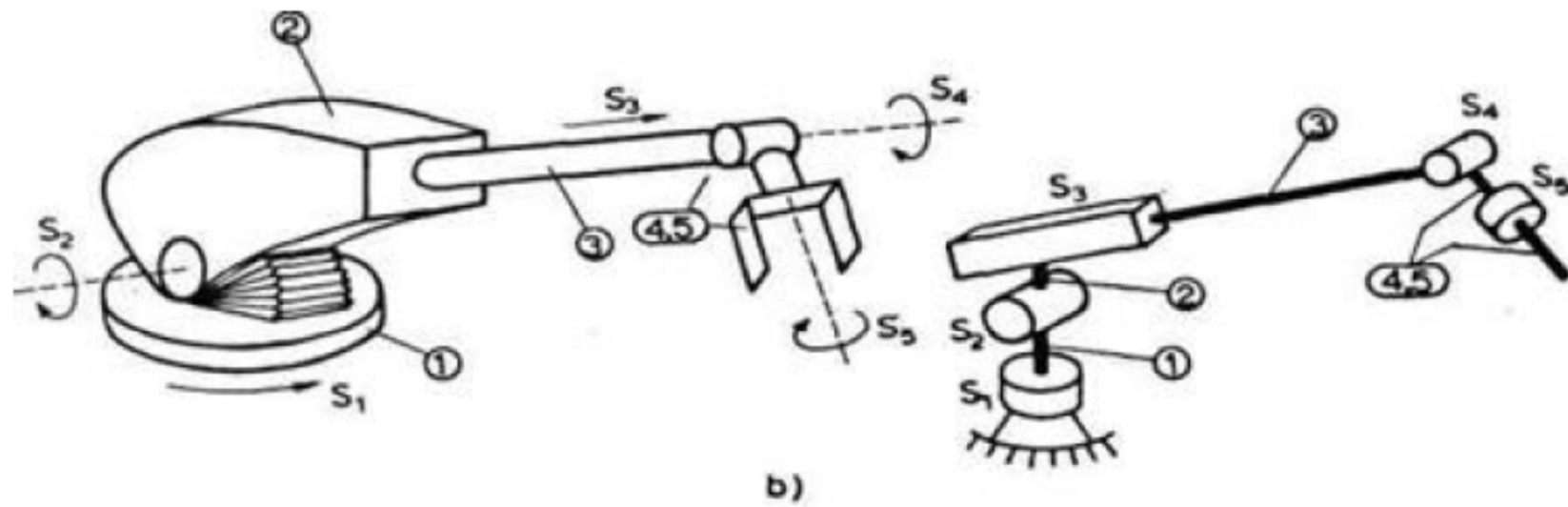
Zglob – joint

Nizove tijela povezane kinematičkim parovima nazivamo kinematičkim lancima

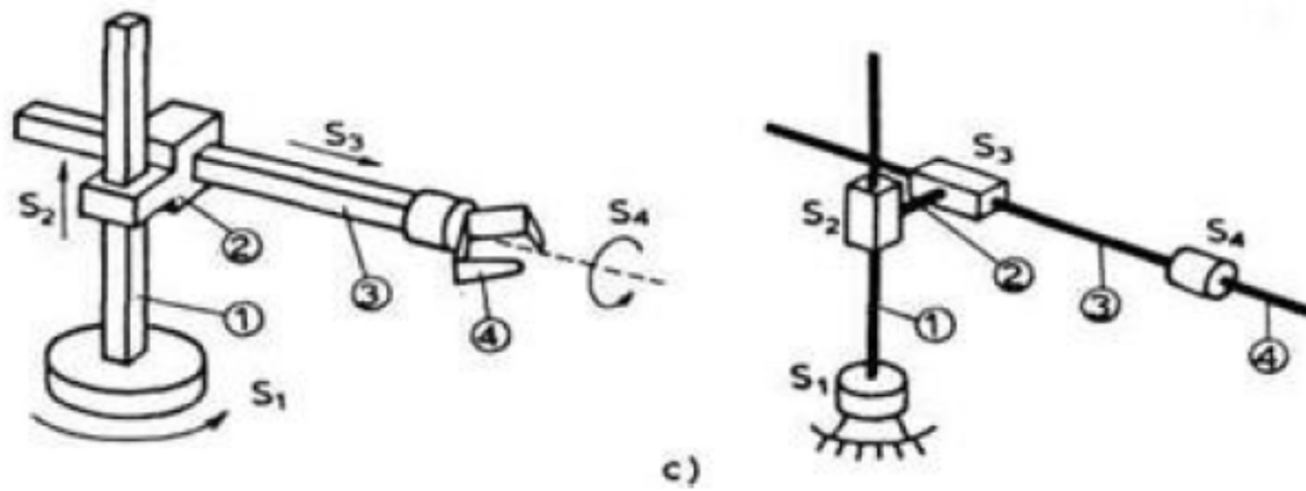
Kinematički lanci su posebno važni u robotici zato što mehanizam svakog robota predstavlja, u stvari, jedan kinematički lanac. Na slikama u nastavku je predstavljeno nekoliko manipulacionih robota i shematski su prikazani odgovarajući kinematički lanci.



Svako tijelo, elemenat lanca, nazivaćemo segmentom lanca. Segmente lanca smatramo krutim, nedeformabilnim tijelima. Lanac se, dakle, sastoji od niza zglobova i segmenata. Zglobovi su obilježeni sa S_1, S_2, \dots , a segmenti sa 1,2, ...

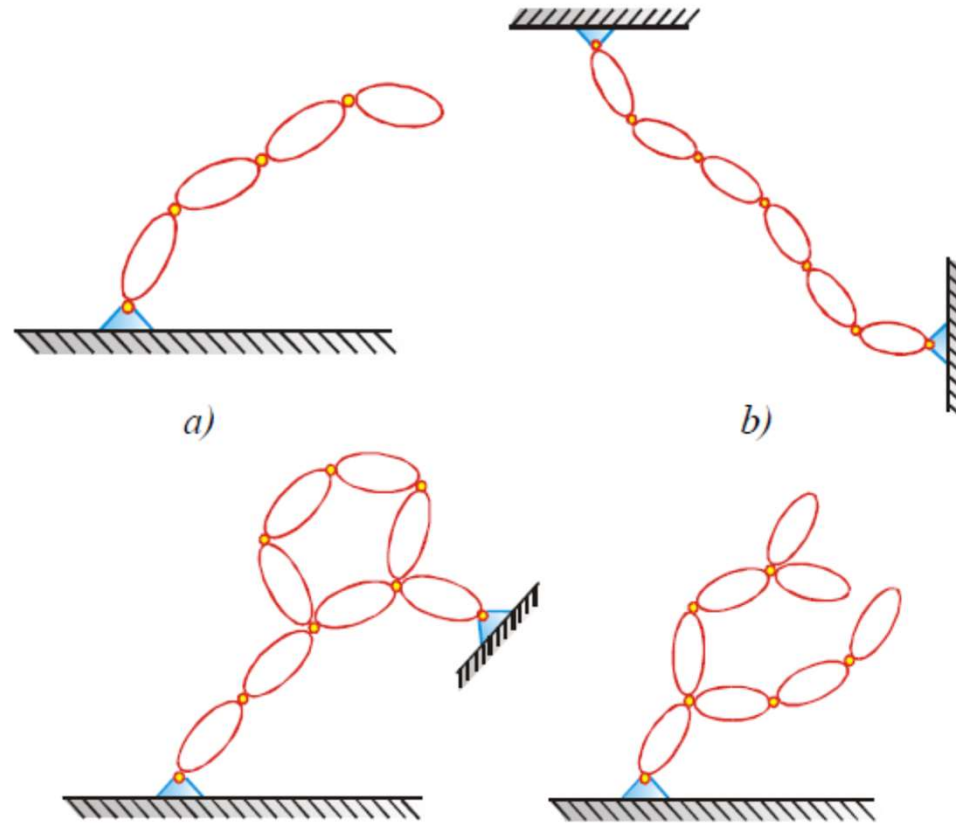


b)



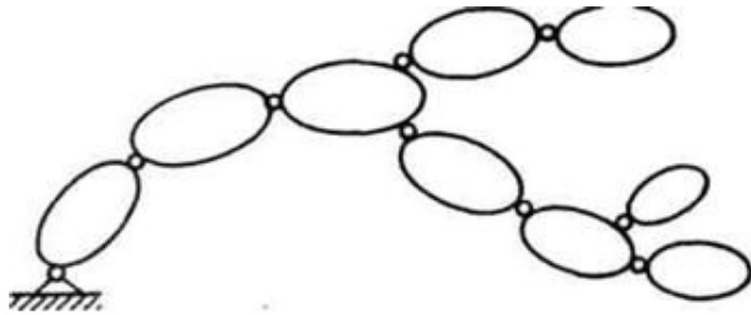
c)

Razmotrićemo neke od podjela kinematičkih lanaca. Kinematičke lance možemo podijeliti na proste i razgranate. Prost lanac podrazumijeva samo jedan niz segmenata pri čemu svaki segment ima dva zgloba, prethodni i naredni, a samo poslednji u nizu ima jedan zglob.

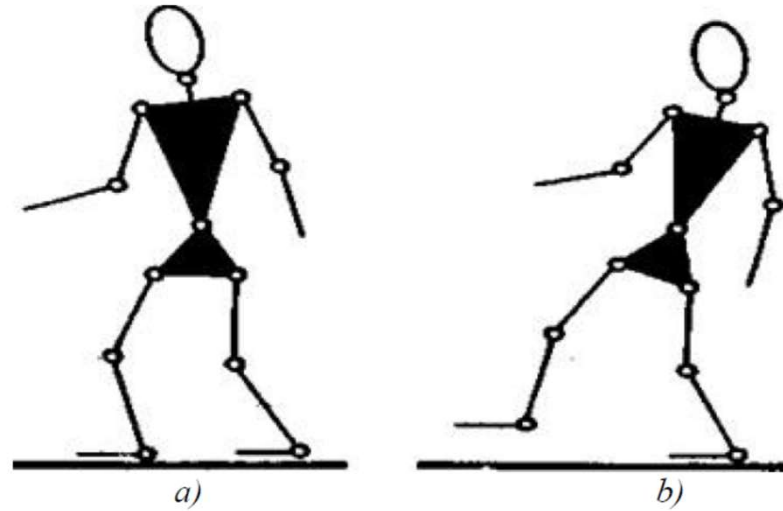


*a) otvoreni, prost lanac; b) zatvoreni, prost lanac;
c) zatvoreni, složen lanac; d) složen, otvoren lanac*

Razgranat lanac podrazumijeva da bar jedan segment lanca nosi tri ili više zglobova (jedan prethodni i dva ili više narednih). Dakle, lanac se grana



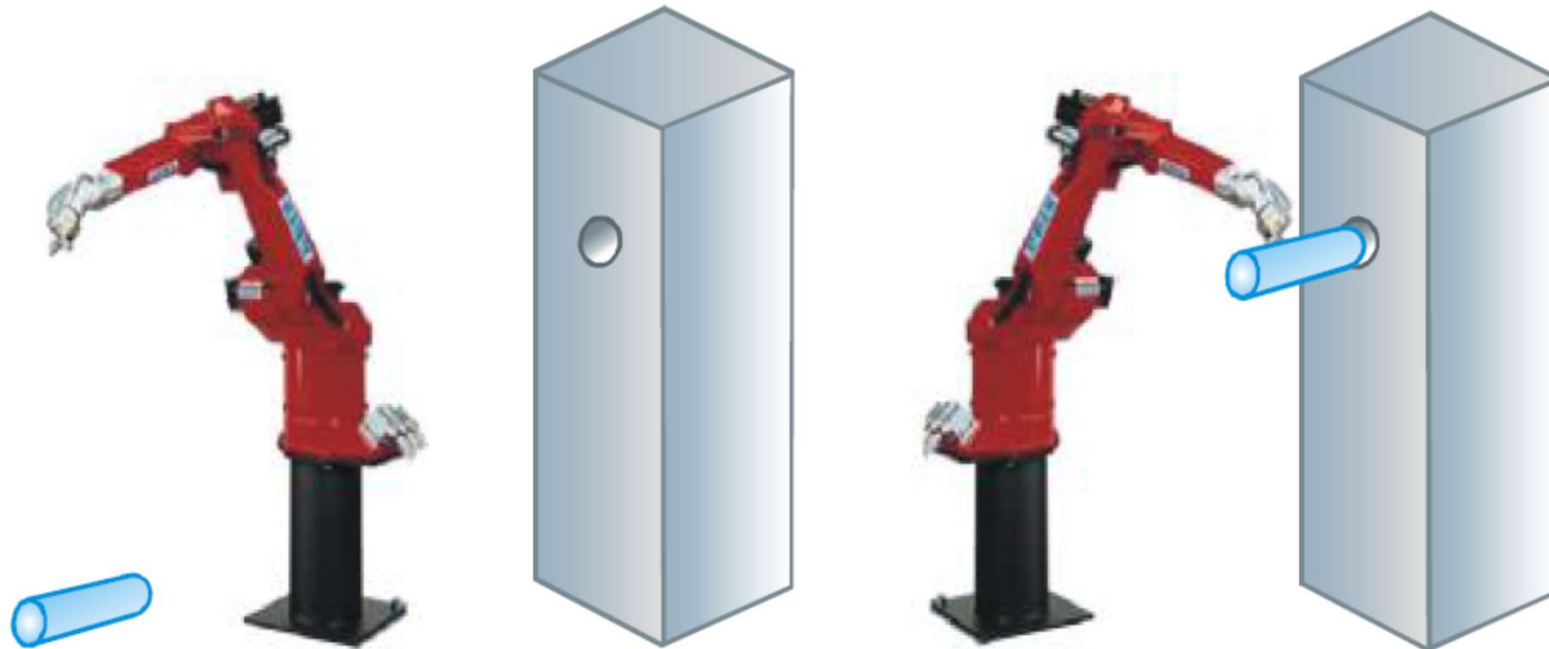
Shema razgranatog lanca



Shema antropomornog hodajućeg robota

Promjena strukture kinematičkog lanca

Za robotske mehanizme karakteristično je da tokom rada robota kinematički lanac mijenja svoju strukturu od otvorene ka zatvorenoj i obrnuto. Na slici je prikazan manipulacioni robot koji u fazi prenošenja predmeta (faza a) predstavlja otvoreni lanac, a u fazi uvlačenja predmeta u otvor (faza b) predstavlja zatvoreni lanac. U fazi b lanac je zatvoren jer ruka sa radnim predmetom, podloga robota i zid obrazuju zatvoreni niz. Primer prikazan na ovoj slici dio je zadatka montaže.



