

**Matej Veber**

# **ROBOTIKA 4.0**

**Učbenik za programe Tehnik mehatronike,  
Strojni tehnik in Elektrotehnik**

## **ROBOTIKA 4.0**

Učbenik za programe Tehnik mehatronike, Strojni tehnik in Elektrotehnik

Avtor: mag. Matej Veber, univ. dipl. inž., [matej.veber@sc-celje.si](mailto:matej.veber@sc-celje.si)

*Strokovna in metodično-didaktična recenzija:* prof. dr. Karl Gotlih, prof. ddr. Boris Aberšek

*Jezikovni pregled:* mag. Majda Degan Kapus

*Fotografije:* Matej Veber, Shutterstock idr. (Podroben seznam je na koncu učbenika.)

*Uredila* Tamara Mušinič Zadavec

*Oblikovanje in prelom* Ksenija Konvalinka

*Izdala* PIPINOVA KNJIGA, d. o. o.

*Za založbo* Tamara Mušinič Zadavec

Podsmreka, 2022

Prva izdaja

Prvi natis

*Naklada* 500

Tisk Present, d. o. o.

Na podlagi 26. člena Zakona o organizaciji in financiranju vzgoje in izobraževanja je Strokovni svet Republike Slovenije za poklicno in strokovno izobraževanje na svoji 193. seji, dne 15.04.2022, sprejel sklep št. 013-29/2022/1 o potrditvi učbenika ROBOTIKA 4.0 za poučevanje modula Robotika v programu Tehnik mehatronike, modula Avtomatizacija in robotika v programu Strojni tehnik ter modula Avtomatizirani postroji v programu Elektrotehnik.

© PIPINOVA KNJIGA, d. o. o., Podsmreka, 2022. Fotokopiranje in razmnoževanje dela po Zakonu o avtorskih in sorodnih pravicah ni dovoljeno.

© Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport, 2022. Fotokopiranje in razmnoževanje dela po Zakonu o avtorskih in sorodnih pravicah ni dovoljeno.

---

CIP - Kataložni zapis o publikaciji

Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

007.52(075.3)

VEBER, Matej

Robotika 4.0 : učbenik za programe Tehnik mehatronike, Strojni tehnik in Elektrotehnik / Matej Veber ; [fotografije Matej Veber, Shutterstock idr.] - 1. izd., 1. natis. - Podsmreka : Pipinova knjiga, 2022

ISBN 978-961-95314-5-7

COBISS.SI-ID 104259075

# VSEBINA

PREDGOVOR .....	5
VSEBINSKA ZASNOVA UČBENIKA .....	6
<b>ZGODOVINA ROBOTIKE .....</b>	<b>9</b>
Zgodovinski pregled razvoja robotov .....	10
<b>ROBOTI .....</b>	<b>17</b>
<b>VRSTE ROBOTOV V NAŠI OKOLICI .....</b>	<b>21</b>
<b>UVOD V ROBOTIKO ZA BISTRE GLAVE .....</b>	<b>37</b>
<b>INDUSTRIJSKI ROBOTI .....</b>	<b>49</b>
Trenutni trendi na področju industrijske robotike .....	49
Razlogi za uvajanje robotiziranih sistemov v industriji .....	52
Osnovna zgradba industrijskega robota .....	53
Delovni prostor industrijskega robota .....	54
Konstrukcijske izvedbe industrijskih robotov .....	58
Prostostne stopnje robotskega mehanizma .....	62
Redundanten in neredundanten robot .....	63
Zunanje in notranje koordinate robota .....	63
Kinematični model robotskega mehanizma .....	64
Dinamični model robotskega mehanizma .....	70
<b>POGON IN TRANSMISIJA ROBOTSKEGA MEHANIZMA .....</b>	<b>77</b>
Vodenje servomotorjev s pulzno-širinsko modulacijo .....	79
Meritev kotnega pomika in hitrosti vrtenja na gredi AC-servomotorja .....	83
Merjenje navora AC-servomotorja .....	86
Gonila in prenosniki v robotskih mehanizmih .....	87
Harmonsko gonilo .....	87
Ostala gonila .....	88
<b>REGULACIJA POGONA ROBOTSKEGA MEHANIZMA .....</b>	<b>91</b>
<b>VRSTE GIBOV ROBOTSKIH MEHANIZMOV .....</b>	<b>97</b>
Sintaksa programiranja industrijskega robota KUKA .....	100
Sintaksa programiranja industrijskega robota ABB .....	100
Sintaksa programiranja industrijskega robota FANUC .....	101
Učne enote industrijskih robotov .....	101
<b>SIMULIRANJE AKCIJ IN INDIRECTNO PROGRAMIRANJE INDUSTRIJSKIH ROBOTOV .....</b>	<b>105</b>
<b>PROGRAMSKI JEZIK KRL .....</b>	<b>111</b>

<b>PRIJEMALA INDUSTRIJSKIH ROBOTOV .....</b>	<b>117</b>
Vrste robotskih prijemal .....	117
<b>VARNOSTNE FUNKCIJE V AVTOMATIZIRANIH SISTEMIH .....</b>	<b>123</b>
<b>PRVA POSTAVITEV INDUSTRIJSKEGA ROBOTA .....</b>	<b>139</b>
<b>APLIKACIJE INDUSTRIJSKIH ROBOTOV .....</b>	<b>145</b>
<b>SODELOVALNI INDUSTRIJSKI ROBOTI .....</b>	<b>155</b>
<b>KIBERNETSKO FIZIČNI SISTEMI V INDUSTRIJSKI ROBOTIKI .....</b>	<b>165</b>
<b>ZAKLJUČNA BESEDA .....</b>	<b>171</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>173</b>

## PREDGOVOR

Namen priročnika je približati robotiko mladim, pa tudi starejšim navdušencem nad tehniko in tehnologijo. Tehnologija se pospešeno razvija in oblikuje naš vsakdan. Zato moramo biti digitalno pismeni, jezikovno vešči, da lahko komuniciramo v domačem in tujih jezikih, delovati moramo kot timski sodelavci, kreativno in inovativno razmišljati, hkrati pa skrbeti za svoje fizično in duševno zdravje.

Vprašamo se lahko, koliko smo samoiniciativni in prilagodljivi na hitre spremembe, ki se dogajajo tako v bližnjem okolju kot tudi globalno. Že danes lahko razmišljamo o poklicih prihodnosti. Verjetno nihče nima dovolj domišljije in sposobnosti, da bi lahko natančno definirali, kaj se bo dogajalo čez deset in več let. V preteklosti nihče ni pričakoval, da se bodo pojavili poklici, kot so vplivnež (angl. *influencer*), blogger/vloger in jutjuber (angl. *youtuber*). Enak pogled na prihodnost imamo danes. Bodimo drzni, učimo se, usvajajmo nova interdisciplinarna znanja in se pripravimo na prihodnost. Tako bomo konkurenčni na trgu dela in tudi lažje stopali v prihodnost, v kateri bo umetna inteligenca krojila naša življenja in bo digitalizacija dobila drugačen pomen, kot ga ima danes. Podjetje Facebook razvija vzporedni kibernetski svet Metaverse, ki ni novost, ampak idejam in trženju odpira nove možnosti. Globalno se spreminja tudi vloga velikih razvojno usmerjenih držav. Kitajska prevzema vodilno vlogo na področju umetne inteligence, si prisvaja globalne multinacionalke in izvaja druge manevre, ki odločilno vplivajo na globalno dogajanje. Posameznik mora in bo moral delovati v metasvetu, obvladovati znanja STEM (angl. *Science, Technology, Engineering, Mathematics*; slo. znanost, tehnologija, inženirstvo, matematika), poznati sisteme VR/AR (angl. *Virtual reality/Augmented reality*, slo. virtualna realnost/obogatena resničnost), koncepte programiranja, strojnega vida in drugo. Pojavili se bodo novi poklici, kot so kreator virtualnih vsebin, kreator vsebin obogatene resničnosti, izhajajoč iz tega tudi psihiater za virtualno realnost in in poznavalec drugih strok.

Robotika je tehnološko področje, ki je zelo pomemben sklop *Industrije 4.0*, hkrati pa čedalje bolj navzoča tudi v našem vsakdanjem življenju. Pomembna je v zdravstvu in v gospodinskih aplikacijah, hkrati pa je nepogrešljiva tehnologija v industrijskih aplikacijah fleksibilnih proizvodnih sistemov. V medicinskem sektorju so vse pogostejši kirurški roboti, v hišnih aplikacijah servisni mobilni roboti, kot sta npr. sesalni robot ali robot za košnjo trave, razvijajo se različna avtonomna vozila, roboti med drugim raziskujejo tudi Mars.

Učbenik je pripravljen v hibridni izvedbi. Znanstveno dokazano je, da so za učenje zelo pomembni pisni viri. Dandanes pa so na voljo tudi elektronska gradiva, spletne učilnice, različni odprti in zaprti hiperteksti in podobno. Bistveno je, da poleg omenjenih ne zanemarimo pisnih virov. Zato je gradivo v besedilni obliki podprto s slikami in QR-kodami, ki omogočajo ogled vsebin s pametnimi telefoni ali tabličnimi računalniki. S pametno napravo odčitamo QR-kodo in se povežemo z izbrano vsebino. To je lahko spletna stran, videovsebina ali interaktivni video. Na ta način lahko hibridno povežemo pisni vir v fizični obliki s sodobnimi tehnologijami in jih tako učinkovito uporabimo za pridobivanje znanja na višji taksonomski ravni oz. za doseganje višjih učnih ciljev. Naslednji korak je vključitev virtualne in obogatene resničnosti (deloma opisano tudi v tem gradivu).

Želim vam kreativno, zanimivo in uspešno učenje tehnologije robotike.

Avtor

## VSEBINSKA ZASNOVA UČBENIKA

Učbenik je razdeljen na 15 poglavij, ki omogočajo postopno usvajanje znanj.

V uvodu boste spoznali zgodovino in zgodovinski razvoj robotike.

Sledi definicija robota in pregled različnih vrst robotov v naši okolici.

Naslednji sklop je namenjen didaktični robotiki in spoznavanju osnov robotskih sistemov. Spoznamo koncept gradnje mobilnih robotov, koncept mehanske konstrukcije, osnove programiranja in reševanja problemov.

Sledi uvod v industrijsko robotiko, kjer definiramo pojem robot in spoznamo trende na področju industrijske robotike. Vprašamo se tudi, kakšni so razlogi za robotizacijo industrijskih procesov.

V sledečem segmentu obravnavamo osnovno zgradbo industrijskega robota, delovni prostor in konstrukcijske izvedbe industrijskih robotov.

Sledi poglavje, kjer spoznamo prostostne stopnje robotskega mehanizma ter kinematični in dinamični model robota. Robotski mehanizem se mora premikati v prostoru, za kar potrebuje pogon in transmisijo, zato je temu namenjeno naslednje poglavje.

Robotski mehanizem mora poznati lego v prostoru, zato se v naslednjem vsebinskem sklopu seznanimo z meritvami na gredi pogonskega servomotorja.

Sledi poglavje, kjer obravnavamo regulacijo pogona robotskega mehanizma. Izhajajoč iz tega nato obravnavamo osnovne gibe industrijskega robota in način programiranja teh gibov.

Brez učne enote ne moremo voditi, nadaljevati in programirati učnega robota, zato v naslednjem sklopu spoznamo učne enote različnih industrijskih robotov.

Sledi predstavitev različnih programskih orodij za simulacijo ter posredno in neposredno programiranje industrijskih robotov.

Spoznamo tudi programski jezik KRL, ki se uporablja za programiranje robotov Kuka. Na vrhu prirobnice robota je običajno pritrjeno orodje oziroma prijemalo. Tej tematiki je namenjeno naslednje poglavje.

Pomemben sklop je tudi varnost v robotiziranih sistemih, kjer so razloženi osnovni pojmi in kategorije varnosti ter varnostni standardi.

Sledi poglavje, v katerem bomo razdelali prvo postavitve robota v praktično aplikacijo.

Omenjene vsebine so uporabljene v praktičnih aplikacijah, katerih opisi sledijo v naslednjem poglavju.

V predzadnjem sklopu so predstavljeni in opisani sodelovalni roboti, ki so trenutno zelo aktualni v industrijskih sistemih. Navežemo se tudi na varnost pri sodelovalnih robotih in izvedenkah prijemal za sodelovalne robote.

V zadnjem sklopu se navežemo na kibernetično-fizične sisteme v industrijski robotiki. Ti so del *Industrije 4.0*, zato jih moramo na primeren in učinkovit način vpeljati v sisteme treninga, navodil in servisa.

Želim vam vse dobro ter hkrati zanimivo in uporabno vsebino gradiva.

*Avtor*



*Naložba v znanje plača najboljše obresti.*

*Benjamin Franklin*

```
1 DEF kariera ()
2 INI
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : moje_znanje
4 ponovi
5 teorija (izobraževanje)
6 praksa (trening)
7 izkušnje (delo)
8
9 if ($datum.ura==9) and ($datum.min==30) then
10 odmor_kava(#cappucino)
11 odmor_malica(#malica)
12
13 endif
14
15 until perfektno
16 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Osnova [1] : moje_znanje
```

# ZGODOVINA ROBOTIKE

V času globalne digitalizacije in uvajanju *Industrije 4.0*, hitrega tehnološkega razvoja, globalne industrializacije, fleksibilnih proizvodnih sistemov ter umetne inteligence (angl. *Artificial intelligence, AI*) ne moremo mimo pojma, ki ga danes skoraj vsak pozna, tj. stroj za avtomatizirano opravljanje delovnih nalog, ki ga običajno poimenujemo z besedo »robot«. Večina si pod omenjenim pojmom predstavlja visoko zmogljiv in »inteligenten« stroj oziroma napravo, ki samostojno opravlja delovne naloge. Stroj, ki samostojno opravlja naloge namesto človeka, po standardni definiciji imenujemo robot (povzeto po standardu ISO 8373).

Človek si je že od nekdaj želel olajšati delo. Tako so nastale različne inovacije ter nova orodja, pripomočki in naprave. Stari Grki so že leta 300 pr. n. št. avtomatsko regulirali višino vode za zalivanje vrta glede na čas v dnevu. Preboj v industrializacijo se je začel z izdelavo prvega parnega regulatorja, ki ga je razvil J. Watt leta 1728. Zаметki prve serijske proizvodnje segajo v leto 1912. Prvo serijsko proizvodnjo je razvil Henry Ford pri serijski proizvodnji avtomobila modela T (Slika 1).



Slika 1: Prva serijska proizvodnja Forda leta 1912

Ta koncept serijske proizvodnje se uporablja še danes. V šestdesetih letih se je z razvojem tehnologij polprevodnikov začel preboj in razvoj mikroprocesorjev, ki so bili izhodišče za delovanje osebnih računalnikov in vse ostale krmilne elektronike, ki se je kasneje uporabljala za krmilno-regulacijske sisteme strojev in naprav. To je spodbudilo razvoj robotskih krmilnikov in prvih industrijskih robotov.

V češčini »robot« pomeni »prisilno delo« oziroma »suženj« (angl. *Forced labour*). Besedo »robot« je leta 1920 zapisal češki pisatelj znanstvene fantastike Karel Čapek v dramski igri R. U. R. (angl. *Rossum Universal Robots*, slo. *Rossumovi univerzalni roboti*).



Slika 2: Dramska igra Rossumovi univerzalni roboti



Karel Čapek,  
češki pisatelj in scenarist, rojen 9. januarja 1890,  
Male Svatonovice, Češka, Avstro-Ogrska,  
umrl 25. december 1938.

Avtomatizacija oziroma uvajanje samodejnega izvrševanja zahtevnih nalog brez človekovega posega se je v industriji začela z obdelovalnimi avtomati, ki so z mehansko izvedeno logiko svojo funkcijo izvajali samodejno. Z razvojem aktivnih elektronskih komponent – tranzistorjev ter nato elektronike in računalnikov so se avtomati razvili v sodobne računalniško vodene stroje, ki so pomemben sklop proizvodnega procesa.

## Zgodovinski pregled razvoja robotov

1959

George Devol in Joseph Engelberger razvijeta prvega industrijskega robota.



Tehtal je dve toni, za vodenje je uporabljal program, napisan na magnetnem bobnu.



1961

Podjetje Unimation postavi prvega industrijskega robota v podjetju General Motors.



Namenjen je bil izdelavi ročajev za vrata, prestavnih ročk in druge opreme v notranjosti avtomobilov.



1967

Prvi industrijski robot v Evropi



Robot Unimate je bil instaliran v tovarni Metallverken na Švedskem.





1975

Podjetje ABB (Asea) razvije robota z nosilnostjo 60 kg.



Robot je bil razvit glede na zahteve avtomobilske industrije po večji nosilnosti in fleksibilnosti robotov (Saab).



1976

Prvi robot v vesolju



Robotske mehanizme so uporabili na vesoljskih sondah Viking 1 in Viking 2.



1984

Prvi robot SCARA



Podjetje Adept, ZDA, predstavi prvega robota SCARA.



Prvi najhitrejši robot, namenjen sestavljanju



50 % hitrejši robot od konkurence, ABB.



1994

Prvo sinhrono gibanje dveh robotov



Motoman, MRC krmilni sistem, ki je omogočil sinhrono gibanje robotov.



1996

Prvi računalniško podprt nadzorni sistem robota



KUKA, prvič omogočeno programiranje in premikanje robota v realnem času z uporabo 6D-miške.



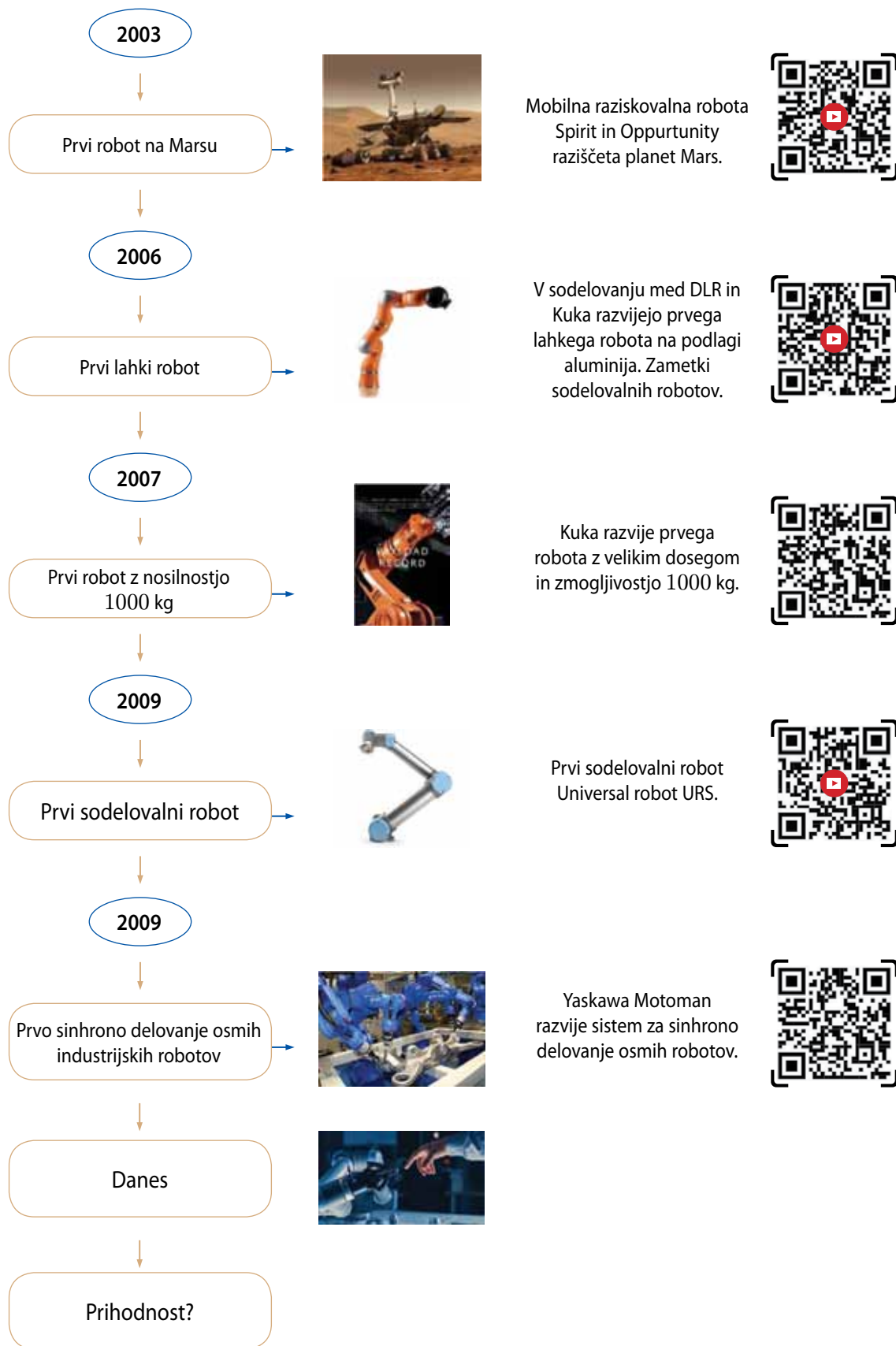
1999

REIS predstavi uporabo laserja v robotiki.



Reis Robotics patentira lasersko vodenje robotske roke.





Vir: IFR 2022



## PONOVITEV, NALOGE IN IZZIVI

1. Kdaj ste prvič slišali za besedo robot?
2. Kaj vam pomeni besedna zveza strojni robot?
3. Kakšno je vaše mnenje o razvoju robotike in umetne inteligence v naslednjih desetih letih?

### Izziv

Preberite naslednje knjige in s sošolci/kolegi v timu razpravljajte o njihovi tematiki.

- Isaak Asimov: *Jaz, robot*, 1950.
- Laurence Devillers: *O robotih in ljudeh*, 2021.

#### Nasvet:

Zajemite QR kodo s pametnim telefonom ali tabličnim računalnikom in si oglejte vsebino.

Rossummovi univerzalni roboti





*Najbolj žalosten vidik življenja v danem trenutku je, da znanost  
hitreje napreduje v znanju kot družba v modrosti.*

*Isaac Asimov*

```
1 DEF prosti_čas ()
2 INI
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : moje_pocutje
4 loop
5 sprehod (gozd)
6 dobri_odnosi(bliznji)
7
8 if ($datum.ura==19) and ($datum.min==30) then
9   berem_knjigo(#zanimivo)
10  odmor_pijača(#voda)
11
12 endif
13
14 until perfektno
15 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Osnova [1] : poln_energije
```

# ROBOTI

Robotika je znanstvena veda, ki se ukvarja s problemi avtomatizacije v industrijskih aplikacijah in aplikacijah v našem vsakdanjem življenju.

Osnovne skupine robotov so:

- **antropomorfni roboti** – človeku podobni roboti;
- **neantropomorfni roboti** – imajo obliko strojev;
- **lokomocijski roboti** – vsebujejo elemente hoje.

Osnovni zakoni robotike, ki jih je zapisal Isaac Asimov v svojem literarnem delu (*Jaz, robot*) so:

**1. zakon:** ROBOT ČLOVEKA NE SME POŠKODOVATI OZIROMA MU ŠKODOVATI S SVOJIM NEDELOVANJEM, RAZEN ČE JE TO V NASPROTJU Z NULTIM ZAKONOM.

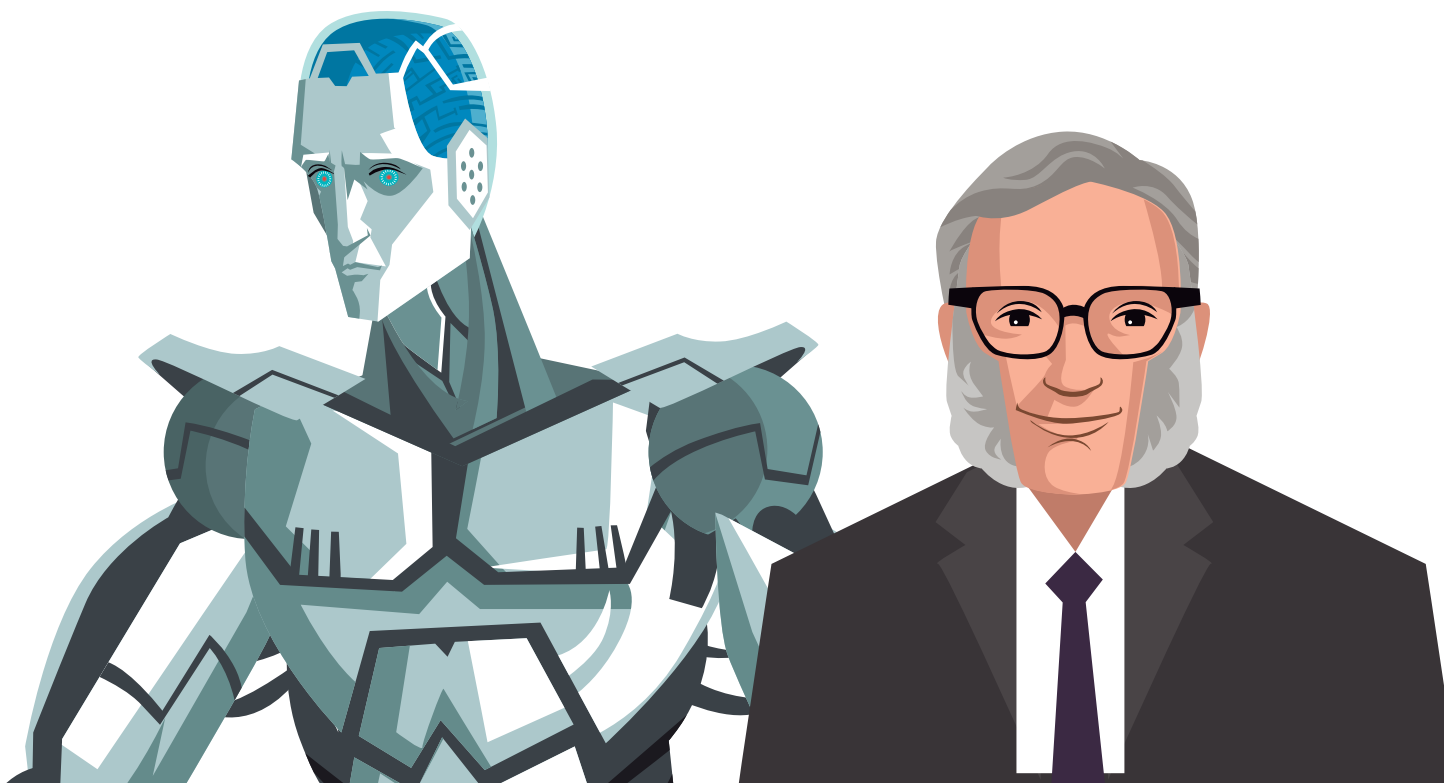
**2. zakon:** ROBOT MORA IZVRŠEVATI ČLOVEŠKE UKAZE, RAZEN ČE SO V NASPROTJU S PRVIM ZAKONOM.

**3. zakon:** ROBOT MORA ŠČITITI SVOJ OBSTOJ, RAZEN ČE JE TO V NASPROTJU S PRVIMA ZAKONOMA.

**0. zakon:** ROBOT NE SME ŠKODOVATI ČLOVEŠTVU OZIROMA MU ŠKODOVATI S SVOJIM NEDELOVANJEM.

Isaac Asimov je bil velik pisec znanstvene fantastike. Njegova dela o znanstvenofantastični robotiki so še vedno zanimiva in aktualna. Med drugim je napisal knjige, v katerih se sprašuje o prihodnosti človeštva. Zavedati se je treba, da gre pri njegovih opisih za namišljeno resničnost, ki je v resničnem življenju oz. praksi le deloma uresničljiva. Zakone, ki jih v petdesetih letih 20. stoletja predlagal za stroje, ni enostavno implementirati v današnje stroje in robote. Lahko pa so omenjeni zakoni izhodišče ter vodilo pri razmišljanju o filozofskih in etičnih vprašanjih na področju robotike.





*Robot ne sme škodovati človeštvu oziroma  
mu škodovati s svojim nedelovanjem.*

*Isaac Asimov*



# VRSTE ROBOTOV V NAŠI OKOLICI

V dobi hitrega razvoja in novih tehnologij se tudi področje robotike čedalje bolj razvija in uveljavlja tako v industriji kot tudi na področjih, kot so medicina, vojska, gospodinjstvo – torej povsod, kjer naj bi robotika človeku olajšala delo in življenje.

Vsi roboti so zasnovani tako, da v človekovem okolju avtonomno opravljajo svoje funkcije. Sestavljeni so iz mehanske konstrukcije, električnega pogona, nadzornega sistema in ustreznih tipal, ki zaznavajo spremembe fizikalnih količin v okolici. Veliko omenjenih sistemov izhaja iz razvojnih vojaških krogov in drugih organizacij vojske, v katerih razvijajo zmogljive sisteme za moderno bojevanje. Oglejmo si nekaj robotov v naši okolici.

## Industrijski robot

Industrijski roboti se uporabljajo v industrijskih aplikacijah, kjer so delovni pogoji za človeka slabši, kjer se na primer kopičijo plini, visoke temperature, velike mase in ponavljajoče monotono delo. Tehten razlog za uporabo industrijskih robotov je torej razbremenitev človeka, pomembni dejavniki pa so tudi konkurenčnost, kakovost in prihodek podjetja. Industrijski roboti se uporabljajo za stregovanje in manipulacijo,



Slika 3: Industrijski robot v robotski celici

paletizacijo, varjenje, barvanje, meritve in druge avtomatizirane aplikacije. Med najbolj znanimi dobavitelji industrijskih robotov so proizvajalci Kuka, ABB, Yaskawa Motoman, Fanuc, Universal robots, Franka Emika, Mitsubishi, Reis, Staubli, Kawasaki, Otc Daihen, Denso, Nachi, Epson, Skilled, RRR, Hyundai in drugi.

Sodelovalni roboti opravljajo delovno nalogo v timu s človekom. Pri tem niso potrebne varovalne robotske celice, ker imajo sodelovalni roboti nameščena tipala, ki zaznajo človeško silo in dotik. So lahki in zelo fleksibilni, lahko jim spreminjamo lokacijo izvajanja delovnih nalog na enostaven način, programiranje je relativno enostavno.

Trenutna slabost je hitrost izvajanja delovnih nalog, ker v sodelovalnem načinu zaradi varnosti ne smejo delovati v hitrem režimu. Trg sodelovalnih robotov trenutno raste 40-odstotno letno [1], zato tega področja ne smemo zanemariti pri izobraževanju tehnike in tehnologije. Pri sodelovalnem robotu so zelo pomembni varnostni standardi, ki jih bomo opisali v poglavju, namenjenem sodelovalnim robotom.



Slika 4: Industrijski sodelovalni robot UR

## Avtonomni industrijski mobilni roboti AGV

Avtonomni industrijski mobilni roboti (AGV, angl. *Autonomous guided vehicle*) so pogosti v industrijskih procesih zaradi logistike materiala, polizdelkov in izdelkov iz določene lokacije proizvodnega procesa na drugo lokacijo. So avtomatizirani in avtonomno opravljajo logistične naloge. Opremljeni so z električnimi motorji, ki zagotavljajo pogon robota. Senzorji pred robotom zaznavajo ovire in navzočnost ljudi, namenski senzor pa zaznava elektromagnetno polje, ki ga oddaja vodnik, nameščen v tla postroja. Na ta način lahko mobilni robot sledi načrtovani poti. Na Sliki 5 vidimo primer avtonomnega mobilnega vozička slovenskega podjetja TPV. Poznamo različne tipe avtonomnih mobilnih vozičkov. Naprava je lahko samostojna in avtonomno opravlja naloge logistike v podjetjih.



Slika 5: Avtonomni industrijski mobilni robot AGV

Drugačen je avtonomni mobilni voziček z dodatno robotsko roko, ki opravlja naloge manipulacije izdelkov na voziček. Na Sliki 6 je primer avtonomnega mobilnega vozička KMR iiWA. Avtonomni mobilni voziček KMR iiWA omogoča premikanje po prostoru in logistiko materiala v proizvodnem procesu. Nameščeni sodelujoči robot LBR iiWA je namenjen manipulaciji materiala.



Slika 6: Avtonomni industrijski mobilni robot KMR iiWA



Avtonomni mobilni voziček Boston Dynamics Stretch je prototipni robot, ki se giba v proizvodnem procesu in paletizira različne pakirane izdelke s pomočjo robotske roke.



Slika 7: Boston Dynamics Stretch



Slika 8: Kuka OmniMove

Mobilni voziček Kuka OmniMove je robot, namenjen logistiki večjih bremen. Med drugim se uporablja pri logistiki sestavljanja potniških letal. Prednost naprave so kolesa Omni (Mecanum).

## Didaktični mobilni roboti

Didaktični mobilni roboti se uporabljajo v izobraževalne namene na področju tehnike in tehnologije. Ključno pri tem je spoznavanje znanj STEM (angl. *Science, Technology, Engineering and Mathematics*, slo. znanost, tehnologija, inženirstvo in matematika), motivacija ter navdušenje mladih za tehniko.



Slika 9: Priprave na tekmovanje RoboBum Rescue Line

Poznamo mobilne robote, ki sledijo črni črti na podlagi, se avtonomno pomikajo v labirintu in rešujejo različne probleme in izzive. Namenjeni so predvsem spoznavanju robotike pri učencih, dijakih in študentih, ki se lahko udeležujejo tudi različnih regijskih in državnih tekmovanj, kot so RoboAs, RoboBum, Legomasters, FLL in druga. Slovenske ekipe so uspešne tudi na svetovnih prvenstvih v robotiki RoboCup in FLL. Koncept didaktičnih mobilnih robotov ponuja možnost spoznavanja

Pogon Mecanum



Kuka KMR iiWA



konstrukcijskih metod, načrtovanja električnih vezij, spoznavanje senzorjev, vstop v svet programiranja ter seznanjanje in srečanje s tehniko na zanimiv in privlačen način. Pridobljena znanja so implementirana v robotskih sistemih, ki jih bomo spoznali v tem gradivu. Na Sliki 9 vidimo priprave dijakov na tekmovanje Robobum. Na Sliki 10 je ponazorjeno programiranje mobilnega robota, na Sliki 11 je prikazano državno tekmovanje, in sicer Robobum Reševanje črta. Za višji nivo znanja o robotiki se poteguje svetovno prvenstvo v robotiki RoboCup. Vsako leto se tekmovanja udeleži 4000 tekmovalcev iz vsega sveta; združeni so v približno 350 ekipah in tekmujejo na približno 30 področjih robotike.



Slika 10: Programiranje Lego mobilnega robota



Slika 11: Tekmovanje RoboCup Reševanje črta

Eno izmed tekmovanj je Rescue, ki je namenjeno simulaciji reševanja z roboti po naravnih katastrofah. Med področji reševanja je Rescue RMRC, ki ga organizira ameriška vlada in njen inštitut kot odziv po nesrečah. Robot je načeloma v celoti prototipiran, izveden s tehnologijo 3D-tiska. Tekmovanje je razdeljeno v tri segmente. V prvem segmentu mora reševalni robot premagati različne terene. Operator robota ne sme videti, vsi parametri vodenja morajo biti vidni le na zaslonu. V drugem segmentu sledi senzorni test, pri katerem je treba s kamero zaznavati različne simbole za nevarnosti (hazmat simboli), zaznati gibanje v prostoru, temperaturo v določeni točki prostora, vrednost CO<sub>2</sub>, različne QR-kode ter barve in črke na stenah stavbe. V tretjem segmentu poteka manipulacija z robotskim prijemalom, s katerim mora robot odpreti različne ventile, pritisniti tipke na tipkovnici, odpreti zadrgo in podobno. Tekmovanje poteka pet dni in je zelo intenzivno. Tekmovalci rešujejo različne problematike in različne tehnične ter programske napake.



Slika 12: Tekmovanje RoboCup Rescue RMRC



Slika 13: Kolaž slik iz svetovnega prvenstva RoboCup

Probleme rešujejo tudi pozno v noč, kar je za njihov dnevni ritem še napornejše. Takšno tekmovanje združuje več dejavnosti in predstavlja celovit koncept. Bistvene prednosti teh tekmovanj so potovanja v tujo državo, izmenjava izkušenj, spoznavanje novih tehnologij, medkulturni dialog in komunikacija v tujem jeziku, timsko reševanje problematik ter širjenje osebnih in strokovnih obzorij.

RoboAS



Robobum



Legomasters



RoboCup Rescue RMRC



## Robotski sesalnik

Robotski sesalnik je avtonomni mobilni robot, ki se avtonomno giblje v prostoru in izvaja aplikacijo sesanja predvsem prašnih delcev in manjših smeti. Sestavljen je iz mehanske konstrukcije, robotskega krmilnika ter kontaktnih senzorjev, ki zaznavajo stene in ovire. Omogoča avtonomno gibanje v prostoru po vnaprej določenem algoritmu, programiranje delovnih ciklov in samodejno električno polnjenje enote.



Slika 14: Robotski sesalnik

## Robotska kosilnica



Slika 15: Robotska kosilnica

Robotska kosilnica je glede na način delovanja zelo podobna robotskemu sesalniku. Avtonomno se giblje po zelenici in kosi zelenico. Običajno moramo okoli zelenice napeljati posebno žico, ki jo kosilnica zazna s senzorji in tako določi svoje delovno območje.

## Avtonomni električni avto

Sodobni avtomobili se razvijajo v smer avtonomnega delovanja in vožnje. Tehnologija trenutno že omogoča avtonomno vožnjo vozil, ovire postavlja predvsem zakonodaja. Avtonomni avto je torej izvedenka avtonomnega mobilnega robota. Mehanska konstrukcija je karoserija avtomobila in podvozje, pogonski motor je lahko dizelski, bencinski ali električni. Bistvena razlika v primerjavi s klasičnim avtomobilom je senzorika, ki zaznava okolje, ovire, vozni pas in ostale parametre avtonomne vožnje.



Slika 16: Sodobni električni avto

Robotski sesalnik



Robotska kosilnica



Avtonomna vožnja



## Robot za dezinfekcijo prostorov

Roboti so pomembni tudi v današnjem času, ki ga pestijo različne bolezni in virusna obolenja. Zlasti zaradi kužnosti je pomembno temeljito razkuževanje prostorov, predvsem v zdravstvenih ustanovah. V ta namen so bili razviti mobilni roboti za dezinfekcijo prostorov.

V osnovi je to mobilni robot, opremljen s električnim pogonom in tipali – senzorji, ki zaznavajo ovire med premikanjem robota. Robota vodi krmilnik z vnaprej določenim algoritmom premikanja. Bistven sklop mobilnega robota je UV-C žarnica. Za UV-C svetlobo je značilno, da uniči bakterije in viruse. Človek med obratovanjem dezinfekcije ne sme biti v istem prostoru.



Slika 17: Robot za dezinfekcijo prostorov

## Mobilni robot za dostavo zdravil

V zdravstvenih ustanovah se uveljavljajo mobilni roboti za dostavo zdravil bolnikom. Robot se avtonomno vozi po bolnišničnih kapacitetah in po vnaprej določenem algoritmu dostavi zdravila v sobe posameznih bolnikov.



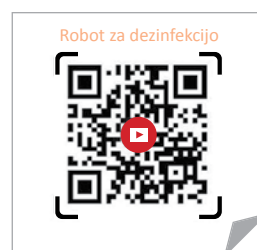
Slika 18: Robot za dostavo zdravil HOSPI-R

## Robot varnostnik

Roboti varnostniki so pomožne naprave, ki lahko nadomestijo pomanjkanje varnostnega osebja, zaznajo težave in obvestijo varnostni center. V času, ko avtomatizirani sistemi nadomeščajo ljudi na vse več področjih, je zelo verjetno, da bodo postopoma prevzeli vidnejšo vlogo. Naprava je v resnici mobilna kamera. Mobilni robot varnostnik se vozi npr. po trgovskem centru in sliko prenaša v varnostni center, kjer jo spremlja varnostnik. Zazna lahko tudi neobičajne zvoke, orožje in drugo.



Slika 19: Robot varnostnik



## Robotski pes

Robotski pes spada v področje zabavne elektronike. Predvsem Japonci so napravo zelo razvili, saj nekaterim nadomešča žive hišne ljubljence. Japonci živijo v velikih mestih in manjših stanovanjih, kjer je imeti živali težko. Zato so se lotili razvoja robotskega psa. Naprava ima zelo veliko funkcij. Zaznava namreč mimiko lastnika in se odzove nanj ter na njegov glas. Lastnika zmore animirati in zabavati s posebnimi triki, poleg tega pa ima funkcijo nočnega varovanja stanovanja.



Slika 20: Robotski pes Aibo

## Medicinski kirurški robot

Medicinski robot za izvajanje operacij je voden prek posebnega vmesnika, ki ga upravlja kirurg. Kirurg s haptično napravo vodi posamezno os in robotska orodja. Kamera mu omogoča primerno povečavo. Prednost omenjenega sistema je hitrejše okrevanje bolnika, ker operacijo izvajajo s posebnimi cevki, v katera so vstavljena robotska orodja. Zaradi tega je veliko manj rezov in ran.

## Medicinski robot Da Vinci



Slika 21: Medicinski robot Da Vinci

Robot, ki so ga poimenovali Da Vinci, je robot s štirimi robotskimi mehanizmi in kamero, s katero upravitelj robota spremlja dogajanje med operacijo. Sistem robota sestavljajo kirurška konzola, robotski krmilnik, enota za prenos slike, instrumenti. V kirurški konzoli operater vidi tridimenzionalno in desetkrat povečano sliko. Gibanje instrumentov je natančnejše, saj ima robot sistem, ki preprečuje tresenje rok. V Splošni bolnišnici Celje so v začetku maja 2010 kot prvi v Sloveniji uvedli operativne posege s kirurškim robotom Da Vinci. Medicinski robot združuje prednosti laparoskopskega in klasičnega načina operiranja ter omogoča minimalno invazivno kirurgijo na številnih

področjih. Trenutno se robotska kirurgija največ uporablja v urologiji in ginekologiji, poleg tega pa še v abdominalni, žilni, torakalni, kardiovaskularni in otorinolaringološki kirurgiji. Operater vse štiri roke vodi s kirurško haptično napravo. Poleg kirurga-operaterja pri operaciji sodelujeta še asistent in upravlja-vec instrumentov. Prednost robotskih operacij je v tem, da sta pri večjih operativnih posegih potrebna le dva kirurga in ne trije kot pri klasičnih in laparoskopskih. Bistveno hitrejše je tudi okrevanje, saj je operacijski poseg manj invaziven.



