

# Senzori u robotici

Samostalnost i inteligencija robota omogućavaju visoku fleksibilnost i uspješnu primjenu robota. Da bi robot bio inteligentan, odnosno na neki način "svjestan" sebe i svoje okoline, mora imati mogućnost mjerenja svojih parametara, parametara okoline i opažanja.

Inteligencija robota, kao što je rečeno polazi od primjene senzora, odnosno senzorske informacije. Različiti uređaji i sistemi, kojima robot dobija informacije o sebi i okolini su senzori. Primjena senzora, tj. podizanje inteligencije, omogućava robotu smanjenje potrebe za periferijskom opremom, koja čini uređenu sredinu, u kojoj većina robota radi u industriji.

Senzori omogućavaju robotu da:

- mjeri sopstvene parametre i parametre okoline,
- da prepozna, odredi poziciju i orijentaciju djelova,
- korekcija grešaka u modelu upravljanja,
- otkrivanje i rješavanje problema u pogrešnim situacijama,
- otkrivanje i izbjegavanje kolizije,
- monitoring interakcije sa okolinom,
- osmatranje promjena, koje mogu uticati na izvršenje zadataka,
- kontrola parametara procesa.

## Klasifikacija senzora

Uopšteno, mogu se klasifikovati po većem broju kriterijuma:

- po fizičkim, hemijskim i drugim veličinama, koje se mjere (brzina, viskozitet, boja i sl.),
- po fizičkim principima na kojima su zasnovani (optički, kapacitivni, piezoelektrični),
- po tehnologiji na kojoj su zasnovani (elektromehanički, silikon, optička vlakna),
- po tipu energije (električna, mehanička, solarna),
- po prostornim odnosima sa objektima (kontaktni, bezkontaktni, daljinski).

U robotici se senzori dele na:

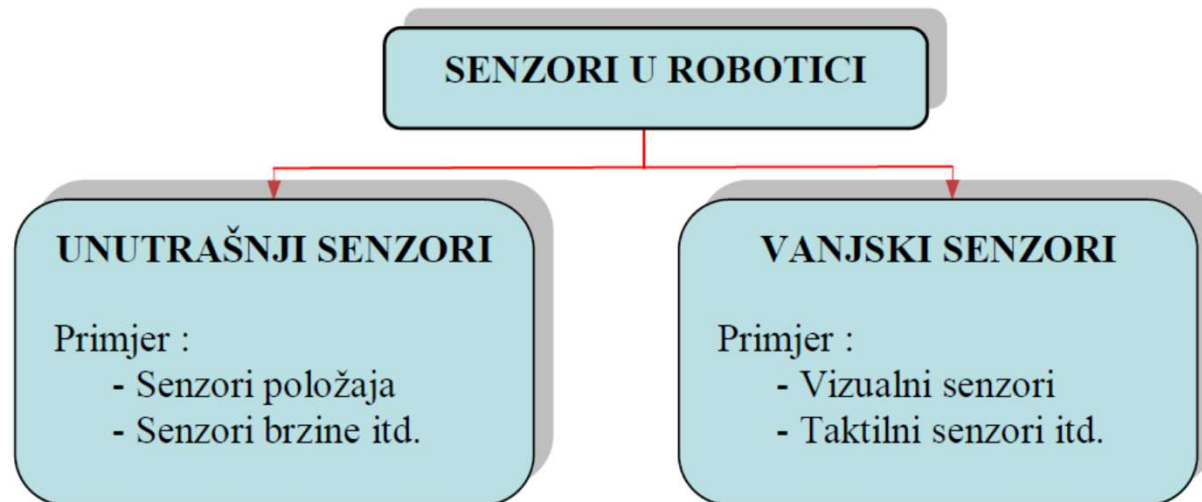
- unutrašnje,
- spoljašnje.

## Unutrašnji senzori

Za modeliranje i upravljanje robota, neophodno je mjerenje pozicije, brzine, ubrzanja, sile i momenata.

Od ostalih su značajni senzori ubrzanja, sile i momenata, kao i različiti mikroprekidači (limit switch), koji mogu biti i unutrašnji i spoljašnji.

Senzori ubrzanja mogu biti zasnovani na korišćenju diferencijala brzine, ili mjerenjem sila za poznate mase.



## Spoljašnji senzori

Spoljašnji senzori daju robotu informacije o okolini. Priroda informacije zavisi od zadatka koji se izvršava, kao i od informacija koje su robotu zadate programom u toku zadatka.