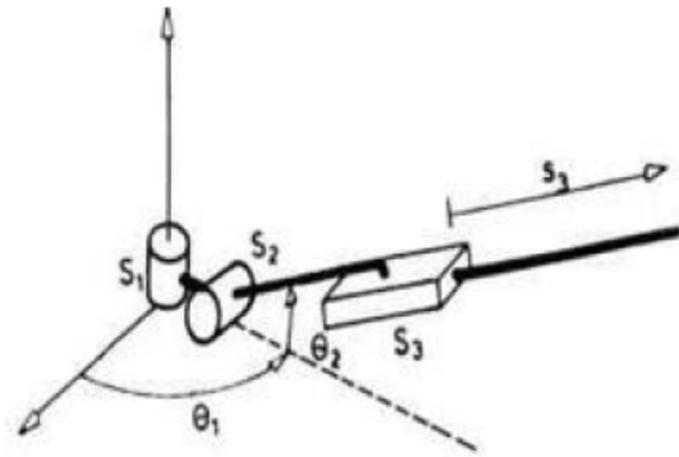
(a)

Otvoreni lanac

(b)

Zatvoreni lanac

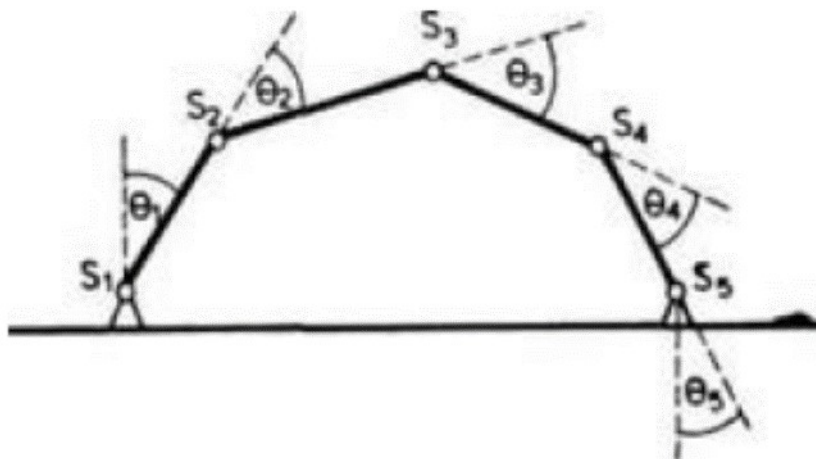
Stepni slobode kinematičkog lanca



Ranije smo uveli definiciju broja stepeni za jedan kinematički par. Sledeći takvu definiciju dolazimo do toga da je broj stepeni slobode zglobnog kinematičkog lanca jednak broju mogućih nezavisnih kretanja tog lanca, odnosno jednak broju nezavisnih parametara potrebnih da bi se jednoznačno odredio položaj celog lanca. Posmatraćemo kinematičke lance sa zglobovima V klase, rotacionim ili translatornim.

Ako je u pitanju otvoreni lanac, tada je za definisanje položaja potrebno znati pomjeranja u svim zglobovima lanca, dakle za koji ugao je obrnut svaki rotacioni zglob i koliki je pomeraj u svakom translatornom zglobu. Naime, kod takvih lanaca zglobovi su međusobno nezavisni i pomjeranja u zglobovima mogu biti proizvoljna. Na primer, kod lanca na slici potrebno je znati uglove θ_1 i θ_2 i izduženje s_3 pa takav kinematički lanac ima tri stepena slobode. Možemo zaključiti da je kod otvorenih lanaca broj stepeni slobode jednak broju zglobova.

Stepni slobode kinematičkog lanca



Kod zatvorenih lanaca problem je složeniji. Broj stepeni slobode lanca nije jednak broju zglobova. Posmatrajmo mehanizam prikazan na slici. Ovaj zatvoreni lanac ima pet zglobova, svaki sa po jednim rotacionim stepenom slobode. Za određivanje položaja ovog lanca potrebno je znati uglove θ_1 i θ_2 , tj. dovoljno je znati dva parametra. Dakle, lanac ima dva stepena slobode iako ima pet zglobova.

Grübler – Kutzbachov kriterijum

Opšti broj stepeni slobode kretanja za prostorne sisteme po Grübler – Kutzbachovom kriterijumu, izračunava se po slijedećem obrascu:

$$f = \sum_{i=1}^{n_z} f_{zi} - 6n_p$$

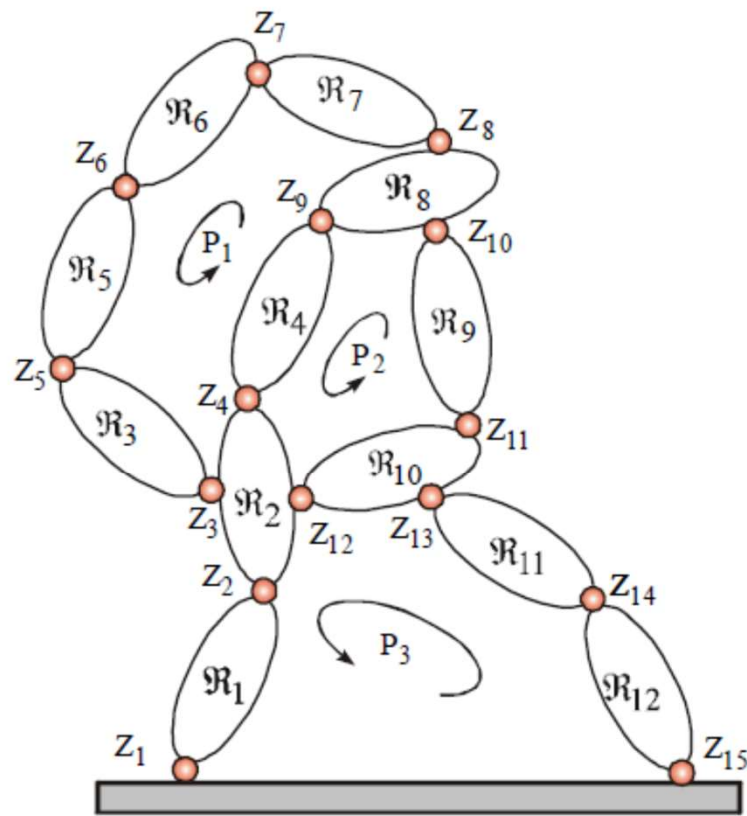
gdje je: f_{zi} - broj stepeni slobode kretanja i -tog zgloba,
 n_p - broj nezavisnih petlji unutar kinematskog lanca.

$$n_p = n_z - n_{gr}$$

gdje je: n_z - broj zglobova,
 n_{gr} - broj tijela ili segmenata.

$$f = \sum_{i=1}^{n_z} f_{zi} - 3n_p .$$

Kriterijum za ravanske sisteme



$$n_p = n_z - n_{\mathcal{R}},$$

$$n_p = 15 - 12,$$

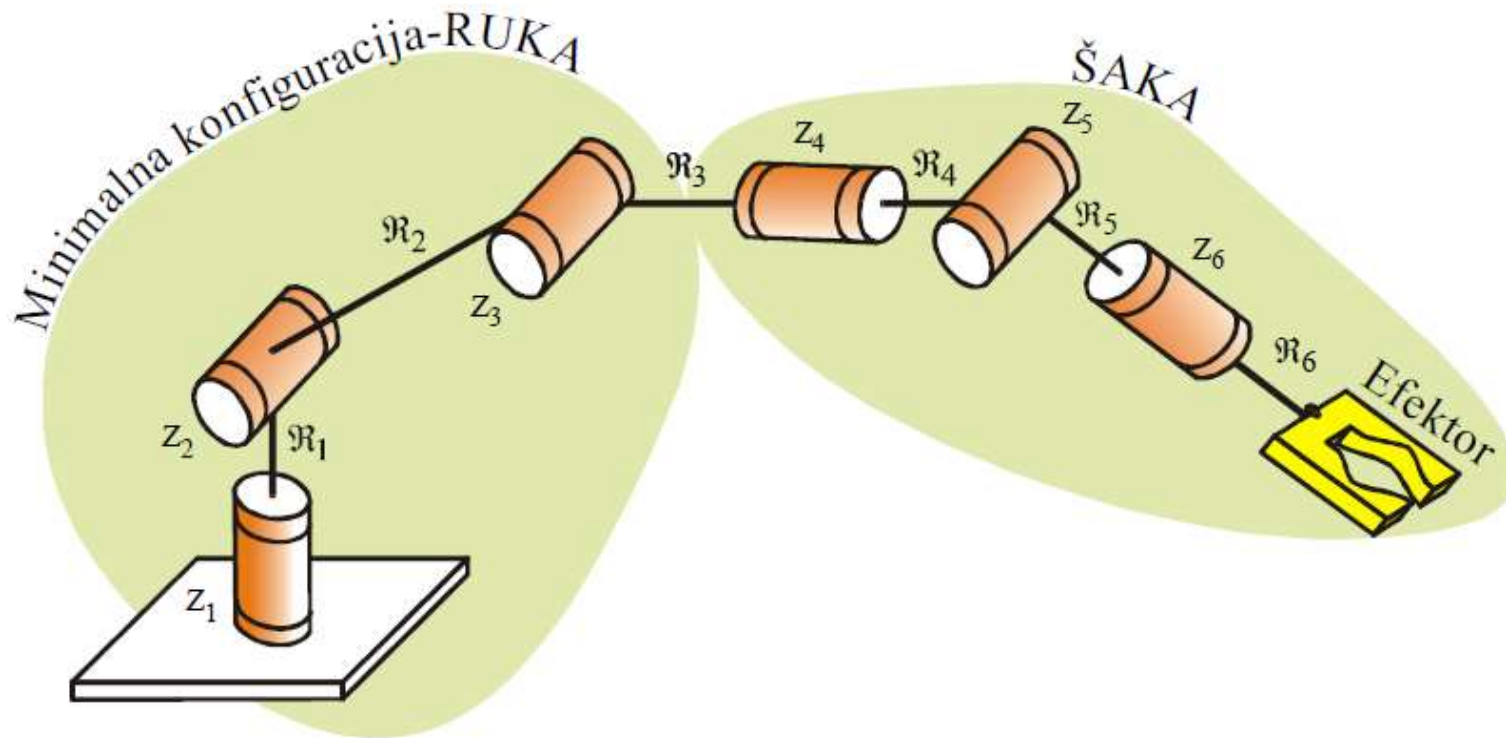
$$n_p = 3.$$

$$f = \sum_{i=1}^{n_z} f_{z_i} - 3n_p = 15 - 3 \cdot 3 = 6.$$

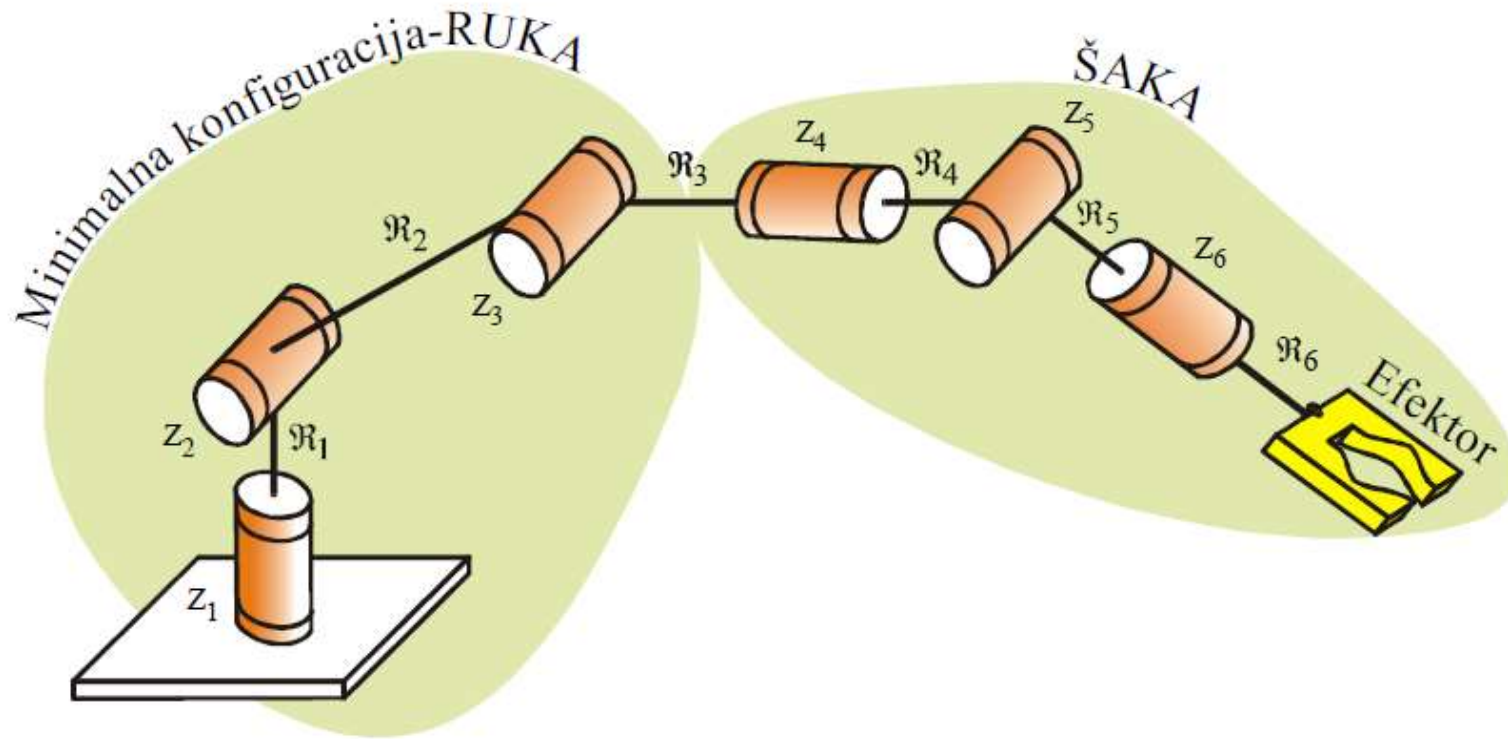
Slika 2.9. Zatvoreni kinematski lanac sa više petlji

GEOMETRIJA MANIPULACIONIH ROBOTA

Sada ćemo sa opšte analize kinematičkih lanaca krenuti ka mehanizmima koji se javljaju u praktičnim realizacijama manipulacionih robota. Analiziraćemo strukturu "ruke" i "šake" robota. Zatim ćemo prodiskutovati broj stepeni slobode manipulacionog robota. Definisaćemo vektore koji određuju geometriju robota i na kraju pokazati postupak proračuna položaja mehanizma robota i položaja radnog predmeta.



Geometrija manipulacionih robota



Da bi jedan robot bio u upotrebi, on mora imati barem mogućnost pozicioniranja u prostoru. To znači da treba da se sastoji od tri zglobova, odnosno da ima tri stepena slobode kretanja. Takva struktura se naziva "*minimalna konfiguracija robota*". Na ovakvu minimalnu konfiguraciju se nadovezuje završni uređaj (mehanizam).

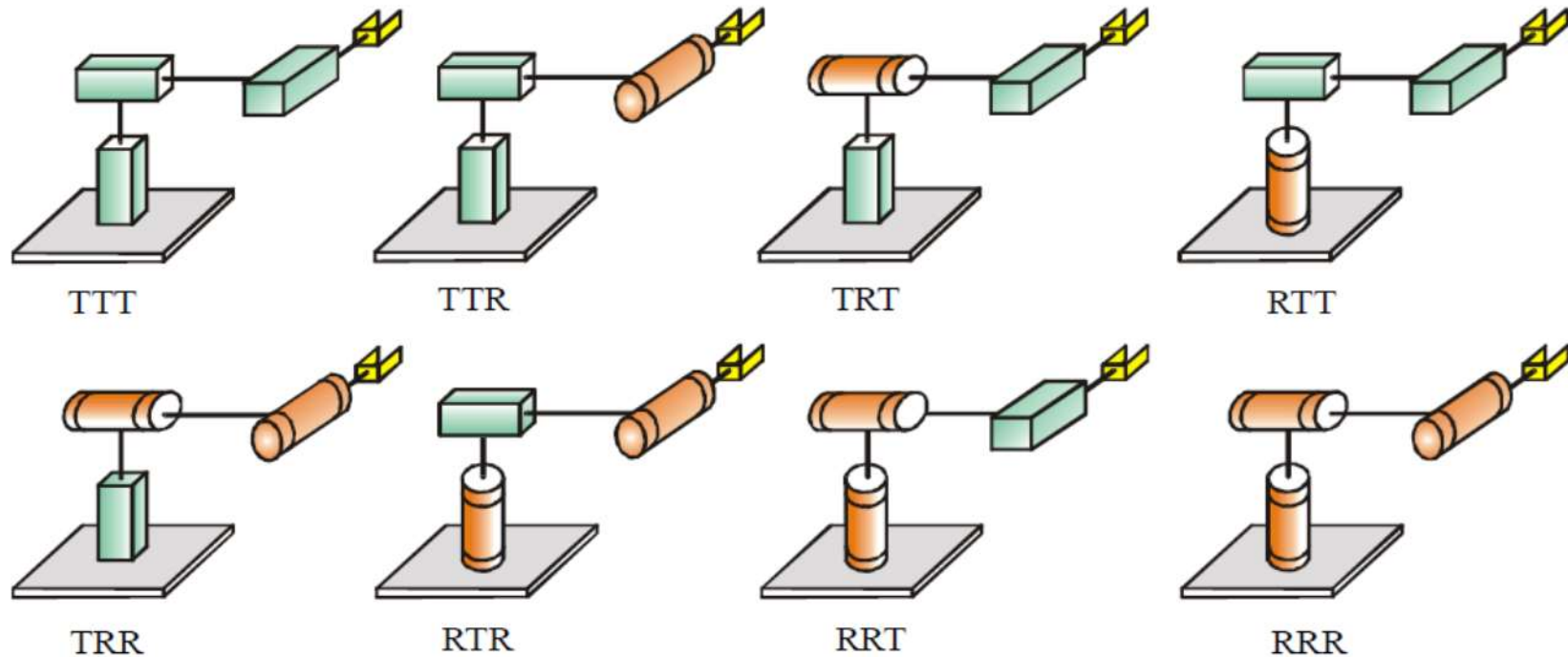


Sledi da minimalna konfiguracija obuhvata zglobove S_1 , S_2 i S_3 i segmente 1, 2 i 3, a šaka se nadovezuje i sadrži određeni broj zglobova i segmenata (na primer 4, 5 i 6).