Slika 22: Medicinski robot Da Vinci

Medicinski robot Da Vinci



## Bionika

Zelo zanimiva in humana je tudi veja robotike, ki se ukvarja s področjem razvoja nadomestnih robotskih udov. Bionični udi se lahko namestijo v povezavi z dejanskim človekovim živčevjem ali pa so vodeni prek dražljajev na uporabnikovi koži. Bionični nastavki niso proteze, ampak aktivni invalidski pripomoček. Imajo svoje napajanje, mehansko konstrukcijo, elektromotorski pogon ter ustrezno krmiljenje in senzoriko.



Slika 23: Bionična noga

Delovanje je mogoče na več načinov. Pri prvi možnosti sta na zdravi nogi v stopalu poseben senzor in oddajnik, ki na robotsko nogo oddaja informacije, potrebne za njeno premikanje. Robotska noga se premika v obratnem režimu kot zdrava noga, omogoča pa tudi aktivno hojo po stopnicah. Druga možnost je dejanska povezava živcev in bionične noge. V tem primeru se mora uporabnik naučiti uporabljati električne signale živčevja za vodenje robotske bionične noge. Podoben koncept je pri bionični roki.



Slika 24: Pripomoček za hojo

Na Sliki 24 je pripomoček za hojo, namenjen medicinski uporabi. Deluje kot robot, ki pomaga premikati spodnje okončine. Robotski sistem pomaga bolnikom z mišično distrofijo in ALS. Deluje tako, da senzori, pritrjeni na stegno in celoten spodnji del telesa, zaznajo različne signale iz živčnega sistema in posledično na podlagi meritev pomikajo določene naprave (skeleton).

Tudi v primeru, ko je motorična funkcija oslABLjena, lahko zagotovi olajšano gibanje bolnika. Posledica tega je, da se možgani lahko regenerirajo in se telo lahko začne spominjati, kako hoditi. Naprava med drugim lahko zagotovi vaje za mišični spomin in tako podpira okrevanje bolnika. Obstajajo tudi različni nastavki, imenovani skeletoni, ki lahko podpirajo samo del okončine, in tudi posebne robotske skeleton hlače, ki omogočajo prenašanje težjih bremen ali pa pomagajo vojakom hitreje premagovati razdalje.

## Robotizirani invalidski vozički

Zelo zanimiva aplikacija je tudi robotska roka na invalidskem vozičku. Invalidi jo uporabljajo pri določenih opravilih, ki jih brez pomoči ne bi bili sposobni opraviti. Pri invalidih tetraplegikih, ki so od vratu navzdol hromi, je ta aplikacija še posebej dobrodošla in uporabna. V tem primeru razvijajo sistem, s katerim oseba vodi robota s pomočjo možganskih valov. Na glavi ima poseben nastavek, ki meri možgansko valovanje, kombinacija vnaprej določenih misli pa pomeni določen gib robotske roke.



Slika 25: Robotizirani voziček

## Humanoidni roboti

Humanoidni robot je po svoji konstrukciji in videzu zelo podoben človeku. Sodobni humanoidni robot, kot je npr. Honda Asimo (Slika 26), se je sposoben gibati podobno kot človek, poleg tega pa lahko teče s hitrostjo 6 km/h. Razvoj robotov je usmerjen k pomoči človeku pri vsakdanjih opravilih. Robot lahko pred seboj pomika voziček s hrano, lahko nosi pladenj, skodelice in drugo, sposoben je postreči hrano in pijačo, razpozna govor in mimiko človeka. Konstrukcija robota je zelo zapletena, saj je zelo težavno zagotoviti usklajeno gibanje sklepov, posebej problematična je hoja po stopnicah. V ta namen je treba meriti naklon (senzor žiroskop) in pozicijo v prostoru (strojni vid – kamere). Med drugim lahko robot stisne roko v pozdrav – ugotovimo lahko, da ima zelo natančno mehaniko roke ter senzorne sile stiska posameznih členkov na svoji dlani.



Slika 26: Honda Asimo



Slika 27: BD Atlas

Celoten sistem nadzoruje tehnološko dovršen krmilni računalnik. Humanoidni roboti se bodo v prihodnosti uporabljali kot hišni pomočniki doma, v bolnišnicah in domovih za ostarele.

Robot, namenjen drugačnim nalogam, je Boston Dynamics Atlas (Slika 27). Gre za zelo dovršenega robota, ki se lahko premika po zahtevnem terenu in prenaša večje mase. Pogon je v tem primeru hidravlični. Namenjen je predvsem vojaškim dejavnostim, raziskovanju in prenašanju težjih bremen.

## Izobraževalni roboti

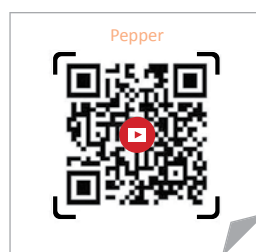
Izobraževalni roboti so namenjeni predstavitvam, informiranju in podajanju znanja slušateljem. Zasnovani so kot mobilni roboti s humanoidnim videzom in nameščenim zaslonom, prek katerega lahko podajajo informacije zunanjemu svetu. Omogočajo interakcijo z okolico in se odzivajo na govorne ukaze in vprašanja. Primer izobraževalnega robota Pepper je na Sliki 28. Druga izbira so izobraževalni roboti, kot je npr. robot Nao na Sliki 29. Uporabljajo se za učenje programiranja in spoznavanja robotskih sistemov.



Slika 28: Softbank Pepper

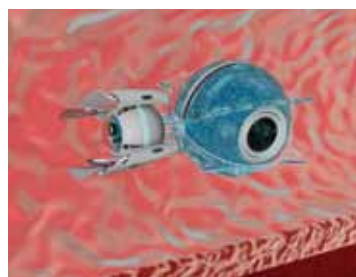


Slika 29: Softbank Nao



## Nanoroboti

Področje medicinskih nanorobotov je še v razvoju. Osnovna znanstvena ideja pri tem je, da bi nanorobote poslali v krvni obtok in po možnosti popravili določeno celico, odmašili žilo in opravili druge možne medicinske aplikacije. Nanorobot je sestavljen iz nanomehanskih sklopov, pogona, senzorike in napajalne enote. V tem trenutku predstavlja znanstvenikom največjo težavo zagotavljanje napajanja in način upravljanja nanorobotov.



Slika 30: Nanorobot

## Žužkoboti

Roboti, ki posnemajo vedenje in delovanje živali, so uporabni predvsem za raziskovanje na težje dostopnih mestih, kot so kanalizacija in ruševine. Poznamo žužkobot, robote kače, robote leteče muhe in druge.



Slika 31: Robot pajek



Slika 32: Robot kača

## Vesoljski robot

18. februarja je 2021 je mobilni vesoljski robot Perseverance pristal v kraterju Jezero na Marsu. Njegova naloga je iskanje sledi življenja ter zbiranje vzorcev kamnin in tal v primeru, da se bo lahko vrnil na zemljo. Robot ima tudi Mars Helicopter oziroma dron, ki je prirejen za letenje v Marsovi atmosferi ter omogoča slikanje in snemanje okolice ter meritve v ozračju.



Slika 33: Vesoljski robot Perseverance

APP Space Craft AR



3D Mars Rover



## Vojaški, policijski in reševalni roboti

Večina sodobne tehnologije izvira iz vojaškega okolja. Med drugim so v vojaški industriji razvili tudi posebne vojaške robote. Lahko se uporabljajo za deaktivacijo bomb in min, za reševanje, izvidniške naloge ali pa preprosto nadomestijo vojaka v boju. Vodení so s posebnim brezžičnim sistemom in kamero, s katero spremljamo dogajanje.



Slika 34: Vojaški robot



Slika 35: Policijski robot

## Molzni robot

V sodobnem času se avtomatizacija in robotika čedalje bolj aplicirata tudi na področju kmetijstva. Zanimiva robotska aplikacija je molzni robot, ki samostojno pomolze kravo. Krave zaporedoma vstopajo v posebno enoto, robot pa se jim približa in zazna mesto odvzema mleka. Avtomatsko namesti sesalni sistem in pomolze kravo. Sistem hkrati na podlagi črtne kode vpiše v bazo podatkov, katero kravo molze in zmeri količino pridobljenega mleka. Poznamo tudi sodobne traktorje, ki avtonomno orjejo njivo s pomočjo GPS-sistema. Kmet določi koordinate obdelovalne površine, traktor pa nato sam po vnaprej določenem algoritmu opravi svojo nalogo.



Slika 36: Molzni robot

## Ostale vrste robotov

Obstaja še veliko drugih vrst in izvedenk robotov. Robotika se čedalje bolj vključuje v naše vsakdanje življenje, v industrijskih proizvodnih sistemih pa je nepogrešljiva tehnologija. Na Sliki 37 je predstavljen robot Boston Dynamic Spot, ki se že uporablja za varovanje industrijskih kapacitet, 3D-mapiranje prostorov in drugo. V prihodnosti bo v povezavi z nevronskimi in genetskimi algoritmi ter umetno inteligenco tehnologija še napredovala. Zato je zelo pomembno, da se na področju tehnike in tehnologije vseživljenjsko izobražujemo.



Slika 37: BD Spot





Poglejte interaktivni video in odgovorite na vprašanja.



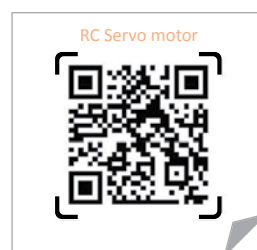
1. Raziščite in opišite zgradbo in delovanje industrijskega avtonomnega mobilnega vozička (AGV).
2. Raziščite delovanje vesoljskega robota Perseverence. Kako je konstruiran? Ima kakšne konstrukcijske posebnosti? Kakšen pogon, krmilni računalnik in kamere uporablja?



3. Ali je tudi dron mobilni robot?
4. Raziščite, ali obstaja robot za dostavo hrane.
5. Raziščite, kdaj so začeli razvijati humanoidnega robota Honda Asimo.
6. Opišite humanoidnega robota Nao.
7. Raziščite, kakšnega robota uporabljajo pri predstavitvah v Centru Noordung v Vitanju.
8. Raziščite robote podjetja Boston Dynamics. Kateri robot vam je najzanimivejši in zakaj?
9. Na spletu poiščite informacije in preverite, ali je v Sloveniji podjetje, ki sestavlja industrijske robote.
10. Kaj bi potrebovali za izdelavo samogradnega mobilnega robota?
11. Najdite podatke o robotu Mars rover Independent 2020.

### Izziv

Izdelajte enostavnega mobilnega robota za sledenje črti. Navodila za izdelavo SLEDIbota:





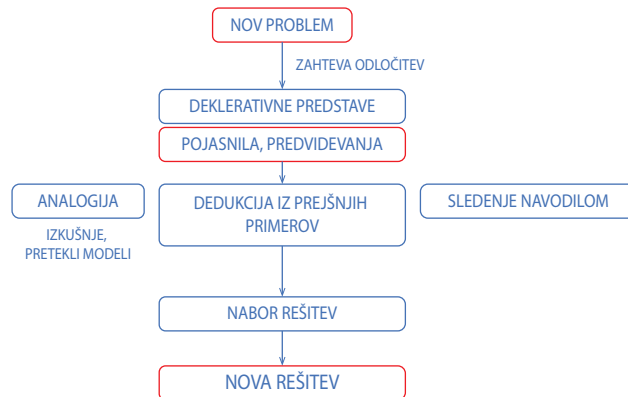
*Nujno je treba v nekaj verjeti – v svoj pogum, v življenje, v usodo,  
v kar koli. Ta pogled me nikoli ni pustil na cedilu!*

*Steve Jobs*

```
1 DEF industrijski_robot ()
2 INI
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : baza
4 loop
5 industrijski_robot ()
6 if (avtomatsko voden&&več_kot_tri_oosi = TRUE) then
7     manipulator==industrijski_robot
8 exit
9 else
10 manipulator ()
11 endif
12 endloop
13 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Uporabnik [2] : industrijski_robot
14 END
```

# UVOD V ROBOTIKO ZA BISTRE GLAVE

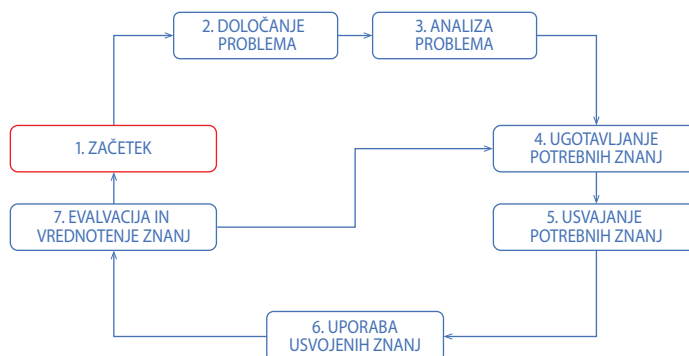
Da bi spoznali osnove znanj STEM, priporočamo uporabo setov Lego Mindstorms EV3. Omogočajo spoznavanje osnovnih znanj inženirstva, tehnologije in računalništva. Spoznamo lahko osnove konstrukcije in mehanike gonil, krmilno-regulacijskih sistemov, senzorskih sistemov in programiranja. Običajno slušatelji aktivno delujejo v timu, zato se razvije sodelovalno in timsko delo. Ker pa podamo tudi izhodiščni problem, govorimo tudi o problemsko usmerjenem iskanju rešitev.



Slika 38: Problemsko zasnovan učni proces

Na Sliki 38 vidimo problemsko zasnovan učni proces. Izhodišče je konkretni oziroma obstoječi problem. Problem slušatelje usmerja na pot do znanja, tako da sami spoznajo, kakšno znanje je potrebno za rešitev problematike. Ta se kaže v vsem, kar otežuje spoznavanje, razumevanje in reševanje objektivnega ali subjektivnega pojava ali procesa.

Problemska situacija je primarna podlaga problemsko usmerjenega pouka. Učitelj je v takšnem ekosistemu del tima oziroma podporni člen, ki usmerja, mentorira in zanj skrbi. Slušatelj je odgovoren za svoje znanje in nosi odgovornost za svoj del nalog v timu.



Slika 39: Cikel problemskega učenja

Robota konstruiramo za reševanje zadanih problematik. Na Sliki 39 je viden cikel problemskega učenja. Ko določimo problematiko, ji sledi analiza in konstruktivna razprava. Pomembno je ugotavljanje potrebnih korakov in znanj, ki jih potrebujemo za reševanje problematike. Predlog je, da se v

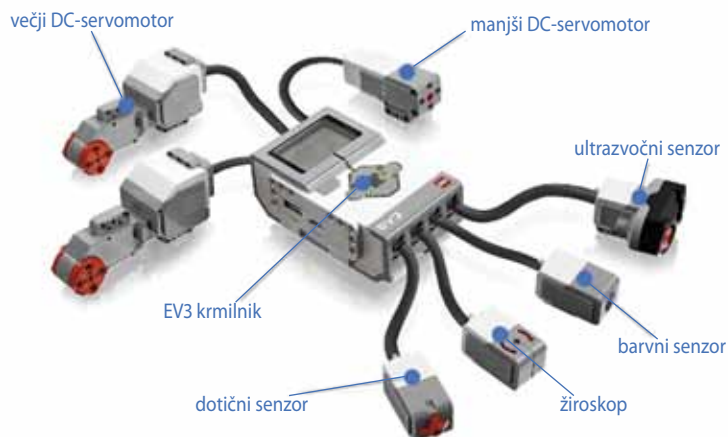
projektne timu natančno opredeli vloge v timu in znanja, ki jih mora posameznik doseči za skupni cilj, rešitev problematike. Sledi implementacija usvojenih znanj. Izvedbeno rešitev evalviramo in nova znanja ovrednotimo. Problematika je lahko zaključena ali pa se taksonomska stopnja problem-skosti dvigne na višjo stopnjo in so usvojena znanja podlaga za nadaljnje pridobivanje znanj.

Na Sliki 40 je predstavljen razvojni koncept robotskega sistema. Na začetku je podan problem. Npr. mobilni robot se mora peljati po črti. Slušatelji poiščejo konstrukcijske rešitve, analizirajo potrebno sensoriko in motorske pogone. Sledi programiranje, testiranje in izvajanje programa.



Slika 40: Razvojni koncept robotskega sistema

Na Sliki 41 vidimo komponente razvojnega sistema EV3. Osrednja enota je krmilnik EV3 (kocka, angl. *brick*), ki ima na voljo štiri (1, 2, 3, 4) vhodne enote, kamor lahko priključimo različne dajalnike stanja (senzorje), kot so dotični senzor, žiroskop, barvni senzor ter ultrazvočni in zvočni senzor. Na voljo so tudi štirje izhodi (A, B, C, D), kamor priključimo aktuatorje oziroma DC-servomotorje. Krmilnik EV3 lahko programiramo prek osebnega računalnika, tabličnega računalnika ali pametnega telefona. Omogoča povezavo prek USB, Bluetooth ali WiFi komunikacijskih protokolov. Najprej je treba prenesti in namestiti programsko opremo Lego Mindstorms EV3, ki se uporablja za programiranje. Osnovno programiranje poteka blokovno. Opcijsko se krmilnik EV3 lahko programira tudi z RobotC, Python in ostalimi programskimi jeziki.



Slika 41: Komponente EV3 razvojnega sistema

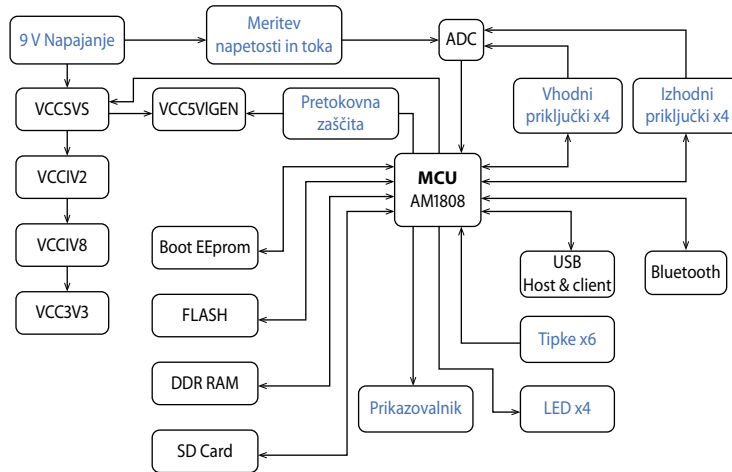
Primer Lego robota



Programsko orodje EV3



Na Sliki 42 vidimo blokovno shemo krmilnika EV3. Napajanje krmilnega sistema je 9-voltno. Izvedeno je lahko s šestimi 1,5 V baterijskimi vložki ali pa 9 V polnilno celico, ki omogoča ponovno polnjenje. Osnova delovanja krmilnika EV3 je mikroprocesor AM1808 ARM, ki upravlja delovanje celotnega sistema. Na krmilniku so tudi tipke za upravljanje in izbor nastavitev in programov. Omogoča tudi povečanje pomnilnika z zunanjo SD-pomnilniško kartico.



Slika 42: Blokovna shema krmilnika EV3

Na Sliki 43 je servomotor EV3, ki vsebuje optični enkoder za meritev kotnega pomika gredi električnega motorja in zobniški prenos oziroma gonilo. Motor EV3 DC je na krmilnik EV3 povezan s posebnim kablom in izvedenko priključka RJ45. Omenjenemu DC-servomotorju lahko nastavljamo smer vrtenja, moč/hitrost vrtenja, št. rotacij, kot osnega pomika in drugo.



Slika 43: Servomotor DC

Na Sliki 44 je senzor na dotik, ki deluje kot stikalo in ga uporabljamo za zaznavanje dotikov.

Na Sliki 45 je barvni senzor, ki je namenjen meritvi odbite valovne dolžine svetlobe. Sestavljen je iz svetlobnega oddajnika (dioda IR LED) in sprejemnika (merilni pretvornik, fototranzistor). Merimo lahko osnovne barve in informacijo uporabimo pri programiranju aplikacij.



Slika 44: Dotični senzor



Slika 45: Barvni senzor

Na Sliki 46 je ultrazvočni senzor, ki omogoča merjenje razdalje do določenega predmeta v prostoru. Sestavljen je iz oddajnika zvoka z valovno dolžino v ultrazvočnem pasu in zvočnega sprejemnika (mikrofon). Koncept meritve temelji na znani hitrosti zvoka in meritvi časa odboja ter posredno izračunano razdaljo. Identičen koncept se uporablja pri parkirnih senzorjih osebnih avtomobilov.



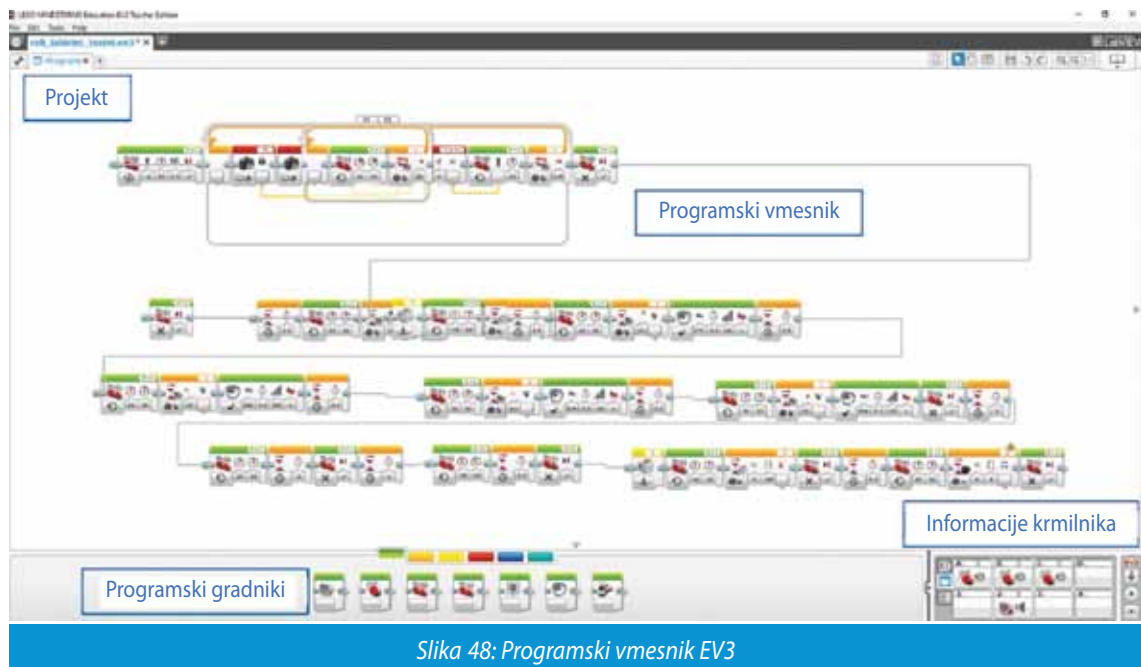
Slika 46: Ultrazvočni senzor

Na Sliki 47 je žiroskop, ki se uporablja za merjenje kotnega pomika in kotne hitrosti robota ali določenega segmenta robota.



Slika 47: Žiroskop

Na Sliki 48 je programski vmesnik EV3. Programiranje poteka blokovno. Izbiramo primerne programske gradnike in jih povezujemo v logično programsko celoto glede na zadano problematiko.



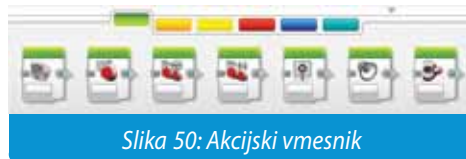
Slika 48: Programski vmesnik EV3

Na Sliki 49 vidimo informacijski vmesnik krmilnika EV3. Podani so osnovni podatki krmilnika, podatek o napetosti baterije, izbrani komunikaciji s programabilno napravo ter informacije o senzorjih in aktuatorjih.



Slika 49: Informacije krmilnika EV3

Na Sliki 50 je akcijski vmesnik, pri katerem lahko izberemo različne možnosti motorских pogonov ter interakcije prek zaslona in zvočnika na krmilni enoti EV3.



Slika 50: Akcijski vmesnik

Na Sliki 51 je vmesnik z različnimi programskimi zankami. Na voljo je časovnik *Wait*, zanka *Loop*, zanka za izbiro *Switch* ter zanka za prekinitve *Switch Interrupt*.



Slika 51: Vmesnik za programske zanke

Na Sliki 52 je senzorski vmesnik, kjer je mogoče uporabiti različna tipala in merilne pretvornike, kot so dotični senzor, barvni senzor, žiroskopski senzor, infrardeči senzor, temperaturni senzor, ultrazvočni senzor ter zvočni senzor.



Slika 52: Senzorski vmesnik

Na Sliki 53 je vmesnik za matematične funkcije, kot so spremenljivke, konstante, polja, logične funkcije in ostale matematične relacije.



Slika 53: Matematične funkcije

Na voljo je tudi vmesnik za napredne funkcije, ki omogočajo dostop do datotek, upravljanje s podatki, pošiljanje sporočil, primerjalnik in izpis. besedila.



Slika 54: Napredne funkcije

Na Sliki 55 vidimo funkcijo za izbiro pogonskega aktuatorja (Large motor), ki mu lahko nastavimo vklop, izklop, čas vrtenja ali kotne stopinje vrtenja ali pa število rotacij gredi DC-servomotorja. Nastavimo lahko tudi izhodno moč (0–100-odstotno), ki vpliva tudi na hitrost rotacije pogonskega električnega motorja. Ker imamo na krmilniku EV3 na izbiro štiri vhodne priključke, moramo programsko izbrati tudi pravilne priključke pogonskih motorjev (A, B, C, D; poglej krmilnik EV3), ki se morajo ujemati z dejansko fizično priključenimi pogonskimi motorji.



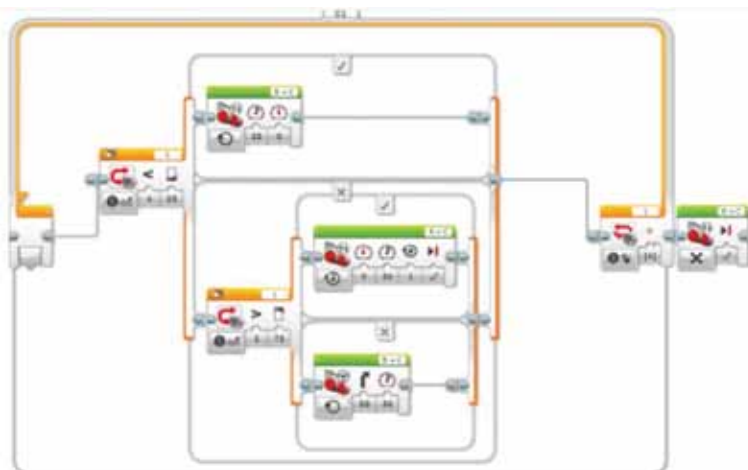
Slika 55: Funkcija Large motor

Na Sliki 56 je primer pogonske funkcije Tank. Uporablja se za gosenične pogone. Nastavljamo podobne funkcije kot pri samostojnem pogonskem motorju, le da sta v tem primeru dva motorja združena v eni funkciji in lahko z različnima smerema in močmi vplivamo na smer vodenja mobilnega robota.



Slika 56: Funkcija Tank

Na Sliki 57 je primer zanke *Loop* in preklopne funkcije *Switch*. Zanka *Loop* se uporablja za ponavljanje akcij neskončno ali omejeno s številom ponovitev ali pa s funkcijo sensorja. Preklopna funkcija *Switch* je sicer v drugih programskih jeziki pogojni stavek *IF-ELSE* (če je nek pogoj izpolnjen, se zgodi določena procedura, če pogoj ni izpolnjen, se izvede drugačna procedura).



Slika 57: Zanka Loop in Switch

Na Sliki 58 je senzor na dotik, ki deluje kot dotično stikalo. Ob dotiku je omogočen kontakt, ki je vhodni pogoj v krmilnik EV3. Glede na napisani program se pogojno izvede določena akcija. Dotični senzor lahko uporabimo kot stikalo in začetni pogoj za zagon programske procedure. Druga možnost je uporaba za zaznavanje ovir. V tem primeru je nameščen pred mobilnim robotom in ob dotiku poda informacijo na krmilnik EV3.



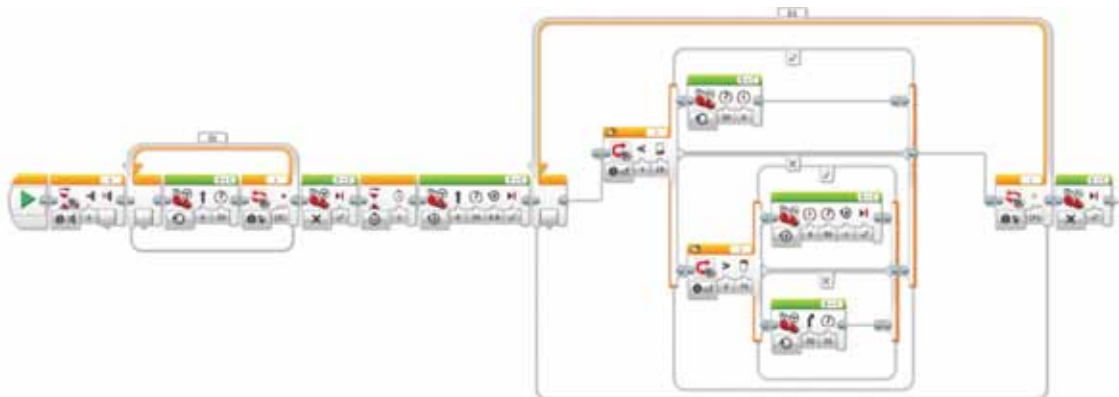
Slika 58: Dotični senzor

Na Sliki 59 je predstavljena funkcija »barvni senzor«. Nastavimo lahko barvo, ki jo zaznavamo, primerjamo odboje barvnih spektrov in izvedemo kalibracijo barvnega sensorja. Kalibracijo treba izvesti, ker se okoliška svetloba spreminja, v različnih prostorih je različna temperatura svetlobe, vplivajo lahko sončni žarki in podobno.



Slika 59: Barvni (optični) senzor

Na Sliki 60 je prikazan program za sledenje črni črti. Na začetku je začetni pogoj, za katerega je treba za nadaljevanje/zagon programa pritisniti tipko oziroma dotični senzor. Robot se začne premikati v levo, dokler barvni senzor ne zazna spremembo barve (prehod iz bele v črno barvo). Motor se v tistem trenutku ustavi, počaka eno sekundo.



Slika 60: Primer programa za sledenje črni črti

Uvod v robotiko EV3



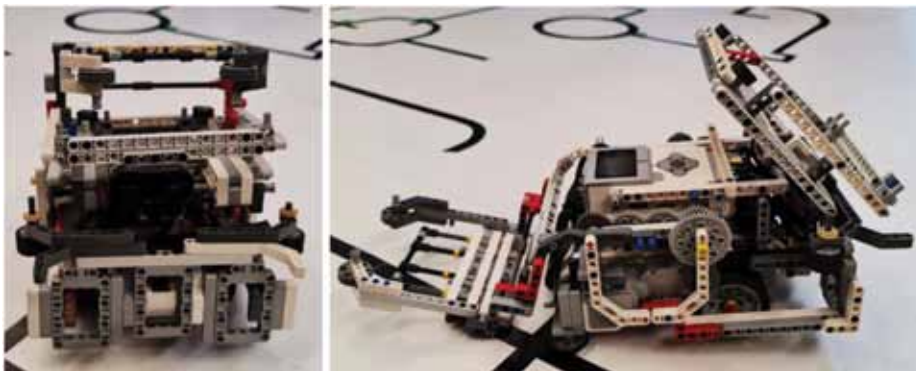
APP EV3 Builder



Navodila EV3



V tem trenutku je izpolnjen pogoj za ponavljajočo zanko, pri kateri se ponavljajoče izvaja preklapljanje smeri dveh pogonskih motorjev; pogoj je prehod iz bele v črno in iz črne v belo barvo. Ko senzor zazna vnaprej določeno barvo (npr. sivo), se zanka zaključi in robot se ustavi.

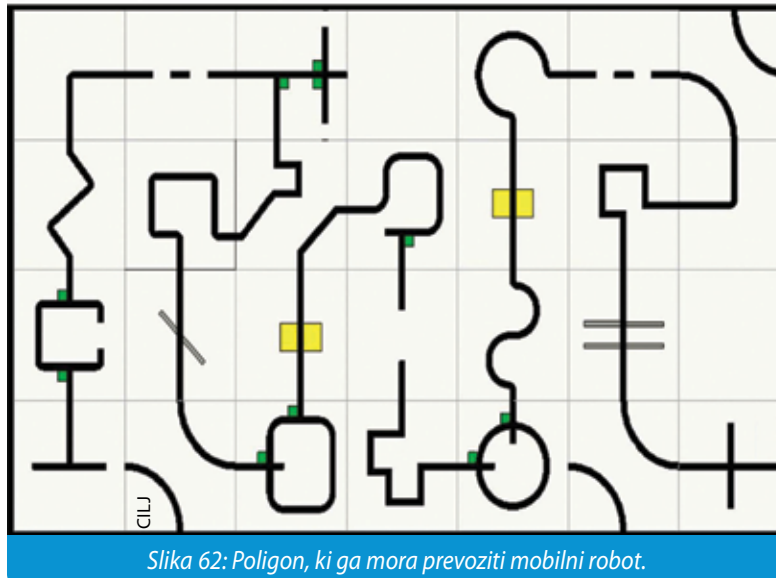


*Slika 61: Primer konstruiranega mobilnega robota EV3 z nakladalno in odlagalno rampo*

## Naloga

Konstruirajte mobilni robot s sistemom Mindstorm EV3. Robot se mora premikati po črni črti. Peljati se mora čez ovire na podlagi (sive ovire), na črni črti sta tudi dve stoječi oviri (rumena ovira), katerim se mora robot izogniti in zapeljati naprej po črni črti in labirintu. Na segmentih, kjer je črna črta prekinjena, mora robot najti pravilno pot – črno črto in peljati naprej. Na križiščih mora mobilni robot zaviti v smeri zelene oznake.

- Izberite pogon za vožnjo (gosenice ali kolesa in utemeljite svojo izbiro. Ali je pomemben obseg koles in zakaj? Ali je pomembna dolžina in širina mobilnega robota? Zakaj?
- Konstruirajte mobilnega robota.
- Izberite senzorje. Kateri senzor bi uporabili za zaznavanje črne/bele barve in kateri senzor za zaznavanje zelene barve? Kateri senzor bi izbrali za zaznavanje ovire pred robotom? Pazite na omejeno število vhodnih in izhodnih priključkov na krmilniku robota.
- Problematiko rešujte po korakih. V prvem koraku naj mobilni robot vozi po črti. V drugem koraku naj prevozi oviro na podlagi. V tretjem koraku naj najde črno prekinjeno črto. V četrtem koraku se izognite visoki oviri. Pazite na slepe črte. V petem koraku poskusite zaznati zeleno barvo in programirajte robota za zavoj v zeleni smeri.



Slika 62: Poligon, ki ga mora prevoziti mobilni robot.







*Non scholae sed vitae discimus – Ne učimo se za šolo, ampak za življenje.*

*Rimski pregovor*

```
1 DEF industrijski_robot ()
2 INI
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : baza
4 loop
5 industrijski_robot ()
6 if (avtomatsko voden&&več_kot_tri_oosi = TRUE) then
7     manipulator==industrijski_robot
8 exit
9 else
10 manipulator ()
11 endif
12 endloop
13 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Uporabnik [2] : industrijski_robot
14 END
```

# INDUSTRIJSKI ROBOTI

Industrijski robot je po ISO 8373 definiran kot avtomatsko voden, reprogramabilen, široko namenško uporaben manipulator, ki ima vsaj tri ali več programabilnih osi ter je uporabljen v aplikacijah industrijske avtomatizacije. Lahko je fiksno pritrjen ali pa je mobilni.

Glavne lastnosti robota so fleksibilnost, reprogramabilnost in adaptivnost. To pomeni, da lahko namembnost in uporabo relativno enostavno spremenimo, kar pa je tudi glavna prednost robota v primerjavi z ostalimi industrijskimi stroji. Med razvojem industrijskih sistemov v smeri *Industrije 4.0* in posledično digitalizacije so se morala podjetja hitro prilagoditi na spremembe na trgu. Pomembna je fleksibilna proizvodnja, v kateri je mogoče relativno hitro spremeniti namembnost produkcijskih sistemov, avtomatizacija sama pa tega ne omogoča. To lahko zagotovimo s prilagodljivimi stroji in napravami, kot so industrijski roboti, pametni obdelovalni stroji, mobilni roboti in prilagodljiva logistika, kot jo ima npr. podjetje Audi v Ingolstadt. Na proizvodni liniji za izdelavo blatnikov avtomobilov imajo stiskalnice, ki iz pločevine v različnih korakih oblikujejo posamezne dele avtomobilskega blatnika. Med posameznimi stiskalnicami so industrijski roboti, ki manipulirajo s polizdelki in jih iz prvega stroja prestavijo v naslednji stroj. Na koncu proizvodne linije je končni izdelek blatnik avtomobila, ki ga s sistemom večal transportirajo v oddelek za barvanje. Bistveno pri tej fleksibilni proizvodnji je, da lahko po dveh urah izdelovanja ustavijo proizvodnjo, v desetih minutah zamenjajo orodja v stiskalnicah, spremenijo programe na strojih in robotih ter naslednji dve uri izdelujejo blatnik za drug model avtomobila.

Robota ne smemo zamenjati z avtomatom, ki je neadaptiven in prirejen za že vnaprej določena dela. Avtomat je težko hitro in poceni prirediti za drugo aplikacijo. Medtem ko robotu določimo mesto in obliko njegovega orodja, lahko predvidimo tudi npr. povečanje proizvodnje, začetek izdelave novega izdelka, zamenjavo oblike izdelka in drugo.

## Trenutni trendi na področju industrijske robotike

Robotika se čedalje bolj uveljavlja v vsakdanjem življenju. Tako roboti trenutno ne nadomeščajo več samo delavcev v industriji na delovnih mestih, za katera so značilna zahtevna ali ponavljajoča se monotona dela, visoke temperature, UV-svetloba in podobno. Na splošno velja mnenje, da zaradi robotizacije dela zaposleni izgubi delovno mesto. Konkretno delovno mesto morda res ni več aktualno, vendar se ob industrijskem robotu ustvarijo tudi nova delovna mesta. Nekdo mora načrtovati in projektirati robotsko celico, izdelati posamezne mehanske sklope, strokovnjak mora izvesti montažo in zagon. Kasneje mora nekdo robota uporabljati, izbirati različne programe delovanja, servisirati in drugo. Treba je poudariti, da ob tem nastanejo delovna mesta z dodano vrednostjo in potrebami po konkretnih znanjih na področju tehnike in tehnologije. Kot primer lahko navedemo podjetje Audi, enega izmed večjih nemških proizvajalcev avtomobilov, ki ima v obratu Ingolstadt zaposlenih približno 30.000 ljudi. Od tega je 20.000 zaposlenih v proizvodnji, kjer ročno sestavljajo

ISO 8373 standard



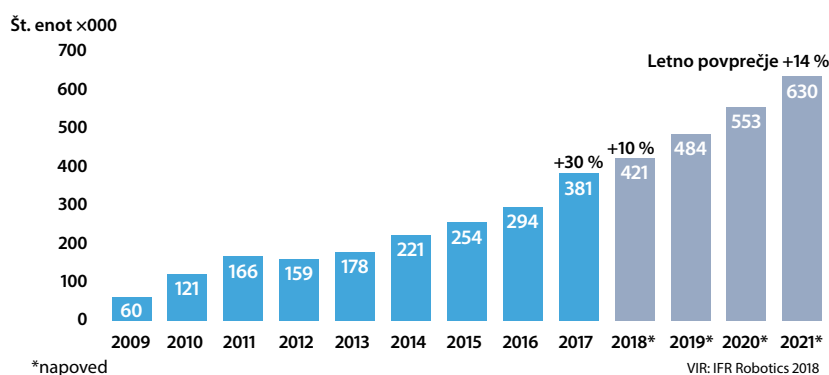
ISO 10218-1 standard



določene dele osebnih avtomobilov, imajo pa še približno 2.000 postavljenih robotov, predvsem za varjenje avtomobilskih karoserij. Velik del zaposlenih dela v oddelku za razvoj (približno 10.000), kjer je potrebno znanje in inovativnost. Vseh delovnih akcij torej ne morejo izvesti roboti, se pa čedalje bolj razvijajo in uveljavljajo v različnih variantah proizvodnega procesa.

Roboti so vse pogostejši v našem vsakdanjem življenju. Veliko gospodinjstev že uporablja robota za sesanje prostora, robotsko kosilnico za košnjo zelenice in podobno. Osnovni razlogi za avtomatizacijo so zniževanje stroškov, razbremenitev človeka ter zagotavljanje zmogljivosti in kakovosti proizvodnje. Avtomatizacija vpliva na skrajšan čas izdelave, večjo zmogljivost in zniževanje proizvodnih stroškov. Med pomembnimi razlogi za uvajanje robotizacije je, kot je bilo rečeno, tako delo, ki je zdravju škodljivo in monotono. Pri aplikacijah, kjer so delovne akcije ponavljajoče, je treba zagotoviti natančno ponovljivost, ki jo lahko izvedemo le z uvedbo robotskih sistemov. Med razlogi je tudi dejstvo, da nekaterih nalog z ročnim delom in človeškimi zmožnostmi ni mogoče več učinkovito izvesti. Človek namreč na ročno vodenem obdelovalnem stroju ni zmožen zagotoviti gibanja orodja po zapletenih prostorskih krivuljah časa, točnosti in natančnosti obdelave, ki jih omogočajo sodobni večosni obdelovalni stroji. Podobno je pri uporabi robotov za varjenje, barvanje in drugo, pri čemer je poleg kakovosti pomembno predvsem zdravje človeka.