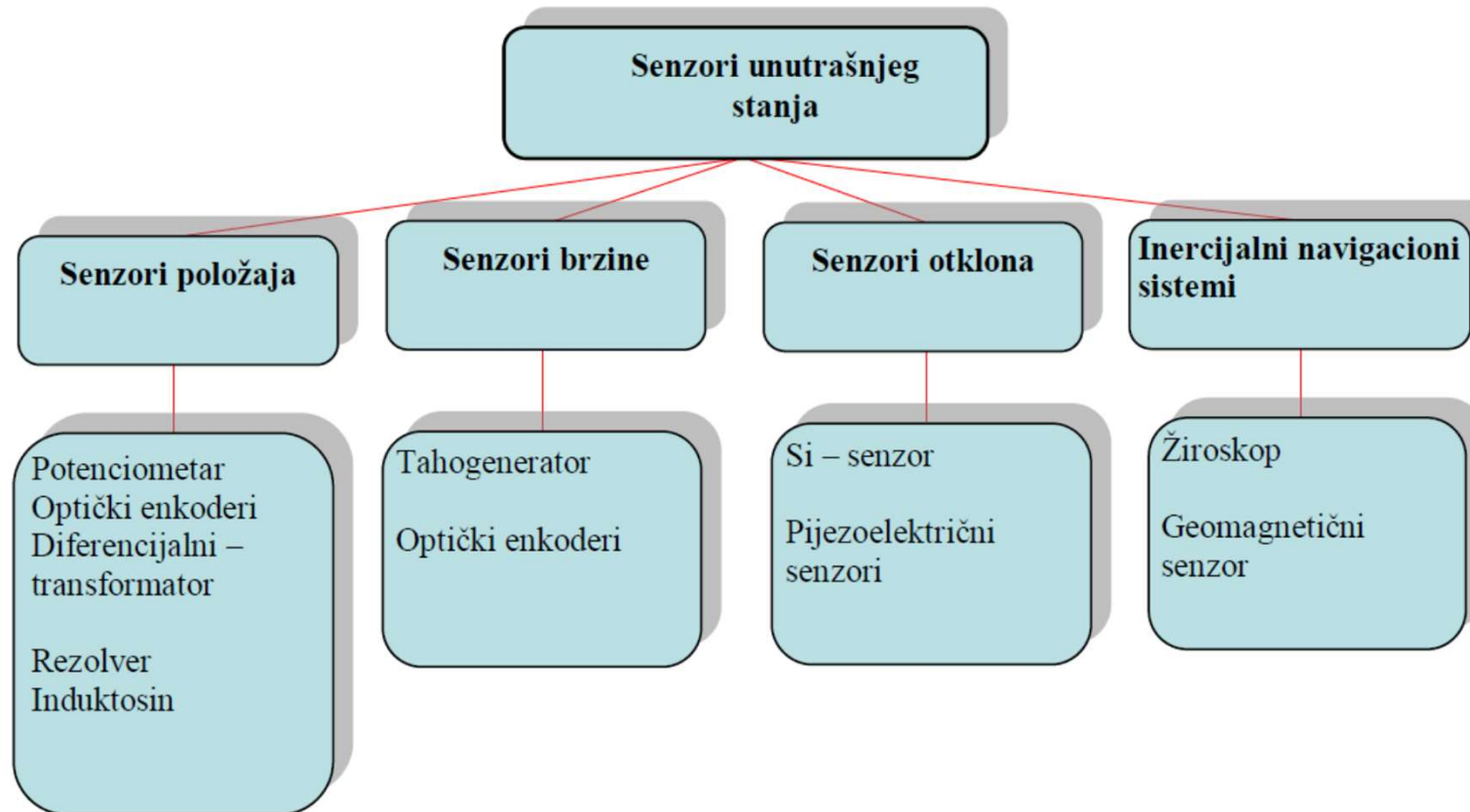
U spoljašnje senzore spadaju :

- senzori dodira
- senzori bliskosti (blizine)
- senzori rastojanja (lokacije)

Pored njih u robotici se često koriste senzori zvuka (prepoznavanje govora), pritiska temperature. . . Najznačajniji i najkompletniji je sistem prepoznavanja (Vision sistem) o kome će biti reči kasnije. Savremeni sistemi robota su praktično zasnovani na principu senzorske fuzije.