Naziv minimalna konfiguracija potiče otuda što svaki manipulacioni robot poseduje takav mehanizam. Minimalna konfiguracija često se definiše kao mehanizam sa tri stepena slobode koji vrši pozicioniranje tj. dovođenje šake na željeno mesto u radnom prostoru.

Kasnije ćemo vidjeti da se pod pojmom pozicioniranja obično podrazumijeva položaj samog vrha šake robota (tačka A na slici). Tako, na taj položaj, pored minimalne konfiguracije, utiču i segmenti same šake. Otuda se može reći da minimalna konfiguracija određuje položaj korijena šake, (tačka C na slici), a zajedno sa šakom vrši pozicioniranje vrha (tačka A na slici).

Minimalna konfiguracija je mehanizam sa tri zgloba od kojih svaki može biti rotacioni ili translatorni. Označimo sa R rotacioni, a sa T translatorni zglob. Sada možemo uvesti označavanje mehanizma na sledeći način: na primer RTT označava mehanizam sa tri zgloba (i tri stepena slobode) od kojih je prvi rotacioni, a druga dva translatorna. Sada ćemo, koristeći uvedeno označavanje obraditi najčešće sheme minimalne konfiguracije robota.

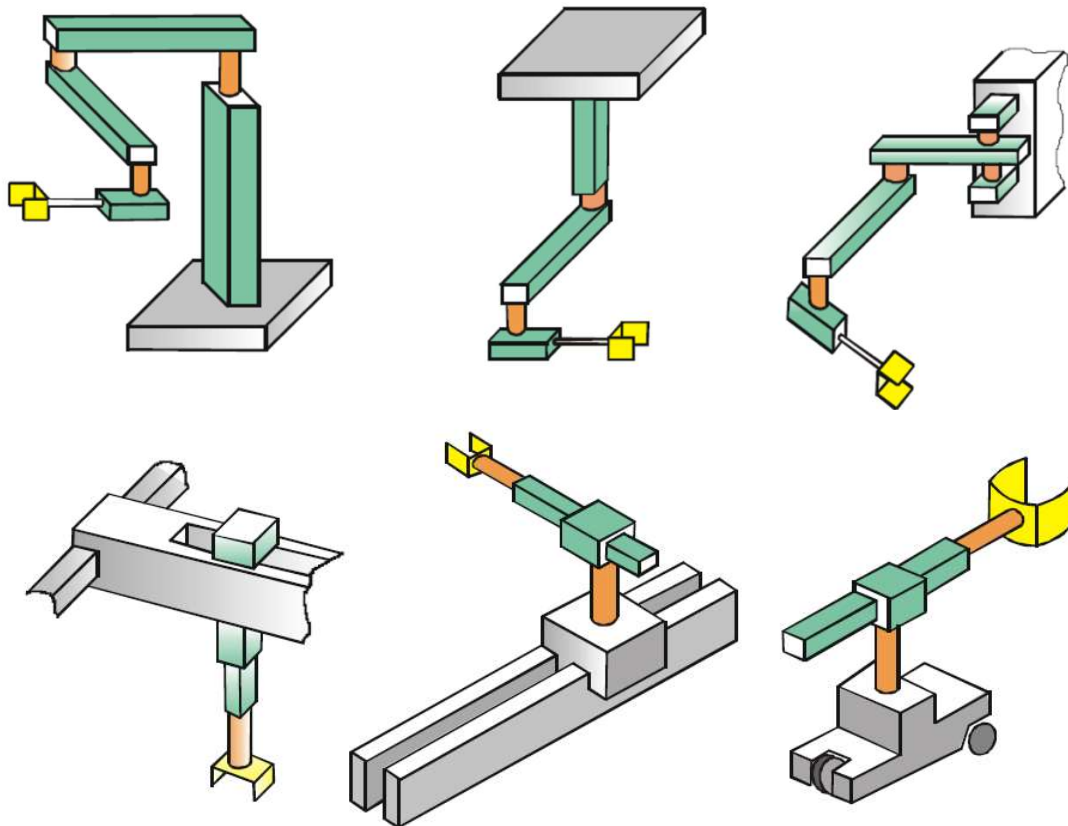


Moguće kinematičke strukture minimalnih konfiguracija robota za $f = 3$
 T-translatorni zglob, R-rotacioni zglob

Postolje robota je slično postolju alatnog uređaja, gdje osnovna ploča može biti livena ili zavarena od profilnog željeza. Postolje robota može biti izvedeno portalno, konzolno i učvršćeno na pod, zid ili plafon (slika). Kod izbora vrste postolja važnu ulogu ima specifičnost zadatka koji robot treba da obavlja.

U slučaju da je postolje pokretno, tad se govori o podvozu robota koji može biti na šinama ili na kolicima.

Na postolju je smješten prvi rotacioni ili translatorni zglob, kao i motori, cilindri, uljni i ostali agregati.



Tipovi postolja i podvoza:

- a) stojeće,
- b) plafonsko,
- c) zidno,
- d) portalno postolje,
- e) podvoz u obliku šina,
- f) podvoz u obliku kolica

Minimalna konfiguracija se često definiše kao mehanizam sa tri stepena slobode kretanja koji vrši pozicioniranje tj. dovođenje šake na željeno mjesto u radnom prostoru, pa se može reći da minimalna konfiguracija definiše poziciju korijena šake koji predstavlja mjesto njenog priključka.

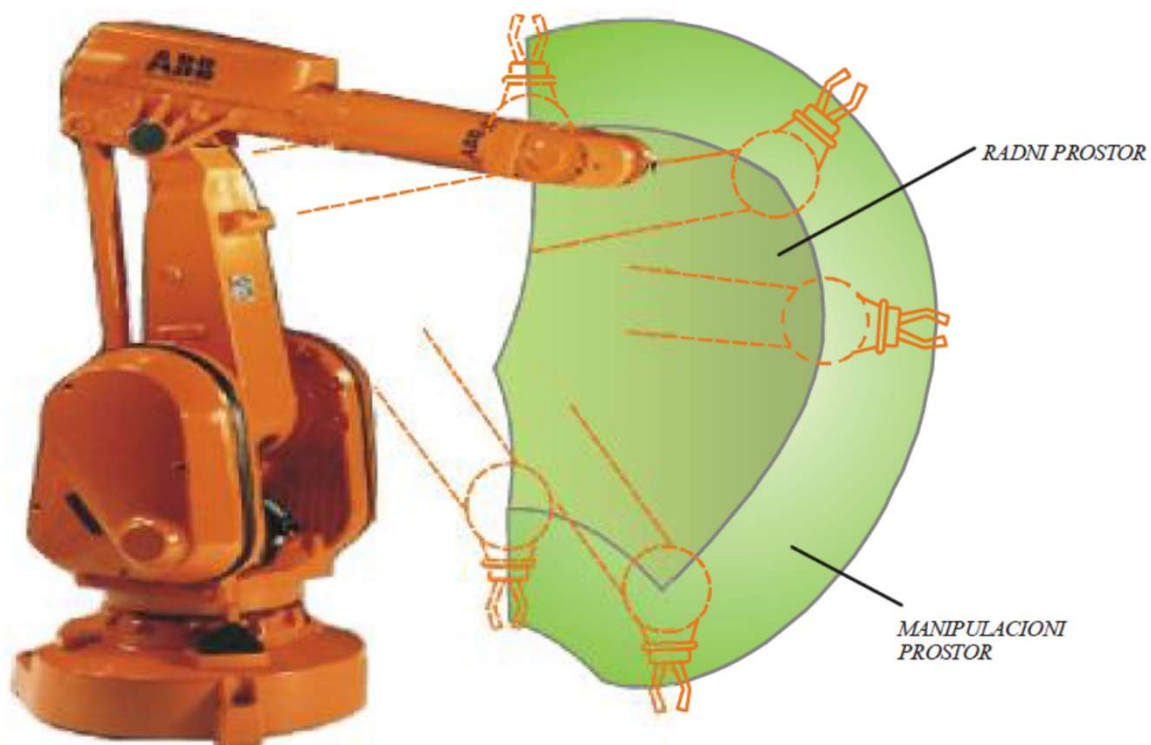
Normalno, ova minimalna konfiguracija robota može se sastojati od bilo koje kombinacije zglobova (translatorni ili rotacioni).

Definicijom minimalne konfiguracije robota određuje se njegov manipulacioni prostor u kojem on može obavljati radne zadatke, odnosno u kojem on može da dovede efektor.

Svaka od ovih struktura ima svoje dobre i loše strane, a rješenja s rotacionim zglobovima imaju jednostavniju mehaničku konstrukciju, složenije programiranje kretanja i brži su od translatorskih.

Radni prostor

Na osnovu definicije minimalne konfiguracije robota moguće je odrediti i njegov manipulacioni prostor. Manipulacioni prostor je skup tačaka u koji robot može dovesti prihvatnicu (centar prihvata, vrh alata i drugo), odnosno obaviti radni zadatak, kako je prikazano na slici. Izvan manipulacionog prostora robot ne može obavljati zadate zadatke.



Radni prostor čine samo one tačke manipulacionog prostora koje robot može dostići uz proizvoljnu orijentaciju.

Drugim riječima, **radni prostor** je prostor u kojem je moguć zahvat iz svih smjerova, dok u preostalom **manipulacionom prostoru** je moguće izvesti zahvat samo pod određenim uglom.

Radni i manipulacioni prostor su određeni kinematičkom strukturom i geometrijom kinematičkih parova robota, te ograničenjem postavljenim na pojedine stepene slobode kretanja pojedinog zgloba.

To znači da će o tipu i broju zglobova, zatim dužini segmenata, postojećim fizičkim ograničenjima, a koja su neposredno povezana s konkretnom građom i izgledom robota, zavisiti i veličina radnog prostora.

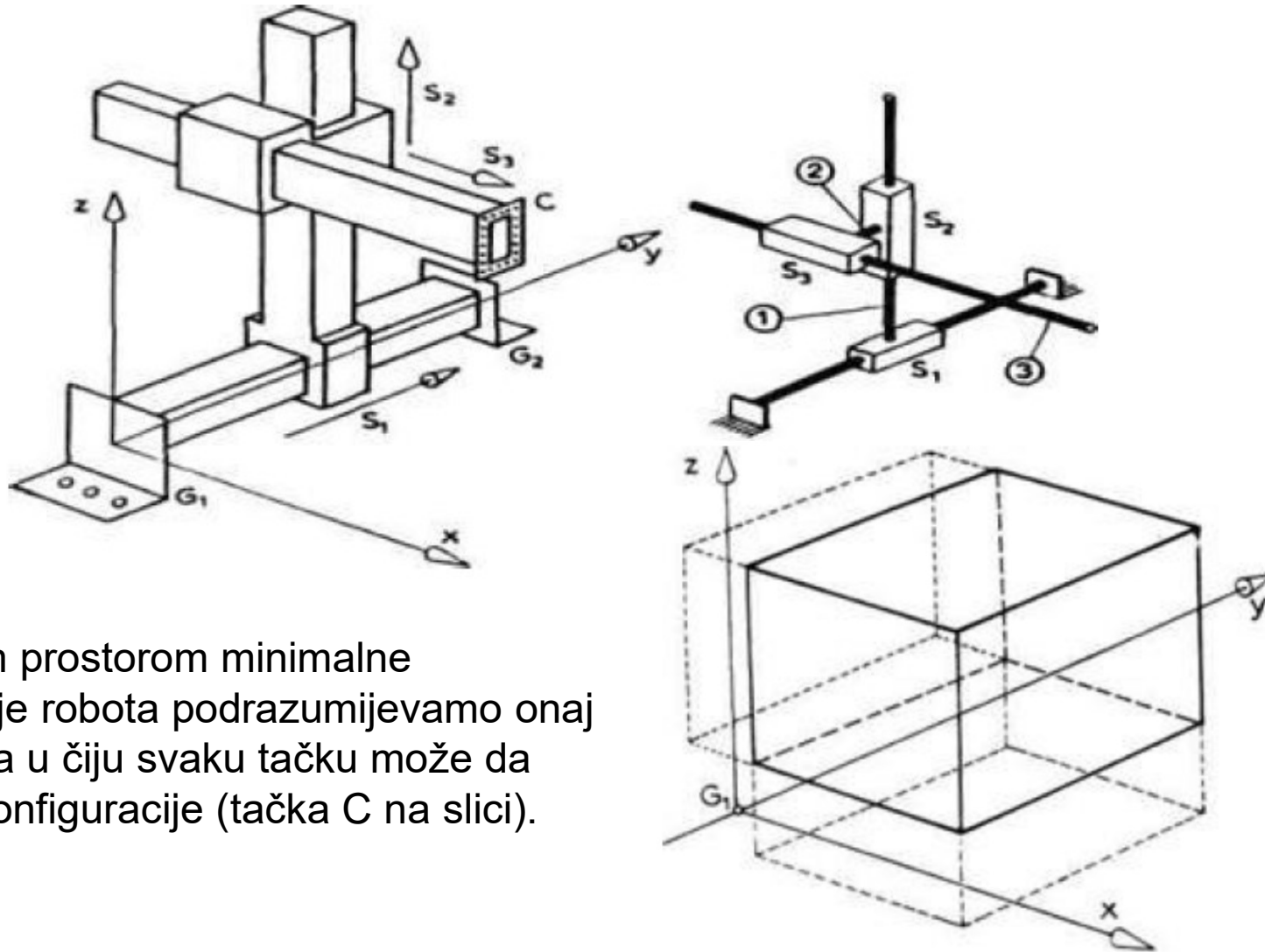
S obzirom da ose prva tri zgloba robota određuju položaj ručnog zgloba, a ose preostala tri zgloba određuju orijentaciju alata, to i tipovi zglobova upotrijebljenih za prve tri ose određuju i geometriju radnog prostora robota.

Kolizionim prostorom se naziva onaj dio manipulacionog i radnog prostora koji pripada grupi od dva ili više robota i u kojem može doći do sudara (kolizije).