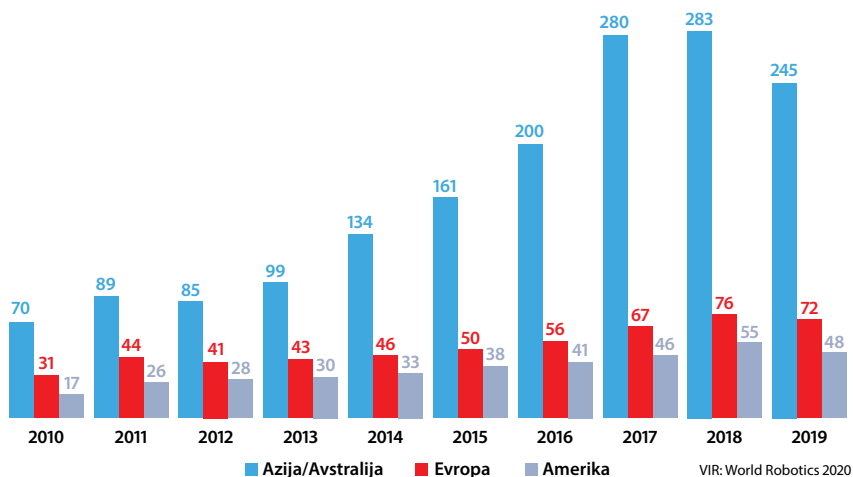
Na Sliki 63 je napoved števila instaliranih industrijskih robotov v svetovnem merilu. Vidimo lahko, da je v letu 2017 bila zaznana 30-odstotna rast, medtem ko je v letu 2021 bila rast približno 10-odstotna. Ocenjuje se, da uporaba industrijskih robotov raste za približno 14 odstotkov letno.



Slika 63: Napoved števila instaliranih industrijskih robotov

Na Sliki 64 je ponazorjeno število industrijskih robotov, nameščenih po različnih celinah. Ugotovimo lahko, da trenutno prevladujejo azijske države, sledita Evropa in Amerika. Kitajska je trenutno največje tržišče industrijskih robotov, kar je logična posledica razvoja, trenutne gospodarske rasti in globalne tehnološke prevlade, Japonska pa v letu 2019 beleži 10-odstotni padec industrijske robotike. Izhajamo lahko iz teze, da je država že visoko avtomatizirana, zato rast ni tako visoka. Ne gre zanemariti niti Južne Koreje, kjer beležijo 2-odstotno rast industrijske robotike po letu 2014. V ZDA po drugi strani beležijo velik padec industrijske robotike v letu 2019, saj je bilo instaliranih 26 odstotkov manj robotov, kar je posledica slabšega stanja v elektronski industriji v letih 2018 in 2019.

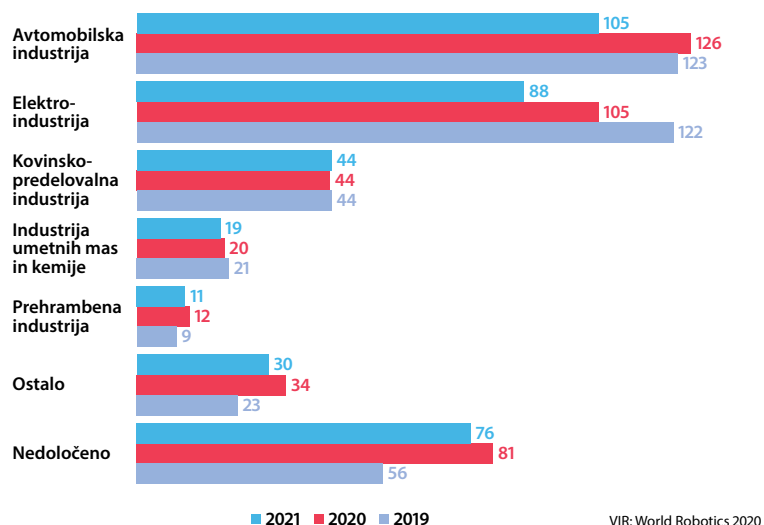
Letna postavitve industrijskih robotov ×000 enot



Slika 64: Število industrijskih robotov, instaliranih na različnih celinah.

Na Sliki 65 vidimo število industrijskih robotov v različnih industrijskih panogah. Prevladuje avtomobilska industrija, sledijo elektroindustrija, metalurška proizvodnja ter proizvodnja plastike, kemijska industrija in prehrabna industrija. Industrijski roboti so v veliki meri namenjeni stregi strojem, sledijo aplikacije varjenja z roboti ter montaža komponent ter nanosi različnih lepil in barv. Vse več aplikacij je tudi na področjih brušenja, poliranja in podobnih del.

Globalna letna postavitve industrijskih robotov glede na industrijsko panogo ×000 enot



Slika 65: Število industrijskih robotov v različnih industrijskih panogah

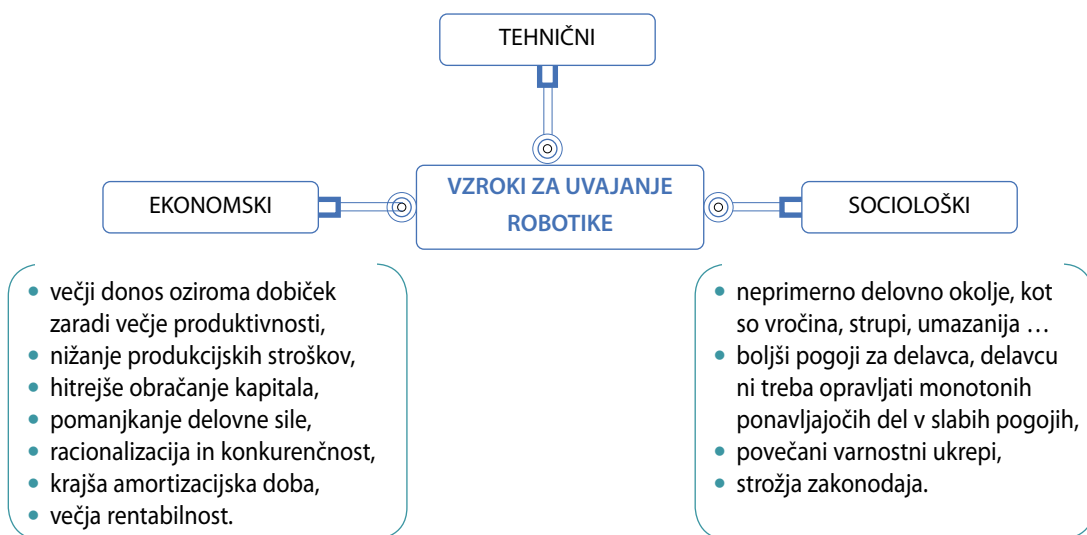


Bistvo uvedbe robotskih sistemov je manjša obremenitev in manj poklicnih poškodb delavcev zaradi monotonih ponavljajočih del, manipulacij težkih bremen, vplivov plinov, visokih temperatur in ostalih neprimernih delovnih pogojev ter posledično vplivanja na poklicne bolezni in psihofizično stanje posameznika. Zelo pomembna je tudi ponovljivost delovnih operacij, ki jo lahko zagotovimo z robotskimi sistemi v primerjavi s človeškim delom. Eden izmed bistvenih vidikov pa je seveda ekonomski vidik in zagotavljanje kakovosti. V tujini in večjih industrijskih državah, kjer je avtomobilska industrija paradna panoga, je v avtomatiziranih sistemih implementiranih zelo veliko robotov. Slovenija je po meritvah števila nameščenih robotov nadpovprečna; po trenutnih podatkih imamo montiranih 179 robotov na 10.000 zaposlenih [1].

## Razlogi za uvajanje robotiziranih sistemov v industriji

Glavni razlogi za uvajanje robotizacije so tehnološki, ekonomski in sociološki:

- večja zanesljivost delovanja,
- ponovljivost, enakomernost in hitrost delovnih aplikacij,
- prilagodljivost zahtevam tržišča (hitro spreminjanje izdelkov, fleksibilna proizvodnja),
- večja kvaliteta izdelka,
- večja natančnost izdelka,
- ergonomija (dolgotrajno delo, velika bremena),
- večja zadostitev tehničnih zahtev kot pri človeku.



## Osnovna zgradba industrijskega robota

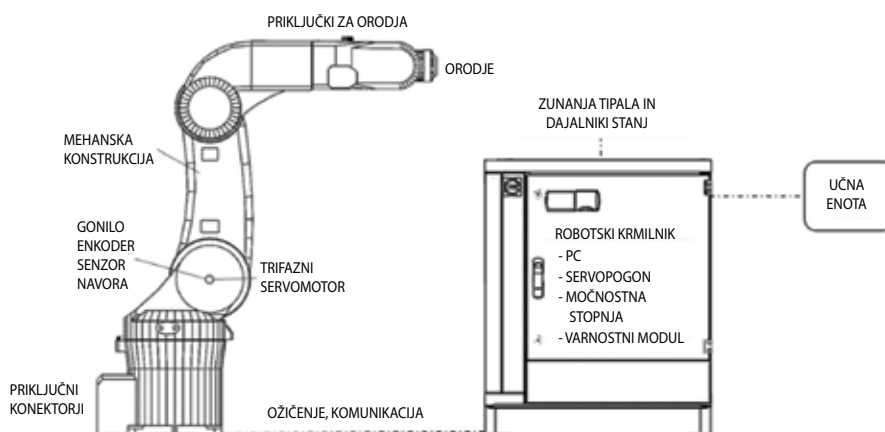
Robotski mehanizem je zelo podoben človeški roki. Sklepi predstavljajo zgiibe robota, mišice pogonske aktuatorje, možgani pa krmilnik robotskega sistema. Vrh robota se giblje glede na način zgradbe robota. Če uporabimo tri translatorska gibanja, se vrh giblje po pravilih kartezičnega koordinatnega sistema. Industrijski roboti pa so najpogosteje antropomorfne konstrukcije. Poznamo torej kartezično, antropomorfno, cilindrično, sferično, kombinirano in paralelno zgradbo robotskih mehanizmov.



Slika 66: Človeška roka in robotski mehanizem

Industrijski robot je tehnološko zasnovan iz treh glavnih segmentov:

- **mehanskega sklopa** (mehanska konstrukcija, električni servomotorji, gonila in zavore);
- **informacijskega dela** (osebni računalnik, servokrmilnik, močnostna stopnja in varnostni sklop);
- **senzorjev** (sistem regulacije poti, hitrosti in navora v robotskem segmentu: enkoder, senzor navora; v okolici robota: senzori prisotnosti delavca, senzori sile, prisotnosti obdelovancev, senzori pospeškov, hitrosti, pomika, strojni vid in drugo).



Slika 67: Osnovni koncept sistema industrijskega robota

Zgradba industrijskega robota



Vsak robot vsebuje mehanski in krmilni sklop. Če primerjamo človeško roko z robotskim mehanizmom, lahko takoj povežemo določene vzporednice. Mehanski sklopi robotskega mehanizma so zelo podobni okostju človeške roke. Prav tako jih moramo premakniti, da lahko opravijo delo. To v primeru človeške roke opravijo mišice, ki se zaradi električnih signalov iz možganov krčijo in raztezajo. Pri robotskem sistemu mehanske sklope pomikamo s pomočjo različnih električnih, pnevmatskih ali hidravličnih aktuatorjev. Običajno so aktuatorji električni servomotorji različnih izvedb. Za interakcijo z okoljem ima človek veliko senzorjev oziroma tipal, kot so oči, ušesa, nos in koža. Sklepamo lahko, da stroj oziroma robotski mehanizem za svoje delovanje in interakcijo z okoljem prav tako potrebuje tipala. Običajno so vedno aktivirani zunanji senzori oziroma tipala, ki so pri robotskem sistemu nujni

za izvrševanje določene delovne naloge. Krmilni računalnik kot programski vmesnik uporablja operacijski sistem Windows. Omogoča pripravo, korekturo, arhiviranje in upravljanje s programi. Posredno omogoča regulacijo pogonskih krogov, nadzoruje varnostni sistem in komunicira z zunanjim okoljem (zunanja krmilja, omrežje, zunanji računalniki). Krmilni računalnik je sestavljen iz upravljaljskega vmesnika, procesorja in glavnega pomnilnika, trdega diska, vodila in akumulatorja. Komunikacija z okolico je mogoča z različnimi komunikacijskimi protokoli, kot so Ethernet, ProfiNet, Ethercat in drugi, odvisno od zahtev implementirane aplikacije.

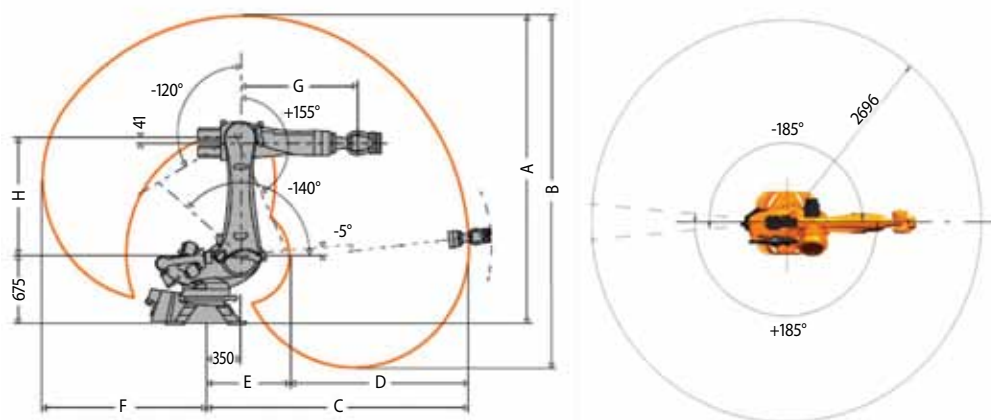


Slika 68: Notranja konstrukcija industrijskega robota

## Delovni prostor industrijskega robota

Delovni prostor so vse točke v prostoru, ki jih industrijski robot lahko doseže z vrhnjim delom orodja. V industrijski praksi je delovni prostor robotskega mehanizma območje, ki je povezano z dosegljivostjo neke točke mehanizma (Bajd, 2002; Scavicco in Siciliano, 1996). Če zadevo pogledamo širše, je delovni prostor območje delovanja robotskega mehanizma, v katerem opravi neko delo, npr. prenaša breme, vari ali pa doseže neko hitrost. Delovni prostor je odvisen od zgradbe mehanizma in števila prostostnih stopenj, dolžin segmentov in omejitev gibov v posameznih koordinatah. V robotskih sistemih običajno obravnavamo dosegljivi delovni prostor, ki je odvisen od pozicij mehanizma, in priročni delovni prostor, ki je odvisen tudi od orientacij mehanizma (Kumar in Waldron, 1981). Dosegljivi delovni prostor zajema vse pozicije, ki jih lahko doseže TCP (angl. *Tool Center Point*) robotskega mehanizma, ne glede na orientacijo vrhnje točke (Kumar in Waldron, 1981). Je prostor, v katerem mehanizem lahko doseže neko točko v koordinatnem sistemu. Vendar to še ni pogoj, da mehanizem lahko v tej točki opravi neko delo. Pomemben je priročni delovni prostor, ki se nahaja znotraj območja dosegljivega delovnega prostora mehanizma. To je območje, ki zajema vse pozicije, ki jih lahko doseže izbrana točka na mehanizmu TCP pri vseh orientacijah vrha mehanizma (Kumar in Waldron, 1981). V priročnem delovnem prostoru robotski mehanizem lahko opravi neko delo v več možnih orientacijah

TCP. Proizvajalci robotov običajno v tehnični dokumentaciji zapišejo dosegljivi delovni prostor v obliki 2D-tehnološke risbe:



Slika 69: Tovarniško dokumentiran delovni prostor

Delovni prostor lahko izračunamo z matematičnim modelom robotskega mehanizma. Običajno proizvajalec robota posreduje spremljajočo dokumentacijo, v kateri je delovni prostor prikazan na grafični način. Na Sliki 69 vidimo stransko in tlorisno perspektivo delovnega prostora, ki ga v tehnični dokumentaciji posreduje proizvajalec robotov.



Slika 70: CAD 3D-izris delovnega prostora industrijskega robota (izometrični, stranski pogled, pogled v prerezu)

Pri robotizaciji industrijskih procesov se srečujemo z dvema pristopoma glede na delovni prostor:

1. Na voljo imamo industrijskega robota in na podlagi njegovega delovnega prostora izvedemo aplikacijo robotizacije (manj pogosto).
2. Poznamo problematiko robotizacije, poznamo delovni prostor in ostale zahteve naročnika, nato izberemo primerne industrijskega robota (pogosteje).

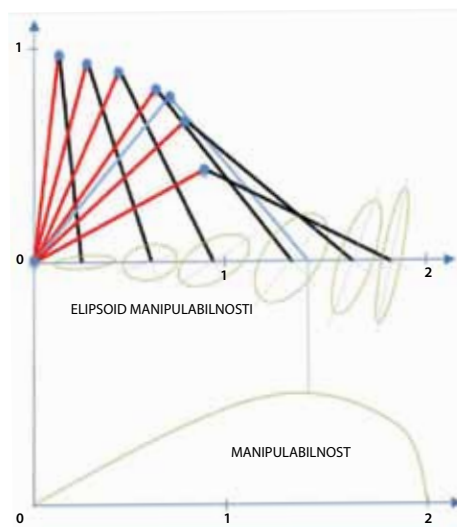
Če primerjamo mobilne in industrijske robote, se seveda delovni prostori popolnoma razlikujejo tako po velikosti kot tudi obliki. Pri študiji delovnega prostora moramo upoštevati omejitve orodij, ki so nameščena na robota, morebitne omejitve prostora in delovnih priprav, uskladitev z okolico, varnost v robotski celici ter zahteve samega obdelovanca. Ko se naročnik odloča za integracijo industrijskega robota, je delovni prostor običajno definiran. Zato moramo poznati parametre robota, kot so prostorske zahteve robota, delovni prostor, način montaže (tla, strop, stena ali drugo), namen skost robota in druge tehnološke parametre, ki jih bomo predstavili v naslednjih poglavjih. Izkušnje običajno pokažejo, kakšnega robota izbrati. Delovni prostor robotskega mehanizma je povezan z dimenzijami posameznega segmenta. Poznamo različne izvedbe mehanizmov, različne izvedbe

glede rotacij osi in različne mehanizme glede mase bremena, s katerim lahko robotski mehanizem manipulira. Robotski mehanizem in nameščeno orodje morajo omogočiti doseganje točke v prostoru s poljubno orientacijo, če želimo v neki točki opraviti nalogo čim bolj redundantno. Govorimo o gibljivosti robotskega mehanizma. Z razvojem robotike v industrijskih aplikacijah se je razvila tudi optimizacija robotskega mehanizma. Proizvajalci robotov v tehnični specifikaciji med drugim podajo karakteristike robota, kot so omejitve gibanja osi, maksimalne hitrosti osi ter dvodimenzionalen tehnološki načrt delovnega prostora robota. Pretekle raziskave so pokazale, da navedene informacije ne zadostujejo za izbiro primerne industrijskega robota.

Lahko se namreč zgodi, da izbrani robot za določeno aplikacijo ustreza vsem podanim zahtevam, ko pa je dejansko integriran v tehnološki sistem, se lahko izkaže, da v določeni postavitvi in položaju robotski mehanizem ni dovolj gibljiv (ne more opraviti zastavljene naloge). Iz tega sledi, da nimamo podane zelo pomembne informacije o gibljivosti robota v priročnem delovnem prostoru. Pri opisovanju funkcionalnih lastnosti mehanizma uporabljamo različne matematične funkcije, kot so dosegljivi in priročni delovni prostor, gibljivost in ostali kinematični indeksi. Indeks gibljivosti lahko definiramo kot zmožnost gibljivosti različnih orientacij orodja za vsako točko znotraj delovnega prostora robota. Proizvajalci industrijskih robotov običajno v tehnični dokumentaciji grafično in tabelarično podajo mere delovnega prostora in njegov volumen. Iz tehnične dokumentacije pa ne pridobimo informacije o gibljivosti robota v posameznih točkah delovnega prostora. Informacijo o gibljivosti imenujemo indeks manipulabilnosti/gibljivosti robotskega mehanizma. Gibljivost robota v določenem položaju v delovnem prostoru je neposredno povezana z natančnostjo robota. Robotski mehanizem ni enako gibljiv v vseh točkah priročnega delovnega prostora. Projektanti, integratorji in uporabniki industrijskih robotov potrebujejo tudi informacijo o gibljivosti robota v določenem delovnem območju industrijskega robota. V praksi se namreč lahko zgodi, da robota integriramo v določeno industrijsko aplikacijo, kot je npr. varjenje, freziranje idr., v določeni poziciji in orientaciji pa industrijski robot ne more opraviti svoje naloge, kljub temu da je delovna naloga locirana v priročnem delovnem prostoru. V matematični singularnosti se mehanizem obnaša drugače in ne more v celoti opraviti delovne naloge. Indeksu, s katerim lahko opišemo omenjeni parameter, pravimo indeks manipulabilnosti oziroma gibljivosti robotskega mehanizma.

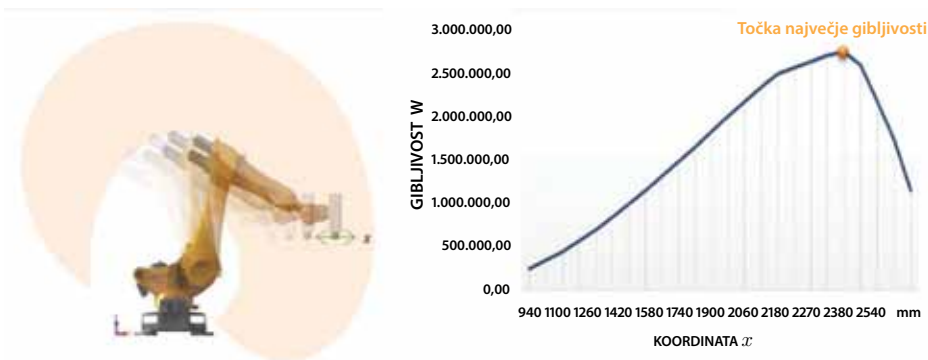
Optimalno analizo in načrtovanje robotskega mehanizma lahko dosežemo z natančnim izračunom oblike in velikosti delovnega prostora mehanizma. Delovni prostor robotskega mehanizma je definiran kot množica točk, ki jih lahko doseže robotski mehanizem z vrhom orodja. Pri tem nas zanimata oblika in velikost delovnega prostora. Mejne oziroma zunanje krivulje in površino delovnega prostora lahko predstavimo grafično, analitično ali numerično. 3D-delovni prostor robota izračunamo na podlagi geometrije in topologije robotskega mehanizma. Indeks gibljivosti lahko definiramo kot zmožnost gibljivosti različnih orientacij orodja za vsako točko znotraj delovnega prostora robota.

Na podlagi izračuna Jakobijeve matrike in njene determinante pa lahko izračunamo gibljivost mehanizma v določeni točki. Pri tem moramo upoštevati, da se lahko v določeno točko orodje robotskega mehanizma pomakne na več različnih načinov oziroma z različnimi vrednostmi kotov osi, iz tega pa sledi, da imamo tudi več računskih rešitev Jakobijeve matrike. Slika 71 prikazuje projekcijo gibljivosti v smeri X pri različnih kotih robotskih osi. Iz slike razberemo, da se pri večji gibljivosti ploščina elipsoida povečuje in obratno. Iz tega sledi, da lahko gibljivost robotskega mehanizma prikažemo z elipsoidi gibljivosti. Na Sliki 71 lahko opazimo tudi, da se gibljivost robotskega mehanizma počasi povečuje do določene vrednosti, nato pa se razmeroma hitro zmanjša, kar moramo upoštevati pri načrtovanju robotskih sistemov.



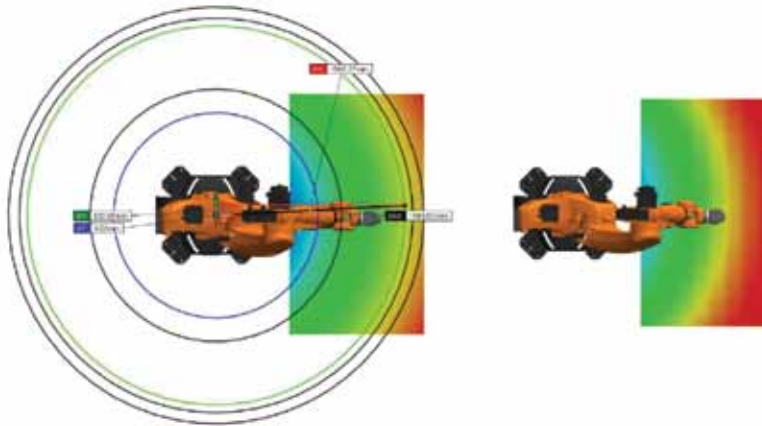
Slika 71: Elipsoid gibljivosti in gibljivost robotskega mehanizma

Na Sliki 72 vidimo delovni prostor industrijskega robota v stranskem prerezu ter prikaz gibanja vrha orodja po osi  $x$ . Na drugem delu Slike 72 je grafični prikaz gibljivosti omenjenega robotskega mehanizma. Vidimo lahko, da se s premikanjem vrha orodja robota po osi  $x$  gibljivost povečuje, dokler ne doseže maksimum. Zaželeno je, da so robotske aplikacije implementirane v okolici točke najvišje gibljivosti. S pomikom po osi  $x$  proti zunanemu robu delovnega prostora robotskega mehanizma se gibljivost hitro manjša. Posledično se manjša tudi uporabnost robotskega mehanizma. To si lahko predstavljamo kot premikanje in rotacijo človeške roke tik ob telesu; iztegujoč naprej od telesa se gibljivost povečuje, na koncu dosegljivosti roke pa zmanjšuje.



Slika 72: Delovni prostor v prerezu in grafični prikaz gibljivosti v smeri X

Na Sliki 73 je barvni prikaz gibljivosti robota na delovni mizi frezalnega robota. Sklep je, da aplikacijo postavimo v območje največje gibljivosti.

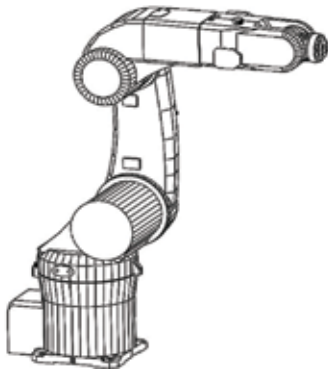


Slika 73: Prikaz gibljivosti na delovni mizi (zelena največja gibljivost, modra slaba, rdeča slabša gibljivost mehanizma)

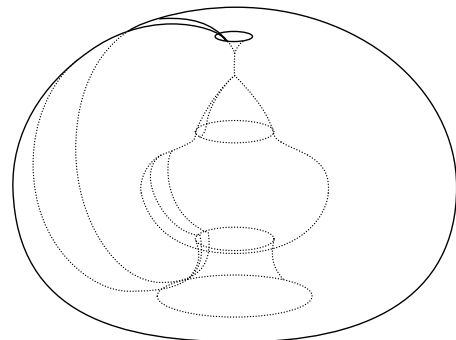
## Konstruktivne izvedbe industrijskih robotov

### Antropomorfna konstrukcija robotskega mehanizma

Antropomorfna izvedba robotskega mehanizma je najpogostejša v praktičnih industrijskih aplikacijah. Antropomorfni robot ima vse osi rotacijske. S svojo konstrukcijo posnema delovanje človeške roke. Običajno imajo ti roboti šest osi, kar omogoča nastavitve želenega položaja in orientacije vrha robota (angl. *Tool Center Point*, TCP).



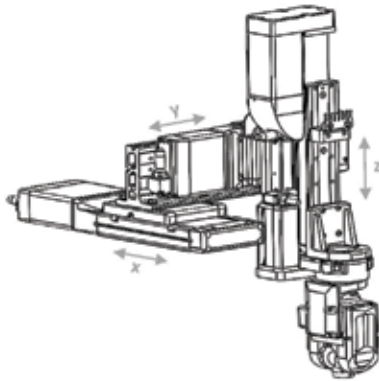
Slika 74: Osnovni koncept antropomorfne konstrukcije



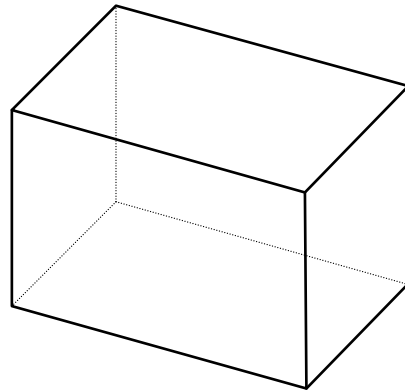
Slika 75: Delovni prostor antropomorfnega robota

## Kartezična konstrukcija robotskega mehanizma

Konstrukcija kartezičnega robota omogoča linearno gibanje v treh prostorskih dimenzijah. Dodamo lahko dodatno rotacijsko os, ki omogoča rotacijo obdelovanca. Kartezični roboti so pogosto izdelani modularno, zato jim po potrebi lahko dodajamo ali odzemamo osi.



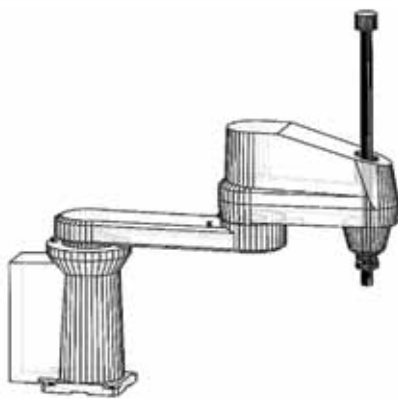
Slika 76: Osnovni koncept kartezične konstrukcije



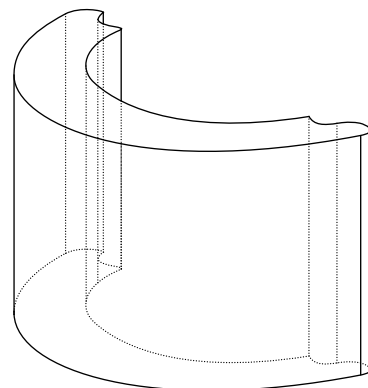
Slika 77: Delovni prostor kartezičnega robota

## Konstrukcija robotskega mehanizma SCARA

Po standardu ISO 8373: 2021 je SCARA (angl. *Selective Compliance Assembly Robot Arm*) robot manipulator, ki ima dve paralelni rotacijski osi, za izvedbo opravil pa je dodana tudi vertikalna translacijska os. Robot se običajno uporablja za operacijo sestavljanja ter vstavljanja elektronskih komponent v tiskanine.



Slika 78: Osnovni koncept konstrukcije SCARA

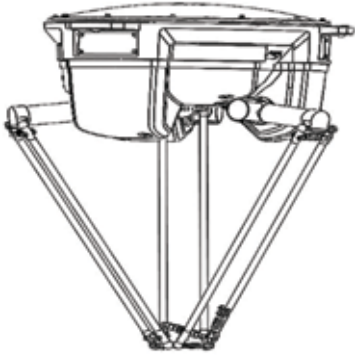


Slika 79: Delovni prostor robota SCARA

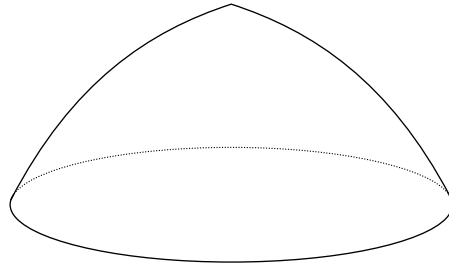


## Paralelna konstrukcija robotskega mehanizma

Paralelni robot se običajno uporablja za hitre aplikacije *pick and place*. Lahko se uporablja za pakiranje prehrabnenih izdelkov in drugo. Prednost paralelnega robota je hitrost gibanja.



Slika 80: Osnovni koncept paralelne konstrukcije



Slika 81: Delovni prostor paralelnega robota

Omenjeni robotski mehanizmi so v industriji trenutno najbolj aplikativni; prevladuje antropomorfna konstrukcija robotskih mehanizmov. V preteklosti so se uporabljali tudi cilindrični roboti in sferični roboti, danes pa zaradi trenutnih konstrukcijskih rešitev robotskih mehanizmov ne več.

 PONOVI TEV, NALOGE IN IZZIVI

1. Preberi ISO standard 8373.
2. Preberi ISO standard 10218-1:2011, ISO 10218-2:2011 in ISO 15066 – *Robot in naprave – Varnostne zahteve za industrijske robote.*
3. Poveži slike s pripadajočimi pojmi:



robot SCARA



antropomorfni robot



paralelni robot

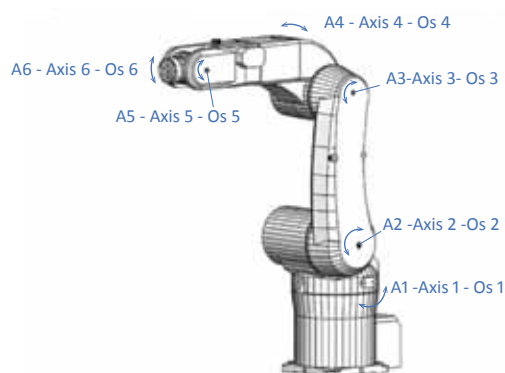


kartezični robot

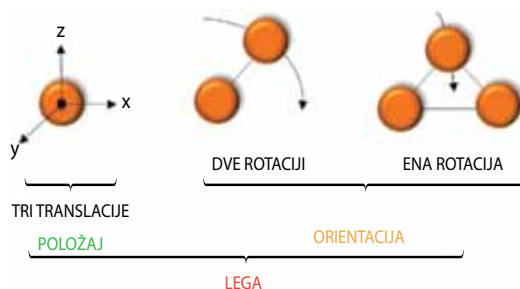
---

## Prostostne stopnje robotskega mehanizma

Osnovna lastnost robotskega mehanizma je njegova gibljivost. Z matematičnega vidika je gibljivost mehanizma pogojena s številom parametrov, ki določajo prostorsko lego vseh teles v mehanizmu. To imenujemo število prostostnih stopenj robotskega mehanizma. Prostostne stopnje robotskega mehanizma so pri antropomorfnih industrijskih robotih izvedene kot rotacijske osi oziroma sklepi (angl. *axes, joints*). Na Sliki 82 je ponazorjen šestosni industrijski robot (A1–A6). Sklepamo lahko, da ima robot šest prostostnih stopenj. Položaj togega telesa v prostoru lahko opišemo s koordinatami  $X, Y, Z$  v masnem središču. Togo telo lahko opiše različne orientacije oziroma kote zasuka okoli osi masne točke oziroma okoli osi  $x, y, z$ . Orientacije lahko opišemo s koti *Roll – Pitch – Yaw* ( $A, B, C$ ) ali pa z Eulerjevimi koti  $XYZ$ . Robotski mehanizem, ki opiše do šest prostostnih stopenj, je neredundanten mehanizem, robotski mehanizem z več kot šest osmi imenujemo redundantni robotski mehanizem. To pomeni, da lahko pozo v delovnem prostoru doseže v veliko možnih orientacijah in tako opiše različne lege v prostoru.



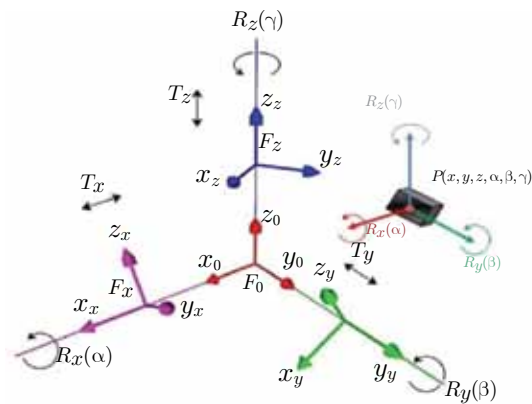
Slika 82: Rotacijske prostostne stopnje antropornega robota



Slika 83: Prostostne stopnje togega telesa

Vzemimo za primer togo telo, sestavljeno iz treh masnih delcev. En masni delec ima tri prostostne stopnje. Prostostne stopnje so opisane s kartezičnimi koordinatami  $X, Y$  in  $Z$ . Gibanje vzdolž premice posamezne koordinatne osi imenujemo translacijsko gibanje. V drugem primeru masnemu delcu dodamo še en masni delec z masnim središčem v centru, ki ima konstantno razdaljo od prvega. Druga masna točka lahko potuje le rotacijsko okoli prve točke. Položaj lahko opišemo z dvema krožnicama. Gibanje *po krožnici imenujemo rotacija*. Togo telo v prostoru ima šest prostostnih stopenj, tri translacije in tri rotacije. Prve tri določajo položaj telesa, naslednje tri pa njegovo orientacijo.

Skupaj z vsemi prostostnimi stopnjami opišemo lego telesa v prostoru. Na gibljivost mehanizma vpliva vrsta sklepa – ta je lahko translacijski ali rotacijski. Antropomorfnih roboti imajo vse sklepe rotacijske. Prostorsko pozicijo točke lahko opišemo v kartezičnem, cilindričnem ali sferičnem koordinatnem sistemu (Paul, 1981; Sciavicco in Siciliano, 1996). Točko  $P$  v kartezičnem koordinatnem sistemu določa kartezični vektor  $\vec{p}$  s komponentami  $p_x, p_y, p_z$ . Položaj togega telesa v prostoru lahko opišemo s koordinatami  $X, Y, Z$  v masnem središču. Vendar ima lahko togo telo različne orientacije oziroma kote zasuka okoli osi masne točke oziroma okoli osi  $x, y, z$ . Z opisom položaja in orientacije dobimo pozo telesa v prostoru. Iz tega izhaja tudi izbira koordinatnih sistemov pri programiranju industrijskega robota. Izbiramo lahko med koordinatnim sistemom posamezne osi (angl. *Joint*), baznim koordinatnim sistemom (angl. *Root*), koordinatnim sistemom vrha orodja (angl. *Tool center point, TCP coordinate system*) ali pa zunanjim koordinatnim sistemom (angl. *World*).



Slika 84: Definicija lege togega telesa v 3D-prostoru

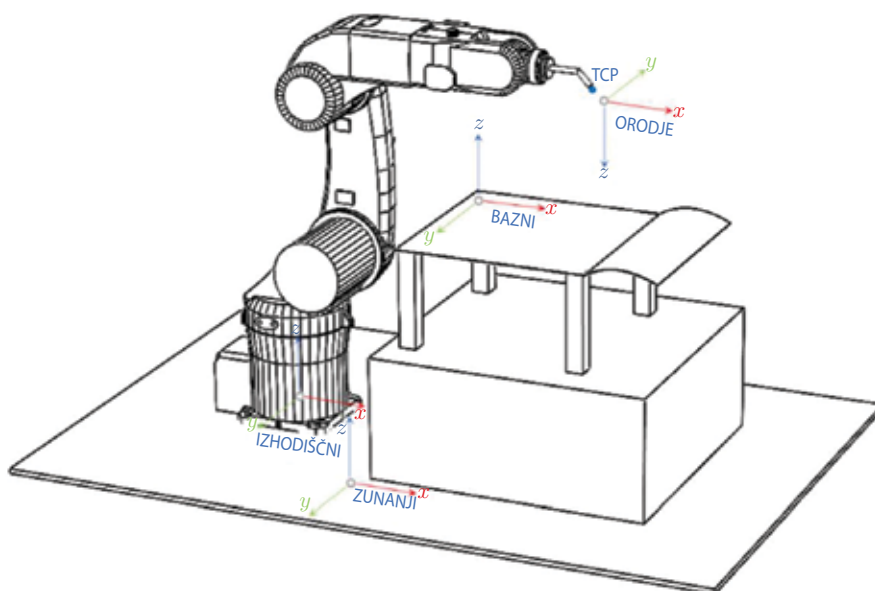
## Redundanten in neredundanten robot

Neredundanten robot je robot z največ šestimi prostostnimi stopnjami, ki jih potrebujemo za poljubno pozicioniranje in orientacijo točke ali togega telesa v prostoru. *Redundanten robot* ima več kot šest prostostnih stopenj. Pozo v prostoru lahko s takšnim robotom dosežemo na neskončno različnih načinov. Običajni industrijski roboti so po navadi neredundantni oziroma imajo največ šest prostostnih stopenj. Posledično bi z dodatnimi prostostnimi stopnjami naloge upravljanja in pozicioniranja postale mehansko nedoločene (neskončno možnih rešitev) in bi otežile določanje optimalnih rešitev.

Ko želimo rešiti določeno nalogo, mora biti število prostostnih stopenj robota oziroma vrha robota vsaj enako (lahko je večje) številu prostostnih stopenj naloge. Če temu ni tako oziroma je število prostostnih stopenj robota manjše od števila prostostnih stopenj naloge, privede do singularnosti robotskega mehanizma. Singularno točko vrh orodja robota doseže v primeru, ko se določena os robota ne zmore več premikati; zelena poza orodja (TCP) v tem primeru ni dosežena.

## Zunanje in notranje koordinate robota

Položaj in orientacijo vrha robota v delovnem prostoru robotskega mehanizma opišemo z *zunanjimi spremenljivkami*. Za določanje položaja in orientacije najpogosteje uporabljamo kartezični koordinatni sistem. Položaj vrha robota določimo glede na izbrano izhodišče s pomočjo vrednosti v smereh  $X$ ,  $Y$  in  $Z$ , orientacijo pa z vrednostmi zasuka okoli posameznih osi ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ). Trenutne vrednosti posameznih robotskih sklepov pišemo z *notranjimi spremenljivkami*. Ko robotski mehanizem oziroma njegov vrh zavzame določeno lego v prostoru, se izrazi vrednost notranjih spremenljivk. Za določen položaj in orientacijo vrha robota potrebujemo določene vrednosti notranjih spremenljivk posameznih sklepov robota.