## Senzori unutrašnjeg stanja

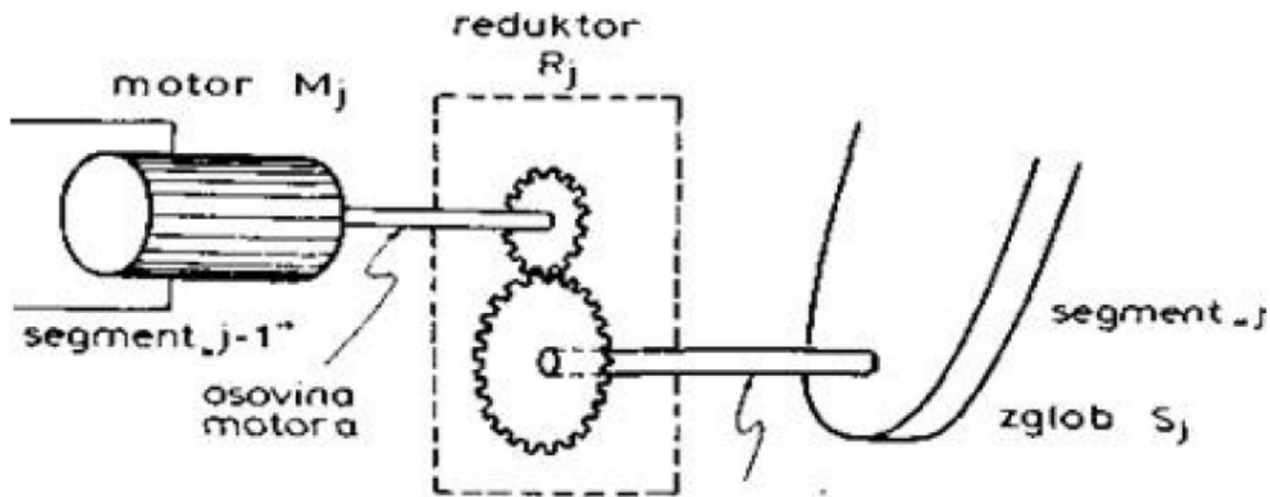
Za senzore unutrašnjeg stanja najbitnija je regulacija pravilnog rada motora. To je ostvarivo mjerenjem pomaka i uglova mehaničkog sistema, a od senzora se zahtijeva ponajprije tačnost, koja je zavisna o greškama koje se mogu javiti u mehaničkom sistemu.



## Mjerni sistemi položaja (puta)

Obezbeđuju stalnu informaciju o položaju pojedinih osa, u odnosu na njihove referentne položaje. Pri ovome se napominje da mogu biti postavljeni na vratilu motora ili direktno u zglobovima rotora. S obzirom da su zglobovi obrtni i/ili translatorni, to su nam potrebni mjerni sistemi za mjerenje ugla ili dužine (moguće je i indirektno mjerenje, na primjer: mjerenje ugla zakretanja rotora i znajući korak zavojnice, može se izmjeriti dužina).

Ranije smo istakli da je za dobijanje kompletne informacije o položaju robota dovoljno izmjeriti uglove obrtanja u rotacionim zglobovima i podužna pomjeranja u translatornim. Treba naglasiti da ugaona i podužna pomjeranja u zglobovima mjerimo počevši od nekog položaja zgloba koji smatramo nultim položajem. O tome se više govorilo kada su definisane unutrašnje koordinate robota. Da bismo uočili gdje treba postaviti mjerače moraćemo uzeti u obzir i način prenosa pogona sa motora na zglob. Posmatrajmo prvo rotacioni zglob pokretan elektromotorom. Šema prenosa prikazana je na slici 6.2. Neka je u pitanju zglob Sj.



SI. 6.2. Rotacioni zglob pokretan elektromotorom

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

$$q_j = \frac{\theta_j}{N_j}, \quad \text{i ima ugaonu brzinu:} \quad \dot{q}_j = \frac{\dot{\theta}_j}{N_j}, \quad \text{gdje je } N_j \text{ redukcioni odnos.}$$



Uloga reduktora objašnjena je detaljnije ranije gdje je diskutovan prenos pogonskog momenta elektromotora .

Podatak o  $q_j$  možemo dobiti direktnim mjerenjem na osovini zgloba ili merenjem ugla  $\theta_j$  na osovini motora, a zatim izračunavanjem pomoću prethodne relacije. Za mjerenje ugla  $q_j$  koristi se potenciometar ili apsolutni enkoder. Za mjerenje velikog ugaonog obrtanja  $\theta_j$  koristi se inkrementalni enkoder. Sva tri uređaja biće opisana kasnije.

Ovu diskusiju možemo i uopštiti i reći da se podatak o pomjeranju rotacionog ili translatornog zgloba može dobiti postavljanjem senzora na sam zglob ili pak mjerenjem pomjeranja na pogonskom motoru kada u obzir moramo uzeti i prenosni sistem.