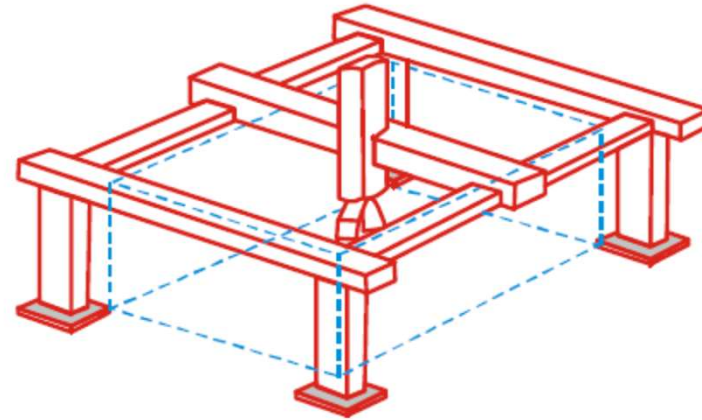
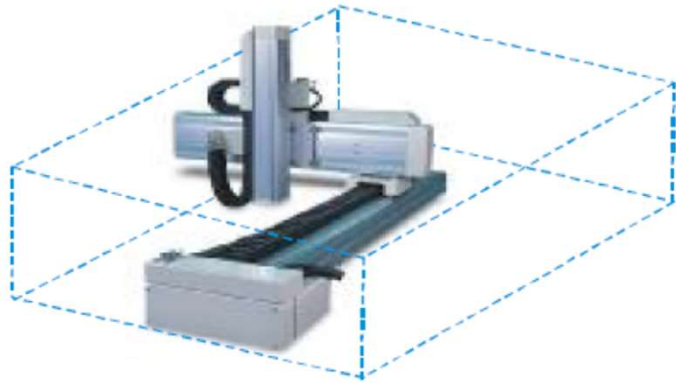
Kombinujući međusobno rotacije (R) i translacije (T) zglobove za prve tri ose određuju se i slijedeće konfiguracije robota:

1. pravougaona ili TTT,
2. cilindrična ili RTT,
3. sferna ili RRT,
4. rotacijska ili RRR,
5. robot tipa SCARA- RTR, TRR ili RRT strukture.

Pravougaona minimalna konfiguracija

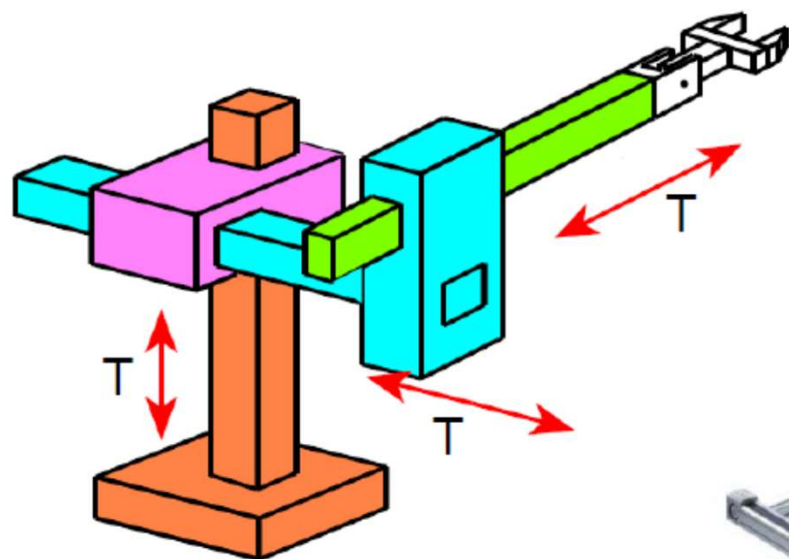


Pod radnim prostorom minimalne konfiguracije robota podrazumijevamo onaj dio prostora u čiju svaku tačku može da dođe vrh konfiguracije (tačka C na slici).

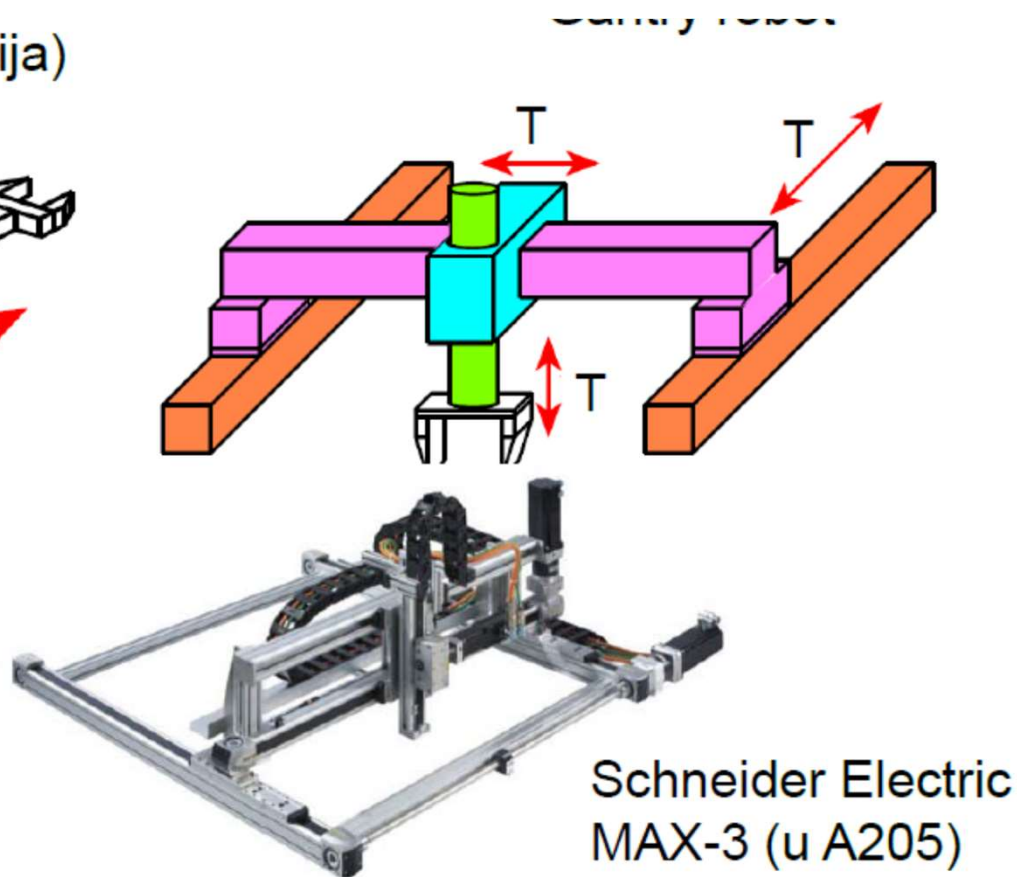


Na slici su prikazana dva tipa robota (konzolni i portalni) sa pravougaonom (engl. Cartesian) konfiguracijom ili TTT , kod koga je radni prostor u obliku prizme.

(Kartezijska ili TTT konfiguracija)

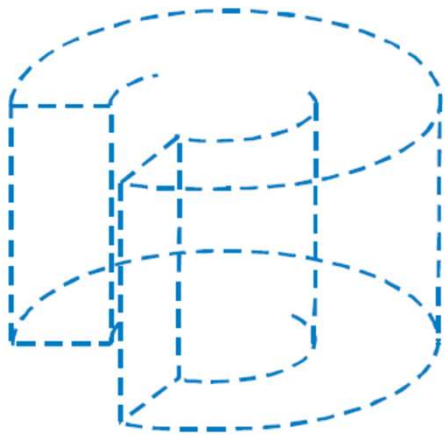


Radni prostor - prizma

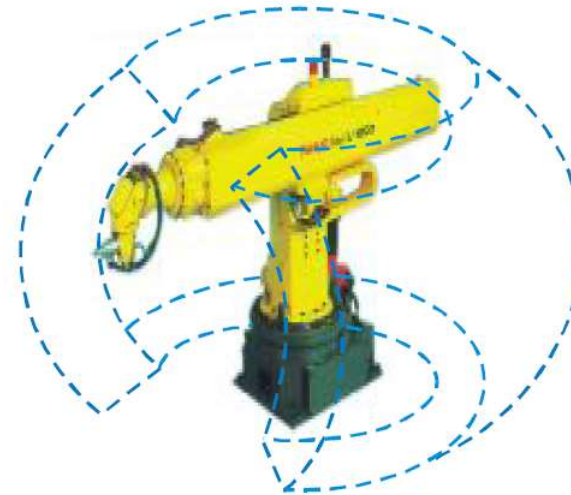


Schneider Electric
MAX-3 (u A205)

Ako se prvi zglob kod pravougaone konfiguracije robota zamijeni rotacionim zglobom, tada se dobija robot cilindrične (engl. cylindrical) konfiguracije (RTT), na slici. Radni prostor takvog robota je zbog ograničenosti translatornog kretanja jednak zapremini između dva vertikalna koncentrična plašta valjaka. Roboti ovakve konfiguracije se koriste za opsluživanje alatnih mašina.

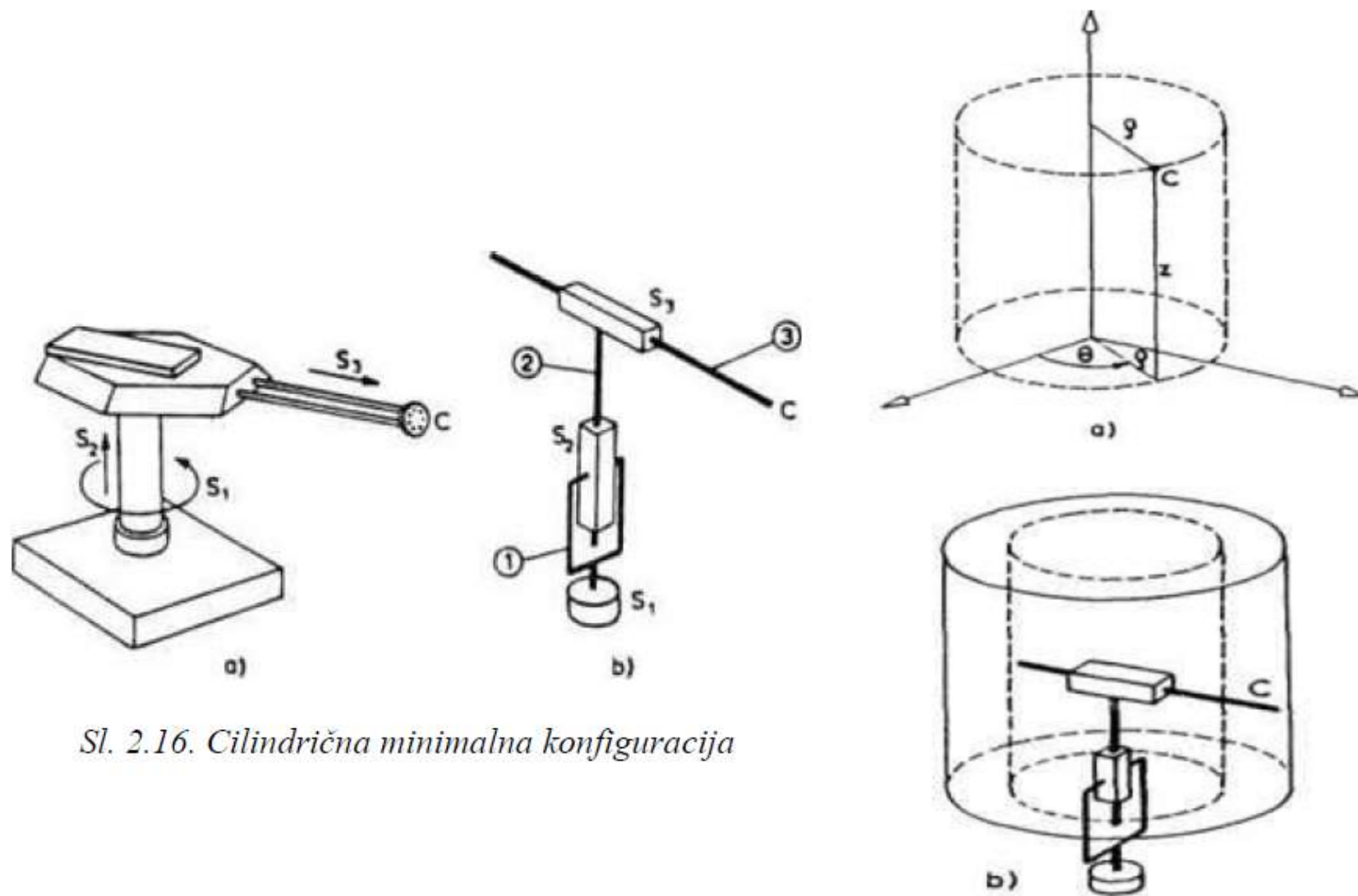


robot RTT konfiguracije



robot RRT konfiguracije

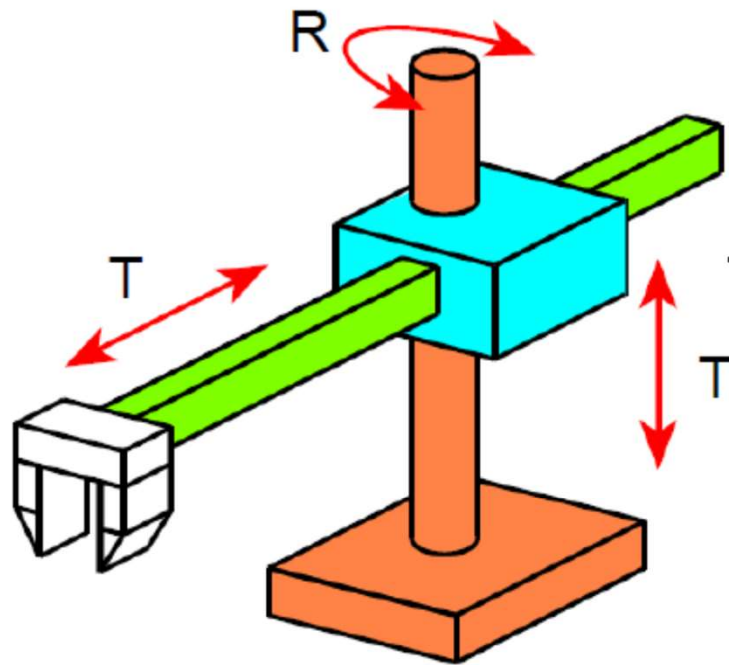
Zamjeni li se drugi zglob cilindrične konfiguracije robota sa rotacijskim zglobom dobiva se robot sferne (engl. spherical) konfiguracije (RRT), prikazan na slici desno. Radni prostor tog tipa robota je, u slučaju da postoji ograničenje translatornog kretanja, zapremina između dvije koncentrične sfere. U slučaju da postoji ograničenje svih kretanja, radni prostor je dio zapremine između dvije koncentrične sfere.