Slika 85: Koordinatni sistemi robotskega mehanizma

Uporabniku industrijskega robota so za določitev položaja in orientacije vrha robota pomembne predvsem zunanje spremenljivke, za razvijalce in proizvajalce robota pa večinoma notranje spremenljivke. Večinoma lahko pri robotih zunanje spremenljivke izražamo relativno glede na specifični izbrani koordinatni sistem. Poznamo koordinatni sistem izhodišča robota, bazni koordinatni sistem obdelovanca, koordinatni sistem orodja in zunanji koordinatni sistem. Zunanje in notranje spremenljivke so med seboj povezane prek Jakobijeve matrike, splošne matematične funkcije, ki je vezana na določen robotski mehanizem. Jakobijeva matrika je operator linearne preslikave hitrosti med hitrostmi v zgibih robota in hitrostjo (linearno in kotno) TCP. Za analizo načina gibanja robota je pomembna Jakobijeva matrika. Omogoča matematično analizo načinov krmiljenja robotskih sistemov, matematično načrtovanje robotskih trajektorij, izračun singularnih točk posameznih robotskih konfiguracij, dinamično analizo robotskih mehanizmov ter izračun transformacije sil in momentov na vrhu robotskega mehanizma (TCP) v premo sorazmerne potrebne sile in momente za rotacijski pomik v sklepih mehanizma. Boljše kot je Jakobijeva matrika definirana, realnejši so matematični izračuni in simulacije. Iz Jakobijeve matrike izhaja matematični model robotskega mehanizma.

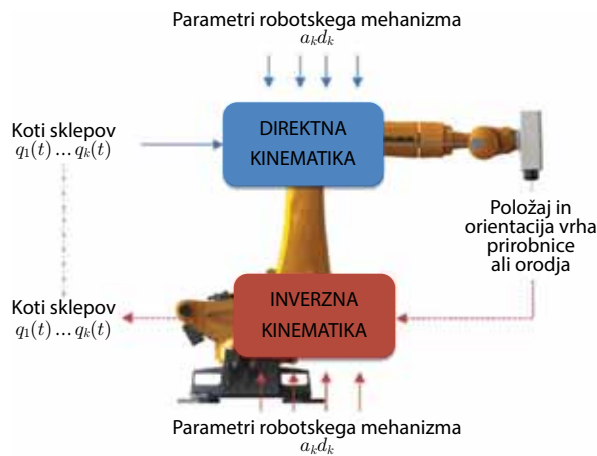
## Kinematični model robotskega mehanizma

Če med seboj s sklepi povežemo toga telesa, dobimo mehanizem. Posamezna toga telesa so členi ali segmenti mehanizma. Kinematika je v fiziki veja mehanike, ki opisuje gibanje telesa ne glede na vzroke in posledice delovanja zunanjih sil. Pri gibanju se s časom spreminja lega opazovanega telesa glede na okolico. Kinematična veriga je pomemben sklop pri obravnavi kinematike mehanizmov. Struktura kinematične verige je lahko serijska (odprta), paralelna (zaprta) ali sestavljena. Če med seboj povežemo gibljive segmente mehanizma, dobimo kinematično verigo. Pri zaprti kinematični verigi je vsak segment kinematične verige povezan z vsaj še dvema gibljivo vpetima segmentoma. Primer zaprte kinematične verige je paralelni robotski mehanizem. Pri odprti kinematični verigi je eden od segmentov pritrjen na podlago oziroma bazo, ostali segmenti pa se gibljejo v prostoru.



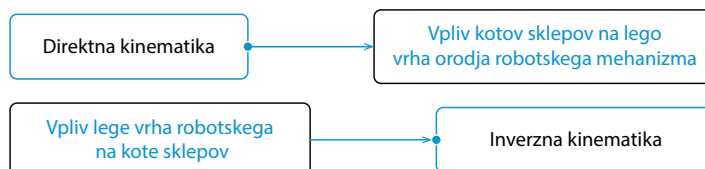
Slika 86: Koncept zaprte in odprte kinematične verige togega telesa

Primer odprte kinematične verige je klasični antropomorfni robot. Pri zaprti kinematični verigi so vsi deli mehanizma vpeti v podlago – primer je sodobni obdelovalni center. Primer hibridne kinematične verige je bionično robotsko zapestje. Kot bomo spoznali v nadaljevanju, ima vsak mehanizem svoje lastnosti, kot so gibljivost, togost, natančnost in drugo. Te lastnosti pa vplivajo tudi na izbiro in funkcionalnost določenega mehanizma. Pri opisovanju funkcionalnih lastnosti mehanizma uporabljamo različne matematične kriterijske funkcije, kot so dosegljivi in priročni delovni prostor, gibljivost in kinematični indeks.



Slika 87: Koncept zaprte in odprte kinematične verige

Kot vidimo na Sliki 88, se pri kinematiki robotskega mehanizma srečujemo z dvema pristopoma obravnave kinematike: direktno in inverzno kinematiko. Direktna kinematika podaja vpliv posameznih kotnih pomikov sklepov robotskega mehanizma na položaj vrha prirobnice ali orodja robota. Pri inverzni kinematiki nas zanima vpliv poze vrha prirobnice ali orodja na posamezni sklep robota.

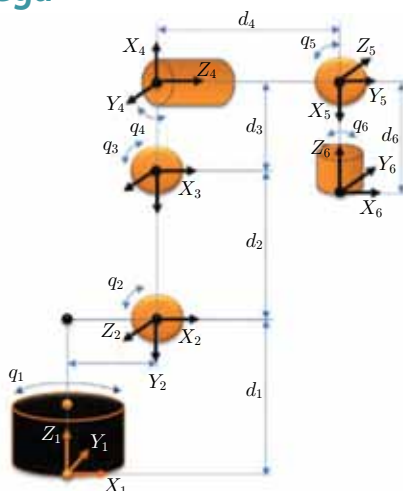


Slika 88: Pristopa obravnave direktne in inverzne kinematike

## Primer izpeljave direktnega kinematičnega modela robotskega mehanizma



Slika 89: Obravnavani 6-osni industrijski robot



Slika 90: Kinematični model robota tega telesa

Na Sliki 89 je industrijski robot KUKA KR 150-2, za katerega bomo matematično izpeljali kinematični model. Na Sliki 90 je prikazano, kako narišemo segmente in vse relacije med segmenti oziroma osmi.

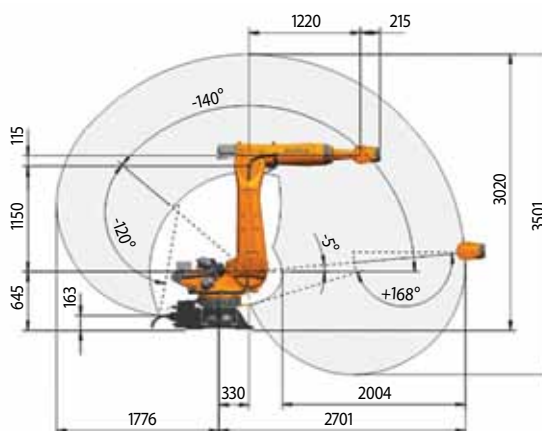
Sklepe označimo z oznako  $q$  ( $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ ). Referenčni koordinatni sistem  $\{M\}$  je izbran glede na tip robota in vključuje bazni koordinatni sistem  $(x_0, y_0, z_0)$ . Koordinatni sistem orodja  $\{T\}$  je lociran na konfigurirano orodje robota (rezkar, varilna pištola, prijemalo idr.). Konfiguracija robota, kjer poteka obdelava materiala na obdelovalni mizi pred robotom in z upoštevanjem omejitev osi robota glede na referenčni koordinatni sistem, je lahko povzeta v obliki inverzne kinematike brez upoštevanja singularnosti in togosti robota. Vektor koordinat sklepov za šestosnega robota lahko zapišemo kot:

$$q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T$$

Pri tem so  $\theta_i, i = 1, 2, \dots, 6$  skalarne vrednosti sklepov vodene z aktuatorji.

Preučimo tovarniške podatke omenjenega robota. Podatke najdemo v tehniškem podatkovnem listu proizvajalca (angl. *Datasheet*):

Os	Omejitev osi	Maks. hitrost
A1	$\pm 185^\circ$	110 °/s
A2	+ 0° do 146°	110 °/s
A3	+155° do -119°	100 °/s
A4	$\pm 350^\circ$	170 °/s
A5	$\pm 125^\circ$	170 °/s
A6	$\pm 350^\circ$	238 °/s



Slika 91: Delovni prostor Kuka KR 150-2

Datasheet Kuka KR-150-2

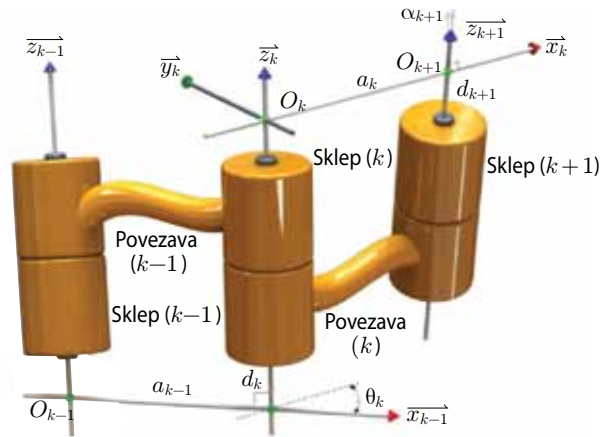


Za izpeljavo kinematičnega modela robotskega mehanizma smo uporabili modificiran Denavit-Hartenbergov (D-H) postopek. D-H postopek sta leta 1955 prvič uporabila Denavit in Hartenberg, po katerih se je postopek poimenoval.

Osnovna ideja postopka je, da je mogoče zapisati translacijske in rotacijske relacije med posameznimi členki robotskega mehanizma z matrikami dimenzij  $4 \times 4$ . Vsak členek in njegovo relacijo na predhodni členek lahko zapišemo z matriko  $4 \times 4$ . Z množenjem vseh  $n$ -matrik  $n$ -prostostnega mehanizma pa lahko zapišemo položaj in orientacijo, torej pozo vrha prirobnice ali vrha orodja robota, kar predstavlja enačbe direktne kinematike robotskega sistema.

### *D-H postopek:*

1.	<i>Postavitev koordinatnih sistemov členkov robota</i>
	Postavitev koordinatnih sistemov poteka tako, da najprej zapišemo bazni koordinatni sistem robotskega mehanizma (nahaja se v središču podstavka robota) in nato nadaljujemo postavitev koordinatnih sistemov po členkih od podstavka do vrha robotskega mehanizma oziroma vrha orodja, če to obstaja.
2.	<i>Najdemo vse <math>d_i</math></i>
	$d_i$ je razdalja od izhodišča $i-1$ koordinatnega sistema do presečišča med osjo $Z_{i-1}$ in osjo $X_i$ vzdolž osi $Z_{i-1}$ ; $d_i$ je spremenljivka sklepa $q_i$ , če je sklep $i$ prizmatičen.
3.	<i>Najdemo <math>a_i</math></i>
	$a_i$ je najkrajša razdalja med osjo $Z_{i-1}$ in $Z_i$ .
4.	<i>Najdemo <math>\theta_i</math></i>
	$\theta_i$ je kot rotacije od osi $X_{i-1}$ do osi $Z_i$ okrog osi $Z_{i-1}$ . $\theta_i$ je spremenljivka sklepa $q_i$ , če je sklep $i$ rotacijski.
5.	<i>Najdemo <math>\alpha_i</math></i>
	$\alpha_i$ je kot rotacije med osjo $Z_{i-1}$ do osi $Z_i$ okrog osi $X_i$ .



Slika 92: Modificiran D-H prikaz relacij med osmi

Zapišemo D-H tabelo kinematičnih parametrov :

Sklep	$a_k$ (mm)	$\alpha_k$	$d_k$	$\theta_k$
1	350	$-90^\circ$	$d_1 = 750$	$q_1$
2	1250	$0$	$0$	$q_2 + 90^\circ$
3	55	$-90^\circ$	$0$	$q_3$
4	$0$	$90^\circ$	$d_4 = 1100$	$q_4$
5	$0$	$90^\circ$	$0$	$q_5 - 90^\circ$
6	$0$	$0$	$d_6 = 230$	$q_6$
Vrh orodja	B	$0$	A	$0$

Ko določimo vse koordinatne sisteme za vsak posamezen sklep robotskega mehanizma po D-H postopku, določimo homogene transformacijske matrike  $i$ -tega koordinatnega sistema proti  $i-1$  koordinatnemu sistemu. Imenujemo jih D-H transformacijske matrike.

To dosežemo na naslednji način:

- rotiramo okoli osi  $X_i$  za kot  $\alpha_i$ ;
- translacija vzdolž osi  $X_i$  za pomik  $a_i$ ;
- rotiramo okoli osi  $Z_{i-1}$  za kot  $\theta_i$ ;
- translacija vzdolž osi  $Z_{i-1}$  za pomik  $d_i$ .

To lahko zapišemo v obliki enačbe kot:

$$A_i^{i-1} = \text{Rot}(x_i, \alpha_i) \cdot \text{Transl}(x_i, a_i) \cdot \text{Rot}(z_i, \theta_i) \cdot \text{Transl}(z_i, d_i)$$

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_i \end{bmatrix}$$

Rezultat je naslednji izraz:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & \alpha_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & \alpha_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

V zgornjo matriko  $4 \times 4$  vnesemo vse zapisane D-H parametre. Začnemo pri baznem koordinatnem sistemu. Iz tega sledi, da zapišemo sedem transformacijskih matrik.

Transformacijska matrika  $A_1^0$  prvega koordinatnega sistema proti baznemu koordinatnemu sistemu:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Transformacijska matrika  $A_2^{i-1}$   $i$ -tega koordinatnega sistema članka proti baznemu koordinatnemu sistemu:

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & \sin q_3 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & -\cos q_3 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & -\sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & \sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & -\cos q_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6^5 = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

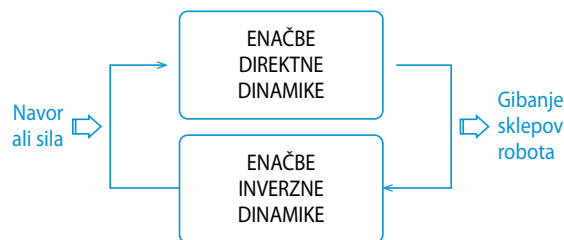
$$A_{\text{orodje}}^6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Direktni kinematični model predstavlja homogena matrika  $T_i^0$ , ki določa položaj in orientacijo vrha prirobnice robota oziroma vrha orodja. Glede na bazni koordinatni sistem zapišemo enačbo:

$$T_i^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 \dots A_n^i = \prod_{j=1}^{j=i} A_j^{j-1}$$

za  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , pri čemer je  $n$  število prostostnih stopenj.

## Dinamični model robotskega mehanizma



Slika 93: Direktna in inverzna dinamika robotskega mehanizma

Pri kinematični obravnavi mehanizma smo opazovali kinematične količine – položaj, hitrost in pospešek – neodvisno od sil in navorov, ki povzročajo gibanje. Pri dinamičnem modelu pa nas zanima gibanje robotskega mehanizma, ki je posledica delovanja sil in navorov v sklepih robota in vseh ostalih dinamičnih vplivov na mehanizem. V tem primeru nas zanima, kakšne sile in navori v sklepih robota so potrebni za to, da je izvedeno želeno gibanje robota. Če upoštevamo, da je robotski mehanizem sestavljen iz šestih rotacijskih osi, je Jakobijeva matrika sestavljena iz števila vrstic, ki je enako številu prostostnih stopenj, število stolpcev pa je enako številu sklepov.

$$J = [J_1 J_2 J_3 \dots J_n]$$

Jakobijeva matrika je sestavljena iz podmatrik  $J_T$  in  $J_R$ .  $J_T$  je matrika razsežnosti  $3 \times n$  in opisuje vpliv sklepnih hitrosti na hitrost robota. Jakobijeva matrika je operator linearne preslikave hitrosti med hitrostmi v zgibih robota in hitrostjo (linearno in kotno) TCP.

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = J(q) \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dot{q}_m \end{bmatrix}$$

Jakobijevo matriko  $J(q)$  lahko zapišemo kot:

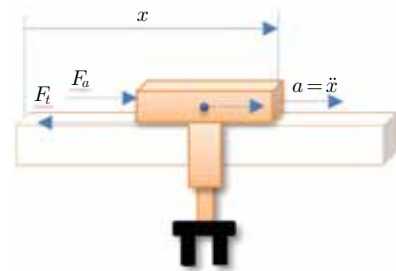
$$J(q) = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4 \ J_5 \ J_6] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix}$$

Kot primer vzemimo primer iz kinetike, kjer na telo z maso  $m$  deluje sila  $F_a$ . Med telesom in podlago se ustvari sila trenja  $F_t$ .

Zapišimo direktni in inverzni dinamični model telesa:

$$\sum F = m \cdot a$$

$$F_a - F_t = m \cdot a = m \cdot \ddot{x}$$



Slika 94: Telo z maso  $m$

**Inverzni dinamični model** zapišemo kot:

$$F_a = m \cdot \ddot{x} + F_t$$

**Direktni dinamični model** zapišemo kot:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \cdot (F_t - F_a)$$

O dinamiki mehanizma torej govorimo, kadar obravnavamo sile in navori na mehanizmu in gibanje mehanizma, ki ga te sile in navori povzročajo. Določanje sil in navorov, ki se pojavljajo v mehanizmu, imenujemo tudi dinamična analiza. Matematični model, ki opisuje dinamiko mehanizma, je sestavljen iz nelinearnih diferencialnih enačb drugega reda; imenujemo jih tudi gibalne enačbe sistema.

**Dinamična analiza** gibanja robota se uporablja pri:

- konstrukciji robotskega mehanizma (dimenzije in mase segmentov, izbira primernih pogonov in gonil idr.);
- pri načrtovanju učinkovitega vodenja. Za vodenje robotov, posebej tistih z nizkimi prestavnimi razmerji ali sploh brez gonil, se namreč izkaže, da enostavne regulacijske sheme, kot je regulator PID, ne zadoščajo. Možna rešitev problema regulacije v takih primerih je, da z znanim dinamičnim modelom robota določamo navori, ki so potrebni pri premagovanju (kompenzaciji) vplivov vztrajnosti, Coriolisovih in centrifugalnih sil, trenja in gravitacije.

**Inverzni dinamični model** robota s togimi segmenti, izpeljan po Newton-Eulerjevi ali Lagrangeovi metodi, ima naslednji zapis:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + \tau_t(q, \dot{q}) = M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})$$

Pri tem je:

$q$  –  $s$  pot oziroma gibanje, pomik osi,

$\dot{q}$  – odvod poti = hitrost  $v$ ,

$\ddot{q}$  – drugi odvod poti = pospešek  $a$ ,

$M(q)$  – simetrična pozitivno definirana masna matrika modela robota, ki lahko vsebuje tudi vztrajnostne momente motorjev. Pri  $m$ -osnem robotu ima matrika dimenzije  $m \times m$ .

$C(q, \dot{q})$  – Coriolisov člen, zajema vpliv Coriolisovih in centrifugalnih sil.

$G(q)$  – vektor navorov zaradi gravitacijskih sil.

$\tau_t(q, \dot{q})$  – vektor navorov zaradi trenja.

Coriolisova sila je sila, ki povzroča odklon oziroma ukrivljenje gibajočih teles z vidika opazovalca, ki se nahaja v vrtečem se sistemu, npr. na Zemlji. To silo povzroči pospešek na maso, ki je pravokoten na smer gibanja, kar vodi do navidezno premočrtnega gibanja, na katerega ne deluje nobena sila.

Centrifugalna sila je reakcija na centripetalno silo. To je sila, s katero vrtenje sistema deluje na določeno maso v smeri radialno navzven.

**Direktni dinamični model** robota s togimi segmenti je podan z naslednjimi enačbami:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q) \cdot (\tau - C(q, \dot{q}) - G(q) + \tau_t(q, \dot{q}))$$

$$\dot{q} = \dot{q}_0 + \int_0^t \ddot{q}(t) \cdot dt$$

$$q = q_0 + \int_0^t \dot{q}(t) \cdot dt$$

## Dodatni dinamični vplivi

To so:

- dinamika pogonov,
- trenje,
- elastičnost,
- sile med okolico in robotom,
- drugo.

Problematika pri industrijskem robotu je zagotavljanje zadostne togosti. Zaradi odprte kinematične verige, velikega vztrajnostnega momenta sistema in tehnološko pogojenih sil nastanejo problemi s togostjo. *Struktura robota je vitka in tako elastična.*

Industrijski roboti trenutno pomenijo cenovno ugodnejšo alternativo sodobnim obdelovalnim strojem. Hkrati so fleksibilnejši in lahko delujejo v večjem delovnem prostoru. Če dodamo še dodatno zunanjo os, se ta delovni prostor še poveča. Zato raziskovalci, proizvajalci CAM-programске opreme in robotov skušajo nadomestiti obdelovalne centre z industrijskimi roboti skladno s prostorskimi omejitvami.

Robotske aplikacije za odzemanje materiala so trenutno manj natančne zaradi nezadostne togosti robotskega mehanizma v primerjavi s sodobnimi obdelovalnimi stroji. Matematično modeliranje togosti, analiza in sinteza omenjenih problemov zajemajo raziskave, ki jih izvajajo v okviru številnih raziskav.

Izvor napak pri pozicioniranju robotskega orodja lahko razdelimo v dve skupini – napake zaradi povratne sile odrezovanja in napake gibanja zaradi kinematike robota, dinamične napake in elastičnosti gonil. Napaka gibanja običajno znaša 0,1 mm in se pojavi tudi pri gibanju robota brez zunanjih sil. Povratne sile pri odzemanju materiala dosegajo nekaj sto  $N$  in lahko povzročijo odstopanje do 1 mm. Trditev je logična, ker je togost običajnega robota manjša od  $1 N/\mu m$ . Pri tem je treba omeniti, da imajo standardni CNC-obdelovalni stroji togost večjo od  $50 N/\mu m$ . Manjša togost robota izhaja iz odstopanj v sklepih, aktuatorjih in prenosnih elementih (elastičnost harmonskega gonila, elastičnost zobatega jermena), geometričnih in strukturnih lastnostih mehanizma in aktivnega zagotavljanja togosti regulacijskega sistema.

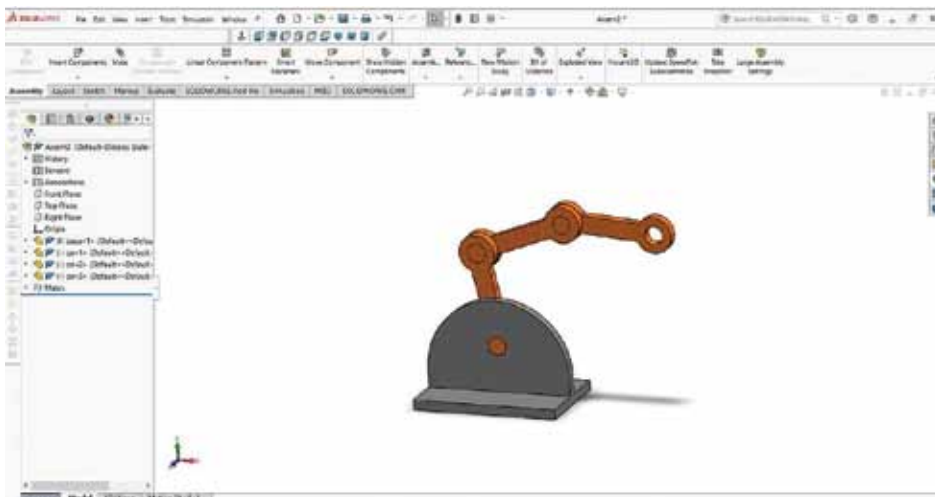


1. Industrijski robot ima sedem osi. Koliko prostostnih stopenj ima?
2. Koliko prostostnih stopenj ima človeška roka?
3. Poglejte video, v katerem so prikazani nizkocenovni roboti IGUS. Kakšne so po vašem mnenju prednosti in slabosti izvedbe takšnega robotskega mehanizma?



### Izziv

4. V programskem okolju Solidworks CAD modelirajte triosnega robota. Robot mora biti gibljiv. Izdelajte tudi animacijo premikanja robota.





*Pomembno je, da ne prenehamo spraševati.  
Zvedavost ima vso pravico, da obstaja.*

*Albert Einstein*

```
1 DEF osebni_razvoj ()
2 INI
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : moja_motivacija
4 ponovi
5 učenje ()
6 branje ()
7 poslušanje()
8 debata ()
9
10 if ($datum.ura==9) and ($datum.min==30) then
11 odmor_kava(#cappucino)
12 odmor_malica(#malica)
13
14 endif
15
16 until perfektno
17 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Osnova [1] : moja_motivacija
```

# POGON IN TRANSMISIJA ROBOTSKEGA MEHANIZMA

## *Vrste električnih motorskih pogonov*

ENOSMERNI MOTOR S PERMANENTNIMI MAGNETI
<ul style="list-style-type: none"><li>• Enostavno vodenje,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• nazivna moč od 100 w do 10 kw,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• nazivna hitrost vrtenja od 1000 do 3000 min<sup>-1</sup>,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• nazivni pospešek motorja in mehanizma je določen z nazivnim momentom in vztrajnostjo rotorja motorja in delovnega mehanizma,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• elektromehanska časovna konstanta znaša od 15 do 150 ms, nazivni pospešek pa od 1 do 1,5 rad/s<sup>2</sup>.</li></ul>
ENOSMERNI MOTORJI POSEBNE IZVEDBE
<ul style="list-style-type: none"><li>• Večji pospešek,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• manjša vztrajnost rotorja,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• zamenjava mehanskega komutatorja z elektronskim (brez ščetk, bldc-motor).</li></ul>
SINHRONSKI MOTORJI S PERMANENTNIMI MAGNETI
<ul style="list-style-type: none"><li>• Brezkontaktni elektronsko komutiran enosmerni motor,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• z merilnikom položaja, ki generira signale za elektronski komutator,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• glede na zgradbo armature statorja lahko imajo trapezni ali sinusni profil vodenja.</li></ul>
ASINHRONSKI MOTORJI
<ul style="list-style-type: none"><li>• Manjše dimenzije in teže,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• robustni, poceni in enostavni za vzdrževanje,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• bolj zapleteno vodenje (frekvenčna regulacija),</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• metoda vodenja – vektorska, neposredno nastavljanje momenta.</li></ul>
KORAČNI MOTORJI
<ul style="list-style-type: none"><li>• Hitra odzivnost in natančnost pozicioniranja (določeno s številom korakov na obrat),</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• bipolarni in unipolarni,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• potrebujemo krmilnik koračnih motorjev.</li></ul>

## *Pnevmatski in hidravlični aktuatorji – prednosti in slabosti*

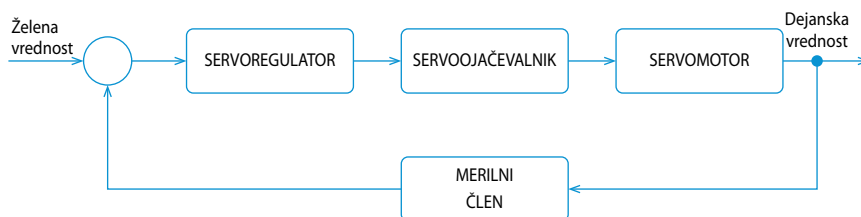
PNEVMATSKI AKTUATORJI
<ul style="list-style-type: none"><li>• Relativno poceni,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• uporaba za translacijska gibanja,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• primerni za eksplozijska okolja,</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• slabost: vzdrževanje, pod vplivom obremenitve ne ostanejo v položaju.</li></ul>

## HIDRAVLIČNI AKTUATORJI

- Višja cena,
- uporaba za rotacijska in translacijska gibanja,
- višje sile in visoka hitrost ,
- slabost: vzdrževanje in puščanje olja.

Osnovni elementi pogona robota so:

- **SERVOREGULATOR,**
- **SERVOOJAČEVALNIK,**
- **SERVOMOTOR Z GONILOM,**
- **MERILNI ČLEN (OPTIČNI ENKODER, RESOLVER, TAHOGENERATOR), PRITRJEN NA GRED SERVOMOTORJA.**



Slika 95: Principalna blokovna shema regulacije pogona robota

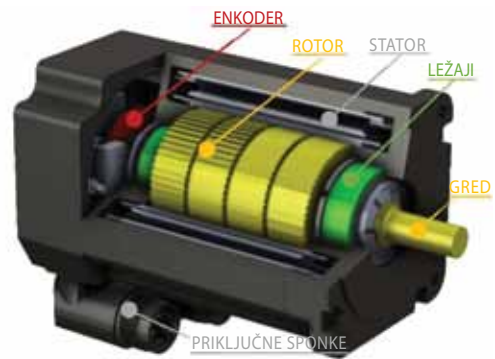
Robotska kinematika antropomorfnega robota, ki jo sestavljajo rotirajoče osi, omogoča translacijsko gibanje vrha orodja robotskega mehanizma. Posamezno os posredno prek harmonskega ali drugega namenskega gonila poganja električni AC-servomotor, za katerega je značilna robustnost, nizka masa in posledično majhen masni vztrajnostni moment. Ker robota pozicioniramo v prostoru, je na posameznih oseh tudi merilni sistem, s katerim merimo položaj, hitrost in navor na posamezni osi. Industrijski robot je običajno voden po matematično določeni poti (matrika inverzne kinematike), zato mora imeti robot ustrezen krmilnik poti in hitrosti oziroma servoregulator. Servoregulator je naprava, ki omogoča ročno ali avtomatizirano vodenje servomotorja. Funkcije servoregulatorja so zagon (če so pogoji izpolnjeni omogočitev in vklop pogona, angl. *drive enable*) in zaustavitev motorja, določanje smeri vrtenja električnega motorja, nastavitev in regulacija hitrosti, nastavitev navora in zaščita pred preobremenitvijo. Servoojačevalnik je običajno sklop servoregulatorja, ki signal poveča na nivo, primeren za vodenje oziroma pogon določenega servomotorja; pravimo mu tudi izhodna močnostna stopnja. Na Sliki 96 vidimo servopogon industrijskega robota, ki se nahaja v ohišju robotskega krmilnika.



Slika 96: Servopogon industrijskega robota



Slika 97: KUKA AC-servomotor



Slika 98: Prerez CAD AC-servomotorja

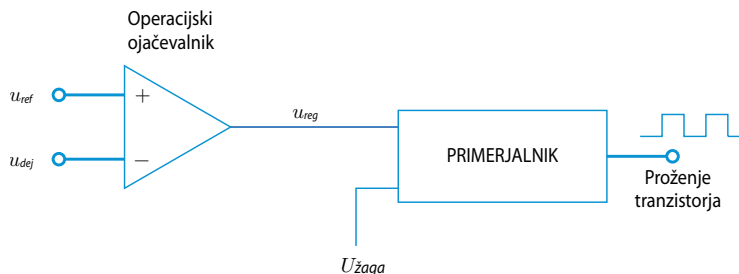


Slika 99: Prerez AC-servomotorja industrijskega robota

Pojem električni servomotor oziroma servopogon se nanaša na električni motor, pri katerem merimo dejanski kotni pomik gredi, hitrost vrtenja gredi motorja ter navor z meritvijo toka na statorskem navitju. Poznamo AC- in DC-servomotorje. Meritev pozicije gredi je lahko izvedena z optičnim inkrementalnim dajalnikom stanja (enkoderjem) ali resolverjem. Običajno je v industrijski robotiki zaradi svoje robustnosti na gredi AC-servomotorja kot merilni člen uporabljen resolver.

## Vodenje servomotorjev s pulzno-širinsko modulacijo

Za proženje polprevodniških stikal oziroma tranzistorjev na izhodni močnostni stopnji servopogona pri vodenju enosmernih električnih pogonov se običajno uporablja pulzno-širinski modulator (slo. PŠM, ang. PWM – *Pulse Width Modulation*). PŠM-generator generira pravokotne signale, konstantne frekvence z nastavljivim prevajalnim razmerjem med vklopom in izklopom izhodne napetosti.

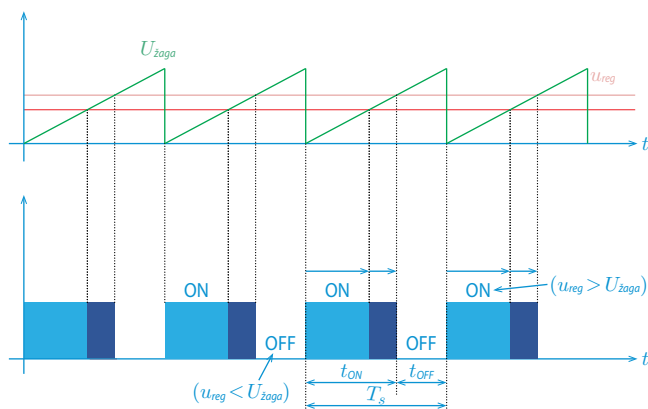


Slika 100: Koncept delovanja PŠM

Posebnost je, da lahko nastavljamo širino aktivnega pulza ( $t_{ON}$ ), pri čemer se frekvenca signala ne spremeni. Razmerje med vklopom (logična 1,  $t_{ON}$ ) in izklopom (logična 0,  $t_{OFF}$ ) izhodne napetosti



imenujemo prevajalno razmerje (angl. *duty cycle*). To lastnost PŠM-regulatorja izkoriščamo pri regulaciji moči enosmernega motorja, reguliranju servomotorjev, pri klimatskih napravah, sodobnih varilnih izvori in drugih napravah. Če izhajamo iz Slike 100, kjer je prikazana osnovna regulacijska shema, lahko sklepamo, da je vhod v regulacijski sistem zelena oziroma referenčna vrednost (npr. vrtljajev električnega motorja). To je običajno referenčna vrednost električne napetosti. V krmilno-regulacijskih sistemih se uporabljajo elektronska vezja, ki delujejo na podlagi električne napetosti in toka. Zato nastavimo in merimo vrednosti električne napetosti ali toka. Posledično prikažemo električne količine, razumljive uporabniku. Na končni strani regulacijske proge merimo dejansko vrednost (npr. vrtljajev električnega motorja). Običajno se za merjenje vrtljajev uporabljajo merilne naprave, kot so tahogeneratorji, optični enkoderji in resolverji. Ti so merilni pretvorniki iz določene



Slika 101: Koncept delovanja PŠM

fizikalne veličine (vrtljaji – generator, mehanska energija) v drugo fizikalno količino (električna napetost). Kot vidimo na Sliki 101, je PŠM konceptualno zgrajen iz operacijskega ojačevalnika, pri katerem primerjamo referenčno (nastavljeno/želeno,  $U_{ref}$ ) vrednost in dejansko modulirano izmerjeno vrednost fizikalne količine ( $U_{dej}$ ). Na izhodu dobimo regulacijsko napako ( $U_{reg}$ ), ki jo v primerjalniku primerjamo z generiranim žagastim signalom.

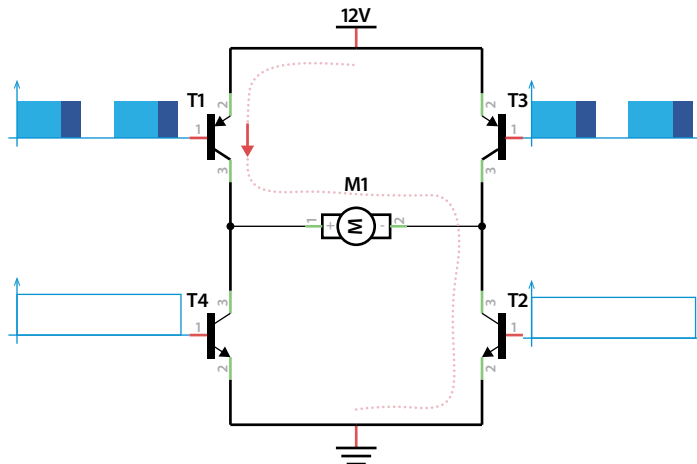
Primerjalno vezje izhod postavi na 0, ko se vhodni vrednosti izenačita. Na izhodu dobimo razliko oz. razmerje izhodnega signala  $T_{ON}/T_{OFF}$  oz. *duty cycle*. S spremembo referenčne vrednosti se spreminja tudi regulacijska napaka ( $U_{reg}$ ), ki jo primerjalno vezje primerja s prej omenjenim umetno generiranim žagastim signalom. Na izhodu dobimo pulzno moduliran signal, ki mu lahko na omenjeni način spreminjamo širino oziroma prevajalno razmerje. Posledično se spreminja srednja vrednost izhodne pulzne napetosti. Omenjeni širinsko moduliran signal krmili odpiranje tokovnega kanala na izhodnem tranzistorju (močnostna stopnja). Dogajanje si lahko predstavljate kot odpiranje ventila na pipi. Z odpiranjem in zapiranjem ventila omogočimo večji ali manjši pretok vode. V primeru PŠM vplivamo na srednjo vrednost toka in napetosti. To pomeni, da lahko vplivamo na vrtljaje motorja z zanemarljivim vplivom na navor motorja. Širina pulza oziroma srednja vrednost moduliranega napetostnega signala je izhodišče za vodenje servomotorja. Kot krmilni signal uporabimo enosmerno napetost, ki jo spreminjamo s pomočjo trimmer potenciometra ali digitalno.

Stikalno frekvenco lahko izračunamo:  $f_s = \frac{1}{T_s}$

in prevajalno razmerje  $D$ :  $D = \frac{t_{ON}}{T_s} = \frac{u_{reg}}{U_{zaga}}$



Na Sliki 102 vidimo H-mostič (angl. *H-bridge*), ki omogoča vodenje smeri DC-motorja na način, da po diagonalah vklapljammo tranzistorje. Če na tranzistor T1 priključimo PŠM-signal, ga lahko na ta način odpiramo in zapiramo na omenjeno srednjo vrednost toka. Tranzistor T2 zaradi stikalnih izgub samo vklopimo in ga držimo vklopljenega. Če želimo DC-električni motor zavrteti v drugo smer, vklopimo tranzistorje na enak način po drugi diagonali mostičnega vezja. Ker lahko s PŠM-signalom vplivamo na srednjo vrednost toka, lahko s tranzistorjem vplivamo na srednjo vrednost toka in napetosti skozi vodeni DC-električni motor. Na ta način vplivamo na smer vrtenja in na vrtljaje DC-električnega motorja.



Slika 102: H-mostič in PŠM-signali

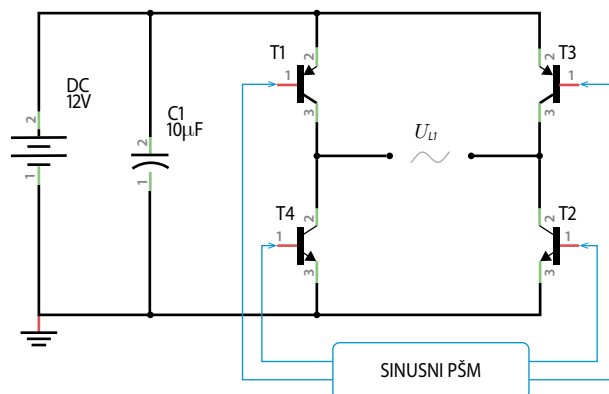
Običajno so v industrijskih robotskih mehanizmih za pogon uporabljeni AC (angl. *alternative current*, slo. izmenični tok/napetost) električni servomotorji. Tudi v tem primeru je izhodišče PŠM. Ker za vodenje izmeničnih električnih motorjev potrebujemo sinusno napetost in tok, v tem primeru govorimo o sinusnem PŠM.

Glede na zahteve po sinusnem napajanju in minimalnih stikalnih izgubah se je razvilo več modula-cijskih izvedb:

- SINUSNA PULZNO-ŠIRINSKA MODULACIJA,
- BLOKOVNA MODULACIJA,
- IZLOČANJE HARMONIKOV,
- VEKTORSKA PULZNO-ŠIRINSKA MODULACIJA.



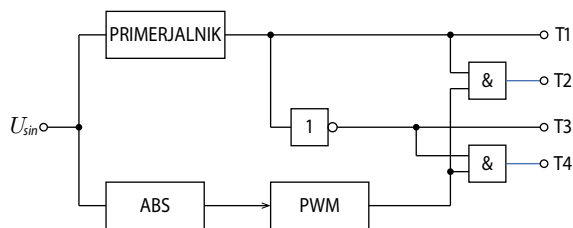
Na Sliki 103 vidimo koncept enofaznega tranzistorskega razsmernika. Uporablja se za napajanje enofaznih izmeničnih servomotorjev. Delovanje temelji na razsmerjanju enosmerne napetosti, kar nam omogoča H-mostič s tranzistorji in sinusna PŠM.



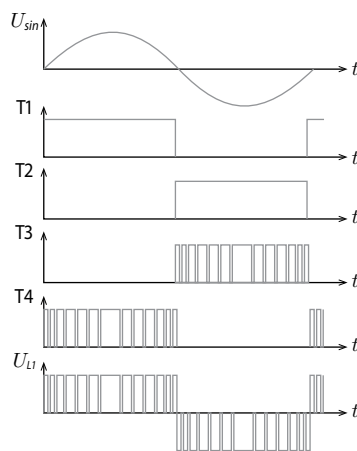
Slika 103: Enofazni tranzistorski razsmernik

Na Sliki 104 je blokovna shema sinusnega PŠM.

Osnovni princip temelji na generiranju pravokotnih signalov, ki se jim širina pulza sčasoma spreminja, hkrati pa tudi elektronsko vezje obrne polariteto izhodne pulzne napetosti. Na izhodu dobimo pulze, ki opišejo srednjo vrednost sinusne napetosti (Slika 105).