Sl. 2.16. Cilindrična minimalna konfiguracija

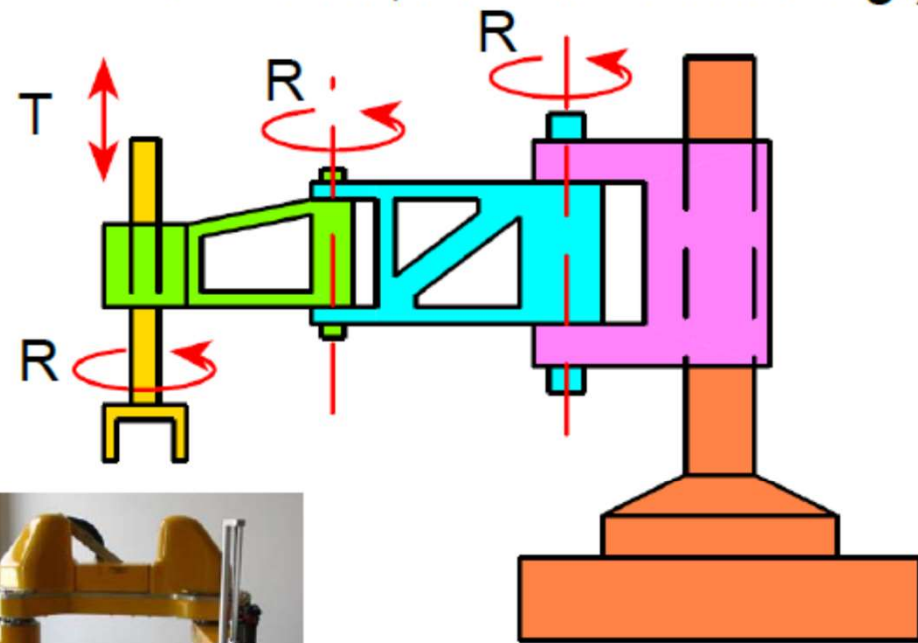
17. Cilindrični koordinatni sistem i radni prostor

Cilindrična konfiguracija (RTT konfiguracija)

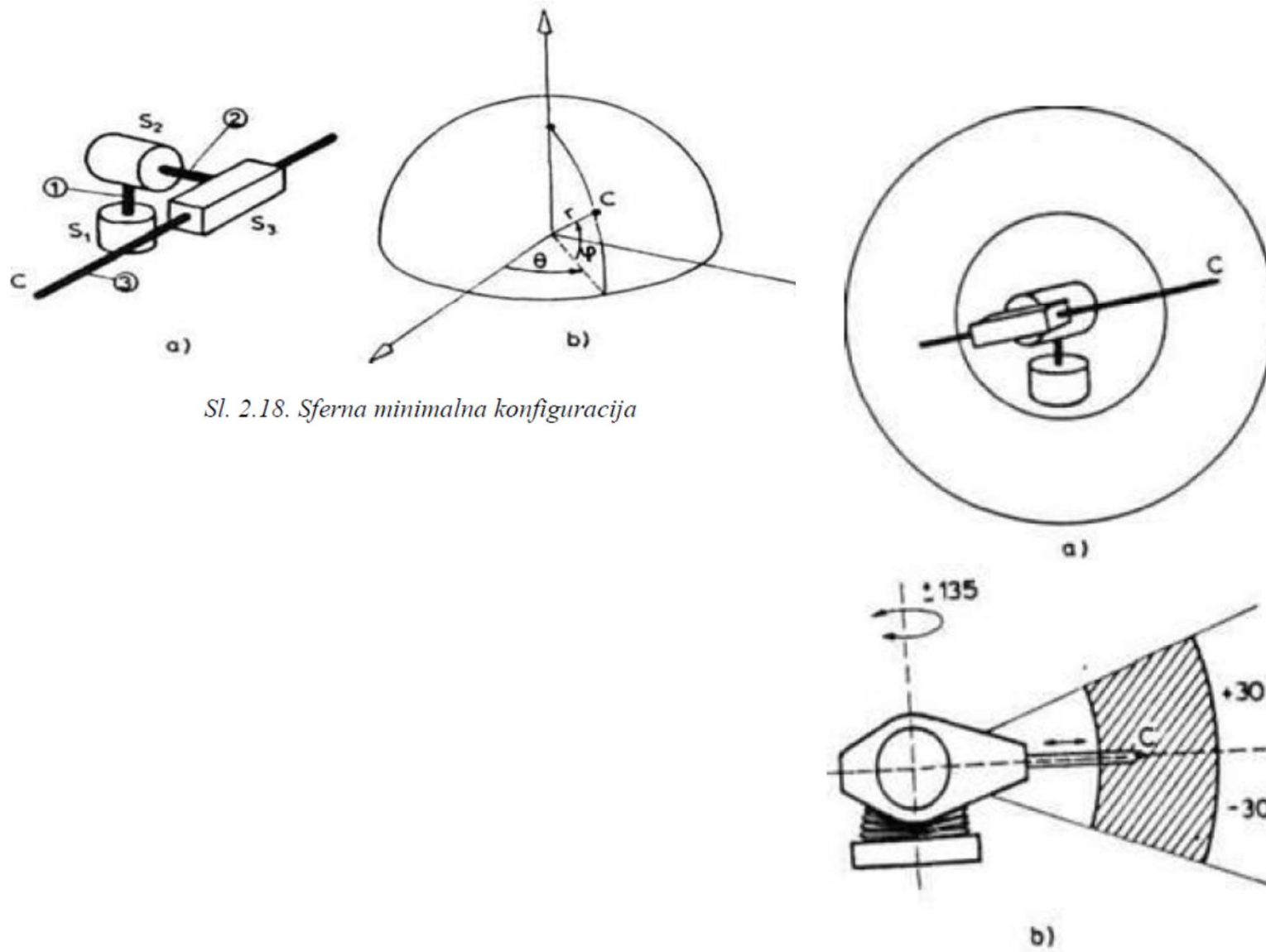


Radni prostor oba robota
– između dva valjka

SCARA konfiguracija (Selected Compliance Articulated Robot Arm, RRT ili RTR konfigur.)



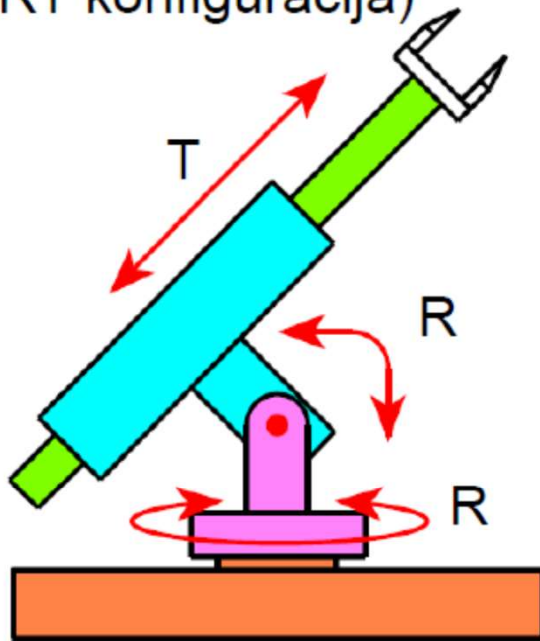
SCARA Kiwi (u A 205)



Sl. 2.18. Sferna minimalna konfiguracija

Sferna konfiguracija

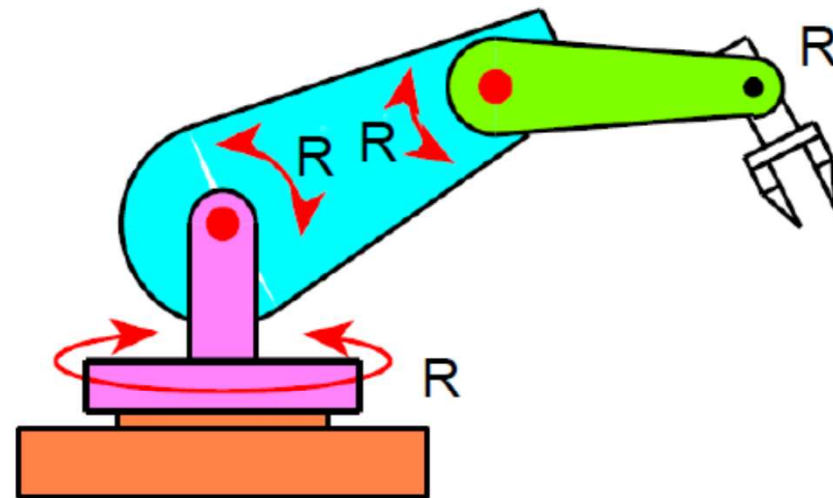
(kuglasta, polarna,
RRT konfiguracija)



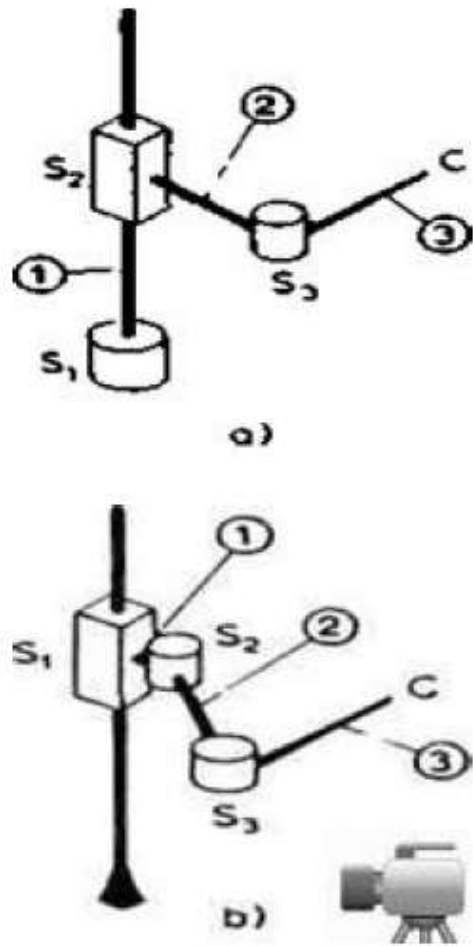
Radni prostor – između kugli

Rotacijska konfiguracija

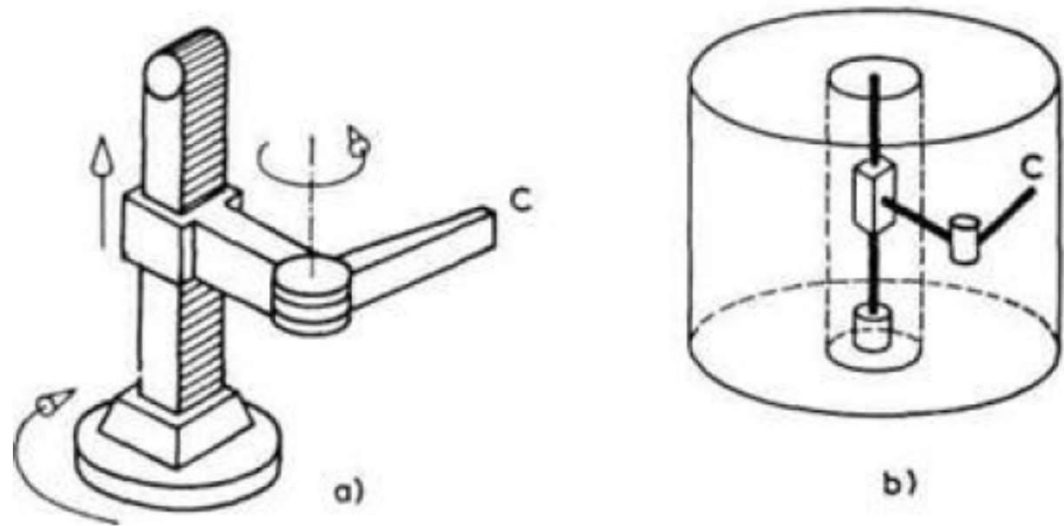
(laktasta, antropomorfna,
artikulirana, RRR konfiguracija)



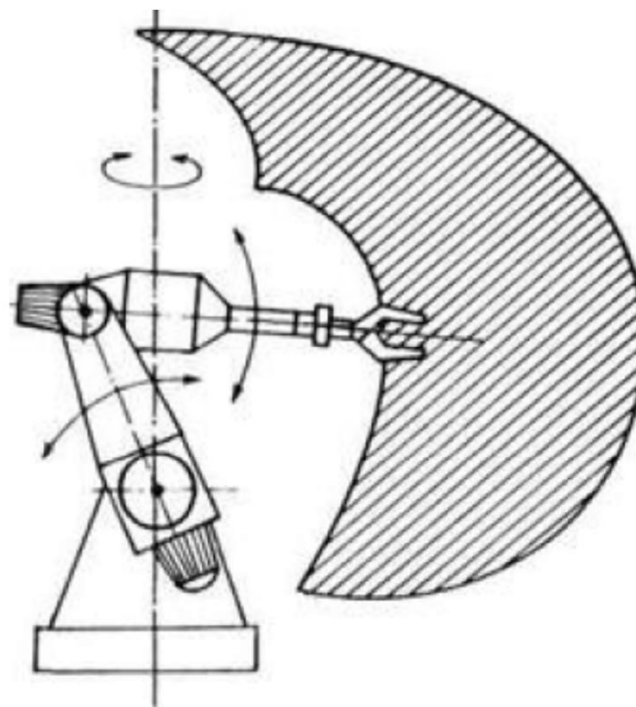
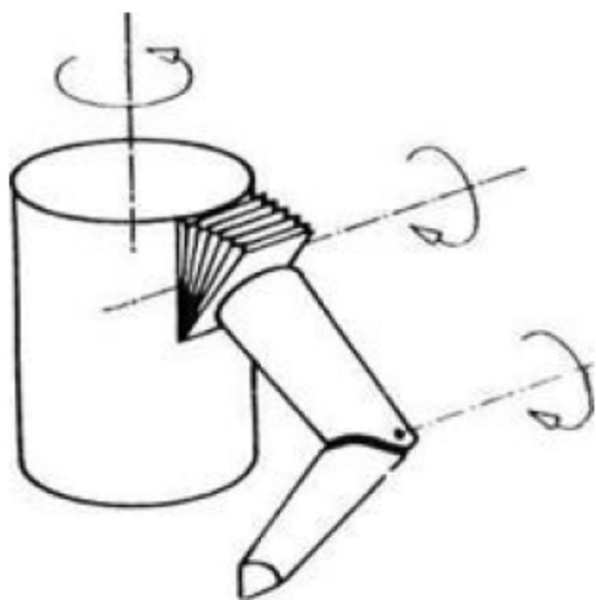
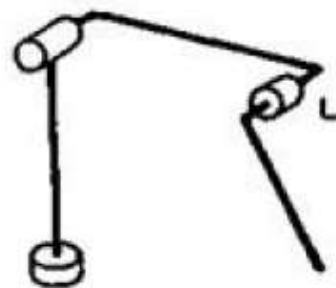
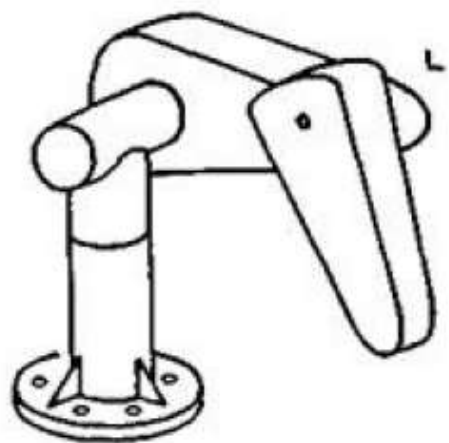
Radni prostor – dio kugle



Sl. 2.20. RTR-shema (a) i TRR-shema. (b)



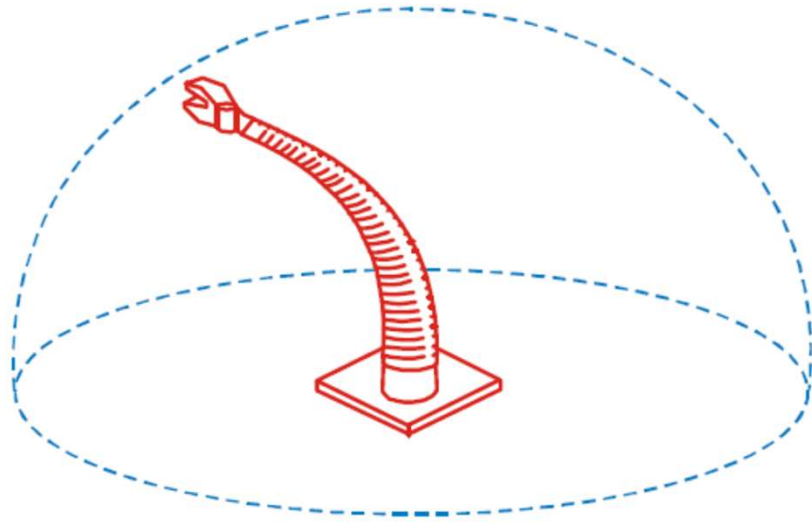
Sl. 2.21. Primer RTR-robota i radni prostor



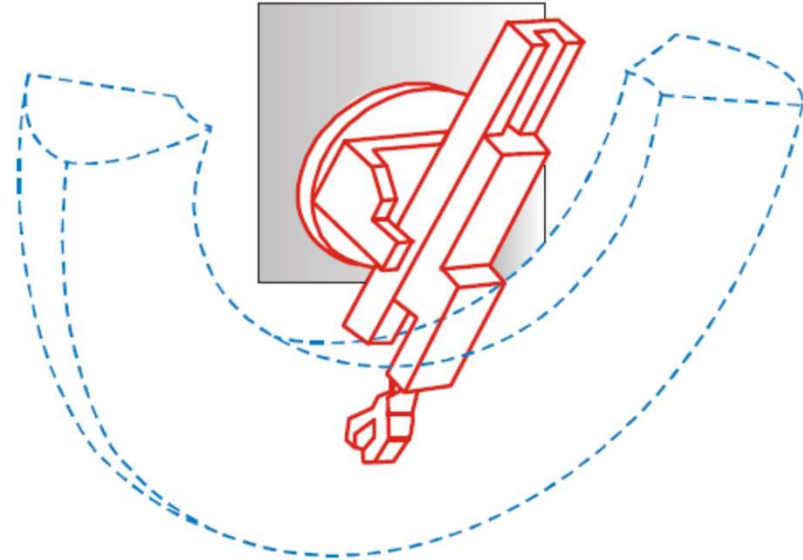
Sl. 2.23. Antropomorfna RRR- shema

Sl. 2.24. Radni prostor laktastog robota

Uz ove tipične konfiguracije robota u primjeni su i roboti nekonvencionalne strukture.



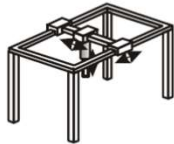
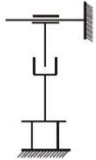
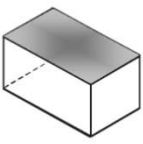

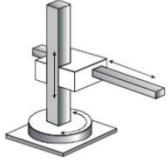
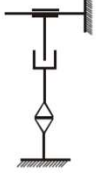


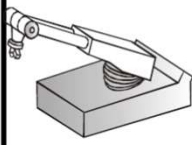



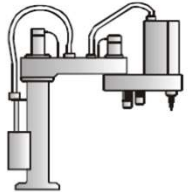
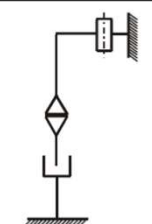
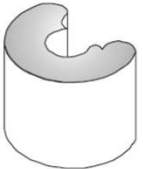


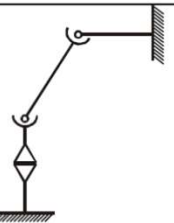



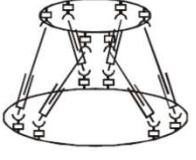
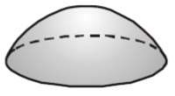

robota tipa Spine,

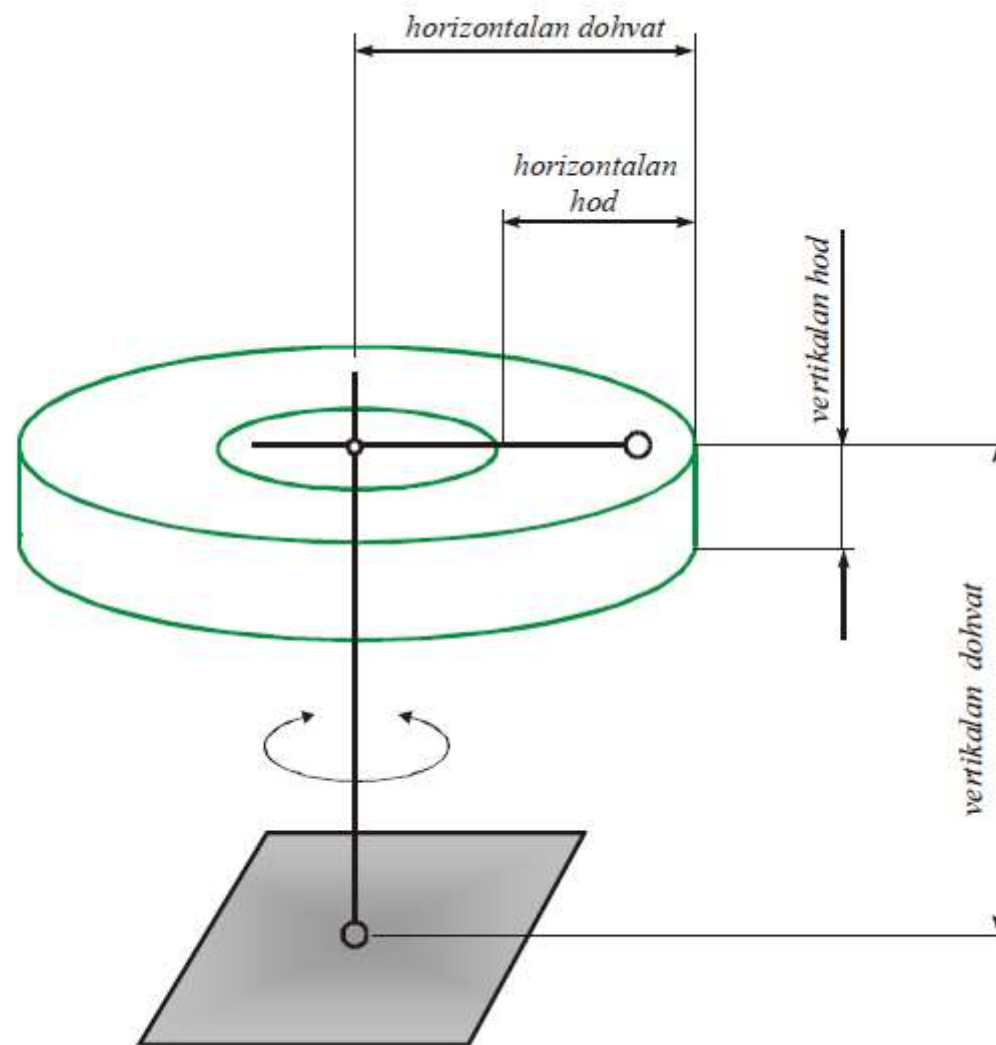


robota konfiguracije klatna

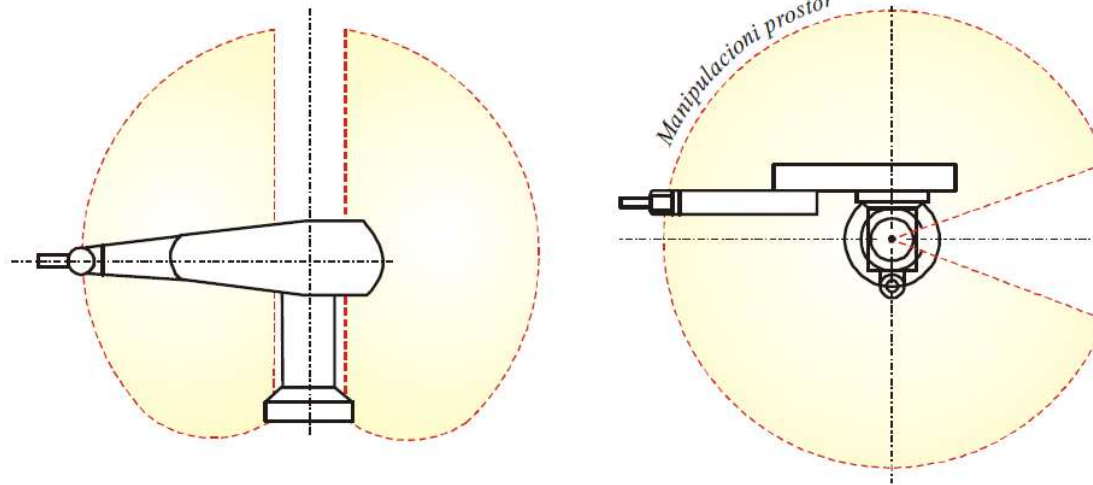
Robot tipa Spine, čija je ruka sasvim gipka (podsjeća na surlu slona) i radni prostor mu je efikasno iskorišten. Bilo kojoj tački sferoidnog manipulacionog prostora može se prići iz bilo kojeg smjera, pa čak i sa stražnje strane, te je pogodan za rad na teško pristupačnim mjestima (npr. Bojenje unutrašnjosti autokaroserija).

Tipične minimalne konfiguracije robota na osnovu ISO 9506-3 standarda

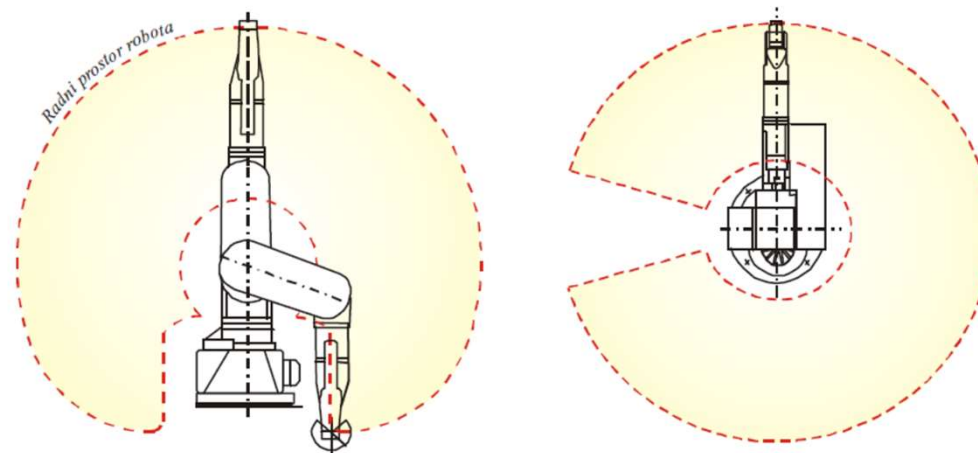
Vrsta robota	Kinematska struktura	Radni prostor	Primjer-fotografija robota
Pravougaoni robot 	$3 T$ 		
Cilindrični robot 	$2 T$ $1 R$ 		
Sferni robot 	$1 T$ $2 R$ 		
SCARA robot 	$2 T$ $1 R$ 		
Zglobni robot 	$3 R$ 		
Paralelni robot 			



Dohvat i hod cilindričnog robota

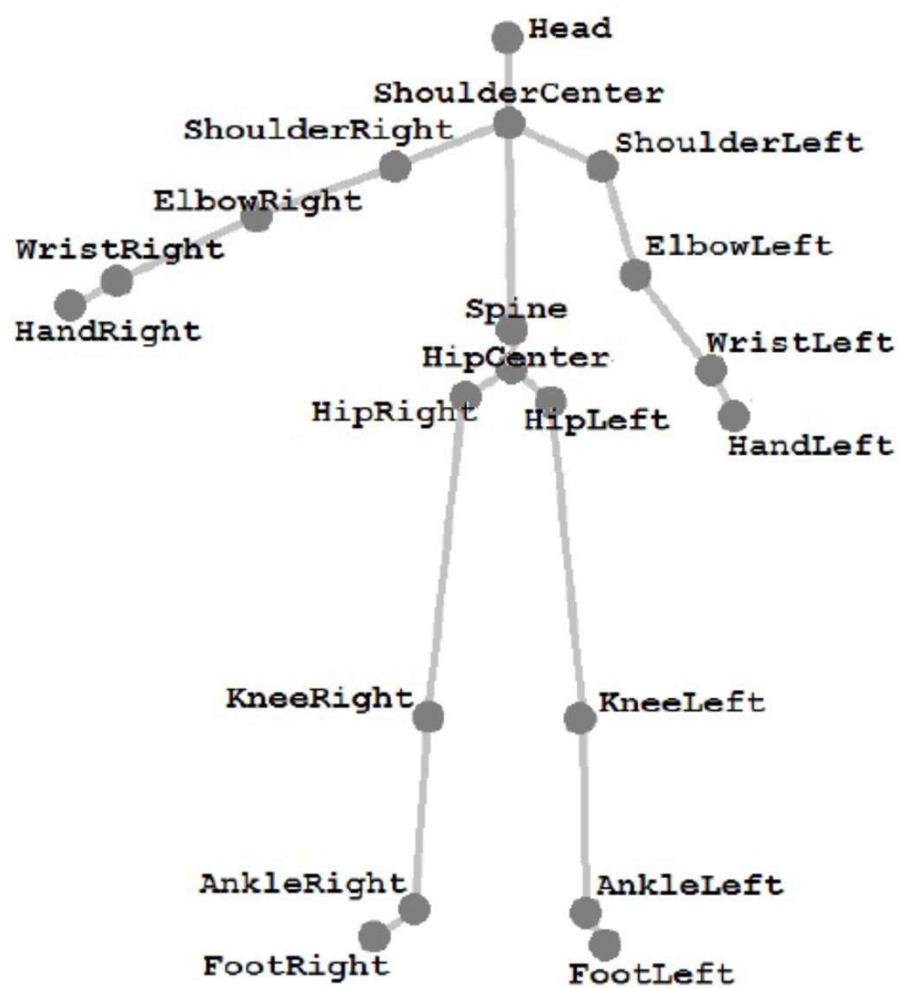
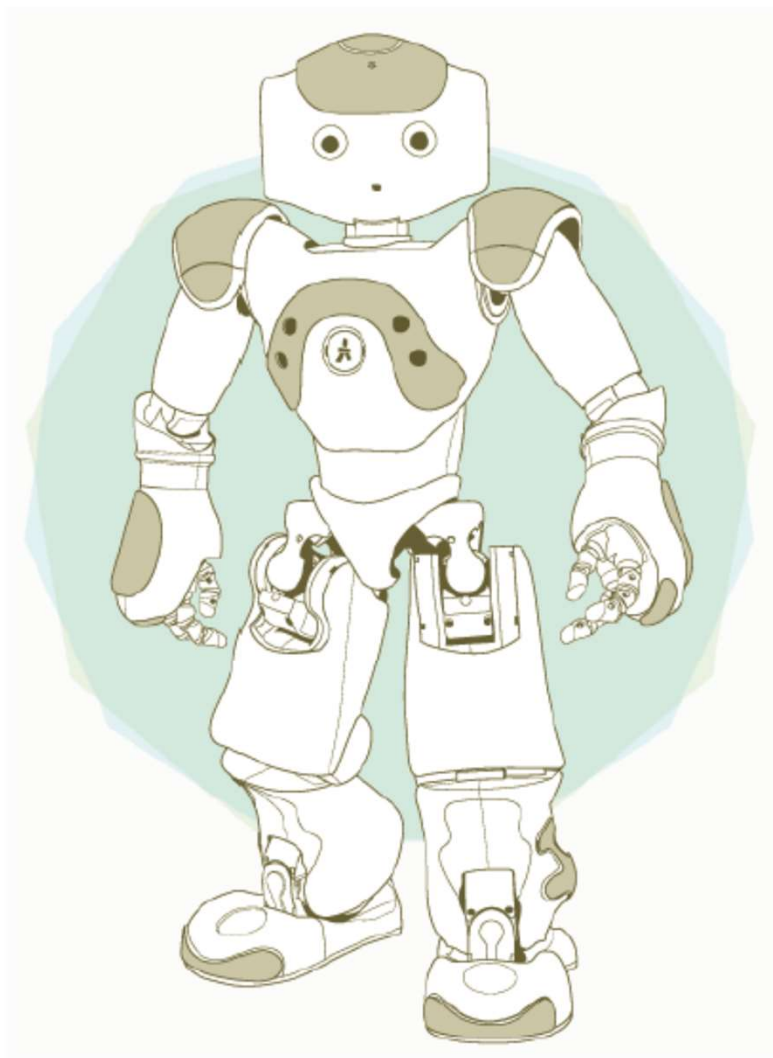