Slika 104: Blokovna shema sinusnega PŠM

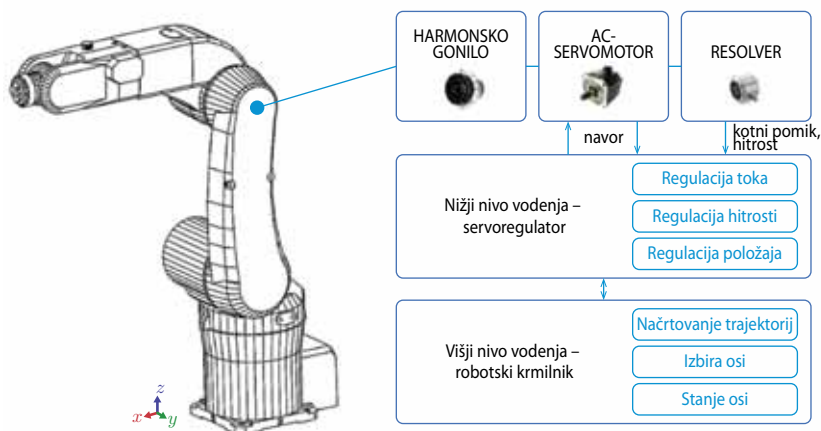


Slika 105: Časovni potek proženja tranzistorjev

Če vodimo trifazni motor, uporabljamo tri enote; razlika je v tem, da so izhodni napetostni signali zamaknjeni za 120 električnih stopinj. Pri trifaznem izmeničnem asinhronskem motorju vplivamo na spremembo smeri vrtenja tako, da zamenjamo med seboj dve fazi; v tem primeru to opravi elektronsko vezje, ki zamakne določeno fazo za 120 električnih stopinj. Če poznamo enačbo za vrtljaje  $n = \frac{60 \cdot f}{p} (1 - s)$  izmeničnega asinhronskega motorja, lahko ugotovimo, da na hitrost vrtenja vplivamo s spremembo frekvence napajalne napetosti  $f$  ali s številom polovih parov na statorju  $p$ . Običajno uporabljamo elektronske naprave, t. i. frekvenčne pretvornike. Po Sliki 101 ugotovimo, da lahko na izhodno frekvenco vplivamo tudi s spremembo širine trikotnega žagastega signala ( $U_{\text{žaga}}$ ). Omenjeni koncept je podlaga za vodenje trifaznih AC-servomotorjev, uporabljenih za pomik osi v robotskih mehanizmih. Če ima robotski mehanizem šest osi, je treba za pomikanje teh osi šest asinhronskih AC-servomotorjev. Ker vrh robotskega mehanizma manipuliramo v prostoru, se morajo posamezne osi premikati v smeri rotacij  $+/-$ , kar dosežemo z omenjenim servoregulatorjem. Ker potrebujemo informacijo o trenutnem kotnem pomiku osi ter informacijo o navoru na posameznem pogonskem motorju, bomo v naslednjem poglavju predstavili način njihove meritve. Ker motor ne more biti direktno povezan z osjo robotskega mehanizma, bomo spoznali tudi gonila, uporabljena v robotskih mehanizmih.

## Meritev kotnega pomika in hitrosti vrtenja na gredi AC-servomotorja

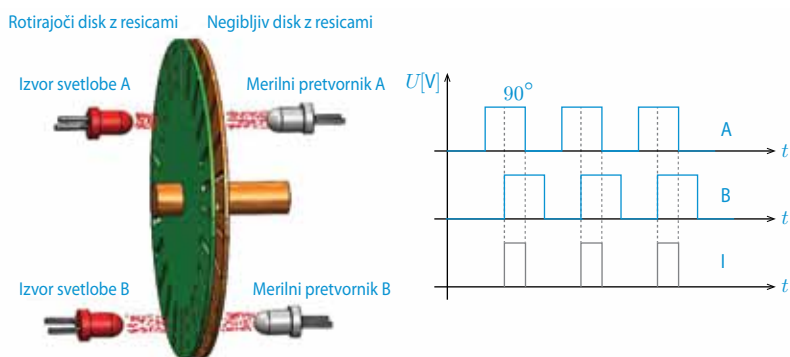
V sistemih servoregulatorjev poznamo različne načine meritve kotnega pomika in hitrosti na gredi servomotorja. Uporabljeni so lahko optični inkrementalni dajalniki stanja oz. enkoderji, absolutni dajalniki stanja ter resolverji. V industrijskih robotskih mehanizmih se zaradi robustnosti običajno uporabljajo resolverji, v ostalih robotskih sistemih pa preostali dajalniki stanja.



Slika 106: Koncept vodenja osi robotskega mehanizma

## Optični inkrementalni dajalnik stanja

Optični inkrementalni dajalnik stanja je merilni pretvornik, ki je pritrjen na gred električnega motorja in omogoča meritev linearnega in kotnega pomika ter hitrost pomika/vrtenja. Informacijo potrebujemo pri servoregulacijskih sistemih za regulacijo kotnega pomika in hitrosti reguliranih sistemov. Optični inkrementalni dajalniki položaja so relativno ugodni pripomočki za merjenje rotacijskega in linearnega pomika. Zgrajeni so iz diska z režami, izvora svetlobe, in na drugi strani fotodetektorja, ki pretvarja svetlobne pulze v napetostni signal (izhodni pulzi) glede na skozi reže prepuščeno svetlobo. Fotodetektor je običajno fototranzistor ali fotodioda. Števec šteje generirane pulze, ki pomenijo določen kot pomika gredi motorja. Disk z režami ima lahko od 500 do več 10.000 resic, kar pomeni resolucijo enkoderja in natančnost vodenja. Kot primer lahko vzamemo enostavni optični enkoder s 500 resicami, kar pomeni 500 pulzov na obrat gredi motorja. Ker je en obrat 360 kotnih stopinj, lahko to vrednost razdelimo na 500 enot.



Slika 107: Koncept delovanja optičnega inkrementalnega dajalnika stanja

Ugotovimo, da lahko v tem primeru pogon vodimo na 360/500 kotnih stopinj natančno oziroma 0,72. V robotskih sistemih se uporabljajo zelo natančni merilniki z več 10.000 resic na obrat gredi predvsem zaradi natančnosti vodenja (to je le eden izmed pogojev). Krmilna elektronika generira na izhodu vsaj tri vrednosti –



Slika 108: Optični inkrementalni dajalnik stanja

signal A, signal B in referenčni signal I. Izhodna signala A in B sta fazno zamaknjena zaradi ugotavljanja smeri vrtenja diska in posledično zaznavanja smeri vrtenja pogonskega motorja. Če se signal A generira pred signalom B iz logične »0« na logično »1«, govorimo o pozitivni smeri gibanja, in obratno, ko je na izhodu signal B pred izhodnim signalom A. Krmilna elektronika, ki ugotavlja smer gibanja, daje signal digitalnemu števcu pulzov, ki pulze prišteva (pozitivna smer vrtenja) in odšteva (negativna smer vrtenja). Na ta način lahko merimo kot zasuka na +\ -1 kvant (resica, pulz) informacije natančno.

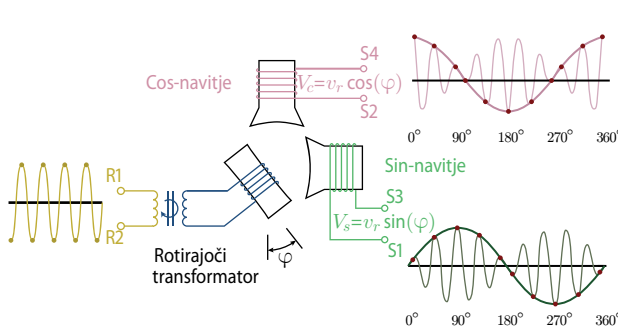
Poznamo tudi **absolutne dajalnike položaja**, ki generirajo na izhodu absolutno vrednost kotnega pomika v primerjavi z optičnim inkrementalnim dajalnikom in merijo le relativni položaj glede na referenčni signal (ob izpadu električne energije se števec pulzov briše). Poznamo absolutne dajalnike, namenjene meritvi enega zasuka, in dajalnike za več vrtljajev. Prednost absolutnega dajalnika položaja je predvsem informacija o položaju ob izpadih električne energije. Rotirajoči diski so kodirani v več nivojih z binarno ali Grayevo kodo. Poznamo tudi enkoderje, pri katerih je rotirajoči disk na enem nivoju kodiran absolutno, na drugem nivoju pa inkrementalno.

## Resolver

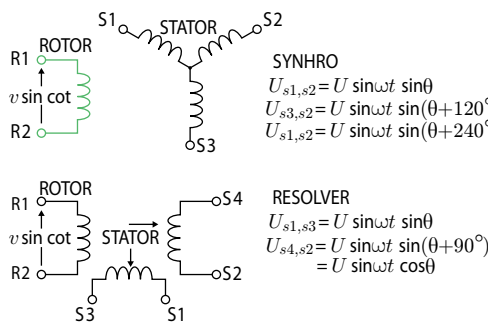
Resolver je zgrajen iz rotorskega navitja (rotirajoči transformator) in statorskih navitij. Naprava z dvema statorskima navitjema se imenuje resolver, s tremi navitji pa sinhro. Resolver ima eno rotorsko navitje in dve statorski navitji, ki generirajo dvojice za 90 stopinj električno premaknjenih sinusnih signalov.



Slika 109: Resolver v osi A3 industrijskega robota



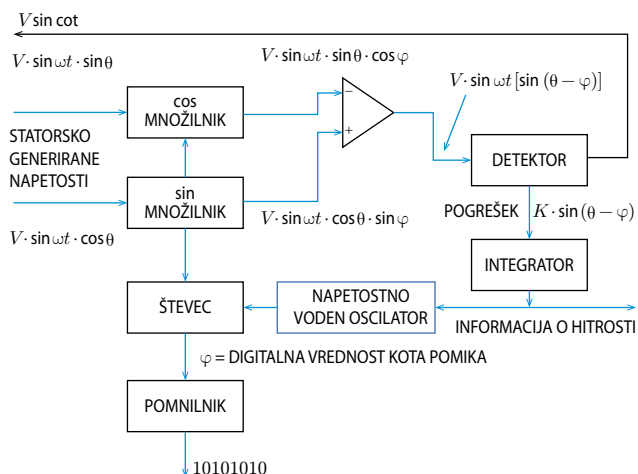
Slika 110: Izhodna napetost resolverja



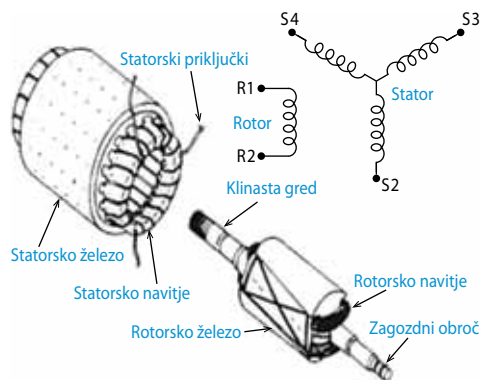
Slika 111: Izhodna napetost sinhro in resolverja

Pri sinhru navitja generirajo tri sinusne signale, ki so zamaknjeni za 120 električnih stopinj. Navitje rotorja je vzbujano z referenčno AC-napetostjo in frekvenco 60 Hz ali 400 Hz. Napetost, inducirana

na statorskih navitjih, je proporcionalna kosinusu med osjo rotorskega navitja in osjo statorskega navitja. Krmilna elektronika resolverja pretvori sinusno generirane signale v digitalno vrednost (pulze), namenjeno vodenju električnega pogona.



Slika 112: Izhodna napetost resolverja



Slika 113: Zgradba sinhro resolverja

Resolver se običajno uporablja za temperature, nižje od  $-40\text{ °C}$ , in temperature, višje od  $100\text{ °C}$ . Amplituda izhodne napetosti znaša od 2 V do 40 V. Kotna natančnost znaša od 5 do 0,5 kotnih minut (1 kotna minuta = 0,0157 kotnih stopinj). Prednost resolverja pred optičnim enkoderjem je predvsem večja robustnost, manjša občutljivost na ekstremne temperature in merjenje položaja. Zato je najpogostejši merilnik kotnega pomika in hitrosti v industrijskih robotskih mehanizmih. Optični enkoder ni dovolj robusten zaradi svoje konstrukcije (stekleni disk), zato se uporablja v preostalih sistemih avtomatizacije in robotike.



Slika 114: Resolver v osi robotskega mehanizma



Slika 115: Resolver

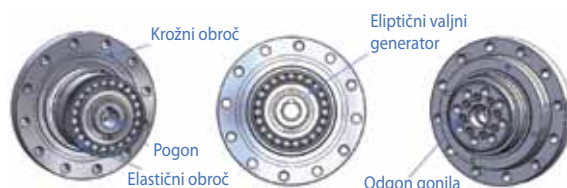




## Gonila in prenosniki v robotskih mehanizmih

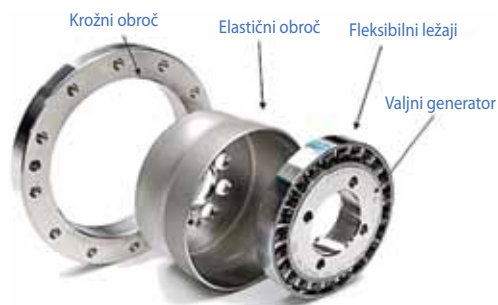
Gred električnega servopogona je običajno direktno povezana z osjo robotskega mehanizma. V tem primeru govorimo o direktno gnanih robotskih mehanizmih, ki pa so v praksi precej redki. Med gredjo servopogona in osjo je nameščeno gonilo, ki v osnovnem konceptu zniža vrtljaje in poveča navor. Poznamo različna gonila, ki se uporabljajo v robotskih mehanizmih. Uporaba je odvisna predvsem od vrste, velikosti in namembnosti industrijskega robota. Najpogosteje uporabljeno gonilo je harmonsko gonilo (zaradi svojih dobrih lastnosti), uporabljajo se tudi različni prenosi z zobatimi jermeni, kotna gonila, planetna gonila in ostala gonila.

### Harmsko gonilo



Slika 118: Konceptualna konstrukcija harmonskega gonila

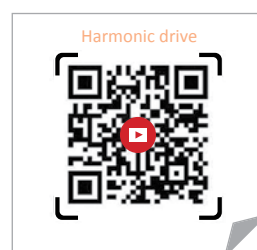
Najpogosteje uporabljeno gonilo v pogonih robotskih mehanizmov je harmonsko gonilo, ker ima dobre tehnološke karakteristike, kot so visoka vzvojna togost, zmožnost prenosa velikih vrtilnih momentov in prestavna razmerja 50 : 1 do 320 : 1. Harmsko gonilo je zgrajeno iz štirih osnovnih komponent: valjnega generatorja, fleksibilnih ležajev, zunanjega elastičnega obroča in krožnega obroča (Slika 119). Harmsko gonilo deluje kot



Slika 119: Segmenti harmonskega gonila

valjni generator, pri katerem se fleksibilni prestavni zobnik elastično deformira. Ta deformacija se prenaša na toge zobnike krožnega obroča in tako omogoča prenos gibanja in navora. Notranji zobnik oziroma eliptični valjni generator kot pogonski del s krogličnim ležajem preoblikuje elastični nazobčani obroč tako, da je vpet z notranjim ozobjem, ki se nahaja na krožnem obroču. Elastični obroč ima dva zoba manj kot krožni obroč, zato je pri polovici vrtljaja valjnega generatorja opravljeno relativno gibanje med elastičnim in krožnim obročem za velikost enega zoba, pri celem vrtljaju pa za velikost dveh zob. Harmsko gonilo zaradi stika z ozobjem nima zračnosti. Prestavno razmerje harmonskega gonila izračunamo s formulacijo:

$$PR = \frac{\text{št. zob elastičnega obroča} - \text{št. zob krožnega obroča}}{\text{št. zob elastičnega obroča}}$$



## Ostala gonila

Harmonsko gonilo je uporabljeno predvsem pri oseh A1, A2 in A3. Na oseh A4, A5 in A6 so prenosi običajno zahtevnejši, razdalja od pogonskega motorja do osi je lahko daljša, hkrati pa gibanje v zadnjih treh oseh omogoča orientacijo vrha robotskega mehanizma. Odvisno je tudi od namembnosti in uporabe robotskega mehanizma. Na Sliki 120 je prenos v osi A4 izveden z zobnikoma s prestavnim razmerjem in zobatim jermenom (vpliv na elastičnost jermena vpliva na togost mehanizma).



Slika 120: Zobniški prenos z zobatim jermenom

Na Sliki 121 je planetno gonilo in zobniški prenos, na Sliki 122 pa je prikazan kotni prenos z zobatim jermenom.



Slika 121: Planetno gonilo in zobniški prenos



Slika 122: Kotni prenos z zobatim jermenom

Na Sliki 122 vidimo kotni zobniški prenos, na Sliki 123 pa primer prenosa navora zadnjih treh pogonskih elektromotorjev na oseh A4, A5 in A6.



Slika 123: Kotni zobniški prenos



Slika 124: Prenos pogonskih motorjev na A4, A5, A6

Primeri gonil





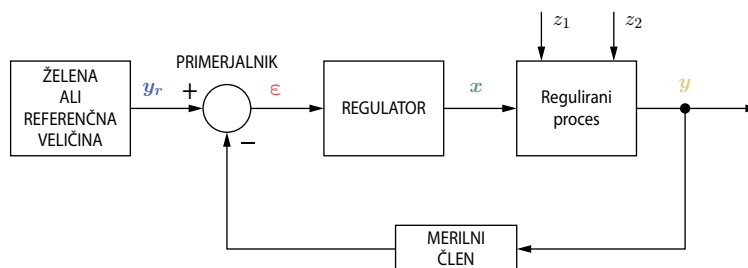
*Age quod agis – "Delaj, kar delaš", v pomenu "To, kar delaš, delaj dobro" ali "Bodi zavzet pri tem, kar počneš"*

*Latinski pregovor*



# REGULACIJA POGONA ROBOTSKEGA MEHANIZMA

Industrijski robotski mehanizmi imajo običajno šest osi. To pomeni, da je v mehanizmih šest pogonskih električnih servomotorjev, ki pretvarjajo električno energijo v mehansko delo in omogočajo rotacijo – pomik posameznih osi. Kot smo omenili, merimo na vsaki osi kotni pomik, kotno hitrost in navor. To so nujne povratne informacije za regulacijo pogona robotskega mehanizma. Potrebujemo torej regulacijski sistem, namenjen regulaciji poti, hitrosti in navora na vrhu orodja robotskega mehanizma (TCP). Industrijskega robota z učnim panelom vodimo v kartezičnem koordinatnem sistemu v različnih izbranih koordinatnih sistemih (#BASE, #AXIS, #TOOL, #WORLD). Zaradi vpliva zunanjih motenj (vztrajnost mehanizma, masa mehanizma, zunanje sile) moramo zagotoviti regulacijo poti vrha robotskega mehanizma. Ker se TCP v prostoru pomika z določeno izbrano in nastavljeno hitrostjo, mora regulacijski sistem regulirati tudi hitrost gibanja. Mehanizem in orodje imata določeno maso, zato potrebujeta za premikanje navor, ki ga je treba prav tako regulirati.



$y_r$  - zelena vrednost

$x$  - regulirana veličina

$\epsilon$  - regulacijska napaka

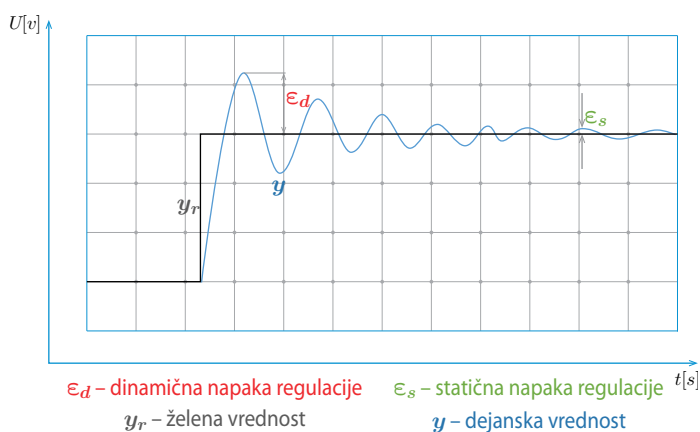
$y$  - regulirana veličina

$z_1, z_2$  - zunanji vplivi, motnje

Slika 125: Regulacijska zanka

Regulacija je povratno-zančno vodenje procesa, pri katerem vplivamo na proces tako, da se regulirane veličine čim bolj ujemajo z referenčnimi (želenimi) vrednostmi. Pri tem je treba upoštevati tudi motnje, ki vplivajo na regulirani proces. Poznamo enozančne in večznančne regulacijske sisteme. Pri enozančnem sistemu merimo samo eno dejansko izhodno veličino in jo prek povratne zanke primerjamo z želeno vrednostjo. Regulacijska napaka je informacija za regulator, ki se odzove in poskuša napako popraviti. Primer enostavnega sistema je regulacija temperature ogrevanja, kjer govorimo o dvopoložajni regulaciji (*on/off*). Termostat v prostoru je v tem primeru merilni člen, ki meri dejansko temperaturo, v vlogi regulatorja pa temperaturo primerja z nastavljeno in vklopi črpalko v sistemu ogrevanja, ko je to potrebno. Govorimo o počasnem odzivu regulacijskega sistema in nedinamični regulaciji. V robotskem sistemu mora biti regulacijski sistem dinamičen in se hitro odzivati na zunanje motnje. Regulacijska proga je sestavljena iz direktne veje, v kateri sta regulator in regulirani proces, ter negativne povratne vezave, v katero je vključen merilni člen. Merilni člen meri vrednost dejanske regulirane količine. Primerjalnik odšteje izmerjeno vrednost od zelene vrednosti. Rezultat je regulacijska napaka  $\epsilon$ . Vrednost regulacijske napake se posreduje regulatorju, ki spremeni regulirano veličino na želeno vrednost tako dolgo, da se regulacijska napaka zmanjša ali popol-

noma odpravi. Z regulacijo torej poskušamo odpraviti zunanje vplive oziroma motnje, ki vplivajo na regulirano količino. Sistemi, ki sestavljajo regulacijsko progo, imajo časovne konstante (npr. časovna konstanta segrevanja prostora, mehanske vztrajnosti ventila, vzmeti idr.), zaradi česar ne morejo delovati neskončno hitro. Motnja torej traja nek časovni interval, posledično traja določen čas, da regulirana količina doseže želeno stanje. Na Sliki 126 vidimo primer stopničnega odziva regulacijske zanke. Stopnica oziroma prehod od vrednosti nič na želeno vrednost oziroma referenca  $y_r$  nam podaja želeno vrednost, ki jo izberemo ali nastavimo (npr. želena hitrost, želeni pomik in drugo). Odziv sistema zaradi vztrajnosti ne more slediti želeni vrednosti, zato se z določeno dinamiko odzove in sledi želeni vrednosti. Hitrost odziva je odvisna od dinamike regulacije. Zaradi vztrajnosti sistema sistem zaniha čez želeno vrednost – pojavu pravimo prenihaj oziroma dinamična napaka  $\epsilon_d$ . Večja kot je dinamika sistema oziroma hitrost odziva, večja je dinamična napaka. Regulacijski sistem v povratni zanki izmeri (tipalo dejanske vrednosti) in izračuna (primerjalno električno vezje) regulacijsko napako ter regulira izhodno vrednost, ki niha okoli nastavitvene vrednosti želene vrednosti. Nihanju okoli nastavitvene vrednosti želene vrednosti pravimo statična napaka regulacije  $\epsilon_s$ . Poznamo različne vrste regulatorjev. Večinoma jih delimo na analogne in diskretne (digitalne), delimo pa jih lahko tudi glede na izvedbo (enopoložajni, dvupoložajni, tropoložajni) ali način delovanja (P, PI, PD, PID, Fuzzy, nevronske, na podlagi genetskih algoritmov in drugi). V sistemih regulacije električnih pogonov robotskih pogonov je običajno uporabljen PID-regulator.



Slika 126: Regulacijska zanka – stopnični odziv

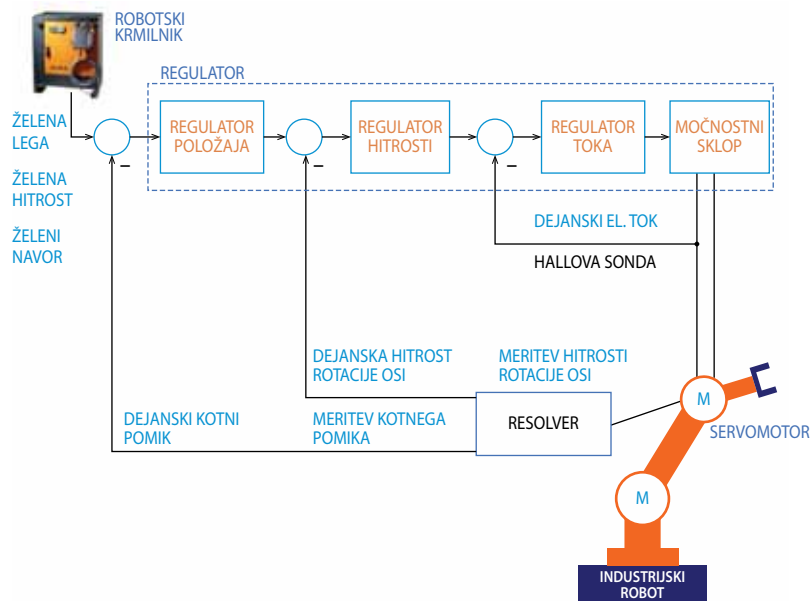
Regulator skupaj s povratno zanko zagotavlja:

- da dejanska vrednost sledi želeni,
- odpravljanje motenj,
- stabilnost regulacijskega sistema,
- želeno dinamiko regulacijskega sistema.

PID-regulatorju je mogoče nastaviti parametre  $P$  ( $K_p$  – ojačanje, vpliv na dinamiko sistema in velikost prenihaja),  $I$  ( $K_i$  – integralni sklop, vpliv na zmanjšanje statičnega pogreška) in  $D$  ( $K_d$  – diferencialni sklop, vpliv na zmanjšanje prenihaja). Parametre nastavimo z metodo poskušanja, metodami Ziegles-Nichols, KLK-metodo, Bodejevo metodo in drugo.

V primeru večzračnega sistema merimo več izhodnih vrednosti in jih nato reguliramo. Takšen sistem imenujemo kaskadna regulacija. Pri vodenju robota ni dovolj samo vodenje položaja posamezne osi. Robotu namreč poleg trajektorije nastavljam tudi hitrost gibanja. Zato moramo regulirati tudi hitrost posamezne osi. Ker vrh robota obremenimo z različnimi masami, ki se gibljejo z določeno regulirano hitrostjo, moramo meriti tudi tok, ki teče v pogonski motor. Posredno lahko iz meritve

toka izračunamo moment mehanizma. Industrijski robot ima v ta namen robotski krmilnik, v katerem se nahaja tudi servoregulator za posamezno os. Naloga servoregulatorja je regulacija tokov in/ali hitrosti za motorje posameznih robotskih osi. Običajno je položajna regulacija zasnovana kot trojna kaskadna regulacija z notranjo hitrostno zanko, znotraj katere se nahaja še tokovna regulacija. Položajna regulacija je digitalna (pulzi), hitrostna in tokovna zanka pa sta analogni. Potrebni senzori pri takšnem krmilju so merilnik toka, merilnik kotne hitrosti (resolver) in merilnik kotnega položaja (resolver). Pri načrtovanju trajektorije gibanja vrha industrijskega robota (TCP) je treba nastaviti referenčno želeno vrednost položaja, hitrosti in pospeška. Pri tem moramo upoštevati mehanske omejitve posamezne osi. Če ima robotski mehanizem šest osi, pomeni, da je treba zagotoviti merjenje 18 informacij in jih v zanki neprestano primerjati, računati in regulirati. Vodenje osi pomeni vodenje električnega motorja, na katerega je nameščeno harmonsko gonilo. Robotski krmilnik mora pri izračunu vodenja na podlagi matematičnega modela robotskega mehanizma upoštevati tudi prestavna razmerja gonil na posamezni osi. Gonilo zniža prenosno hitrost in poveča izhodni moment na os mehanizma. Mehanska moč mehanizma se pri tem ne spremeni. Glede na dinamični model robotovega sklepa lahko ugotovimo, da ima robotski mehanizem spremenljivi masni vztrajnostni moment  $J$  in koeficient viskoznega trenja  $B$ , kar je posledica trenja in vpliva sile teže. Pomembne fizikalne količine pri vodenju robota so torej položaj, hitrost in navor, regulacijo teh pa zagotovimo s servoregulatorjem.



Slika 127: Koncept kaskadne regulacije pogona robotskega mehanizma





PONOVITEV, NALOGE IN IZZIVI

1. Izvedite preprosto PWM-vezavo z integriranim vezjem NE555. Opazujte izhodni signal na osciloskopu.
2. Izdelajte preprost optični enkoder. Uporabite LED-diodo, fototranzistor in rotirajoči disk, ki ga izdelate iz kartona. Disk pritrdite na gred DC-motorja.
3. Katere vrste regulacij poznate?



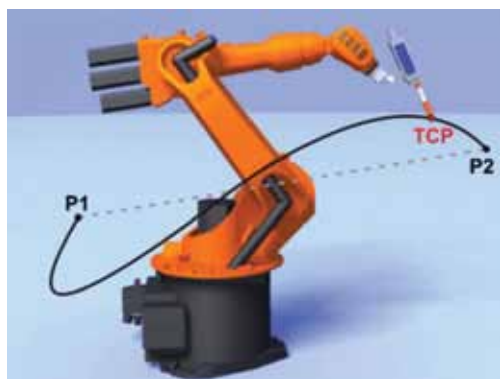
*Znanje nas osvobaja in nam daje mesto na svetu.*

*Heraklit*

```
1 DEF osnovni_gibi()  
2 INI  
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : robot_pleše  
4 loop  
5 robot_pleše ()  
6 if (super_ples = TRUE) then  
7 plesni_gib=plesni_gib+1  
8 exit  
9 else  
10 robot_počiva ()  
11 endif  
12 endloop  
13 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Uporabnik [2] : robot_počitek  
14 END
```

# VRSTE GIBOV ROBOTSKIH MEHANIZMOV

Upravljanje in programiranje industrijskega robota običajno poteka s pomočjo učne enote (angl. *teach pendant*). Poleg tega je mogoče uporabiti osebni računalnik in programska orodja za indirektno programiranje ter prenos konfiguracije in programov na robotski krmilnik. Poznamo tri osnovne gibe industrijskih robotskih mehanizmov, obstajajo pa še določene izvedenke osnovnih gibov (odvisno od proizvajalca). Pri posameznih proizvajalcih industrijskih robotov se uporablja različna sintaksa programiranja osnovnih gibov.



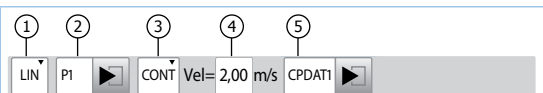
Slika 128: PTP-gib robotskega mehanizma

PTP (angl. *Pose to Pose*) pomeni gib od poze do poze v prostoru z vrhom orodja robotskega mehanizma po najkrajši in najhitrejši trajektoriji gibanja. Robot si v tem primeru sam izračuna trajektorijo gibanja na podlagi matematičnega modela mehanizma. Ker so vse osi rotacijske, običajno gibanje PTP opiše gibanje TCP po krivulji. Gib PTP je po navadi prvi gib iz domače (*Home*) lege v prvo prostorsko točko aplikacije. Pri gibu PTP je potrebna pazljivost, gibanje namreč aproksimira robot sam in zato lahko pride do kolizije z ovirami v delovnem prostoru robota. Hitrost je pri

gibu PTP relativna in izražena procentualno ( $v = \%$ ). Na Sliki 128 vidimo grafični vmesnik programiranja trajektorije PTP. Osnovno programiranje v načinu programiranja *Teach in* poteka tako, da s pomočjo učnega panela najprej določimo izhodiščno pozo robotskega mehanizma (*Home point, Location 1*). Nato robotski mehanizem premaknemo v zeleno prostorsko pozo in opravimo proceduro programiranja.

## KUKA – PROGRAMIRANJE TRAJEKTORIJE PTP

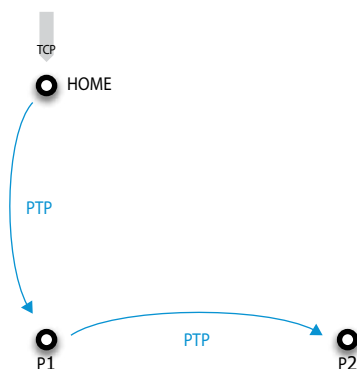
1. ROČNO SE POSTAVIMO SE V PROSTORSKO TOČKO P2.
2. IZBEREMO UKAZ **MOTION**.
3. IZBEREMO TIP GIBANJA:



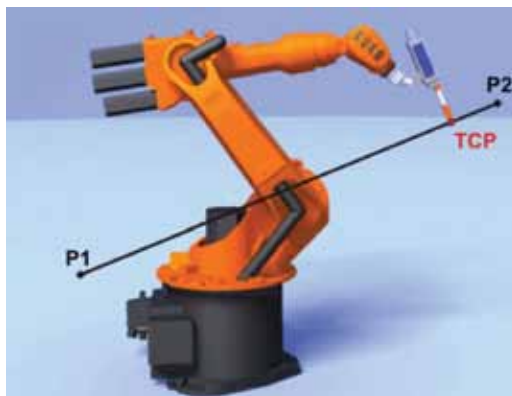
- 1 - Izbior gibanja PTP
- 2 - Ime končne točke
- 3 - Aproksimacijsko gibanje (CONT – aproksimacija)
- 4 - Hitrost gibanja (1...100 %)
- 5 - Ime podatkovne baze z izbranimi parametri

Slika 129: Kuka - Programiranje PTP trajektorije

4. PRITISNEMO **TOUCH UP** – SHRANITEV INFORMACIJE PROSTORSKE TOČKE V KOORDINATNEM SISTEMU.
5. POTRDIMO UKAZ S PRITISKOM NA **CMD OK**.



Ukaz za linearno trajektorijo imenujemo LIN. Linearno gibanje je zvezno gibanje v ravnini, hitrost je določena absolutno v m/s. Linearni gib ima določen trapezni profil hitrosti. Linearni gib uporabljamo v aplikacijah, pri katerih je treba natančno definirati pot trajektorije vrha orodja robota, natančno pa definiramo tudi hitrost gibanja v m/s (npr. varjenje z robotom).



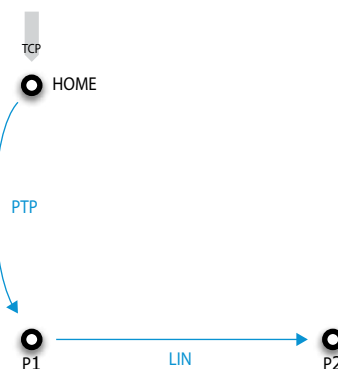
Slika 130: LIN trajektorija robotskega mehanizma

### KUKA – PROGRAMIRANJE TRAJEKTORIJE LIN

1. ROČNO SE POSTAVIMO SE V PROSTORSKO TOČKO P2.
2. IZBEREMO UKAZ **MOTION**.
3. IZBEREMO TIP GIBANJA:

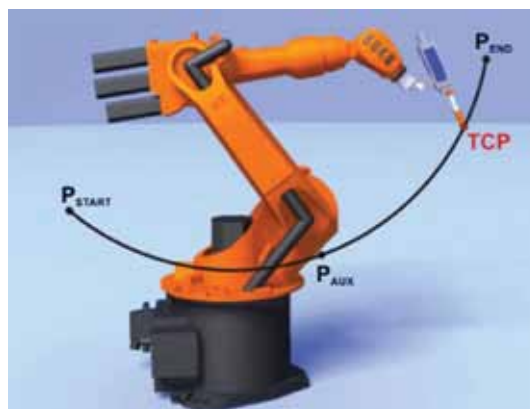
1 - Izbor gibanja LIN  
 2 - Ime končne točke  
 3 - Aproksimacijsko gibanje (CONT – aproksimacija)  
 4 - Hitrost gibanja (0.001–2 m/s)  
 5 - Ime podatkovne baze iz izbranimi parametri

*Slika 131: Grafični vmesnik LIN trajektorije*



4. PRITISNEMO **TOUCH UP** – SHRANITEV INFORMACIJE PROSTORSKE TOČKE V KOORDINATNEM SISTEMU.
5. POTRDIMO UKAZ S PRITISKOM NA **CMD OK**.

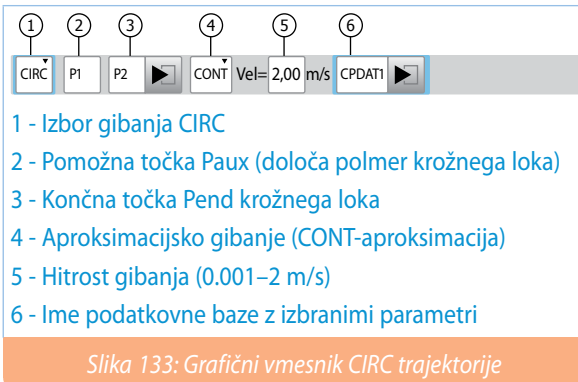
Ukaz za gibanje po trajektoriji krožnega loka imenujemo gib CIRC. Krožno gibanje robotskega mehanizma TCP programiramo v dveh delih. Določiti moramo radij krožnega loka oz. pomožno točko (angl. *AUX point*) ter končno točko (angl. *END point*) v delovnem prostoru robotskega mehanizma. Robotski krmilnik glede na matematični model aproksimira trajektorijo med omenjenima točkama po trajektoriji krožnega loka. Krožni gib CIRC ima absolutno definirano hitrost v m/s.



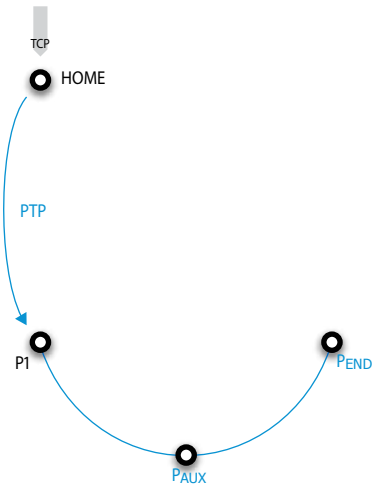
Slika 132: Trajektorija CIRC robotskega mehanizma

## KUKA – PROGRAMIRANJE TRAJEKTORIJE CIRC

1. ROČNO SE POSTAVIMO V PROSTORSKO TOČKO P1.
2. IZBEREMO UKAZ **MOTION**.
3. IZBEREMO TIP GIBANJA:

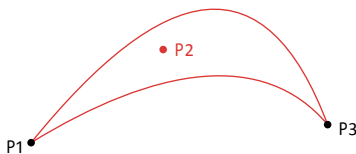


Slika 133: Grafični vmesnik CIRC trajektorije

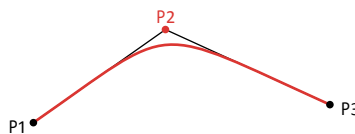


4. ROČNO SE POSTAVIMO V POMOŽNO TOČKO P<sub>AUX</sub>.
5. IZBEREMO UKAZ **Teach Aux**.
6. ROČNO SE POSTAVIMO V POMOŽNO TOČKO P<sub>END</sub>.
7. IZBEREMO UKAZ **Teach End**.

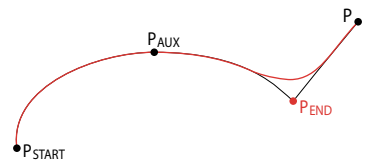
Če želimo zmanjšati uporabo procesorske moči in delovnega pomnilnika robotskega krmilnika, lahko izberemo približek gibanja oziroma aproksimacijo (CONT, gibanje ni izbrano). To pomeni, da je gibanje v določenih trajektorijah samo približno, aproksimacija se uporablja v aplikacijah, kjer ni potrebna absolutna trajektorija gibanja (npr. zlaganje vreč cementa). Aproksimacija posameznih osnovnih trajektorij je prikazana na Slikah 134, 135 in 136.



Slika 134: Aproksimacija – CONT PTP-giba

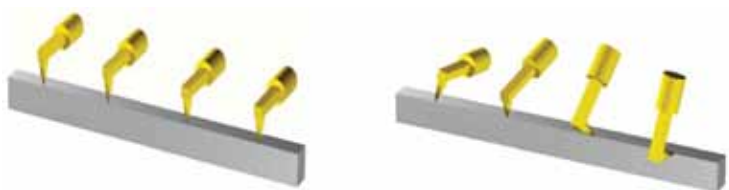


Slika 135: Aproksimacija – CONT LIN-giba



Slika 136: Aproksimacija – CONT CIRC-giba

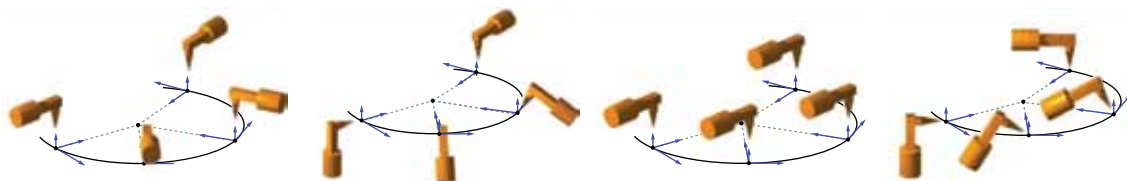
Pri programiranju trajektorij gibanja je pomembna tudi orientacija orodja. Na Sliki 137 vidimo konstantno in standardno orientacijo orodja industrijskega robota.



Slika 137: Levo – konstantna orientacija orodja, desno – standardna orientacija orodja



Na Sliki 138 so prikazane različne orientacije, s katerimi lahko izberemo referenčno pot ali bazni sistem.