Ravanski prikaz manipulacionog prostora robota PUMA 500

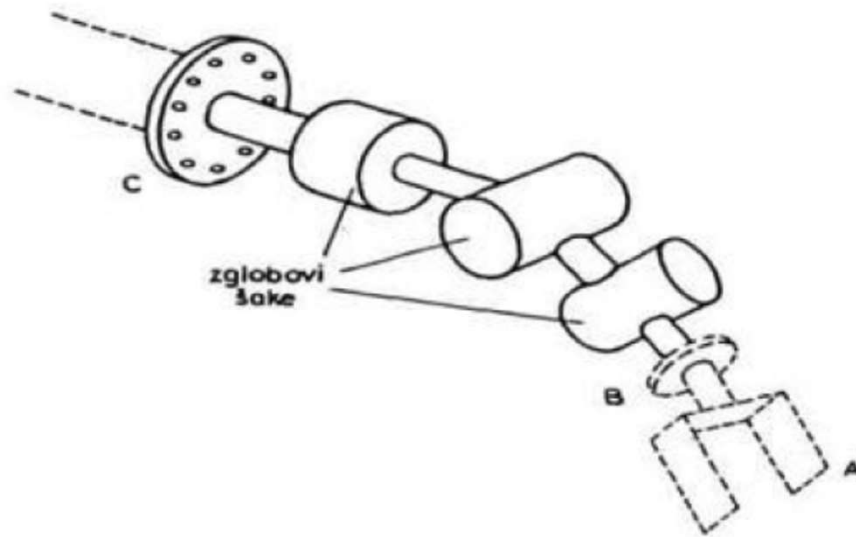


Ravanski prikaz manipulacionog prostora robota MANUTEC r3

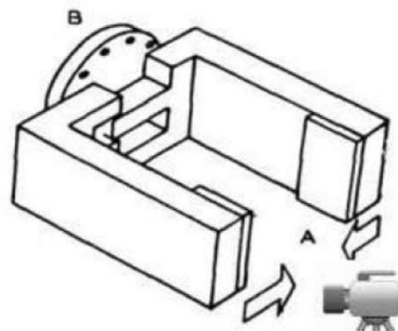
Zglobovi humanoidnog robota NAO



Šake ili hvataljke robota



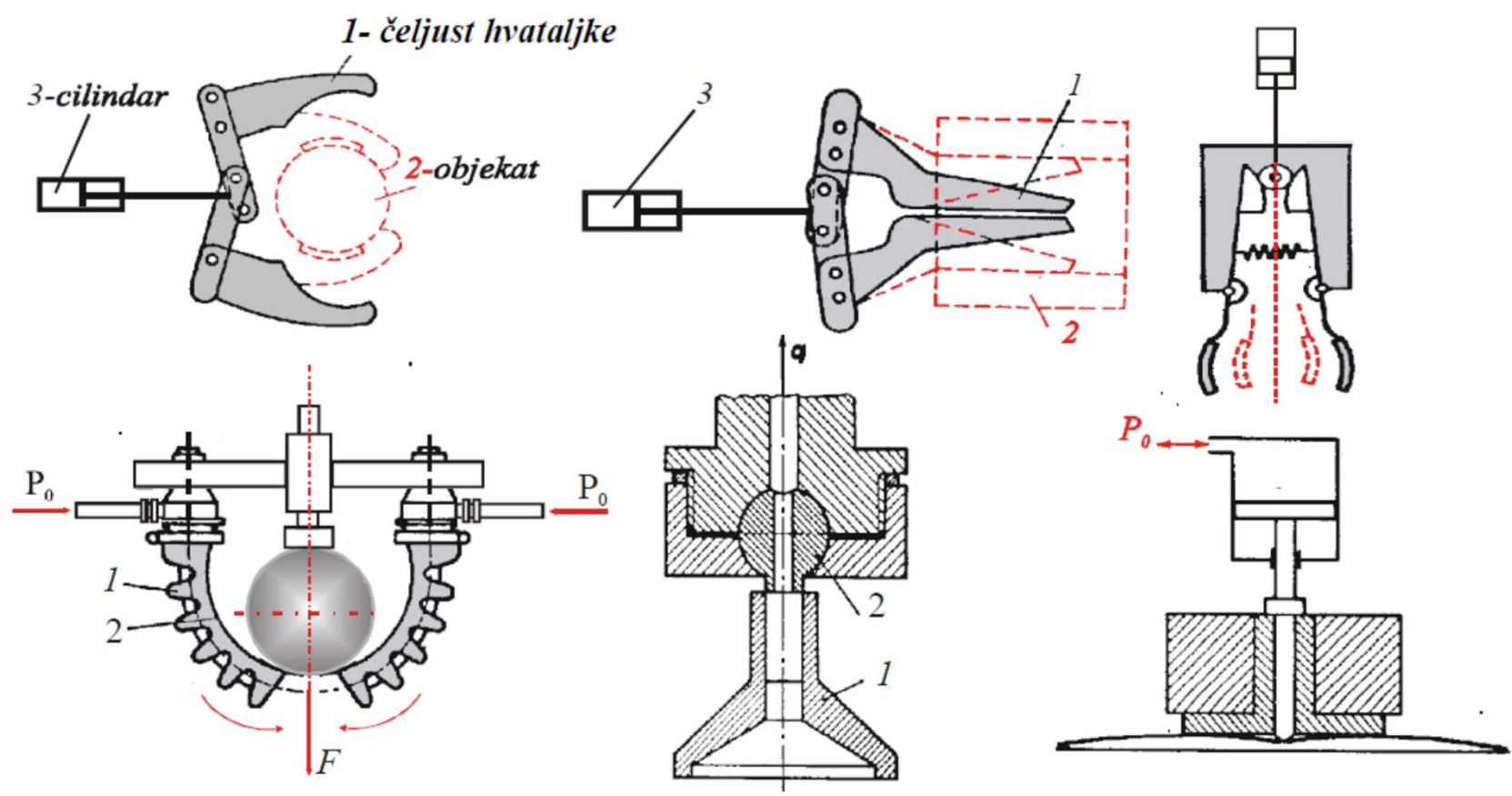
Sl. 2.26. Shema šake robota

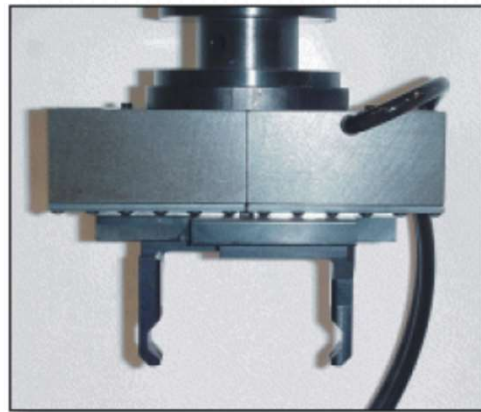


Sl. 2.27. Hvataljka robota

Završni mehanizam robota sastoji se od određenog broja zglobova, a na kraju se pričvršćuje takozvani završni uređaj (engl. end-effector). Zglobovi šake su po pravilu rotacioni. Na slici je prikazana shema mehanizma šake. Tačka C označava korijen šake i tu je ucrtana pločica koja se učvršćuje za vrh minimalne konfiguracije koja je ucrtana isprekidano.

Tačka B označava položaj gde se takozvani završni uređaj učvršćuje za mehanizam šake. To je ucrtano u obliku pločice na kojoj se nalaze zavrtnji za učvršćavanje. Završni uređaj ucrtan je isprekidano, u obliku hvataljke. Vrh završnog uređaja označen je tačkom A.





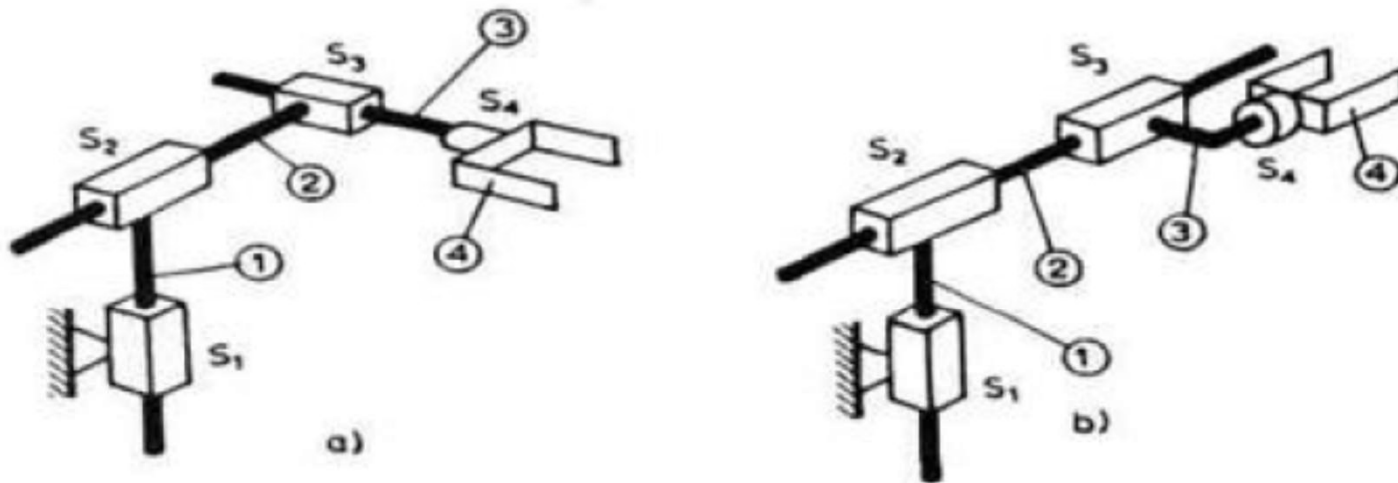
Mogućnost kretanja robota — broj stepeni slobode

Detaljnije ćemo analizirati mogućnost kretanja i, posebno takozvanog funkcionalnog kretanja robota. Manipulacioni robot smo posmatrali kao otvoreni lanac bez grananja u kome su segmenti povezani zglobovima V klase koji dozvoljavaju jednu translaciju ili rotaciju. Takav mehanički sistem ima onoliko stepeni slobode koliko ima zglobova. Ako ima n zglobova, sistem će imati n stepeni slobode, bez obzira na to da li je n veće ili manje od **6**. Vidjećemo uskoro zašto je ova vrijednost **6** bitna. Dakle, robot kao mehanički sistem može da se kreće na n nezavisnih načina. Pri tome se uzimaju u obzir kretanja svih segmenata. Videćemo kasnije da je za proračun dinamike potrebno voditi računa o ovih n nezavisnih mogućnosti kretanja.

Sada ćemo, međutim, obratiti pažnju na kretanja koja imaju neku funkciju u ostvarenju određenog manipulacionog zadatka. Posmatrajmo mogućnost kretanja hvataljke robota, a to je poslednji segment lanca. Posmatrajmo kretanja samo jednog tijela, poslednjeg u lancu, a ne cijelog lanca. Označimo sa n_h broj stepeni slobode hvataljke u prostoru. Prvo zaključujemo da hvataljka kao tijelo u prostoru može imati najviše šest stepeni slobode, tri translacije i tri rotacije. Dakle, $n_h \leq 6$.

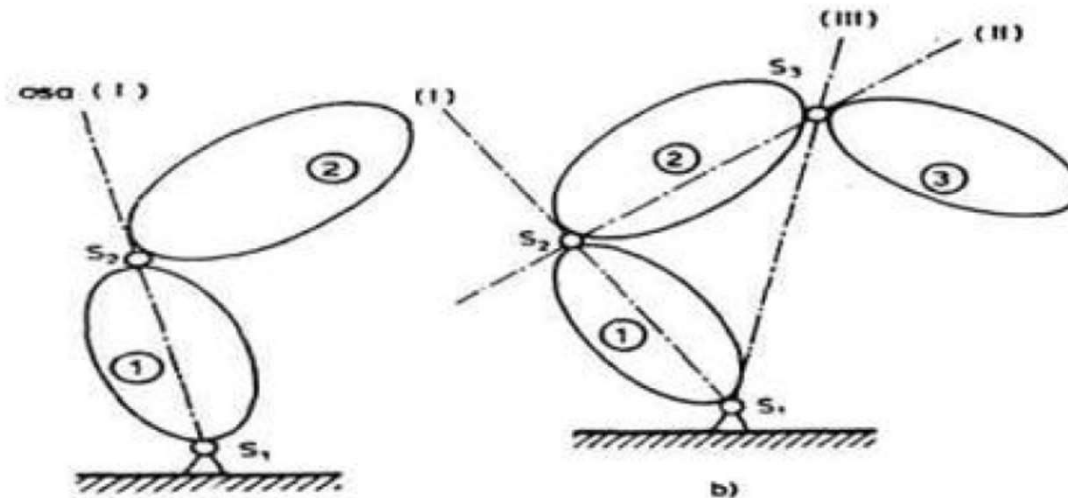
Kako hvataljka nije slobodna već lancem vezana za podlogu, to njeno kretanje može biti ograničeno ovom lančanom vezom. Tako, za broj stepeni slobode hvataljke možemo reći da je manji ili jednak broju stepeni slobode lanca, tj.: $n_h \leq n$

Analizirajmo zašto je $n_h \leq n$ a ne $n_h = n$. Ova nejednakost sugerira da se u smislu funkcionalnog kretanja neki stepen slobode lanca može izgubiti. Najbolje je to objasniti uz nekoliko konkretnih primera. Na slici 2.28 prikazane su dvije minimalne konfiguracije TTT-tipa, a na svaku se nadovezuje šaka sa jednim zglobom, tj. jednim stepenom slobode. Svaki od ovih lanaca ima po četiri zgloba i kao mehanički sistem ima četiri stepena slobode. Dakle $n = 4$. Sa stanovišta kretanja hvataljke stvari stoje drugačije. U slučaju (a) hvataljka takođe ima 4 stepena slobode. Tada je $n_h = 4$, tj. $n_h = n$ i nikakvih gubitaka nema. U slučaju (b) hvataljka ima samo tri stepena slobode, tj. $n_h = 3$ i $n_h < n$. To je otuda što sa stanovišta kretanja hvataljke translacije S_2 i S_3 nijesu nezavisne, već proizvode jedinstven efekat i ponašaju se kao jedna translacija. Dakle, jedan od ta dva stepena slobode se gubi. Gubitak tj. razlika n i n_h nastaje otuda što to podužno kretanje segmenta S_2 ne utiče na kretanje hvataljke. Segment može kliziti kroz zglobove S_2 i S_3 , a hvataljka i dalje mirovati.



Sl. 2.28. Nesingularni i singularni mehanizam

Na slici 2.29. prikazana su dva nešto drugačija primjera gubitka stepeni slobode. Lanac (a) je sastavljen od dva tijela pri čemu su zglobovi **S1** i **S2** sferični tj. svaki dovoljava po tri relativna obrtaja tada lanac ima $n = 3 + 3 = 6$ stepeni slobode. Poslednji segment lanca (tijelo br. 2), međutim, ima $n_n = 5$ stepeni slobode jer se sa stanovišta njegovog kretanja jedan stepen slobode gubi (obrtanje tijela 1 oko ose (I)).

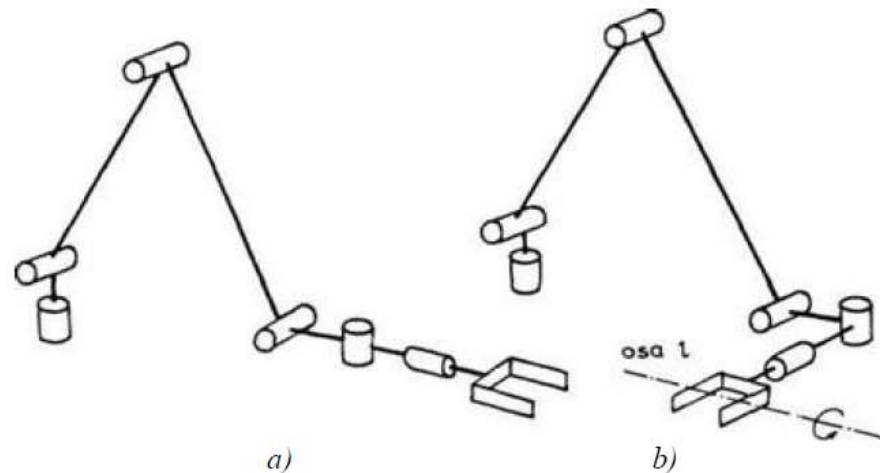


Sl. 2.29. Lanci sa sferičnim zglobovima

Trosegmentni lanac sa sferičnim zglobovima (sl.2.29b) ima $n=3+3+3=9$ stepeni slobode. Poslednji segment, pak, ima $n_n = 6$ stepeni slobode jer se tri stepena slobode gube (obrtanja oko osa (I), (II), i (III)).

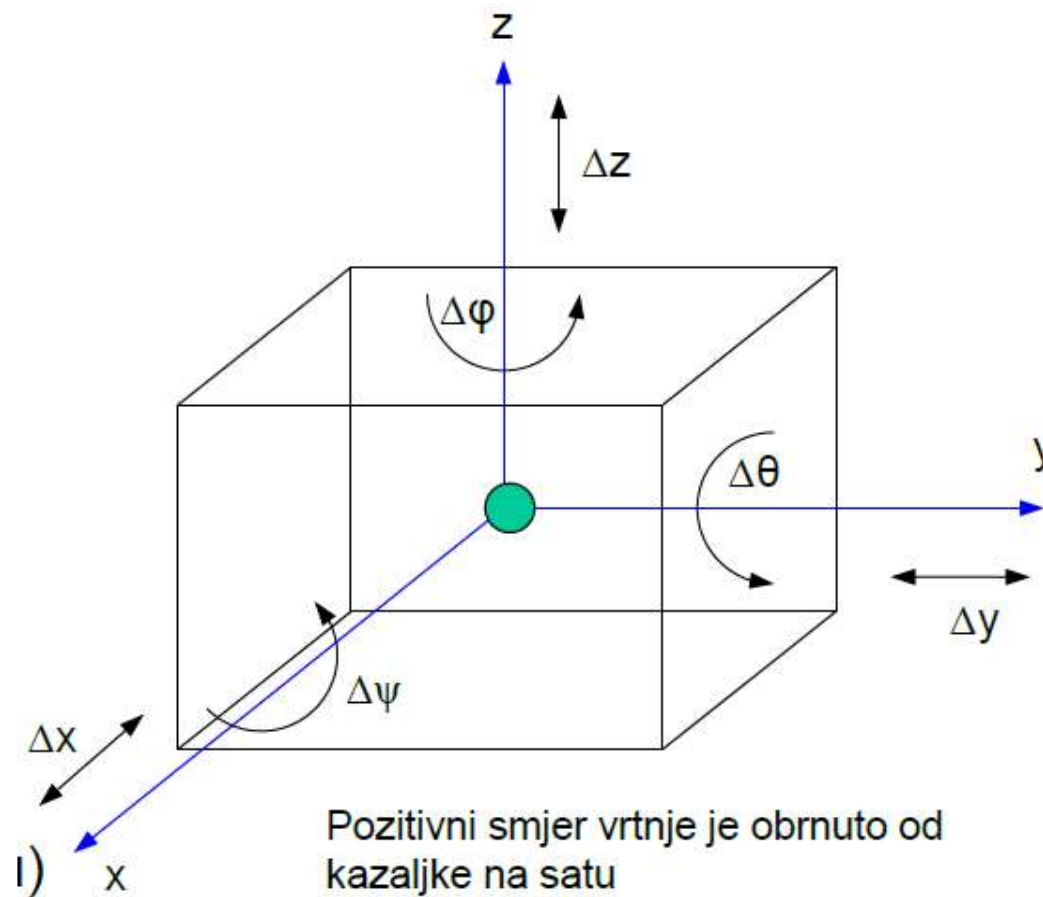
Mehanizme kod kojih je $n_h < n$ tj. kod kojih se gube neki stepeni slobode nazivamo singularnim mehanizmima, a one kod kojih gubitaka nema tj. $n_h = n$ nazivamo nesingularnim.

U primjeru sa slike 2.28a,b prikazana su dva mehanizma, jedan koji je stalno nesingularan i drugi koji je stalno singularan. Međutim uobičajeno je da su mehanizmi robota nesingularni, osim u nekim posebnim položajima kada postaju singularni. Posmatrajmo primer robota prikazanog na slici 2.30. Kod ovog lanca je $n = 6$. Kada se robot nade u položaju (a), tada njegova hvataljka može da se pomjera i obrće u svim pravcima (tri translacije i tri rotacije) tj. $n_h = 6 = n$, pa je mehanizam nesingularan. Međutim, kada je robot u položaju (b) tada hvataljka ne može da se obrće oko svoje ose (l). Dakle, $n_h < n$ i mehanizam je singularan. Treba još istaći da svaki robot čiji lanac ima više od 6 stepeni slobode ($n > 6$) mora uvek biti singularan, jer je $n_h \leq 6$. Pitanje singularnosti je važno, jer kada se nade u singularnom položaju robot svojom hvataljkom ne može napraviti one pokrete koje bi inače mogao, a koji mogu biti potrebni.



Sl. 2.30. Nesingularan i singularan položaj robota

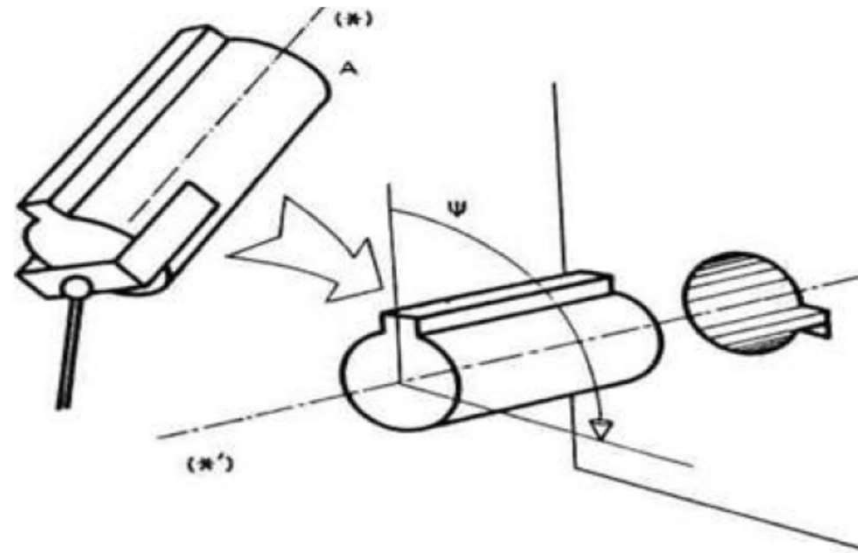
Proizvoljno zadat položaj (pozicija + orijentacija) robota može se postići s najmanje n zglobova, pri čemu barem tri zgloba moraju biti rotaciona (jer translatorni zglobovi ne utiču na orijentaciju).



Analizirajmo sada mogućnost robota da obavi određene manipulacione zadatke. Definišimo prvo neke neophodne pojmove.

Pozicioniranje podrazumijeva dovođenje vrha hvataljke u željenu tačku radnog prostora.

Potpuna orijentacija hvataljke podrazumijeva postavljanje hvataljke u tačno određeni uglovni položaj u prostoru.

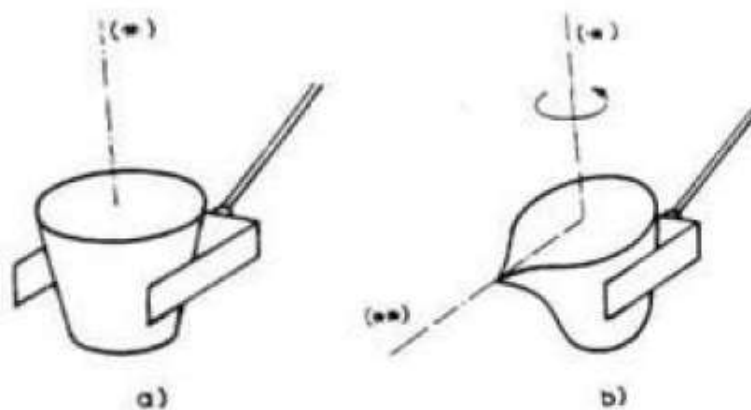


Sl. 2.31. Potpuna orijentacija

Slika 2.31 ilustruje potpunu orijentaciju. Osu predmeta (*) treba poklopiti sa pravcem otvora (*) i još predmet obrnuti oko ose za ugao ψ da bi se ispupčenje na bočnoj strani predmeta postavilo naspram žljeba u otvoru. Tada se tek predmet može uvesti u otvor.

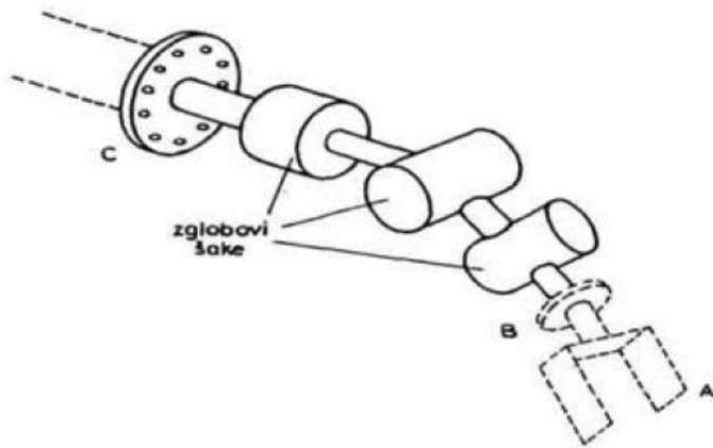
Djelimična orijentacija podrazumijeva samo da se određena osa hvataljke ili radnog predmeta poklopi sa željenim pravcem u prostoru.

Razlika između djelimične i potpune orijentacije prikazana je na slici 2.32. na primjeru prenošenja kontejnera sa tečnošću. U slučaju (a) važno je jedino da osa (*) bude vertikalna, odnosno u pitanju je djelimična orijentacija. U slučaju (b) važna je ne samo osa (*) nego i osa (**) koja mora zauzeti željeni pravac. Kada je pravac (*) određen, onda položaj pravca (**) može biti definisan uglom obrtanja oko ose (*). U pitanju je potpuna orijentacija kontejnera. Nešto slično možemo uočiti i u zadatku prikazanom na slici 2.31. U pitanju je potpuna orijentacija zbog isturenog dijela po dužini cilindra koji treba da se poklopi sa bočnim žljebom na kružnom otvoru. Kada takvog isturenog dijela ne bi bilo, tj. kada bi se cilindričan predmet uvlačio u cilindričan otvor, tada bi bilo dovoljno poklopiti ose predmeta i otvora, odnosno dovoljna bi bila djelimična orijentacija.



Sl. 2.32. Delimična i potpuna orijentacija

Razjasnimo sada pojam "vrha" hvataljke. Taj pojam podrazumijeva određenu zadatu tačku hvataljke ili nekog drugog završnog uređaja. To je uvek ona tačka čije je dovođenje u određeni položaj bitno u konkretnom zadatku. Na primjer, pri hvatanju predmeta bitno je pozicionirati tačku A prikazanu na slici 2.26. Kada se radni predmet uvlači u otvor bitno je pozicionirati vrh predmeta (tačka A na slici 2.31.). U slučaju farbanja prskanjem pozicionira se vrh pištolja za prskanje, a u slučaju zavarivanja vrh zavarivačkih kliješta.



Sl. 2.26. Shema šake robota

Označimo sa n_z broj stepeni slobode koji je potreban za izvršenje određenog manipulacionog zadatka.

Za savlađivanje zadatka pozicioniranja potrebno je 3 stepena slobode tj. $n_z = 3$.

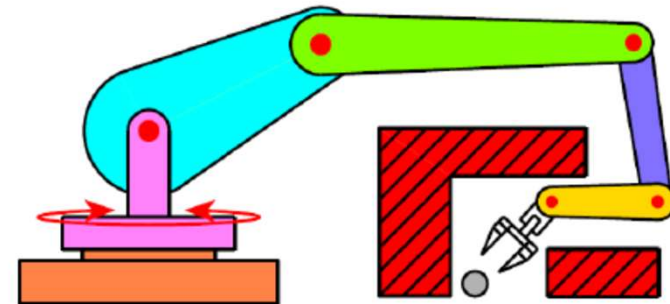
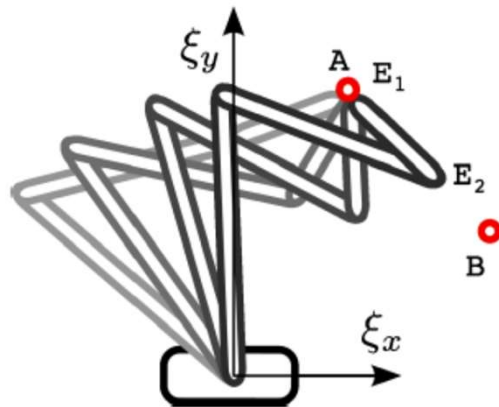
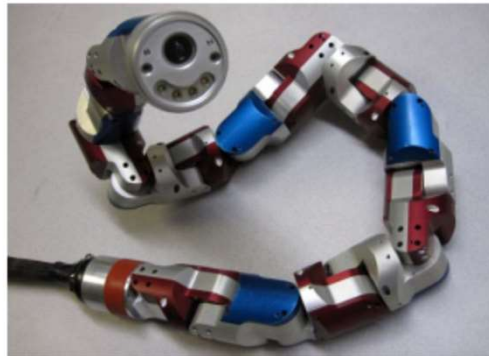
Za savlađivanje zadatka pozicioniranja zajedno sa delimičnom orijentacijom potrebno je $3 + 2$, odnosno 5 stepeni slobode ($n_z = 5$).

Za savlađivanje zadatka pozicioniranja zajedno sa potpunom orijentacijom potrebno je $3 + 3$, odnosno 6 stepeni slobode ($n_z = 6$).

Da bi robot mogao uspješno izvršiti postavljeni zadatak potrebno je i dovoljno da bude $n_h \geq n_z$.

Obično je $n_h = n_z$, a u slučaju $n_h > n_z$. govorimo o redundantnosti robota u odnosu na postavljeni zadatak. Dakle, redundantnost podrazumijeva "višak" stepeni slobode hvataljke (n_h) u odnosu na najmanji broj potreban za izvršenje zadatka (n_z).

Ako se proizvoljno zadani položaj robota u potpunosti ostvaruje sa n zglobova, tada sličan robot sa $n+i$ zglobova spada u grupu **redundantnih robota**



O višku stepeni slobode možemo govoriti i u slučaju singularnosti. Tada je $n > n_h$, odnosno mehanizam (n) ima višak u odnosu na hvataljku (n_h). I u ovom slučaju mogli bismo govoriti o redundantnosti. Međutim, ako je robot singularan samo u nekim položajima, tada izbjegavamo termin redundantnosti jer mehanizam nije namerno projektovan da ima višak stepeni slobode, već je taj višak posledica smanjivanja mogućnosti kretanja hvataljke ("gubljenje" stepeni slobode) što predstavlja neželjenu situaciju.

Ako se, pak, robot projektuje namjerno tako da stalno bude singularan i da ima višak stepeni slobode, na primer, robot sa slike 2.28b, tada koristimo termin redundantni robot. Slično je sa robotima koji imaju $n > 6$ i koji su uvijek singularni zbog $n_h \leq 6$ pa, dakle, i redundantni.

Danas se roboti uglavnom projektuju tako da imaju 4,5 ili 6 stepeni slobode. Robot sa četiri stepena slobode može da obavi pozicioniranje, za šta je potrebno tri stepena slobode, a sa preostalim četvrtim stepenom slobode vrši dopunska kretanja, što je dovoljno za izvršenje nekih jednostavnijih manipulacionih zadataka u praksi. To su obično zadaci prenošenja predmeta, opsluživanja presa i slično. Robot sa pet stepeni slobode može da izvrši zadatak pozicioniranja zajedno sa djelimičnom orijentacijom. Tu spadaju, na primjer, zadaci prenošenja tečnosti, jednostavniji zadaci montaže, zavarivanja i slično. Robot sa šest stepeni slobode u principu može da izvrši bilo kakav manipulacioni zadatak jer se on uvijek može svesti na problem pozicioniranja zajedno sa potpunom orijentacijom. To su, na primjer, složeniji zadaci prenošenja, montaže, zavarivanja i slično.