Slika 138: Levo – konstantna orientacija – pot, spremenljiva orientacija – pot, konstantna orientacija – bazni sistem, spremenljiva orientacija – pot

## Sintaksa programiranja industrijskega robota KUKA

```

1 DEF program() // Ime programa
2 INI // Začetna inicializacija industrijskega robota
3 PTP HOME Vel= 100 % DEFAULT // PTP trajektorija v izhodiščno lego (v=100%)
4 PTP P1 Vel= 70 % CPDAT1 Tool[3] Base[4] // PTP trajektorija v točko P1
  (v=70%)
5 LIN P2 Vel= 2 m/s PDAT1 Tool[3] Base[4] // LIN trajektorija v točko P2 (v=2
  m/s)
6 CIRC P3 P4 Vel= 1 m/s PDAT1 Tool[3] Base[4] // CIRC trajektorija v točko
  P2 (v=1 m/s)
7 PTP HOME Vel= 100 % DEFAULT // PTP trajektorija v izhodiščno lego (v=100%)
8 END // Konec programa

```

## Sintaksa programiranja industrijskega robota ABB

```

1 PROC main() //Glavni program
2 SetDO ABB_Scalable_IO_0_D01, 0; // Digitalni izhod na logično 0
3 SetDO ABB_Scalable_IO_0_D02, 1; // Digitalni izhod na logično 1
4 WaitTime 1; // Počakaj 1 s
5 MoveJ Location31, v200, fine, tool0; //Hitri gib po najbližji trajektoriji
  (v=2 m/s)
6 MoveJ Location33, v200, fine, tool0;
7 MoveJ Location32, v200, fine, tool0;
8 SetDO ABB_Scalable_IO_0_D02, 0;
9 SetDO ABB_Scalable_IO_0_D01, 1;
10 WaitTime 0.5;
11 ENDPROC
12 ENDMODULE

```

## Sintaksa programiranja industrijskega robota FANUC

```

1: UTOOL_NUM(GP1)=1 // Nastavitev orodja
2: UFRAME_NUM(GP1)00 // Nastavitev koordinatnega sistema
3: @P(1) 100% CNT25 // Aproksimiran gib v točko P1 s hitrostjo 100%
4: P(2) 100% FINE // Gib v točko P1 s hitrostjo 100%
5: P(3) 2000mm/sec FINE // Linearni gib v točko P1 s hitrostjo 2 m/s
6: ! Pickup ('A03932 Bat cilindra') // Sintaksa za prijemalo
7: WAIT 0.5 (sec) // Počakaj 0.5 s
8: P(4) 2000mm/sec FINE
9: @P(5) 100% FINE
10:P(6) 2000mm/sec FINE
11:P(7) 2000mm/sec FINE
    
```

## Učne enote industrijskih robotov

Učne enote (angl. *teach pendant*, *smart pad*) se uporabljajo za ročno vodenje, konfiguracijo, programiranje in izbiranje različnih parametrov industrijskih robotov. V določenih primerih so jih danes začeli nadomeščati tablični računalniki. Učni panel je z robotskim krmilnikom običajno povezan s kabelsko oklopljeno povezavo predvsem zaradi zagotavljanja zanesljivosti in robustnosti.

Na Sliki 139 so učni paneli različnih proizvajalcev industrijskih robotov. Vse enote so ergonomsko oblikovane za ročno upravljanje robotskih mehanizmov.



Slika 139: Učni paneli različnih proizvajalcev industrijskih robotov

Vodenje robota ABB



Vodenje robota FANUC



Vodenje robota Yaskawa



Vodenje robota Kuka



Na Sliki 140 so prikazane komponente učne enote. Najpomembnejša je »Izklop v sili« (nem. *Not aus*, angl. *Emergency stop*), ki omogoča zaustavitev industrijskega robota v nevarnih okoliščinah (stisk ali poškodba delavca, kolizija z okolico idr.). Za premikanje robotskega mehanizma moramo s prsti aktivirati »Omogočitev pogona« (*Drive enable*), ki omogoči električne servopogone. Če tipko spustimo ali pritisnemo do naslednjega zaskoka, se robot ustavi. Tudi to je varnostna funkcija v primerih nevarnih situacij.



Slika 140: Kuka SmartPad

Pomembna je tudi izbira režima delovanja. T1 je testni režim 1 (omejena hitrost gibanja v ročnem načinu vodenja, pogoj je stikalo »Omogočitev pogona«). T2 je testni režim 2 (dejanska hitrost gibanja v ročnem načinu vodenja, pogoj je stikalo »Omogočitev pogona«).

AUT pomeni avtomatski režim delovanja (dejanska hitrost, »Omogočitev pogona« ni pogoj, pogoj so ostale varnostne funkcije, stikalo na ograji celice, 2D-skener ni aktiven idr.). AUT EXT je avtomatski zunanji režim delovanja, kjer so pogoji enaki kot pri AUT-režimu, v tem primeru program robota aktiviramo prek zunanjih enot (tipka, zaslon na dotik). Novejši učni paneli imajo običajno zaslone na dotik in omogočajo interakcijo prek zaslona. Večina učnih panelov omogoča več načinov ročnega vodenja. Prva možnost je vodenje s tipkami, namenjenimi vodenju robota. Druga možnost so različne izvedenke 6D-mišk in kontrolnih palic (angl. *Joystick*), ki omogočajo intuitivnejše vodenje industrijskega robota. Poznamo tudi vodenje robota s silo (angl. *torque mode*), pri čemer robota primemo in vodimo v prostoru, npr. pri aplikacijah barvanja z industrijskimi roboti. Danes to omogoča tudi veja sodelovalnih robotov, ki bodo opisani v posebnem poglavju. Ta način vodenja se imenuje kinestetično vodenje.





*Razvijte strast do učenja. Če to storite, ne boste nikoli več nehali rasti.*

*Anthony J. D'Angelo*



# SIMULIRANJE AKCIJ IN INDIREKTNO PROGRAMIRANJE INDUSTRIJSKIH ROBOTOV

Upravljanje, nastavljanje in programiranje industrijskega robota z učnim panelom imenujemo direktno oziroma *online* programiranje. Druga možnost je indirektno programiranje oziroma *offline* programiranje, pri katerem robotizirane aplikacije simuliramo in programiramo na osebnem računalniku. Na trgu obstaja veliko programskih orodij za simulacijo in indirektno programiranje industrijskih robotov. Prednost učenja programiranja na osebnem računalniku je, da uporabnik ne more povzročiti škode na dejanski fizični opremi. To začne uporabljati, ko obvlada rutine na osebnem računalniku. Drugi vidik je praktičnost uporabe v industrijskih aplikacijah. Kot primer vzemimo robotizirano proizvodno linijo, ki jo določeno projektno podjetje postavlja na Madžarskem. Ker projektno podjetje izhaja iz Slovenije, bi moral programer potovati na Madžarsko, da implementira programe za robote. Ker pa ima možnost programirati indirektno, lahko to opravi na osebnem računalniku v Nemčiji in nato pošlje programe na Madžarsko, kjer drug programer implementira programe na dejanske industrijske robote.

## KUKA SIM PRO, OFFICE LITE, REMOTE PENDANT IN WORKVISUAL

Kuka Sim Pro, Office Lite, Remote Pendant in WorkVisual so programska orodja proizvajalca Kuka. Omogočajo programiranje robota na računalniku brez posega v robotsko aplikacijo med delovanjem. Program nato prenesemo prek USB-medija ali lokalnega omrežja, sledi optimizacija in implementacija.



Slika 141: Kuka Sim Pro

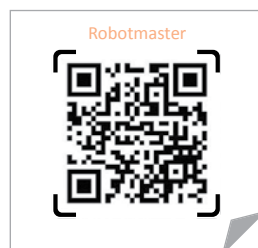


## ROBOTMASTER

Robotmaster je postprocesorsko programsko orodje, namenjeno CAD/CAM-programiranju robotskih aplikacij. Uporablja se za rezkanje, brušenje, barvanje, varjenje idr. Programsko orodje na podlagi 3D-modela generira programske vrstice, namenjene vodenju gibanja robota.



Slika 142: Robotmaster



**ABB ROBOT STUDIO**

Programsko orodje Robot Studio je razvilo podjetje ABB in je namenjeno nastavitvam, simuliranju in indirektnemu programiranju robotov ABB.

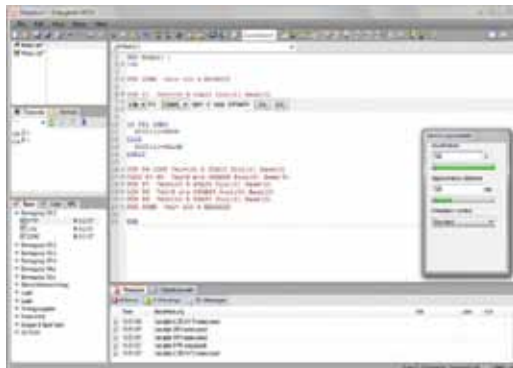


Slika 143: Robot Studio

Robot Studio

**ORANGEEDIT**

Programsko orodje OrangeEdit omogoča urejanje programskega jezika KRL.

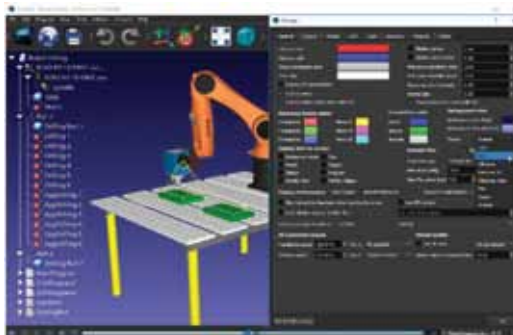


Slika 144: OrangeEdit

OrangeEdit

**ROBO DK**

Programsko orodje RoboDK je simulator industrijskih robotov; namenjen je offline programiranju.



Slika 145: RoboDK

RoboDK

**ROBOTWORKS**

RobotWorks je izdelek podjetja SolidPro in je vtičnik programskega orodja SolidWorks, ki je namenjen konstruiranju 3D-CAD-modelov. RobotWorks uporablja SW-grafični in kinematični vmesnik.



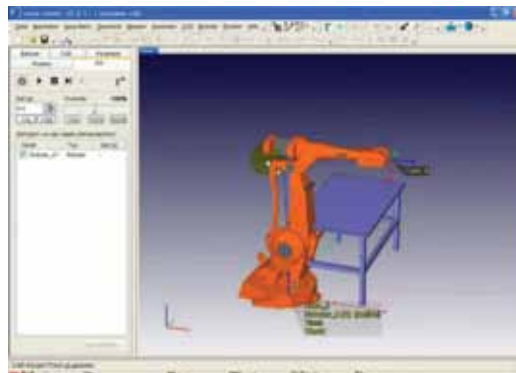
Slika 146: RobotWorks

RobotWorks



### FAMOS ROBOTIC

Famos Robotic je samostojno programsko orodje. Vključuje modele vseh največjih proizvajalcev šestosnih industrijskih robotov: ABB, Motoman, Kuka, Stäubli idr.



Slika 147: Famos Robotic

Famos Robotic



### FACTORY IO

Programsko orodje Factory IO je namenjeno kreiranju simuliranega industrijskega okolja. Oblikujemo in programiramo lahko tudi robotske celice.



Slika 148: Factory IO

Factory IO



### YASKAWA MOTOSIM

Programsko orodje MotoSim je izdelek podjetja Yaskawa in je namenjen *offline* programiranju, 3D-simulacijam in virtualnemu vodenju industrijskih robotov Yaskawa.



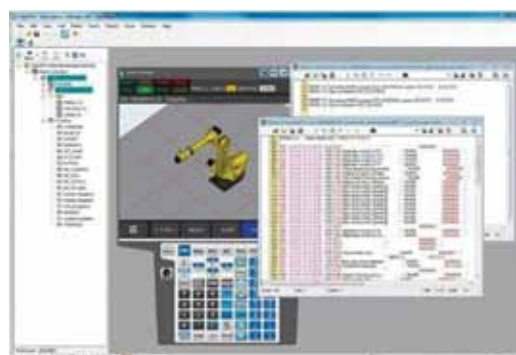
Slika 149: Yaskawa Motosim

Yaskawa Motosim



### FANUC ROBOGUIDE

Programsko orodje Fanuc Roboguide je simulator in *offline* programsko orodje; namenjen je industrijskim robotom proizvajalca Fanuc.



Slika 150: Fanuc RoboGuide

Fanuc RoboGuide







*Izobraževanje je najmočnejše orožje, s katerim lahko spremenite svet.*

*Nelson Mandela*



# PROGRAMSKI JEZIK KRL

KRL je kratica za programski jezik (angl. *Kuka Robot Language*), ki ga uporabljamo pri programiranju industrijskih robotov proizvajalca Kuka.

## *Vhodne in izhodne periferne enote*

**Vhodne periferne enote** so lahko digitalne ali analogne. Nanje priključimo različne senzorje v okolici robota, ki nam omogočajo pogoje za izvedbo nalog industrijskega robota.

Sintaksa: `$IN[št.vhoda]`.

**Izhodne periferne enote** so namenjene komunikaciji z aktuatorji v okolici industrijskega robota.

Sintaksa:

`$OUT[št. izhoda]`

`$OUT[1]=TRUE`

`$OUT[2]=FALSE`

**Pulzni izhod** nam omogoča generiranje pulzov, s katerimi določimo čas trajanja pulza (angl. *high value*)

Sintaksa:

`PULSE($OUT[#],state,time)`.

`PULSE($OUT[1],TRUE,0.5)`.

## *Programske zanke*

### *Pogojni stavek IF*

Pogojni stavek *IF* nam omogoči preverjanje programskega pogoja. Če je pogoj pravilen (*True*), se izvede določena programska akcija, če pa je nepravilen (*False*), se postopek spremeni.

Sintaksa:

*Spremenljivka IF == TRUE THEN*

*Izvedi program, če je pogoj resničen (true).*

**ELSE**

*Izvedi program, če pogoj ni pravilen (false).*

**ENDIF**

Primer:

`IF $IN[2]==TRUE THEN`

*Izvedi akcijo, ko je vhod 2 aktiven (Logična 1).*

**ELSE**

Če vhod ni aktiven (Logična 0), izvedi to proceduro.

ENDIF

Če stavka *ELSE* ne uporabimo, se nič ne zgodi, program samo preskoči na naslednjo funkcijo:

IF \$IN[3]==TRUE THEN

Izvedi akcijo, ko je vhod 2 aktiven (Logična 1).

ENDIF

Pogojni stavek *SWITCH* se uporablja, kadar imamo vnaprej znano spremenljivko in moramo za vsako vrednost izbrati drugo proceduro (npr. pri paletizaciji izdelkov na paleto).

Sintaksa:

Števec SWITCH

CASE 10

Kadar bo spremenljivka 10, bo izvedena določena procedura (npr. gib v točko P1).

CASE 20

Kadar bo spremenljivka 20, bo izvedena določena procedura (npr. gib v točko P2).

CASE 30

Kadar bo spremenljivka 30, bo izvedena določena procedura (npr. gib v točko P3).

DEFAULT

ENDSWITCH

## Zanka FOR

Zanka *FOR* se ponovi  $n$ -krat od začetno določene vrednosti do končno določene vrednosti.

Primer: Imamo zanko, ki se mora ponoviti 10-krat. Korak te zanke pa naj bo 3:

FOR vrednost\_ponavljanja = 1 to 30 STEP 3

V tem stavku se mora neka spremenljivka vrednost\_ponavljanja vsak cikel povečati za 3, če želimo, da se cikel ponovi 10-krat.

ENDFOR

## Zanka WHILE

Zanko *WHILE* uporabljamo za preverjanje stanj vhodov ali števil.

Sintaksa:

WHILE \$IN[1]==TRUE

Zanko izvajamo toliko časa, dokler bo na vhodu 1 vrednost TRUE, potem se zanka zaključi.

`ENDWHILE``UNTIL LOOP``$IN[1]==TRUE`

Sintakso izvajamo tako dolgo, dokler se ne spremeni spremenljivka.

## *REPEAT*

Program se bo ponavljal tako dolgo, dokler ne bo na vhodu 1 vrednost *FALSE*.

`UNTIL $IN[1]==FALSE``DOLOOP`

Neskončna zanka.

`LOOP`

Običajna zanka, ki se uporablja za ponavljajoč program. Je pogoj za avtomatski režim delovanja robota.

`ENDLOOP`

## *Spremenljivke*

V programskem jeziku KRL poznamo dve vrsti spremenljivk:

- Integer (števila brez decimalne vejice, kot so: 1, 50, 120 ...)  
sintaksa: `INT ime_spremenljivke`
- Real (decimalna števila, kot so: 1.28, 334.45 ...)  
sintaksa: `REAL ime_spremenljivke`

## *Logične operacije*

- NOT
- AND
- OR
- EXOR

## *Računske operacije*

- množenje \*
- seštevanje +
- odštevanje -
- deljenje /

## *Preverjanje števil*

- preverjanje, ali sta števili enaki: `==`
- preverjanje, ali sta števili večji/manjši: `<>`

- preverjanje, ali je število večje: <
- preverjanje, ali je število večje ali enako: <=
- preverjanje, ali je število manjše: >
- preverjanje, ali je število manjše ali enako: >=

## Časovniki

Časovniki so programske enote, ki omogočajo programske zakasnitve.

Sintaksa:

```
$TIMER_STOP[1]=FALSE //aktivacija časovnika
```

```
$TIMER_STOP[1]=TRUE // ustavite časovnika
```

```
$TIMER[1]=0 // postavite časovnika na 0
```

## Zakasnitve

**WAIT FOR** je programska zanka, ki omogoča preverjanje/čakanje na logično spremembo stanja določene vhodne enote.

Sintaksa:

```
WAIT FOR $IN[št.vhoda] // Program čaka, dokler ni na vhodu vrednost TRUE.  
    Nato nadaljuje s programsko proceduro.
```

```
WAIT SEC // Program se ustavi za 1 s in potem nadaljuje z izvajanjem.
```

```
WAIT SEC 3.2 // Program se ustavi za 1 s in potem nadaljuje z izvajanjem.
```

```
HALT // Program čaka tako dolgo, dokler ne pride operater do robota in  
    celoten program znova zažene.
```



*Ne učite svojih otrok samo branja. Naučite jih, da se sprašujejo o prebranem. Naučite jih, da se sprašujejo o vsem.*

*George Carlin*



# PRIJEMALA INDUSTRIJSKIH ROBOTOV

Če potegnemo vzporednico med robotskim mehanizmom in človeško roko, lahko ugotovimo, da sta si zelo podobna. Človeška roka je sestavljena iz okostja, ki predstavlja nosilno ogrodje, ter mišic, ki mehanizem fizikalno premikajo v prostoru. Podobno je pri robotskem mehanizmu, pri katerem nosilno ogrodje predstavlja mehanske segmente industrijskega robota, električni pogonski servomotorji pa mišice mehanizma. Ker roboti običajno nadomestijo človeka pri določenem delu, potrebujejo v ta namen prijemala (angl. *gripper*). Človek pri svojem delu uporablja roke in dlani, da lahko objekt prime, opravi delo in manipulira z objektom. Podobno mora imeti tudi industrijski robot na montažno prirobnico pritrjeno orodje oziroma prijemalo, s katerim lahko prijema in manipulira z objekti.

## Vrste robotskih prijemal

Prijemala se uporabljajo v različnih segmentih avtomatizirane industrijske proizvodnje, kot so palletizacija, pakiranje, sestava in ostale manipulacije. Glavna funkcija prijemal je vzpostavljanje povezave med robotom in objektom manipulacije pri manipulaciji surovin, polizdelkov in izdelkov ter orodij na določeno lokacijo v proizvodnem procesu.

Prijemala lahko delimo:

- po namenu uporabe,
- po vrsti medija oziroma načinu ustvarjanja sile,
- po načinu odpiranja,
- po številu prstov,
- po velikosti sile oziroma hoda.

Glede na način delovanja ločimo različna prijemala:

- prijemala na silo oziroma stisk (prsti),
- prijemala na silo in obliko (vakuum),
- prijemala na obliko oziroma sprijem (uporabljeno lepljivo sredstvo),
- prijemala na vbod.



Slika 151: Primer pnevmatskega prijemala

Poznamo pnevmatski, hidravlični in električni pogon prijemal. Pnevmski in hidravlični pogon sta najpogosteje uporabljena pri prijemalnih, aktiviranih s silo oziroma stiskom. Običajno imajo industrijski roboti priključni modul, namenjen priključitvi pnevmatskih priključkov. Pri naročilu industrijskega robota naročimo pnevmatske ventile, ki so že vgrajeni ob prirobnici robota. Na Sliki 151 vidimo primer pnevmatskega prijemala. Pnevmski vodi so povezani na pnevmatski elektromagnetni 4/2-bistabilni ventil, ki ga programsko aktiviramo z izhodno periferno enoto industrijskega robota. Običajno se pri proizvajalcu prijemal dobavi samo aktuatorski sklop prijemala, prsti so izdelani naknadno glede na zahteve aplikacije. To lahko izvedemo z različnimi načini obdelave kovin ali pa s tehnologijo 3D-tiska.

Na Sliki 152 je primer prijemala, vodenega z električnim motorjem. V tem primeru mehansko silo za pomik zagotavlja električni motor. Na Sliki 153 vidimo prijemalo, pri katerem se za prijem uporablja sila stiska. Glede na način odpiranja prijemal poznamo vzporedna in kotna prijemala ter kotna prijemala s polnim odpiranjem. Glede na število mehanskih prstov delimo prijemala na dvoprstna, triprstna in večprstna. Stik s podlago na obdelovancu je lahko glede na omenjeno točkovni, dvotočkovni in večtočkovni stik. Glede na silo, s katero lahko prijemala primejo izdelek, poznamo prijemala z manjšimi silami (pnevmatska, električna) in prijemala, ki omogočajo večje sile stiska (hidravlični pogon prijemal). Poznamo prijemala z manjšimi hodi (npr. 2 cm) in večjimi hodi (10 cm in več). Pri nekaterih prijemalih je mogoče hod nastaviti. Pametna prijemala omogočajo tudi nastavitve sile stiska, hitrost stiska in ostale parametre. Na Sliki 154 je prijemalo, ki je konstruirano tako, da se prilagaja obliki manipuliranca. Na Sliki 155 je prikazano dvoprstno prijemalo, ki deluje na podlagi ustvarjene sile.



Slika 152: Primer električno vodenega prijemala



Slika 153: Sistem stiska



Slika 154: Prijem glede na obliko



Slika 155: Vpetje s silo

Sila stiska se določi posredno z nastavitvijo tlaka zraka v pnevmatskem sistemu ali s tlakom v hidravličnem sistemu. Pri električnem pogonu prijemala lahko z nastavitvijo posredno vplivamo na navor motorja in tudi na sistem stiskanja. Običajno imajo takšna prijemala možnost nastavitve s posebnim potenciometrom, lahko pa jih nastavimo s posebno pripadajočo programsko opremo, če to omogoča izvedba prijemala. Na Sliki 156 vidimo prijemalo z vakuumskim načinom prijema izdelkov. V tem primeru se ustvari nadtlak, ki omogoča manipuliranje objektov, kot so npr. različne steklene površine, pločevina in podobno. Vakuumska prijemala niso primerna za umazana oz. prašna okolja, ker lahko umazanijo vsesajo v sistem. Delno lahko problem rešimo s filtrirnimi sistemi. Na Sliki 157 je ponazorjeno delovanje prijemala na podlagi magnetnega polja. V tem primeru lahko manipuliramo s kovinskimi kosi, ki so iz magnetnega materiala. Na Sliki 158 vidimo koncept prijemala, pri katerem s posebnim lepljivim sklopom prijemala vplivamo na objekt manipulacije in ga z lepilnim učinkom premaknemo v drugo lego.



Slika 156: Vakuumski princip



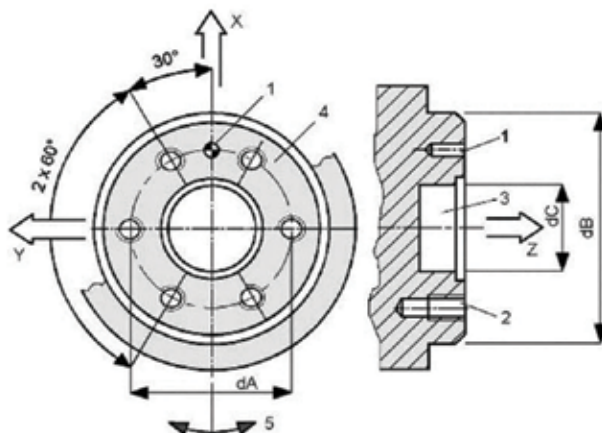
Slika 157: Magnetni princip



Slika 158: Lepilni princip

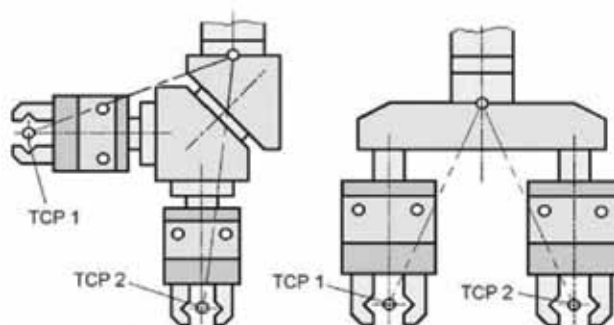
Poznamo tudi prijemala, ki delujejo po principu vboda, saj s posebno iglo ali več iglami zapičimo v manipuliranec in ga potem prestavimo v drugo pozicijo. Prijemalo pritrdimo z montažno prirobnico, ki je običajno standardizirana.

Na Sliki 159 vidimo montažno prirobnico, ki je izdelana skladno s standardom DIN ISO 9409. Ko izbiramo industrijskega robota, moramo v tehnični dokumentaciji preveriti, kakšen tip prirobnice ima naprava, da lahko po potrebi izdelamo vmesnik za določen tip prijemala, ki ni izdelan po enakih standardih.



Slika 159: Montažna prirobnica, izdelana v skladu s standardom DIN ISO 9409

Na Sliki 160 je prikazano večkratno prijemalo, ki se uporablja v primerih, ko mora robot opraviti več različnih operacij in manipulacij. Vidimo tudi TCP (angl. *Tool Center Point*) oziroma centralno točko vrha orodja na koncu kinematične verige robotskega mehanizma. Podaja nam referenčno točko koordinatnega sistema na vrhu orodja s pripadajočo orientacijo.



Slika 160: Večkratno prijemalo in TCP

Prijemala industrijskih robotov



3D tisk prstov prijemala



 PONOVI TEV, NALOGE IN IZZIVI

1. S pomočjo CAD-programskega orodja konstruirajte prijemalni sistem (prste) za izbrano prijemalo na industrijskem robotu in ga 3D-prostorsko natisnite s 3D-tiskalnikom.

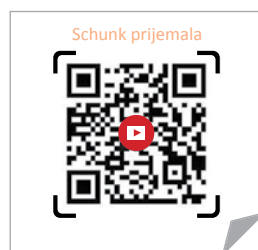
Preizkusite prijemalo.

Na kaj moramo biti pazljivi pri konstruiranju prijemalnega sistema?

Ali je pomembna oblika manipuliranca/izdelka?

Ali lahko z načrtovanjem prijemalnega sistema vplivamo na izdelavo prijemalnega sistema, ki omogoča manipulacijo večjih kosov? Kako?

2. V naravi poiščite primere prijemalnih sistemov. Ali so prijemala podobna sistemom v naravi?
3. Raziščite področje miomimikrije (miomimetika). Kaj pomeni in kako se odraža v tehnoloških rešitvah? Navedite nekaj primerov.





*Odličnost ni nikoli naključje. Vedno je rezultat velikega namena, iskrenega truda in inteligentne izvedbe. Predstavlja pametno izbiro mnogih alternativ – izbira, ne slučaj, določa vašo usodo.*

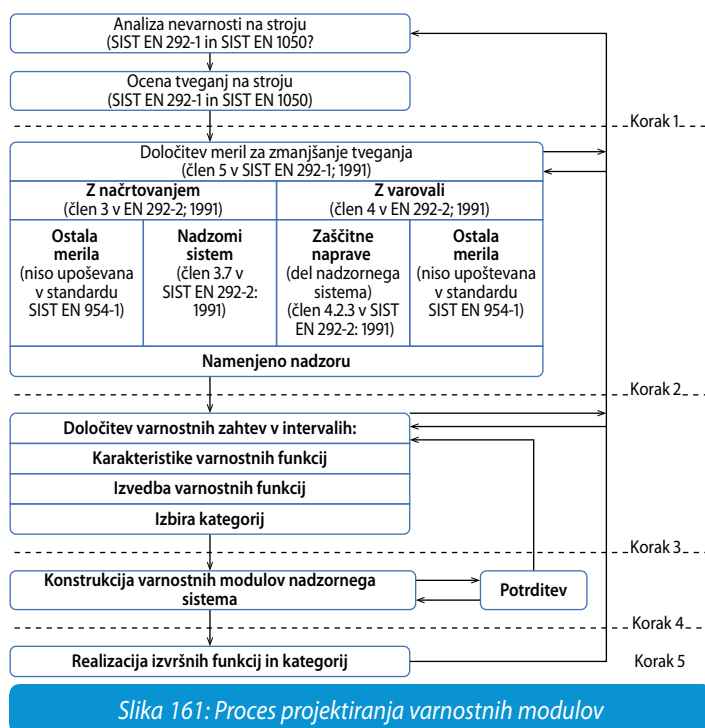
*Aristotel*

```
1 DEF varnost_v_robotski_celici ()
2 INI
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : projektant_celice
4 loop
5 varna_celica ()
6 if (varnost_zagotovljena = TRUE) then
7     varnostni modul=varnostni modul+1
8 exit
9 else
10 nevarna_okoliščina ()
11 endif
12 endloop
13 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Uporabnik [2] : uporabnik_celice
14 END
```

# VARNOSTNE FUNKCIJE V AVTOMATIZIRANIH SISTEMIH

Varnost pri delu je zelo pomemben dejavnik pri načrtovanju avtomatizacije stroja. Izhodišče je direktiva EU 2006/42 ES. Da zagotovimo zanesljivo in varno delo osebe (delavca, upravljavca) ob stroju, moramo upoštevati vse možne dejavnike, ki lahko povzročijo nevarna stanja ali kakor koli ogrožajo njegovo zdravje in življenje. Človek sam ni sposoben izvajati zaporednih dejanj brez napake. Podzavest mu narekuje, da si poskuša olajšati delo ali pa ga zanimajo dejavnosti zunaj obsega dela. To pomeni, da ne zmore popolne koncentracije za ponavljajoče se in monotono delo. Ponekod zato uvajajo menjava delovnega mesta vsake štiri ure.

Tudi pri delu s stiskalnico je človek neposredno ogrožen. Varnost mu zagotovimo s primerno varnostno razdaljo, ogradami in varnostnimi funkcijami, ki jih prilagajamo vrsti dela. V krmilju so na primer uporabljeni varnostni moduli za dvoročni vklop, izklop v sili, varnostna vrata idr. Ti moduli so namensko izdelani za varnostne aplikacije, izpolnjujejo zahtevane standarde in imajo določeno garancijo proizvajalca modulov.



Varnost je upoštevana tudi na področju konkurence. Tržišče zahteva določeno standardizacijo strojev in eno izmed pomembnih področij je tudi varnost pri delu s strojem. S tem, ko podjetje izpolnjuje zahtevane standarde, je konkurenčnejše. Tipke, nožna stikala in zagonske nadzorne naprave morajo biti zaščitene, da preprečimo nevarno delovanje. Dostop do nožnega stikala mora biti možen samo iz ene smeri, aktivirano pa je lahko samo z eno nogo. Tipka za izklop v sili mora ob aktiviranju ustaviti vsa nevarna gibanja (4.1.5 v SIST EN 418 : 1992 – *Varnost strojev – Oprema za izklop v sili – Funkcionalni vidiki, načela načrtovanja*). V dosegu upravljavca, vključno z upravljavcem stiskalnice, mora biti uporabljena vsaj ena tipka za izklop v sili. Katera koli priključna nadzorna postaja ne sme vplivati na napravo za izklop v sili. Da preprečimo nenačrtovani zagon, moramo načrtovati nadzorne naprave ter prenosna

stojala in obešala skladno s standardom SIST EN 60204-1: 1992, člen 10.6, in glede na stabilnost in podporo, skladno s standardom SIST EN 60204-1: 1992, člen 4.4.7.

Ponavljajoči proces konstruiranja varnostnih modulov nadzornega sistema:

**KORAK 1: ANALIZA NEVARNOSTI IN OCENA TVEGANJA.**

**KORAK 2: DOLOČITEV MERIL ZA ZMANJŠANJE TVEGANJA Z NADZORNIM POMENOM.**

**KORAK 3: DOLOČITEV VARNOSTNIH ZAHTEV ZA VARNOSTNE MODULE NADZORNEGA SISTEMA.**

**KORAK 4: KONSTRUKCIJA.**

**KORAK 5: REALIZACIJA.**

## Izbira kategorije varnosti

Običajno je v industrijskem procesu zelo težko določiti tveganje, zato je izbrana metoda bistven prispevek k zmanjšanju tveganja. Namenjena je usmerjanju projektanta in izdelovalca standarda pri izbiri kategorije na podlagi obnašanja sistema pri morebitnih napakah. To je samo en pogled, tudi ostali dejavniki pripomorejo k oceni, če je primerna varnostna funkcija že bila dosežena. Pri tem se upošteva zanesljivost komponente in uporabljena tehnologija pri posamezni aplikaciji.

Resnost poškodb (označeno s **S**) je relativno lahko določiti, npr. raztrganine, amputacijo, življenjsko nevarne poškodbe. Za pogostost poškodb so uporabljeni pomožni parametri za izboljšanje ocene:

- pogostost in čas izpostavljanja nevarnosti (**F**) in
- možnosti izognitve nevarnosti (**P**).

Izkušnje so pokazale, da te parametre lahko kombiniramo (Slika 162) in stopnjujemo tveganje od nižjega do visokega tveganja. Poudariti je treba, da je to postopek, ki poda samo oceno tveganja. Na Sliki 162 je izbrana kategorija označena z velikim zapolnjenim krogom. V nekaterih aplikacijah lahko projektant ali izdelovalec standarda tipa C izbere drugo kategorijo, prikazano z malim krogom ali z velikim nezapolnjenim krogom. Uporabljene so lahko druge kategorije, vendar mora sistem delovati, kot smo načrtovali. Razlogi za izbiro druge kategorije morajo biti navedeni. Razlog je lahko uporaba drugačne tehnologije, npr. dobro preizkušena hidravlika ali elektromehanske komponente (kategorija 1) v kombinaciji z električnimi ali elektronskimi sistemi (kategoriji 3 ali 4).

Ko so izbrane kategorije, na Sliki 162 označene z malim krogom, so zahtevani dodatni ukrepi, kot so:

- predimenzioniranje ali uporaba tehnik za izključitev napak in
- uporaba dinamičnega nadzornega sistema.

Ocena tveganja s parametrom S1 podaja kategorijo za varnostne module v kategorijo 1. V nekaterih aplikacijah lahko načrtovalec standarda tipa C izbere kategorijo B z uporabo ostalih varovalnih ukrepov.

## Navodila za izbiro parametrov S, F in P za oceno tveganja

### *Resnost poškodb S1 in S2*

Pri oceni tveganja, ki narašča zaradi napak v varnostnih modulih, so upošteevane samo lažje poškodbe (običajno ozdravljive) in resne poškodbe (najpogosteje neozdravljive, vključno s smrtjo). Pri določanju S1 in S2 moramo upoštevati običajne posledice nesreč in normalni postopek zdravljenja. Primer: zmečkanina in/ali raztrganina brez komplikacij je lahko uvrščena kot S1, medtem ko je lahko amputacija ali smrt uvrščena kot S2.

## Pogostost in/ali čas izpostavljanja nevarnosti F1 in F2

Splošno veljaven čas, za katerega mora biti izbran parameter F1 ali F2, ne sme biti definiran. Pojasnilo, ki sledi, lahko olajša odločitev, ko se pojavi dvom. Parameter F2 mora biti izbran, če je oseba pogosto ali dolgotrajno izpostavljena nevarnosti. To je pomembno, če so iste ali različne osebe izpostavljene nevarnosti neprekinjeno, npr. pri uporabi dvigal. Obdobje izpostavljenosti nevarnosti mora biti ovrednoteno na temelju povprečne vrednosti. Vrednost lahko razberemo iz razmerja celotnega obdobja uporabe opreme. V primeru, da je treba doseči regularnost med orodji stroja med cikličnim obratovanjem vstavljanja in jemanja delov iz orodja, mora biti izbran F2. Če je dostop zahtevan samo občasno, potem lahko izberemo F1.

## Možnost izognitve nevarnosti P

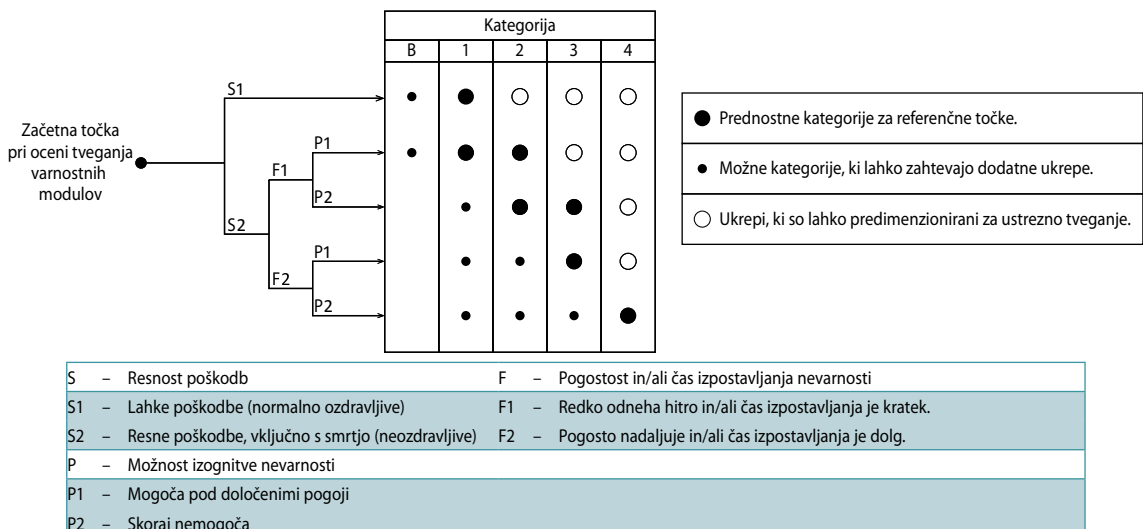
Ko je nevarnost večja, je pomembno vedeti, če jo lahko prepoznamo in ali se ji lahko izognemo, preden povzroči nesrečo. Treba je vedeti, ali je lahko nevarnost neposredno prepoznana zaradi svojih fizičnih karakteristik ali zaradi tehničnih lastnosti, npr. s prikazovalniki.

Ostali pomembni dejavniki, ki vplivajo na izbiro parametra P, so:

- delovanje z ali brez nadzora;
- delo s strokovnjaki ali z amaterji;
- hitrost, s katero nevarnost raste, npr. hitro ali počasi;
- možnost izognitve nevarnosti, npr. pri zagonu ali posredovanju tretje osebe;
- praktične varnostne izkušnje, ki se navezujejo na proces.

P1 izberemo samo tedaj, če obstaja realna možnost izognitve nesreči ali pomembno zmanjšanje posledice. P2 izberemo, če ni skoraj nobene možnosti, da bi se izognili nesreči.

Na Sliki 162 je ponazorjen proces projektiranja varnostnih modulov. Na podlagi analize tveganja mora projektant določiti posamezni kriterij in po korakih izbrati primerno kategorijo varnosti. Upoštevati je treba vsa predvidena in nepredvidena obnašanja ljudi/delavcev v okolici in v neposredni bližini stroja. Ljudje si namreč velikokrat želimo olajšati delo in zaobiti varnostne funkcije. V industrijskih procesih se pogosto zgodijo nesreče predvsem zaradi človeških faktorjev.



Slika 162: Proces izbire varnostnih kategorij

Naj navedemo primer dvoročnega vklopa pri različnih strojih. Zelo pomemben vidik dvoročnega vklopa je predvsem varnostni, saj z odklikom rok na varnostni tipki onemogočimo poseg v nevarno področje stroja med obratovanjem. V preteklosti se je dogajalo, da so delavci eno izmed tipk varnostnega dvoročnega vklopa zataknili in pritiskali samo eno izmed tipk. Ker je šlo za monotono delo, je lahko delavec v določenem trenutku pozabil, da ima enega od prstov v nevarnem področju in se je poškodoval. To so rešili z varnostnim modulom, pri katerem sta obe tipki pritisnjeni znotraj časovnega intervala 0,5 s. V aplikacijah industrijskih robotov je za varnost okoli delovnega okolja robotskega mehanizma običajno nameščena varnostna ograja oziroma robotska celica. Namen robotske celice je omejevanje nepooblaščenega dostopa v delovno okolje robota med avtomatskim režimom delovanja. Celica ima vrata s senzorjem/stikalom, ki daje povratno informacijo v krmilje celice, ali so vrata med delovanjem industrijskega robota res zaprta. Pogoste so nevarne situacije stiska ali udarcev in druge nevarne situacije. V praksi se dogaja, da operaterji na varnostno stikalo vrat namestijo sklop vrat, ki podaja napačno informacijo o zaprtih varnostnih vratih. Zato so bile v preteklosti pogoste nevarne situacije in poškodbe delavcev v bližini industrijskega robota.

Ugotovimo lahko, da je potreben celovit vpogled in predvidevanje vseh možnih scenarijev v procesu projektiranja varnostnih funkcij avtomatiziranih procesov.

### *Določitev kategorije varnosti*

Pri delu ob stroju ali v njegovi bližini so možne resne poškodbe, kot npr. zmečkanine, zagozditev in druge poškodbe udov. Pri zahtevi za izbiro kategorije se zato odločimo za prvi parameter S2. V primeru, ko je oseba v bližini stroja dolgotrajno izpostavljena nevarnosti, izberemo drugi parameter F2. Ker v primeru, ko se nesreči ne moremo izogniti, izberemo parameter P2. Določimo torej kategorijo varnosti 4. Na splošno velja, da tam, kjer je ob stroju človek, izberemo 4. kategorijo varnosti. Pri oceni tveganja moramo upoštevati vse nepredvidene dogodke. Krmilni sistem stroja načrtujemo skladno z zahtevami za 4. kategorijo varnosti.

Kategorija	Povzetek zahtev	Odziv sistema	Principi za doseganje varnosti
B	Varnostni moduli in/ali njihova zaščitna oprema kot tudi njihove komponente morajo biti načrtovani, izdelani, izbrani, sestavljeni in kombinirani skladno s pomembnimi standardi tako, da lahko nasprotujejo pričakovanim vplivom.	Napaka lahko povzroči izgubo varnostne funkcije.	Značilnosti določimo večinoma z izbiro komponent.
1	Upoštevati moramo zahteve kategorije B. Uporabiti moramo dobro preizkušene komponente in varnostne principe.	Napaka lahko povzroči izgubo varnostne funkcije, vendar je možnost napake manjša kot pri kategoriji B.	
2	Upoštevati moramo zahteve kategorije B in uporabo temeljito preizkušenih varnostnih principov. Varnostna funkcija mora biti preverjena v ustreznih intervalih z nadzornim sistemom stroja.	Napaka lahko povzroči izgubo varnostne funkcije med posameznimi preverjanji. Izguba varnostne funkcije je zaznana.	V glavnem določimo značilnosti z gradnjo sistema.
3	Upoštevati moramo zahteve kategorije B in uporabo temeljito preizkušenih varnostnih principov. Varnostni moduli morajo biti načrtovani tako, da: <ul style="list-style-type: none"> <li>● ena napaka v katerem koli modulu ne povzroči izgube varnostne funkcije;</li> <li>● je zaznana posamezna napaka kadar koli je to z razlogom izvedljivo.</li> </ul>	Ko se zgodi posamezna napaka, je treba izvajati varnostno funkcijo Nekatere, vendar ne vse napake morajo biti zaznane. Kopičenje ne zaznanih napak lahko povzroči izgubo varnostne funkcije.	
4	Upoštevati moramo zahteve iz kategorije B in uporabo temeljito preizkušenih varnostnih principov. Varnostni moduli morajo biti načrtovani tako, da: <ul style="list-style-type: none"> <li>● ena napaka v katerem koli modulu ne povzroči izgube varnostne funkcije;</li> <li>● je posamezna napaka zaznana pri ali pred naslednjo zahtevo glede na varnostno funkcijo. Če to ni mogoče, potem kopičenje napak ne sme povzročiti izgube varnostne funkcije.</li> </ul>	Ko se zgodijo napake, je treba izvajati varnostno funkcijo. Napake morajo biti zaznane v času, potrebnem za preprečitev izgube varnostne funkcije.	

Na Sliki 163 je varnostna tipka za izklop v sili (nem. *Not Aus*, angl. *Emergency stop*), ki mora biti montirana na dosegu delavčeve roke, da lahko onemogoči nevarno gibanje stroja. To zagotovi varnostni modul, na katerega je tipka električno priključena; običajno je v krmilni omari.

Vidna je tudi funkcija dvoročnega vklopa, za katero je tudi potreben električni krmilni modul. Varnostne module lahko nadomesti tudi varnostni krmilnik, s katerim je mogoče varnostne funkcije programirati (Slika 163).



Slika 163: Varnostne funkcije in pripadajoči krmilni moduli

## Varnostni modul – Izklop v sili

Varnostni modul za izklop v sili je naprava, ki ob nevarnosti ali kakršnem koli ogrožanju človekovega življenja ali možnosti poškodbe omogoča varno prekinitev varnostnega tokokroga določenega dela stroja. Izklop v sili ne sme povzročiti nevarnih pomikov stroja ali drugih nevarnih okoliščin. Enota je primerna za uporabo pri ločenih varovalih z izhodnimi kontakti, pri katerih obstaja možnost silovitega zagona. Pri mehanskih stikalnicah mora zagotoviti blokado paha v zgornjem položaju oziroma v položaju, ki ne ogroža upravljavca.

### Značilnosti

- dvokanalno delovanje z ali brez zaznavanja kratkega stika prek vhodnih kontaktov;
- izbiramo lahko nadzorovan ročni ali avtomatični ponovni vklop (*Reset*);
- načrtovano za uporabo s polprevodniškimi izhodi;
- vgrajena varnostna avtomatska varovalka s tipko *Reset*;
- pozitivno krmiljeni relejski izhodi:
- trije varnostni kontakti (N/O);
- en pomožen kontakt (N/Z);
- kontakti za izklop v sili, končna stikala varnostnih vrat in tipka *Reset*;
- LED-prikaz za kanal 1 in 2, napako in napajanje;
- možnost dodatnih varnostnih kontaktov z razširitvenimi moduli.



## Modul mora izpolnjevati te varnostne zahteve:

- tokokrogi so podvojeni z vgrajenim notranjim nadzorom;
- varnostna funkcija deluje v primeru, da modul preneha delovati;
- pravilno odpiranje in zapiranje varnostnih kontaktov je testirano avtomatično ob vsakem ciklu;
- kratkostično varovanje: DC-enote imajo vgrajeno termično avtomatsko varovalko, AC-enote pa imajo vgrajeno avtomatsko varovalko z magnetno preobremenitvijo.

## Opombe

Da preprečimo zvar kontaktov, moramo pred izhodne kontakte priključiti varovalko (hitro 10 A ali 6 A počasno varovalko).

Funkcija zaznave kratkega stika prek vhodov je testirana pri izdelovalcu modula, vendar je mogoče testirati enoto tudi po vgradnji na naslednji način :

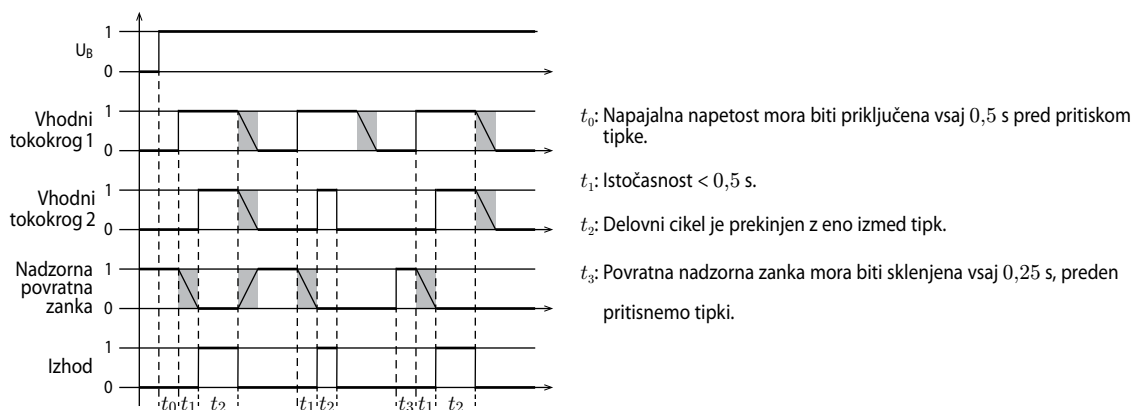
- Enota je pripravljena za delovanje, izhodni kontakti so zaprti.
- Kratko sklenemo priključke S12/S22 za zaznavanje kratkega stika prek vhodov.
- Varovalka enote se mora prožiti, izhodni kontakti pa odpreti. Dolžina kabla glede na največjo dolžino lahko zakasni proženje varovalke do dve minuti.
- Resetiramo varovalko: odstranimo kratki stik in izklopimo napajalno napetost za približno eno minuto.

## Varnostni modul – Dvoročni vklop

Varnostni modul za dvoročni vklop je varnostna naprava, ki zagotavlja, da upravljavec stroja ne zadrži rok v nevarnem območju. Uporablja se pri mehanskih in hidravličnih stiskalnicah ali pri ostalih varnostnih tokokrogih v industriji. Delovanje stroja je omogočeno le v primeru, ko stisnemo obe tipki istočasno znotraj določenega časovnega intervala 0,5 s. Delovanje je onemogočeno takoj, ko spustimo eno ali obe tipki. Ponovno delovanje je omogočeno, ko ni aktivna nobena izmed tipk in kadar istočasno znova stisnemo obe tipki znotraj določenega časovnega intervala 0,5 s.

## Priključitev in delovanje

Na kontakt A1 in A2 priključimo napajanje. Sklenemo nadzorno povratno zanko na kontaktih X1 in X2. Na kontakt T12 vežemo mirovni kontakt tipke dvoročni vklop, na T13 pa delovni kontakt tipke dvoročni vklop. T11 je skupna masa. Na T21, T22 in T23 vežemo drugo tipko. Nadzorna logika primerja signale mirovnih kontaktov obeh tipk in povratne nadzorne zanke. V primeru, da so obe tipki stisnjeni znotraj časa 0,5 s, se aktivirata releja K2 in K4. Delovni kontakti tipk aktivirajo releja K1 in K2. Tako so kontakti varnostnega tokokroga sklenjeni in krmilnik dobi informacijo za vklop stroja. Zaradi možnosti zvara kontakta uporabljamo pri tipkah mirovni in delovni kontakt . Če je eden izmed kontaktov zavarjen ali je žica prekinjena, ne bo izpolnjen pogoj za delovanje. V tem primeru varnostni tokokrog prekinemo dvakrat zaporedno, znotraj modula samega pa šestkrat. Tako zagotovimo 3. kategorijo varnosti, skladno s standardom SIST EN 954-1 (deli komandnih sistemov, povezanih z varnostjo) in ustreznost tipu IIIC varnostnih zahtev, skladno s standardom SIST EN 574 (naprava z dvoročno komando). Vendar s tem ne zagotovimo popolne varnosti. Ker stroj upravlja človek in je neposredno izpostavljen nevarnosti, bi morali zagotoviti varnost 4. kategorije.



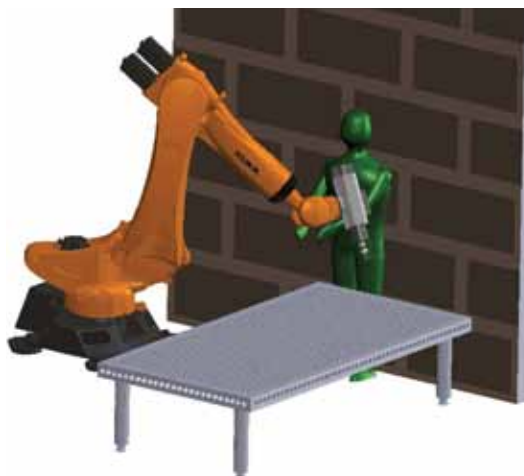
Slika 164: Funkcijski diagram varnostnega modula P2HZ5

## Nevarnosti pri delu z industrijskimi roboti

Industrijski roboti se običajno uporabijo v aplikacijah paletizacije, varjenja, barvanja, brušenja, pakiranja, kovanja in drugih aplikacijah in tako človeka odreši monotonih, zahtevnih in nevarnih del. Ker robot deluje v avtomatskem režimu delovanja, lahko pride med njegovim obratovanjem zaradi nezadostnih varnostnih funkcij oziroma obkroga varnostnih funkcij do nevarnih situacij za vse delavce in upravljalce. Glavne nevarnosti pretijo v delovnem prostoru industrijskega robota. Zgodijo se lahko nepredvideni gibi in dejavnosti robotskega mehanizma, kar tudi ogroža varnost osebe, ki dela ali stoji v bližini robota. Zato moramo tudi pri robotskih celicah oceniti, kakšno je tveganje za nevarnost, in uvesti ukrepe za zmanjšanje možnosti nevarnih situacij. Nepričakovano gibanje robota lahko povzroči človeške napake ali okvara sistema. Med te prištevamo:

- nepredvideno obnašanje robota, katerega vzrok je napaka v robotskem krmilnem sistemu;
- prekinitev pomembnih kabelskih povezav, ki je posledica robotskega gibanja;
- napaka pri prenosu podatkov, ki povzroči robotov gib, ki je večji od pričakovanega;
- napaka ali okvara delovanja orodja, npr. varilne pištole;
- programske napake ali druge napake v delovanju;
- premajhna natančnost gibanja ali izraba;
- nekompatibilnost vpenjal in drugih orodij.

Najosnovnejše so tri potencialne nevarnosti pri delu z industrijskimi roboti. Na Slikah 165 in 166 je ponazorjena nevarnost trka, s katerim lahko gibajoči se robot ali orodje industrijskega robota zadane operaterja in ga stisne. Trk je lahko posledica nepričakovanega robotovega giba ali izmeta/izpustitve obdelovanca. Ta nevarnost obstaja tudi pri delu ob vozičkih, tekočih trakovih, paletah in drugih transportnih mehanizmih. Pri delih v neposredni bližini robota so lahko pri servisnih pregledih udi stisnjeni med segmente industrijskega robota, zlasti če je gibanje mehanizma aktivno. Nevarne situacije moramo predvidevati vnaprej in čim bolj zmanjšati delo v neposredni bližini



Slika 165: Možnost stisnjenja pri delu z industrijskim robotom

industrijskega robota. Pojavijo se tudi ostale nevarnosti, ki so specifične za posamezno robotsko aplikacijo. Pri robotskem varjenju se lahko pojavi nevarnost udara električnega toka, vpliv varilnega oblaka, opekline, strupeni plini, UV-svetlobno sevanje, prekomerni zvoki in drugo. Pri razpršenem barvanju lahko prašni delci zaidejo v dihala, zato je potrebno odsesavanje in prezračevanje (tudi pri aplikacijah varjenja z industrijskim robotom). Podobno je pri tehnologiji robotskega frezanja, kjer obstaja možnost izmeta odrezkov v človeka. Pri vsaki aplikaciji je treba analizirati nevarne situacije in zagotoviti največjo mero varnosti. Nevarnosti lahko povzročijo različne situacije.



*Slika 166: Možnost trka in stisnjenja pri delu z industrijskim robotom*

## *Nevarnosti krmilnega sistema*

To so nevarnosti, povzročene zaradi napak, ki se zgodijo v robotskem krmilnem sistemu, kot so npr. napake programske sintakse, napake zaradi interference signalov ter napake v hidravličnih, pnevmatskih ali električnih podsistemih, povezanih z robotom.

## *Mehanske nevarnosti*

So posledica mehanskih lastnosti obdelovancev ali orodij, s katerimi manipulira industrijski robot. Te so ostri robovi, večje mase ali varilne elektrode. Zaradi mehanskih napak lahko robotsko prijemalo nepredvideno izpusti obdelovanec. Vzroki mehanskih napak so prekomerna obremenitev, korozija, utrujenost materiala in slabo vzdrževanje.

## *Nevarnosti okolja*

Nevarnosti v bližini robota so varilne robotske celice, kjer se širijo varilni plini, iskrenje pri varjenju ter leteči delci pri obdelavi materialov. Podobno tveganje povzročijo tudi prah, vlaga, ionizirajoče in neionizirajoče sevanje, laserski žarki, ultra vijolična svetloba ter gorljivi in eksplozivni plini.

## *Nevarnosti perifernih naprav*

V večini robotskih celic robot deluje v povezavi s perifernimi enotami, kot so obdelovalni stroji, tekoči trakovi, obdelovalna orodja, stiskalnice in drugo. Periferne naprave lahko pomenijo varnostno tveganje v primeru, če so nevarni deli izpostavljeni, brez varnostnih elementov in v dosegu uporabnika.

Poročila o nesrečah z industrijskimi roboti opozarjajo, da se največ nesreč zgodi, ko operater vstopi v delovni prostor industrijskega robota, potem ko je bil ta predhodno ustavljen ali upočasnen, kar lahko povzroči njegove nenadne in nepredvidene gibe.

## Nevarnosti človeških napak

Operater deluje v bližini robota in mora zaradi narave dela vstopati v robotov delovni prostor. V tem primeru je izpostavljen nevarnosti trka ali stisnjenja, ki lahko nastopi med programiranjem, učenjem gibanja, vzdrževanjem ali delom v bližini robota, npr. pri vlaganju ali jemanju obdelovancev iz celice.

Glavni vzrok za človeške napake pri delu z industrijskimi roboti je gotovo slabo poznavanje opreme in obvod varnostnih sistemov.

## Zahteve in zagotavljanje varnosti pri delu z roboti

**Standard ISO 10218-1** podaja varnostna priporočila, ki se navezujejo neposredno na interakcijo robotskega mehanizma in človeka:

- 5.9 Priporočila za simultano delovanje več robotov, ki določajo pogoje za vodenje več robotskih manipulatorjev z enim krmilnikom.
- 5.10 Zahteve in pogoji za skupno delovanje robota in človeka.
- 5.12.3 Priporočila za programsko omejevanje gibanja osi in delovnega prostora, ki omogočajo uporabo elektronskih naprav in programskih orodij omejevanja delovnega prostora in hitrosti gibanja robota v smislu zagotavljanja varnosti.

Standard ISO 10218-2 (angl. *Robots and robotic devices – Safety requirements – Part. 2: Industrial robot system and integration*) opisuje normative in določila o sodelovanju človeka in robota ter predstavlja nadgradnjo predhodne izdaje standarda (ISO 10218-1). Standard ISO/TC 299 vsebuje 37 podatkov, ki določajo standarde robotskih aplikacij in načrtovane standarde v prihodnosti.

Splošne zahteve za varno delovanje industrijske strojne opreme predvidevajo, da morajo biti vsi gibajoči se deli opreme, vsak del prenosnih sistemov in vsak nevaren del varno zakriti. Izjeme obstajajo v primerih, ko so ti deli v takšnem položaju ali so takšne konstrukcije, da so že sami varni, kot da bi bili zakriti. Pri klasičnih strojih so nevarni deli običajno vgrajeni v njihovi notranjosti.

Vzroki nesreč so večinoma človeški faktor, saj je delovanje strojev pod nadzorom človeka – upravljavca. V nasprotju z ostalimi stroji je pri robotski celici lahko potencialno nevarna širša okolica industrijskega robota, ki obsega delovni prostor robota in bližnjo okolico, če gre za leteče delce ali kose. Glede na varnostne standarde in varnostne kategorije mora varnostni inženir temu primerno analizirati in projektirati robotsko celico.



## Zagotavljanje varnosti pri strojni opremi

### Nivo 1

Varovanje na prvem nivoju obsega celotno robotsko celico. Običajno je varovanje izvedeno s fizičnim ograjevanjem oz. kombinacijo mehanske ograje in vrat, na katerih je senzor (stikalo), ki zaznava odprtost vrat. Kot možnost so lahko uporabljene tudi naprave za zaznavanje prisotnosti oziroma varnostni 2D-skenerji.



Slika 167: Robotska celica

### Nivo 2

Vključuje nivo varovanja človeka, ki se nahaja v delovnem prostoru robota. Običajno je varovanje izvedeno s pomočjo senzornih naprav za zaznavanje navzočnosti človeka. V primerjavi s predhodnim nivojem, kjer gre predvsem za ograjevanje, je v tem primeru poudarek na zaznavanju navzočnosti operaterja.

Na drugem nivoju je varovanje izvedeno s senzorji za ugotavljanje prisotnosti operaterja. To lahko zagotovimo z laserskimi 2D-skenerji, ki skenirajo prostor na podlagi narejenega programa in v primeru nepredvidenega objekta v delovnem okolju pošljejo informacijo krmilniku, ki onemogoči nevarno gibanje robota. Druga možnost so različni optični senzorji, ki delujejo po principu zaznavanja prekinitve žarka (več žarkov, fotozavesa, Slika 169). Alternativa je uporaba senzornih preprog, ki po izmerjenem tlaku na podlagi zaznavajo položaj operaterja. V samem izhodišču naj bi bili senzorji za ugotavljanje prisotnosti uporabljeni le kot sekundarna oblika zagotavljanja varnosti, in to le v primerih, ko je nujno potreben omejen dostop do robota.



Slika 168: Varnostni skener



Slika 169: Svetlobna foto zavesa

### Nivo 3

Gre za nivo varovanja človeka v neposredni bližini robota. Varovanje na tem nivoju se izvaja z zaznavanjem prisotnosti človeka ali ovir v bližini robota ali pa neposrednega stika z robotom ter posledično s takojšnjo zaustavitvijo delovanja. Za ta namen so uporabljane naprave za merjenje položaja človeka in različni senzorji kolizije, kot so npr. senzorji sil in momentov ali kontaktni senzorji dotika.

V večini robotskih aplikacij je zahtevan vsaj en nivo varovanja. Glede na oceno tveganja je mogoče izvajati več nivojev varovanja hkrati. Podobno velja za zagotavljanje varnosti na tretjem nivoju. Senzorji za zaznavanje kolizije z robotom so nameščeni na robotske segmente ali na vrh robota. Ta pristop se uporablja pri celicah z manjšimi roboti, kjer operater med obratovanjem stoji v bližini robota. Signal, ki ponazarja kolizijo z robotom, povzroči hipno izključitev obratovanja robotske celice. V ta namen se danes uporabljajo sodelovalni roboti, ki jih bomo preučili v svojem poglavju. Tipka za izklop v sili je pomembna pri zagotavljanju varnosti, saj operaterju omogoča hitro zaustavitev gibanja robota. Nameščena je na več mestih v robotski celici in je nujno velika ter rdeče obarvana, da je lahko opazna in dosegljiva. Praviloma je nameščena na robotskem krmilniku, na enoti za ročno učenje ter na ograji robotske celice. Vse varnostne naprave, kamor spada tudi tipka za izklop v sili, so zaradi čim hitrejšega izklopa obratovanja s krmilnikom povezane prek ožičene logike in niso del programske opreme.

Programiranje in učenje robotskega gibanja se izvaja s pomočjo ročnega vodenja robota ob položajih, ki jih robotski krmilnik pomni in jih nato v avtomatskem načinu izvaja. Za ta namen je uporabljena enota za ročno učenje. Mogoče je tudi učenje s fizičnim vodenjem vrha robota vzdolž trajektorije gibanja. V obeh primerih se mora operater med učenjem nahajati v robotski celici relativno blizu robotu. V tem primeru deluje v režimu, kjer je hitrost robota omejena. Poleg tega je na učnem panelu varnostna tipka za omogočitev pogona, ki je pomembna v režimu programiranja in testiranja aplikacije.

V avtomatskem režimu delovanja industrijskega robota upoštevamo nivoje varnosti, ki smo jih omejnili v tem poglavju.

Med učenjem je zato za zagotavljanje varnosti potrebno biti pozoren na te varnostne zahteve:

- Operater, ki upravlja robota, mora biti za to dobro usposobljen, seznanjen z vsemi nevarnostmi in upoštevati ukrepe za zagotavljanje varnosti.
- Med vodenjem in učenjem točk se robot ne sme pomikati z visokimi hitrostmi (izbran testni režim delovanja, omejen na 25 cm/s, v avtomatskem režimu delovanja 2 m/s ).
- Operater mora imeti v dosegu roke tipke za izklop v sili (po standardu je ena na učnem panelu).
- Operater mora biti lociran na mestu, kjer je majhna možnost stiska k okoliškim objektom ali med segmente mehanizma. Imeti mora dober pregled nad vsemi komponentami v robotski celici.
- Priporočljivo je, da je pri programiranju prisoten opazovalec, ki se nahaja zunaj delovnega področja robota in ima dostop do takojšnjega izklopa v sili.
- Kjer je to potrebno, mora operater nositi zaščitno opremo in zaščitno obleko.



## Varnostna ključavnica z zaklepanjem

Varnostno ključavnico najpogosteje uporabljamo na vratih robotske celice. Namenjena je preprečevanju nevarnih gibov in situacij, povezanih z delovanjem industrijskega robota v robotski celici. Deluje kot stikalo in v primeru nepooblaščenega odprtja vrat celice pošlje informacijo v krmilnik sistema, ki ustavi nevarno delovanje industrijskega robota. Poznamo več vrst robotskih varnostnih ključavnic. Najosnovnejše varnostne ključavnice imajo preklopno stikalo, s katerim zaznavajo, ali so vrata celice odprta. Običajno pa imajo dodatno varnostno funkcijo z elektromagneto ključavnico, ki se zaklene in onemogoči odpiranje vrat celice v avtomatskem režimu industrijskega robota.



Slika 170: Varnostno stikalo na vratih

## Varnostni skenerji

Varnostni skener je višji nivo varnosti v robotski celici. Z njim dosežemo boljše varovanje uporabnikov, ki delujejo neposredno v delovnem prostoru industrijskega robota. Princip delovanja temelji na fizikalnem principu, pri katerem laser oddaja laserski žarek, ki samo v določeni točki osvetli objekt. Odbiti laserski žarek je zajet s široko področnim detektorjem. Izmeri se razdalja do točke in posledično položaj točke glede na referenčni položaj laserskega oddajnika. Dobimo oblak točk (angl. *mesh*), ki podaja obliko objekta v prostoru. Glede na programsko določitev objektov ugotovimo prisotnost neznanega ali nedovoljenega objekta v okolju robotske celice. Prednost pred zajemanjem s kamero je, da laser ne potrebuje svetlobe okolja, ampak si jo zagotovi sam in tako ni občutljiv na svetlobne motnje. Skeniranje (razpoznava) ima veliko resolucijo (5.000 do 30.000 točk), hitrost skeniranja pa je več kot  $10^8$  točk na sekundo. Linije skeniranja dosežemo z zapletenim sistemom prizem in ogledal.

Za enostavne sisteme (malo točk in majhne hitrosti skeniranja) se uporabljajo oscilirajoča ravna ogledala, pri večjih hitrostih skeniranja in večji resoluciji pa rotirajoča poligonalna ogledala. Varnostni skenerji so uporabljeni v mnogih industrijskih aplikacijah. Lahko se uporabljajo kot varnostni element v robotskih celicah in zaznavajo nedovoljene objekte v robotski celici, kot lahko vidimo na Sliki 171. So programirljivi in prilagodljivi.



Slika 171: Zaznavanje nedovoljenih objektov v robotski celici

Druga možnost je uporaba v robotski celici (Slika 172). V tem primeru omogoča spremembo hitrosti delovanja industrijskega robota glede na razdaljo odmika od neposredne bližine robota. V bližini robota je hitrost omejena na relativno varno za uporabnika, z oddaljenostjo uporabnika se hitrost delovanja industrijskega robota povečuje.



*Slika 172: Nadzor varnostnih con s skenerjem v robotski celici*

Tretja možnost uporabe varnostnih skenerjev je pri različnih avtonomnih mobilnih vozičkih, pri katerih zagotavljajo zaznavanje ovir in oseb na poti avtonomnega robota (angl. *Automated Guided Vehicle, AGV*). Skener zajema polje pred mobilnim robotom in glede na oddaljenost do ovire prilagaja hitrost ali pa popolnoma ustavi mobilni voziček.



*Slika 173: Uporaba skenerja pri AGV*

Ugotovimo lahko, da je projektiranje robotske celice zelo kompleksen proces, v katerem je treba upoštevati veliko različnih dejavnikov.

Zajem varnostnih con s skenerjem



Skener na avtonomnem vozičku





*Življenje je odprta knjiga. Učenje učenja je v sodobnem svetu vaša najdragocenejša veščina.*

*Marc Cuban*



# PRVA POSTAVITEV INDUSTRIJSKEGA ROBOTA

Postopek izvedbe robotizacije za naročnika je večstopenjski. Naročnik najprej poda naročilo s splošnimi zahtevami in opisom projekta. V tem segmentu poda zahtevo za izdelavo idejne zasnove robotske celice, način manipulacije materiala v celico in iz nje, tip izdelka, energetske vire in priključke. Predloži dosedanje postopke dela, zelene postopke dela, kako so pripravljene polizdelki, pričakovane pretočne čase ter učinkovitost proizvodnje OEE (angl. *Overall Equipment Effectiveness*). V tem segmentu se definira kapaciteta izdelave izdelkov na letno število dni in zelene količine za robotizacijo procesa. Podamo velikost prostora, ki je na voljo, zahteve glede dobaviteljev vgrajene opreme, zahteve glede čiščenja in vzdrževanja, zakonodaja in standarde, ki jih je treba upoštevati, zahteve glede varnosti in posebne zahteve glede uporabniškega vmesnika. Zelo pomemben podatek je tudi nivo avtonomije robotske celice, predvideni gabariti robotske celice in število delavcev, ki bodo robotski celici podajali material ter jo nastavljali in servisirali. Prav tako je pomemben terminski rok izvedbe celice, zakonodaja, zahtevana dokumentacija, garancijsko obdobje za robotsko celico ter zagotovitev servisa v obratovanju. Bistven podatek je med drugimi tudi predvidena vrednost investicije ter finančni okvir in opredelitev plačil glede na terminske plane. Morebitni projektni izvajalec izdelava elaborat robotizacije z vsemi zahtevami in pripravi finančno ovrednoteno ponudbo. Če naročnik na podlagi svojih zahtev izbere določenega ponudnika robotizacije, lahko podpiše pogodbo, ki obveže pravice in dolžnosti naročnika in izvajalca. Pogosto se v praksi dogaja, da se izvajalci ne držijo terminskih rokov, določenih v pogodbi, zaradi nepredvidenih problematik, težav pri dobavi naprav ter materiala in podobno. Običajno je v pogodbi določen člen, kjer je opredeljeno, da mora izvajalec plačati pogodbeno globo oziroma finančno nadomestilo za čas, v katerem naročnik zaradi zamud ne more uporabljati naročene robotske celice; omenjeni so lahko zelo visoki finančni zneski. Zato so projektni izvajalci – integratorji robotskih celic pod velikimi časovnimi pritiski. Zaradi nepredvidenih situacij si morajo predhodno zagotoviti rezervni čas za izvedbo.

Ko se odločimo robotizirati delovno mesto ali delovno nalogo, moramo upoštevati ta izhodišča:

- IZBIRA IN DOLOČITEV ROBOTA, KI BO ZADOSTIL ZAHTEVAM NAROČNIKA,
- HITROST PROIZVODNJE OZIROMA CIKEL DELOVANJA ROBOTIZIRANEGA SISTEMA,
- DOLOČITEV PARALELNEGA DELOVNEGA MESTA,
- KOMPLEKSNOŠT AVTOMATIZACIJE,
- EKONOMSKA UPRAVIČENOST,
- ČASOVNI TERMIN UVEDBE ROBOTIZACIJE,
- NAKLONJENOST OKOLJA,
- PODPORA VODSTVA.

## *Izbira in določitev robota, ki bo zadostil zahtevam naročnika*

Glede na zahteve naročnika je treba izbrati primeren tip industrijskega robota. Upoštevamo namen-skost robota (paletizacija, varjenje, barvanje idr.), velikost robota, delovni prostor robota in primer-nost glede na izbrano aplikacijo, nosilnost, ki jo lahko robot manipulira ter obliko in lastnosti name-

ščenega orodja. Upoštevati je treba kasnejše vzdrževanje, možnosti nakupa rezervnih delov, možnost ponovne uporabe industrijskega robota in drugo.

## KR 30 R2100



### Technical data

Maximum reach	2101 mm
Rated payload	30 kg
Maximum payload	36.5 kg
Maximum supplementary load, rotating column / link arm / arm	-
Pose repeatability (ISO 9283)	± 0.05 mm
Number of axes	6
Mounting position	Floor; Ceiling; Wall; Desired angle
Footprint	603 mm x 480 mm
Weight	approx. 533 kg

### Axis data

Motion range	
A1	±185 °
A2	-175 ° / 60 °
A3	-120 ° / 165 °
A4	±180 °
A5	±125 °
A6	±350 °
Speed with rated payload	
A1	180 %/s
A2	165 %/s
A3	180 %/s
A4	250 %/s
A5	250 %/s
A6	360 %/s

### Operating conditions

Ambient temperature during operation	0 °C to 55 °C (273 K to 328 K)
--------------------------------------	--------------------------------

### Protection rating

Protection rating (IEC 60529)	IP65
Schutzart Arm (IEC 60529)	IP65 / IP67
Protection rating, robot wrist (IEC 60529)	IP65 / IP67

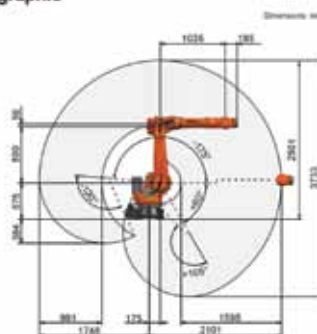
### Controller

Controller	KR C5; KR C4
------------	-----------------

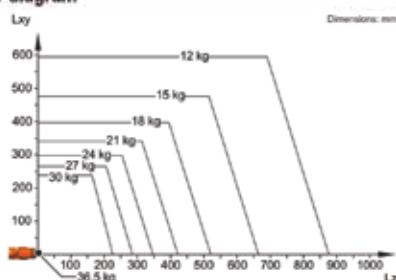
### Certificates

ESD requirements	IEC61340-5-1; ANSI/ESD S20.20
------------------	-------------------------------

### Workspace graphic

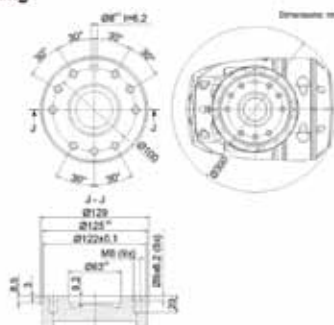


### Payload diagram



The KR 30 R2100 is designed for a rated payload of 30 kg in order to optimize the dynamic performance of the robot. The maximum payload of 36.5 kg applies only if the position of the center of mass is 0 mm and a supplementary load optimized for the load case is mounted. The specific load case must be verified using KUKA.Load or KUKA.Compose. For further consultation, please contact KUKA Support.

### Mounting flange



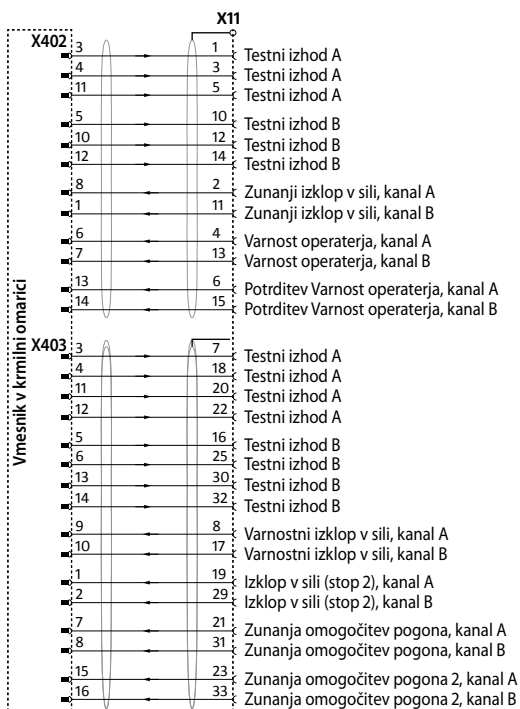
Slika 174: Podatkovni list (angl. data sheet) robota Kuka KR 30

Na Sliki 174 vidimo podatkovni list industrijskega robota Kuka KR 30. Podatkovni list je običajno na voljo na spletni strani proizvajalca robotov. (V iskalnik vpišemo npr. »Kuka download« in se povežemo s spletno bazo omenjenega proizvajalca; enako omogočajo drugi ponudniki). Ko izbiramo industrijskega robota, namenjenega določeni industrijski aplikaciji, najdemo bistvene podatke v podatkovnem listu posamezne naprave. V dokumentaciji so osnovni podatki, kot so maksimalni doseg robota, nazivna nosilnost, maksimalna nosilnost, ponovljivost mehanizma, število osi, način montaže (tla, strop, stena) ter osnovna masa robota. Podani so tudi podatki o možni rotaciji posamezne osi, delovna temperatura, standardi zaščite in tip krmilnika robota. Bistvena informacija je izrisan 2D- delovni prostor z vsemi zahtevanimi kotiranimi merami. To je zelo pomembno, ko imple-

mentiramo aplikacijo v delovni prostor robotskega mehanizma. Izris 2D-delovnega prostora ni dovolj za uspešno izvedbo robotske aplikacije. Kot smo opisali v poglavju, ki se je navezovalo na delovni prostor robotskega mehanizma, poznamo delovni prostor dosegljivosti in priročni delovni prostor. Proizvajalec ne podaja informacije o gibljivosti robotskega mehanizma, ki je bistven podatek, ker nam pove, v katerem območju delovnega prostora robotskega mehanizma je ta najučinkovitejši, da tja postavimo robotsko aplikacijo. Trenutno lahko gibljivost robotskega mehanizma izračunamo z matematičnimi metodami na podlagi matematičnega modela mehanizma. Zanimiva je tudi informacija o nosilnosti, ki se spreminja s pomikanjem v prostoru in z ročico, ki se pri tem ustvari glede na bazni sistem robota. Pomembno je, da pri nosilnosti robotskega mehanizma upoštevamo, da nosilnost računamo od prirobnice naprej in zato pri nosilnosti upoštevamo maso vseh segmentov in orodja, ki je pritrjeno na prirobnico robota. V podatkovnem listu je med drugim prikazana tudi montažna prirobnica (angl. *mounting flange*) z vsemi tehnološkimi karakteristikami.

#### Varnostni vmesnik X11

Priključki



Slika 175: Varnostni vmesnik x11

Ko industrijskega robota pritrđimo in priključimo na električno omrežje, priključimo tudi varnostne funkcije. Robotski krmilnik preverja varnostne funkcije v robotski celici in njeni okolici. Brez zagotovljenih varnostnih signalov se robot ne sme premikati. Temu je namenjen poseben segment krmilne elektronike in posebne sponke (npr. X11), ki zagotavlja mehaniko električno priključitev posameznih enot. Na omenjene sponke priključimo tipke za izklop v sili, varnostne skenerje, varnostno stikalo na vratih robotske celice in ostale varnostne funkcije. Na Sliki 175 vidimo primer varnostnega vmesnika robota. Sledi prva kalibracija oziroma nastavitve (angl. *Mastering*). To pomeni, da po vnaprej določenem postopku nastavimo izhodiščne lege posameznih osi, da izpeljemo meritev

za sistem vodenja industrijskega robota (servopogon). Mastering lahko izvedemo na več načinov, in sicer glede na možnosti proizvajalcev in vrsto robotskega mehanizma.

Mastering Kuka robota



Mastering ABB robota



Mastering Fanuc robota



Mastering Yaskawa robota



Prvi postopek je mehanski, tj. z merilno uro, ki jo privijačimo v namenski utor za kalibracijo (Slika 176). Posamezno os postavimo v izhodiščno lego s pomočjo odčitka na mehanski merilni uri. Drugi način kalibracije je mogoč z elektronsko napravo, ki jo priključimo na industrijskega robota; to omogoča natančnejšo kalibracijo.



Slika 176: Kalibracijska pozicija

Običajno je delo pred robotizacijo opravljal človek. Z uvedbo robota se načeloma delovno mesto izgubi, hkrati pa nastanejo nova delovna mesta v robotovi okolici. Nekdo mora robota postaviti in zmontirati, nastaviti in kalibrirati ter programirati. Lahko se določi paralelno delovno mesto, če možnosti to dopuščajo. Dejstvo je, da mora delavec podajati material robotu, ga nastavljati, izbirati programe ter servisirati in vzdrževati. Industrijski robot sam ni zelo natančna naprava (odprta kinematična veriga, natančnost  $\pm 0,12$  mm), ima pa zelo dobro ponovljivost, kar je prednost pri zagotavljanju enakih serijskih izdelkov in tudi kakovosti. Primer je varjenje z robotom. Varilec je lahko vrhunski mojster, ampak zvari ne bodo nikoli popolnoma enaki. To lahko dosežemo z robotskim varjenjem. Pomemben vidik je ekonomska upravičenost. Robot lahko deluje 24 ur dnevno, izjema so servisni intervali in nastavitve naprav. Industrijski roboti imajo zelo dobro dobo amortizacije. Kot primer lahko navedemo varilnega robota. Če je vrednost investicije v varilno celico približno 100.000,00 evrov, je pri serijski proizvodnji lahko doba amortizacije dve leti. Glede na to, da je delovna doba industrijskih robotov do deset let, lahko sklepamo, da bi robot v tem primeru osem let ustvarjal ekonomski dobiček.





*Tudi kaplja izdolbe kamen, ne z močjo, temveč z vztrajnim padanjem.*

*Latinski pregovor*

```
1 DEF uporaba_industrijskih_robotov ()
2 INI
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : industrijsko_okolje
4 ponovi
5 robotizirana_aplikacija ()
6 industrija_4_0 ()
7 fleksibilna_proizvodnja ()
8 until perfektno
9 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Osnova [1] : konkurenčno_podjetje
```

# APLIKACIJE INDUSTRIJSKIH ROBOTOV

Industrijski roboti so implementirani v vseh sklopih sodobne avtomatizirane fleksibilne proizvodnje. V Sloveniji je po IFR trenutno v letu 2021 v proizvodne procese vključenih približno 20.000 industrijskih robotov. Številke se vsako leto povečujejo. Podjetja morajo biti vse bolj fleksibilna in konkurenčna na globalnem trgu in robotika je ena izmed tehnologij, ki to omogoča. Po podatkih IFR je bilo v letu 2020 globalno v uporabi 3.053.000 industrijskih robotov. Številka je relativno visoka in prikazuje uporabljen količino industrijskih robotov globalno.

## Paletizacija

Namen procesa paletizacije je na paletah povezati posamezne manjše kosovne izdelke v večje tovarne enote in tako omogočiti neprekinjeno verigo v procesu logistike od surovca do izdelka in končnih potrošnikov. Palete uvajajo v proizvodne, transportne, skladiščne in distribucijske postopke, pri čemer njihova množična uporaba močno vpliva na nižanje stroškov, racionalizacijo proizvodnih procesov ter večanje produktivnosti. Primer paletizacije je zlaganje vreč moke na paletu, zlaganje akumulatorjev na paletu, paletizacija tetrapakov mleka in drugih izdelkov. Industrijski roboti imajo za paletizacijo posebna namenska prijemala, ki omogočajo proces manipulacije in logistike kosov. Na Sliki 177 vidimo paletizacijo pločevink. Glavna cilja paletizacije sta zbiranje, združevanje raznovrstnega kosovnega blaga v večje, standardizirane manipulacijsko transportne enote (palete) tovara in povratni tok praznih palet, posledično dosežemo:



Slika 177: Paletizacija z industrijskim robotom

- optimizacijo manipulacije in logistike izdelkov,
- zmanjševanje ali izključitev fizičnega dela v procesu manipuliranja z izdelki,
- povečevanje izkoriščenosti skladiščnih zmogljivosti teh kapacitet transportnih centrov;
- optimalno izkoriščanje prometne infrastrukture;
- povečevanje hitrosti, varnosti in racionalizacije procesa prometnih storitev,
- povečevanje delovnega učinka,
- zniževanje stroškov.



## Varjenje z industrijskimi roboti

V praktičnih varilnih aplikacijah z industrijskimi roboti se uporabljajo predvsem robotske tehnike varjenja: točkovno uporovno varjenje in električno varjenje z elektrodami.

### Točkovno uporovno varjenje

V robotiki se točkovno uporovno varjenje uporablja za tehnološko združitev dveh kovinskih kosov. Običajno so to sklopi avtomobilskih karoserij in podobne aplikacije. Pri tem morajo biti pločevinaste komponente že predhodno pritisnjene ena ob drugo. Varilne klešče z bakrenimi elektrodami v želeni točki uporovnega vara, kjer se pločevini stikata, stisneta pločevinasti komponenti ter spustita tok skozi elektrodi in obe plasti pločevin.

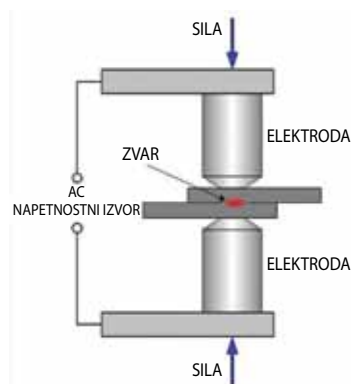


Slika 178: Točkovno varjenje z industrijskim robotom

Pri tem morajo biti bakrene klešče in hladilna telesa dovolj hladni, da se ne začnejo taliti. Pri tem se zmečkata obe plasti pločevine, in sicer le v točki, kjer se elektrodi dotakneta površine obeh pločevin. Ko se elektrodi odmakneta, je tok skozi pločevino prekinjen in začne se rekristalizacija raztaljenega materiala pločevin. Pri ponovni vzpostavitvi kristalne mreže zavarjenega mesta obeh plasti pločevin ju zvar trdno drži skupaj. Programer mora upoštevati operacije točkovnega varjenja, ki si sledijo po naslednjem vrstnem redu:

- postavitve vrhov elektrod v pravilno lego,
- stisk elektrod,
- aplikacija varjenja (električni tok skozi klešče in material),
- zadržimo primeren čas,
- odmik elektrod,
- odmaknitev klešč oziroma premaknitev v drugo lego.

Varilne klešče z elektrodami imenujemo tudi varilna priprava, večinoma so sestavljene iz sovpadajočih elektrod in mehanizma klešč (npr. C-varilne klešče). Bakreni nastavki na varilnih kleščah se po določenem času deformirajo, zato jih mora operater ciklično menjati.



Slika 179: Koncept uporovnega varjenja

Vrtanje z robotom



Točkovno varjenje z robotom



## Robotizirano varjenje

Robotizirano varjenje je zelo pogosta aplikacija v avtomatiziranih proizvodnih sistemih. Prednost je predvsem ponovljivost in kakovost zvarov, višja produktivnost ter fleksibilnost pri izvedbi naročil. Glede na način varjenja poznamo MIG/MAG (angl. *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*, glede na zaščitni plin, ki je lahko inertni ali aktivni), TIG (*Tungsten Inert Gas*, varjenje z volframovo elektrodo v zaščitnem plinu), lasersko varjenje, plazemsko varjenje in varjenje z elektronskim snopom. Najpogostejše robotizirano varjenje je tehnologija MIG/MAG, ki spada v skupino obločnega varjenja v zaščitnem plinu. Varilna šoba omogoča dotok zaščitnega plina in varuje mesto zvara pred izpostavljenostjo zraku (problematična sta kisik in dušik). Pri omenjeni tehnologiji varjenja lahko toploto, potrebno za taljenje osnovnega in dodajnega materiala, omogoči električni oblok. Električni oblok se vzpostavi med konico varilne žice (navita je na kolut in se med varjenjem avtomatizirano dovaja na točko varjenja) ter osnovnim materialom. Varilna celica MIG/MAG vsebuje po navadi varilnega robota ter varilno pripravo, ki je nameščena na prirobnico robotskega mehanizma, na kolut navito varilno žico, rezervoar (jeklenka) **z zaščitnim plinom**, **sodoben varilni izvor** (invertni varilni izvor) in avtomatizirano pripravo za ciklično čiščenje varilnih šob (Slika 181).



Slika 180: MIG/MAG robotizirano varjenje



Slika 181: Čistilna priprava

Robotski mehanizem je namenjen manipulaciji varilnega orodja, zato robotu pri varjenju nastavljamo samo parametre gibanja (hitrost, orientacija, lega, kot, smer). Varilne parametre (varilni tok in napetost, enosmerni ali pulzni tok, frekvenca in drugo) običajno nastavimo na varilnem izvoru, shranimo nastavitve v določen parameter, ki ga potem uporabimo v varilnem programu. Vsi standardi, priprave in postopki so enaki kot pri ročnem varjenju, razlika je samo v izvedbenem delu, pri katerem robot manipulira z varilnim orodjem namesto človeka; sistem varjenja je torej avtomatiziran. Človekovo delo pa je potrebno pri servisiranju in vzdrževanju (npr. zamenjava varilnih šob, zamenjava jeklenke plina, zamenjava koluta varilne žice), podajanju materiala in logistiki varjenčev.



Upoštevati je treba vse varnostne standarde ter standard kakovosti pri varjenju (SIST EN 729). Podroben opis varilnih postopkov je opisan v popisu varilnega postopka (angl. *Welding Procedure Specification*), ki izhaja iz standarda SIST EN 288.

## Strojna obdelava

Aplikacije strojne obdelave z industrijskimi roboti so med drugimi:

- vrtanje,
- rezkanje,
- brušenje,
- ulivanje v kalupe,
- rezanje pločevine,
- poliranje.

**Vrtanje** je pri strojni obdelavi ena najpogostejših aplikacij robotov. Aplikacija zahteva natančno pozicioniranje vrha orodja z upoštevanjem natančnosti robota. Na Sliki 182 je primer vrtanja z industrijskim robotom.



Slika 182: Vrtanje z robotom



Slika 183: Robotsko frezanje

**Frezanje** oziroma tehnologija odzemanja materiala z robotom predstavlja cenovno ugodnejšo alternativo sodobnim obdelovalnim strojem. Industrijski roboti so tudi cenejši, fleksibilnejši in lahko delujejo v večjem delovnem prostoru. Če dodamo še dodatno os (tirnico), se ta delovni prostor še poveča. Največja težava pri robotskem odzemanju materialov je togost robotskega mehanizma, ki jo povzročijo odprta kinematična veriga, velik vztrajnostni moment sistema in materiala tehnološko pogojene sile pri odzemanju. Struktura je elastična. Robotske aplikacije za odzemanje materiala so v primerjavi s sodobnimi obdelovalnimi stroji trenutno manj natančne prav zaradi nezadostne togosti robotskega mehanizma.



**Poliranje** z industrijskim robotom je izvedeno s posebnim orodjem za poliranje, ki je nameščeno na prirobnico industrijskega robota. Avtomatizacija postopka poliranja je razdeljena na štiri segmente. V prvem segmentu s pomočjo postprocesorja in CAD-programskega orodja generiramo konturo, po kateri se bo gibal mehanizem. Da bi sledili površini, je treba zagotoviti informacijo o povratnih silah. Na podlagi matematičnih modelov in računalniških izračunov je mogoče predvideti grobost površine, ki jo lahko dosežemo po aplikaciji poliranja. V zadnji fazi sledi fino poliranje. Večina zapletenih procesov poliranja se izvaja ročno. Izvedba tega temelji na strokovnem znanju delavca. Avtomatizacija izvedbe poliranja zagotavlja zmanjšanje človekovega dela in ponovljivost izvedbe v serijskih aplikacijah.



Slika 184: Robotsko poliranje

**Brušenje** in poliranje z industrijskim robotom sta standardni operaciji pri končni obdelavi izdelkov. Avtomatizacija je izvedena z industrijskimi roboti, da bi razbremenila delavce v nevarnih delovnih okoljih. Vendar so trenutno znani sistemi precej dragi in neprilagojeni geometrijskim oblikam obdelovancev, zato se zaradi ekonomskih razlogov uporabljajo le za veliko serijsko proizvodnjo. Aplikacija brušenja se uporablja predvsem v sanitarni industriji za brušenje armatur in drugih sanitarnih sklopov. Obdelovanci so običajno izdelani s tehnologijo litja. S tehnologijo brušenja in poliranja zagotovimo visokokakovostno sijočo površino.



Slika 185: Robotsko brušenje



**Robotsko rezanje pločevine z laserjem** je aplikacija, s katero je na prirobnico industrijskega robota nameščena laserska naprava, namenjena rezanju pločevine. Laserski izvor zagotovi pri tem konceptu potrebno temperaturo za razrez materiala. Pločevina je postavljena na posebni mizi, namenjeni laserskemu razrezu. Značilnosti laserskega razreza je, da se uporablja visoko energijski snop svetlobe, ki je s posebno zasnovanim optičnim sistemom usmerjen na določeno točko obdelovanca. Koherentno usmerjeni snop svetlobe topi, izpari ali zgoreva material. Lasersko rezanje omogoča rezanje z visoko hitrostjo in relativno ozkim rezom materiala. Rezultat je večja natančnost, višja kakovost in prilagodljivost.



Slika 186: Robotsko lasersko rezanje

## Barvanje z industrijskim robotom

Ena izmed najstarejših aplikacij je aplikacija barvanja z industrijskim robotom. Med drugim se uporablja v avtomobilski industriji za avtomatizirano barvanje karoserij avtomobilov. Glede na to, da so avtomobili na proizvodni liniji običajno izdelani po naročilu stranke (angl. *custom made*), je vsak izmed avtomobilov na liniji drugačne barve. V ta namen imajo posebno mešalnico barv, ki na podlagi kode avtomobila zmeša prilagojeno barvo. To pomeni, da mora celoten sistem, vključno z robotom, po vsaki akciji barvanja očistiti šobe sistema barvanja, nato pa s posebnim orodjem na prirobnici robota prevzeti namešano barvo za določen avtomobil. Primer je podjetje Audi, pri katerem lahko stranka izrazi željo po točno določeni barvi. Roboti, namenjeni barvanju, so zaščiteni s posebnim pokrivalom zaradi prašnih delcev barve, ki bi lahko dosegli notranjost in gonila in povzročili okvaro pogona robota. Da bi zagotovili optimalni nanos barve, so sklopi, namenjeni barvanju, naelektreni z nasprotnim nabojem kot barva, s katero barvamo. Ker se nasprotno polarizirane elektrine privlačijo, objekt barvanja privlači prašne delce barve. Tako zagotovimo manjše izgube in enakomernejšo porazdelitev prašnih delcev.



Slika 187: Barvanje karoserije avtomobila z industrijskim robotom

Robotsko rezanje pločevine



Robotsko barvanje





1. Oglejte si interaktivni video in odgovorite na vprašanja.



2. Kakšen je namen začetne kalibracije (masteringa) industrijskega robota?
3. Delovna oznaka industrijskega robota običajno vsebuje tudi podatek o masi (KR 5, LR 10iA in drugo). Kaj nam omenjeni podatek pove? Ali lahko omenjeno vrednost presežemo?
4. Na spletu raziščite, ali obstajajo posebne izvedbe robotiziranih varilnih aplikacij.

### *Izziv*

5. S CAD-programskim orodjem Solidworks konstruirajte industrijskega robota po izbiri. Obstaja možnost, da prenesete s spletne strani proizvajalca CAD-model, ki vam bo referenca. Robot mora biti v segmentih gibljiv, nameščeno mora biti prijemalo z gibljivimi prsti.





*Inteligenca ne temelji samo na znanju, ampak tudi na sposobnosti uporabe znanja.*

*Aristotel*

```
1 DEF sodelovalni_robot ()
2 INI
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : sodelovalna_aplikacija
4 loop
5 sodeluje_z_delavcem_neposredno ()
6 if (robot_sodeluje = TRUE) then
7     industrijski_robot==sodelovalni_robot
8 endif
9 endloop
10 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Uporabnik [2] : uspešno_sodelovanje
11 END
```

# SODELOVALNI INDUSTRIJSKI ROBOTI

Dandanes je na različnih področjih izpostavljena težnja po sodelovanju človeka in stroja. Iz te težnje so razvili prve sodelovalne robote, ki lahko delujejo neposredno v interakciji s človekom z namenom, da skupaj izvedeta delovne naloge. Sodelovalni roboti (angl. *Collaborative robots* ali *Cobots*) se v zadnjem času čedalje pogosteje uporabljajo v sistemih industrijske robotizacije. Glede na standard ISO/TS 15066: 2016 je sodelovalno (kolaborativno) okolje definirano kot sodelovalni delovni prostor, kjer sodelujeta namensko zasnovan robotski mehanizem in človek. Sodelovalni delovni prostor je definiran kot delovni prostor, kjer lahko robotski sistem in človek hkrati opravljata naloge v proizvodnem procesu. Pri tej obliki sodelovanja je zelo pomemben pojem zaščitna varnostna razdalja, ki podaja najkrajšo dovoljeno razdaljo v sodelovalnem delovnem prostoru med katerim koli premikajočim se nevarnim delom robotskega mehanizma in človekom. Sodelovalni roboti torej opravljajo delovno nalogo v timu s človekom. Pri tem ne potrebujemo varovalne robotske celice, ker imajo sodelovalni roboti nameščena tipala, ki lahko eventualno zaznajo povratno silo in človekov dotik. So lahki in zelo fleksibilni, lahko jim spreminjamo lokacijo izvajanja delovnih nalog na enostaven način, programiranje je relativno enostavno. Trenutna slabost je hitrost izvajanja delovnih nalog, ker v sodelovalnem načinu zaradi varnosti ne smejo delovati v hitrem režimu. To je trenutno rešeno z varnostnimi skenerji podobno kot pri klasičnih industrijskih robotih. Skener lahko zazna bližino človeka in temu primerno zmanjša delovno hitrost na sodelovalno hitrost (po standardih je hitrost sodelovalnih robotov omejena na 0,8 m/s, klasični industrijski roboti po standardih lahko dosegajo hitrosti do 2,2 m/s pod pogojem, da so omogočene vse varnostne funkcije). Trenutni sodelovalni roboti omogočajo sodelovanje človeka in robota na nivoju delovanja drug ob drugem, brez dotikov, tako da človek opravi svoje delovne naloge, potem pa sodelovalni robot nadaljuje z svojim sklopom delovnih nalog. Naslednji korak je popolno sodelovanje in odgovorno



Slika 188: Klasična robotska celica

sodelovanje vseh deležnikov v sodelujoči aplikaciji. Na Sliki 188 vidimo klasično robotsko celico. V tem primeru je industrijski robot običajno zaradi varnosti ograjen. Ko gre za sodelovalnega robota, varovalna ograja ni potrebna.

Standard ISO/TS 15066



## Sodelovalni roboti na globalnem trgu:

---



Slika 189: Universal robots

Prvi na tržišču od  
Leta 2005,  
Trenutno 40-odstotni  
tržni delež  
globalno.



Slika 190: Kuka LBR iiWA

Eden izmed prvih  
sodelovalnih  
robotov, razvit na  
inštitutu DLR.  
Vrhunec  
tehnologije.



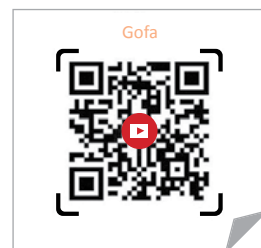
Slika 191: Fanuc CR-4iA

Klasična  
konstrukcija  
robotskega  
mehanizma z  
lastnostmi  
sodelovalnega  
robota.



Slika 192: ABB GOFA

Najnovejši  
sodelovalni robot  
proizvajalca ABB.  
VR predpripravljen.



## Sodelovalni roboti na globalnem trgu:

---



Slika 193: Fanuc CRX

Najnovejši produkt  
proizvajalca Fanuc.



Slika 194: Franka Emika Panda

Zanimiv  
sodelovalni robot,  
ki že ima  
integrirano  
prijemalo.



Slika 195: Omron TM 700

Sodelovalni robot  
proizvajalca  
Omron, ki že ima  
tovarniško  
integriran strojni  
vid.



Slika 196: Kuka LBR iiSY

Okrnjena manjša  
izvedba LBR iiWA.



## Sodelovalni roboti na globalnem trgu:

---



Slika 197: Yaskawa HC 10

Sodelovalni robot  
Yaskawa.



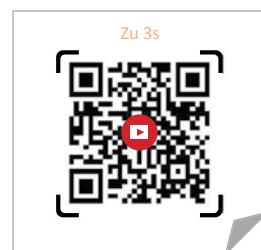
Slika 198: Hanwha HCR-3A

Korejski  
proizvajalec  
sodelovalnih  
robotov Hanwha.



Slika 199: Jaka Zu 3s

Kitajski  
proizvajalec  
sodelovalnih  
robotov Jaka.



Obstaja še veliko drugih proizvajalcev sodelovalnih robotov, predvsem iz Južne Koreje in Kitajske.

Na Sliki 200 je vidna notranja konstrukcija enega izmed sodelovalnih robotov. Ker so sodelovalni roboti po navadi konstrukcijsko izdelani za nižje obremenitve, je tudi tehnološko izdelan na drugačen način kot klasični robot. Običajno so pogoni kompaktni, brez prenosov prek jermenov in podobno. Zunanost sodelovalnega robota je zelo ergonomsko oblikovana brez ostrih robov. Sodelovalni roboti imajo nameščena sodelovalna prijemala. Sodelovalnim prijemalom je mogoče nastaviti prijemalno silo, hitrost odpiranja in podobne parametre. Tudi sodelovalna prijemala so ergonomsko oblikovana z namenom zmanjšanja možnosti poškodb človeka.



Slika 200: Notranja konstrukcija sodelovalnega robota



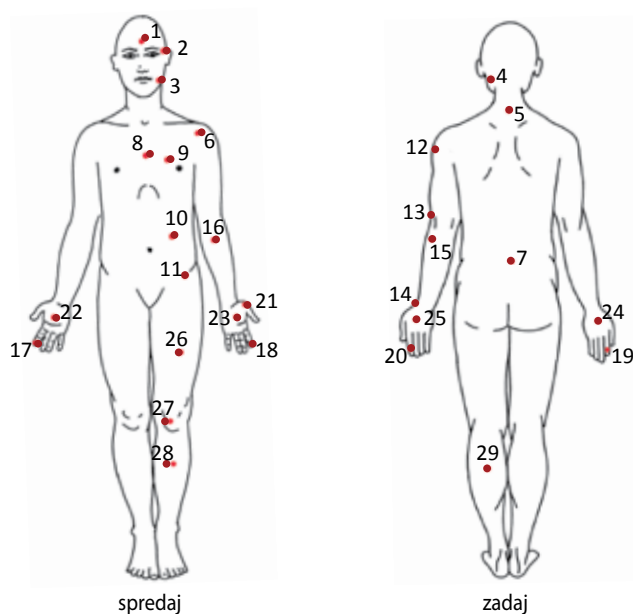
Slika 201: Prijemalo EGP

Na Sliki 201 je sodelovalno prijemalo Schunk EGP-C. Pogon prijemala je izveden z električnimi servomotorji. Prijemalo ima dva digitalna vhoda, s katerima prožimo odprtje/zaprtje prijemalnih prstov. Na krmilniku sodelovalnega robota fizično električno povežemo digitalne izhode in vhode na priključke sodelovalnega prijemala. Prijemalo omogoča tudi indikacijo o odprtem oziroma zaprtem prijemalu prek digitalnih izhodov prijemala na vhod robotskega krmilnika. Prijemalu je mogoče nastaviti silo in hitrost pomikanja prstov. Prste konstruiramo v programskem okolju CAD glede na želeno aplikacijo in natisnemo s 3D-tiskalnikom.

Pri sodelovalnih robotih so bistvene varnostne nastavitve in upoštevanje varnostnih standardov pri delovanju robota. Sodelovalni robot lahko deluje enako kot klasični industrijski robot, ki je varovan z varovalno robotsko celico. Največji problem je trenutno hitrost delovanja, ki je v sodelovalnem procesu omejena na 0,8 m/s. Zato lahko sodelovalnega robota programirano v procesu delno sodelovalnega delovanja. V tem primeru se v nesodelovalnem režimu po tirnici zapelje v robotsko celico,



tam hitro opravi namenske naloge, se nato zapelje iz celice in tam dokonča delovni proces v sodelovanju s človekom. Druga možnost je kombinacija z varnostnim skenerjem, kjer se hitrost omeji glede na bližino človeka. Bistven sklop pri programiranju in nastavitvah sodelovalnega robota je nastavitve varnostnih funkcij in varnostnih con v delovnem okolju sodelovalnega robota. Varnostna navodila podaja standard ISO/TS 15066. Na Sliki 202 vidimo sklop omenjenega standarda, kjer so zapisane biološko-mehanske omejitve človeka pri delu z robotom. Podani so tlaki in sile, ki lahko delujejo na določen del telesa. Izhajajoč iz te informacij lahko omejimo hitrost gibanja robota v sodelovalnem delovnem prostoru na način, da zmanjšamo možnost poškodb človeka-operaterja na minimalno možnost. Določeni so sklopi in točke telesa, kjer obstaja možnost kolizije z robotom. Vsaka točka telesa ima določen maksimalni tlak in silo. Treba je upoštevati, ali delavec stoji ob oviri in je lahko možnost stisnjenja ali te ovire ni in so zato vrednosti maksimalnih tlakov in sil drugačne. Te vrednosti in omejitve so bistvene in jih moramo upoštevati in programirati v sodelovalnih robotskih aplikacijah.



Del telesa	Konkretni del telesa	Sprehaj/zadahj
Lobanja in čelo	1 Srednji del čela	Sprehaj
	2 Teme	Sprehaj
Obraz	3 Ustne mišice	Sprehaj
Vrat	4 Vratne mišice	Zadahj
	5 Sedmo vratno vretence	Zadahj
Hrbet in ramena	6 Ramenski sklep	Sprehaj
	7 Peto ledveno vretence	Zadahj
Prsi	8 Prsnica	Zadahj
	9 Prsna mišica	Sprehaj
Trebuš	10 Trebušne mišice	Sprehaj
Medenica	11 Medenična kost	Sprehaj
Zgornji del rok in komolci	12 Trikotna mišica	Zadahj
	13 Ključnica	Zadahj
	16 Živci na roki	Sprehaj
	14 Radialna kost	Zadahj
Spodnji del rok in zapestja	15 Podlaktna mišica	Zadahj
	17 Blazinica kazalca D <sup>a</sup>	Sprehaj
Roke in prsti	18 Blazinica kazalca ND <sup>a</sup>	Sprehaj
	19 Sklep kazalca D <sup>a</sup>	Zadahj
	20 Sklep kazalca ND <sup>a</sup>	Zadahj
	21 Zapestje	Sprehaj
	22 Dlani D <sup>a</sup>	Sprehaj
	23 Dlani ND <sup>a</sup>	Sprehaj
	24 Zadnji del rok D <sup>a</sup>	Sprehaj
	25 Zadnji del rok ND <sup>a</sup>	Zadahj
	Stegna in kolena	26 Stegenska mišica
27 Pogačica		Sprehaj
Spodnji del nog	28 Srednji del golenice	Sprehaj
	29 Zadnja mišica	Zadahj

<sup>a</sup> D = dominantna stran telesa (desno ali levo); ND = nedominantna stran telesa.

Slika 202: Opis modela človeškega telesa – sklop standarda ISO/TS 15066

Standard ISO/TS 15066



ABB APP Builder





1. Zakaj uvajajo sodelovalne robote? V katerih industrijskih aplikacijah je mogoče uporabiti sodelovalne robote?



2. Oglejte si spodnji video. Kako je zgrajen sodelovalni robot?



3. Ali so prijemala za sodelovalne robote tehnološko drugačna kot klasična prijemala? Zakaj?

### Izziv

4. V CAD-programskem orodju Solidworks konstruirajte prste za izbrano sodelovalno prijemalo. Upoštevajte priporočila in varnostne standarde.





*Kdor uči drugega, uči tudi samega sebe.*

*Seneka*

```
1 DEF kibernetski_sistem ()
2 INI
3 PTP Vel=100 % DEFAULT Orodje [1] jaz Osnova [1] : virtualna_realnost
4 loop
5 virtualna_realnost ()
6 if (vr_očala = TRUE) then
7     vpliv_dojemanje=dojemanje+1
8 endif
9 endloop
10 PTP HOME Vel=100% DEFAULT Orodje[1] : jaz Uporabnik [2] : obogatena_resničnost
11 END
```

# KIBERNETSKO FIZIČNI SISTEMI V INDUSTRIJSKI ROBOTIKI

Način dela se neprestano spreminja. Globalno se dogajajo spremembe. Dejstvo je, da se moramo vseživljenjsko izobraževati ter prilagajati na nove tehnologije in orodja. To je dinamičen proces, ki se neprestano spreminja in oblikuje delovna okolja. Med drugim vplivajo na industrijske procese tudi sodobne tehnologije. Globalno se uvaja koncept Industrije 4.0, kjer so zelo pomemben sklop kibernetsko fizični sistemi. V sisteme vodenja sta vključena umetna inteligenca ter internet stvari z namenom optimizacije in učinkovitosti avtomatiziranih procesov. Tehnologije, ki imajo trenutno zelo velik potencial, so virtualna resničnost (angl. *Virtual Reality*, VR) in obogatena resničnost (angl. *Augmented Reality*, AR). Virtualna resničnost je opredeljena kot računalniško kreirana 3D- interaktivna simulacija, ki uporabniku omogoča intenzivno vizualno izkušnjo. Raziskave so pokazale, da virtualno okolje izboljša konceptualno in proceduralno znanje ter omogoča učinkoviti trening spretnosti. Kot primer lahko navedemo delavca, ki pride na novo delovno mesto. Možnost je, da delavec nadomesti fizični trening z virtualnim. Tako zmanjšamo možnost napačnih odločitev, okvar in poškodb v samem začetku delovnega procesa.

Če se najprej osredotočimo na virtualno resničnost, potrebujemo primerno strojno opremo. Na trgu je veliko različnih VR-očal, ki omogočajo dovolj intenzivno izkušnjo virtualne resničnosti. Med najbolj uporabljenimi so Oculus Rift, Oculus Quest 2 ter HTC Vive. Omenjena oprema je trenutno v cenovnem razponu od 450 do 800 evrov. Potrebujemo tudi dovolj zmogljiv osebni računalnik ali prenosnik, ki je pripravljen za virtualno resničnost (*VR ready*). Starejša VR-očala (Oculus Rift) imajo zunanje senzorje kontrolnikov in lege v prostori, novejša pa imajo nameščene senzorje na prednji strani VR-očal (HTC Vive, Oculus Quest, Quest 2). Na Sliki 203 so očala Oculus Quest, na Sliki 204 pa VR-očala HTC Vive.



Slika 203: VR-očala Oculus Quest 2

Za ogled VR-vsebin z omejenimi možnostmi interakcije ter ogled 360 VR-filmov lahko uporabimo poseben nastavek za telefon, kot ga vidimo na Sliki 205.



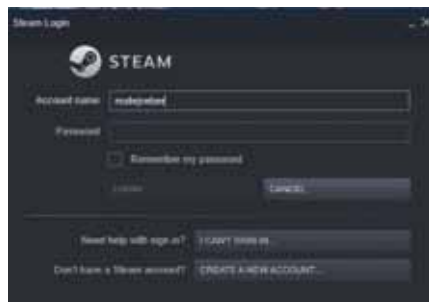
Slika 204: VR-očala HTC Vive



Slika 205: VR 3D-nastavek za pametni telefon

V tem primeru je pametni telefon v vlogi prikazovalnika in enote, ki procesira vsebino. S pomočjo 360 VR-kamere lahko posnamemo različno video gradivo, ga objavimo na spletni platformi in si ga ogledamo v 360-stopenjski tehnologiji video vsebin. Na spletnih videoplatfromah je objavljeno veliko 360 VR-videovsebin, ki jih lahko uporabimo pri svojem delu.

Eno izmed programskih orodij za simulacijo robotskih mehanizmov je VR-Robotic robotski simulator. Predvidevamo, da imamo na osebni računalnik priključena VR-očala, nameščene primerne gonilnike, programsko opremo in izvedeno kalibracijo VR-očal. Programsko orodje VR-Robotic robotski simulator lahko vidimo v knjižnici platforme STEAM (Slika 206). Ustvarimo si uporabniško ime in se vpišemo na platformo. Prenesemo aplikacijo in jo namestimo. Po začetnih nastavitvah aplikacijo odpremo in aktiviramo VR-okolje (Slika 208).



Slika 206: Programski vmesnik STEAM



Slika 207: VR-Robotic Simulator



Slika 208: Delovno okolje VR Robotic Simulator-ja

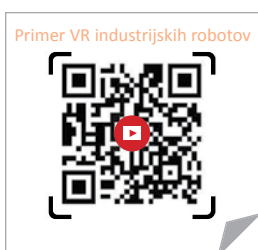
Uporabniški vmesnik omogoča konstruiranje okolja, gradnjo robotskih celic, programiranje robotov in interakcijo z VR-vsebino. Na Sliki 209 je primer upravljanja in nastavljanja industrijskega robota v VR-okolju. Na Sliki 210 vidimo možnosti, ki jih ponuja programski vmesnik. Bistveno je, da delovno VR-okolje ponuja čim resničnejšo izkušnjo in vpliv na kognitivne procese uporabnika. Na Sliki 211 vidimo simulacijo in programiranje tehnologije robotskega varjenja, na Sliki 212 pa resnični prikaz uporabe VR-očal za implementacijo kibernetko fizičnih sistemov v industrijski robotiki.



Slika 209: VR RS programiranje robota



Slika 210: VR RS možnosti





Slika 211: VR RS programiranje varjenja



Slika 212: VR programiranje industrijskega robota

Aplikacije sodobnih tehnologij razvijamo v različnih razvojnih programskih orodjih. Najbolj uporabljena sta *Unity 3D* in *Unreal Engine*. Omogočata razvoj aplikacij virtualne in obogatene resničnosti.

Z implementacijo obogatene resničnosti (AR) in interneta stvari (IOT) lahko zagotovimo informacije v realnem času. Podamo lahko različne informacije, kot so navodila za delo po korakih, ali pa prikazemo informacije na strojih in napravah. Delavec lahko z uporabo mobilnih naprav (pametni telefon, tablični računalnik) ali pametnih očal (*Vuzix Blade*, *MS Hololens*, *Epson Moverio* in druge) hitreje zazna napake in jih odpravi, ker so relevantne informacije prikazane v vidnem polju posameznika. Tehnologija omogoča tudi oddaljeno podporo in povezovanje z zunanjimi strokovnjaki v realnem času med reševanjem problematike. Klasična navodila v pisni obliki bodo nadomestila navodila, prikazana s tehnologijo obogatene resničnosti. Običajno so navodila besedilna in v 2D- obliki, obogatena resničnost omogoča prikaz 3D-oblik. Klasična navodila so običajno nepregledna in je potrebno veliko časa za iskanje določenih pomembnih informacij. Digitalno navodilo zato omogoča hitrejši delovni proces. Drug primer so sodobni stroji in naprave, ki so vse kompleksnejši in zahtevajo veliko znanja za učinkovito delo. Obogatena resničnost nam omogoča, da prikazemo sklope strojev, ki so pomembni za delovno akcijo in omogočimo trening, učinkovito delo s strojem, iskanje informacij in bolj učinkovito odpravljanje napak. Zelo pomembna je uporaba tehnologije pri servisnih in vzdrževalnih aplikacijah. Vmesnik obogatene resničnosti omogoča vizualno vodenje po korakih in oddaljeno podporo v primeru težav. Tehnologija obogatene resničnosti je med drugim uporabna tudi pri treningu montaže strojev in naprav.

Unity 3D



Unreal Engine



Primer izdelave VR app



Primer izdelave AR app



## Poznamo tri tipe AR-pametnih očal:

### Monoskopska AR-očala

Naglavna očala, pri katerih je vsebina prikazana samo na enem očesu. Lahka izvedba, namenjena enostavnim prikazom, pritrjena so lahko na kapo ali čelado.

Primer: Vuzix M serija, Realwear HMT



Slika 213: Vuzix M-4000

### Stereoskopska AR-očala

Naglavna očala, pri katerih je vsebina prikazana na obeh očesih. Omogočajo interakcijo v širšem vidnem polju uporabnika.

Primer: Epson Moverio



Slika 214: Epson Moverio

### Hologrfska AR-očala

Najnaprednejši prikaz obogatene resničnosti. Interakcija v zelo širokem vidnem polju. Namenjene vizualnim vodičem. Prepoznavanje gestikulacije in možnost interakcije.

Primer: Microsoft HoloLens 2



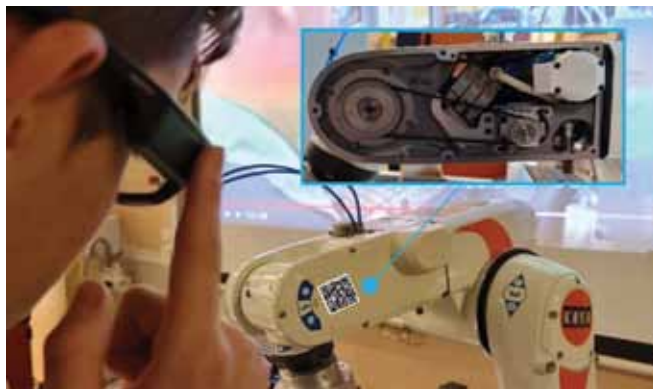
Slika 215: Microsoft HoloLens 2

Tehnologijo AR lahko uporabljamo pri napravah, kot so AR-pametna očala, pametni telefoni in tablični računalniki.

Na Sliki 216 je prikazan koncept obogatene resničnosti na AR-očalih Vuzix Blade, namenjen servisu industrijskega robota. Na robotu je QR-koda, s katero lociramo in prikažemo grafični prikaz. Na Sliki 216 je primer, kjer uporabnik v sistemu obogatene resničnosti na grafičnem vmesniku vidi notranjo zgradbo določenega sklopa robotskega mehanizma.

V naslednjem koraku je mogoče prikazati grafično navodilo za servis določenega sklopa mehanizma ali pa za trening opisovanja določenih segmentov robotskega mehanizma. Na Sliki 217 je primer programiranja trajektorij industrijskega robota s tehnologijo obogatene resničnosti. Na tablični računalnik v obogateni resničnosti narišemo trajektorijo, robotski krmilnik izračuna dejansko želeno trajektorijo in omogoči dejansko spre-

membo lege industrijskega robota. Na zaslonu tabličnega računalnika spremljamo dejansko gibanje, hkrati pa na zaslonu vidimo trajektorijo v sistemu obogatene resničnosti.



Slika 216: Uporaba AR-očal Vuzix Blade v industrijski robotiki



Slika 217: Programiranje robota v AR okolju

Na Sliki 218 je predstavljen sistem obogatene resničnosti Rewo, ki je namenjen vzdrževanju ter servisu strojev in naprav v sistemu obogatene resničnosti. Omogoča tudi oddaljeno podporo z video prikazom v sistemu obogatene resničnosti. To pomeni, da se lahko vzdrževalec prek tabličnega računalnika v živo poveže s strokovnjakom, ki mu lahko svetuje in podaja navodila v sistemu obogatene resničnosti. Na sliki je tudi grafično navodilo, kjer sistem vizualno vodi serviserja po korakih in podaja delovne akcije, ki jih je treba opraviti.



Slika 218: AR sistem REWO



PONOVITEV, NALOGE IN IZZIVI

1. Preučite spletno trgovino na vašem pametnem telefonu; v iskalni niz vpišite »AR« in preizkusite katero izmed vam zanimivih aplikacij.
2. Kaj je umetna inteligenca? Na katere nivoje delovanja lahko razdelimo umetno inteligenco? Na katerem nivoju trenutno deluje umetna inteligenca?
3. Kaj je internet stvari? Podajte nekaj primerov iz vašega okolja. Kaj menite, kako bo v prihodnosti?
4. Kakšno je vaše mnenje o razvoju robotike in umetne inteligence v naslednjih desetih letih
5. Izdelajte preprosto haptično napravo za vodenje enostavnega robotskega mehanizma.

*Izziv*

6. Preberite knjigo:

Kai Fu Lee: *Velesili umetne inteligence*, 2019.

Razmislite in razpravljajte s kolegi v timu o tematiki knjige.



# ZAKLJUČNA BESEDA

Naj povzamemo sporočilo *Malega princa*: ustvarjalni ljudje sanjamo z odprtimi očmi, iščemo nove izkušnje, si postavljamo zanimiva vprašanja, opazujemo druge in njihova mnenja soočimo z lastnimi prepričanji.

Na poti do cilja se spreminjamo v odrasle, odgovorne ljudi, ki so radovedni, pošteni in ne odstopajo od svojih vrednot. Izkoristimo čas za nove izkušnje in doživetja, razmišljajmo osvobojeni miselnih okvirov, bodimo radoživi in vedoželjni.

Živimo v času hitrih sprememb, globalnih pretresov in migracij. Če hočemo ostati konkurenčni na trgu dela, se moramo neprestano izobraževati, iskati nova znanja in spoznanja, pridobivati izkušnje, ki bodo temelj za pridobivanje novih spoznanj. Ko se zavedamo, da še ničesar ne vemo, smo na dobri poti.

Naj vam bo omenjeno gradivo izhodišče za nova znanja na poti v vesolje robotskih tehnologij. Robotika je namreč prihodnost.



# VIRI

## Avtorji in viri slikovnega gradiva

Matej Veber: sl. 3, 9, 11–13, 35, 38–41, 48–62, 66, 67, 70–83, 85–90, 92–96, 98–107, 109, 114, 116, 118, 120–127, 139, 140, 141, 151–158, 161, 162, 165–168, 170, 176, 180, 181, 183, 200, 201, 206–212, 216; str. 35, 75, 89, 95, 109, 115, 121, 143, 153; str. 35, 75, 89, 95, 109, 115, 121, 143, 153; generiranje QR-kod, filmi in povezave.

Ksenija Konvalinka: obdelava in priprava slikovnega gradiva, risanje po predlogah;

Podatkovni listi: KSS\_82\_System\_integrators.pdf: sl. 68, 128–138; Kr\_5\_sixx\_en.pdf: sl. 69; Kr\_150\_2\_r2700\_en.pdf: sl. 87;

Monkman, G.J., Hesse, S., Steinman, R., Schunk, H., Robot Grippers, Wiley, 2007: sl. 159, 160;

<http://www.iat.tu-berlin.de>: sl. 217; <https://www.rewo.io/>: sl. 218;

[https://cdn.sick.com/media/docs/2/92/292/special\\_information\\_safe\\_robotics\\_human\\_robot\\_collaboration\\_en\\_im0073292.pdf](https://cdn.sick.com/media/docs/2/92/292/special_information_safe_robotics_human_robot_collaboration_en_im0073292.pdf): sl. 169, 171, 172, 173;

<https://factoryio.com/>: sl. 188; <https://www.iso.org/standard/62996.html>: sl. 202;

[https://store.facebook.com/quest/products/quest-2/?utm\\_source=www.oculus.com&utm\\_medium=oculusredirect](https://store.facebook.com/quest/products/quest-2/?utm_source=www.oculus.com&utm_medium=oculusredirect): sl. 203;

<https://www.acs-giz.si/novice/na-ogledu-agv-automated-guided-vehicles-2017-02-22>: sl. 5;

<https://www.autonews.com/article/20181204/CCHISTORY/181209882/ford-unwraps-the-model-a-successor-to-the-model-t>: sl. 1;

<https://www.bostondynamics.com/atlas>: sl. 27; <https://ifr.org>: sl. 63–65;

<https://www.bostondynamics.com/products/stretch>: sl. 7;

<https://www.eska-welt.de/en/detail/index/sArticle/19449>: sl. 97;

<https://www.irobot.si/trgovina.html#category-robotski-sesalniki>: sl. 14;

<https://www.kuka.com/en-au/products/mobility/mobile-platforms/kuka-omnimove>: sl. 8, 174, 177, 178, 192;

<https://www.mace.manchester.ac.uk/research/facilities/laser-processing-facilities/>: sl. 186;

<https://www.pilz.com/en-INT/products>: sl. 164;

[https://www.researchgate.net/figure/An-assistive-robotic-arm-on-a-wheelchair-for-ADLs-assistance-12\\_fig1\\_328244309](https://www.researchgate.net/figure/An-assistive-robotic-arm-on-a-wheelchair-for-ADLs-assistance-12_fig1_328244309): sl. 25

<https://www.svet-telefonije.com/izdelek/virtualna-3d-ocala-za-mobilni-telefon/>: sl. 205;

<https://www.tm-robot.com/en/>: sl. 184; <https://nopromat.si/projekt/aquaestil/>: sl. 185;

<https://www.universal-robots.com/products/ur3-robot/>: sl. 4;

<https://www.vive.com/us/product/vive-pro2/overview>: sl. 204;

<https://www.wikipedia.org>: sl. 2, Karel Čapek;

Shutterstock: sl. 6, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 36, 37; str. 15, 19, 47, 103, 137, 163;

## Viri literature

- Veber, M. (2019). Robotizacija proizvodnih procesov. Visoka šola za proizvodno inženirstvo, Interno gradivo.
- Manseur, R (2007). Robot modeling and kinematics. Firewall Media.
- Nof, S. (1999). *Handbook of Industrial Robotics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Monkman, G., Hesse, S., Steinmann, R., Schunk, H. (2007). *Robot Grippers*. New York: Wiley VCH.
- Pires, J., Loureiro, A., Bolmsjo, G. (2006). *Welding Robots*. London: Springer-Verlag.
- Podatkovni list: KSS\_82\_System\_integrators.pdf
- Podatkovni list: Kr\_5\_sixx\_en.pdf
- Podatkovni list: Kr\_150\_2\_r2700\_en.pdf
- Bajd T. (2006). Osnove robotike. Ljubljana: Založba FE in FRI.
- Noe D., Krpač J. (1989). Strega in montaža. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.
- [http://www.ro.feri.uni-mb.si/predmeti/izdel\\_tehmol/Predavanja/Izdel\\_teh3b.pdf](http://www.ro.feri.uni-mb.si/predmeti/izdel_tehmol/Predavanja/Izdel_teh3b.pdf)

*Čuvaj red in red te bo čuval*