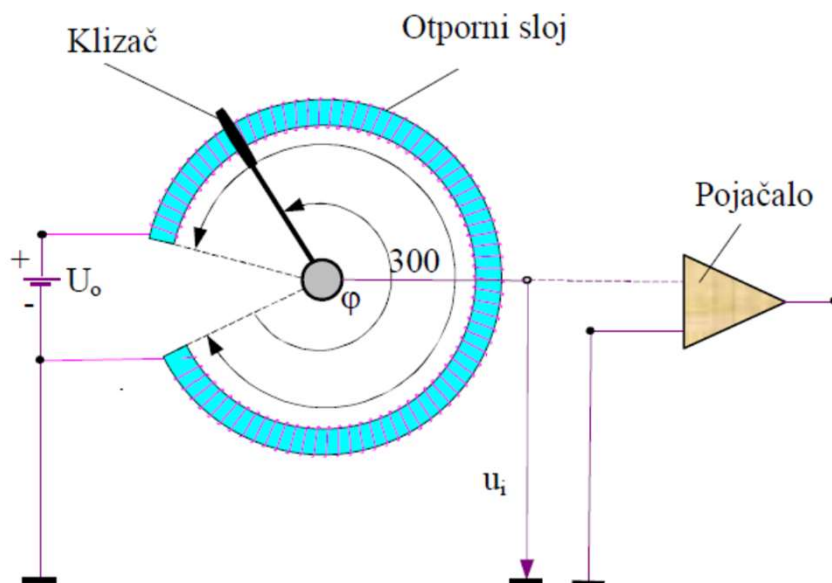
Razmotrićemo različite vrste senzora unutrašnjeg položaja i brzine.

## Potenciometri

Ovi senzori predstavljaju najjednostavniju grupu sistema za mjerenje položaja.

Pretvaraju pomjeraje (linearne i ugaone) u električni napon.

Na slici je prikazan rotacioni potenciometar. Element otpornosti može biti kalem od hrom-nikla (žica, ugljena šipka ili otporna plastika).



Otpornički element u većini slučajeva ima linearnu otpornost. Klizač je spojen s osovinom zgloba robota, čije se kretanje mjeri. Pomjerenjem zgloba pomjera se i klizač po otporničkom dijelu. Napon je proporcionalan položaju zgloba. Tačnost mjerenja položaja pomoću potenciometra je približno 0,5 %. Za tačnije mjerenje izvor napona mora biti izuzetno stabilan.

Na krajeve potenciometra se obično priključi napon  $U_0$  tako da kroz njih teče struja:

$$I = U_0/R.$$

Zbog niskog energetskeg nivoa izlaznog signala, na izlazu se priključuje elektronski sklop, najčešće pojačalo na osnovu čega se može postaviti jednačina napona  $u_i$  u funkciji od ugla klizača  $\varphi$ .

$$u_i = (\varphi / 335) U_0$$

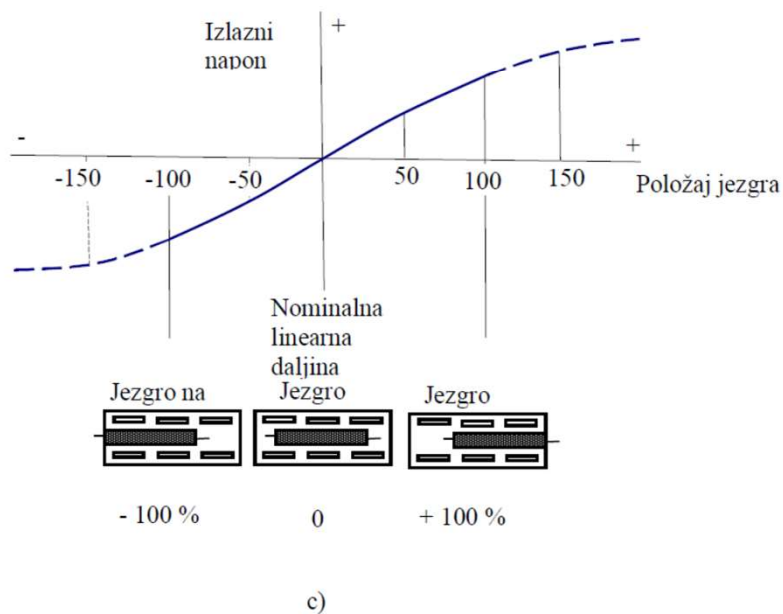
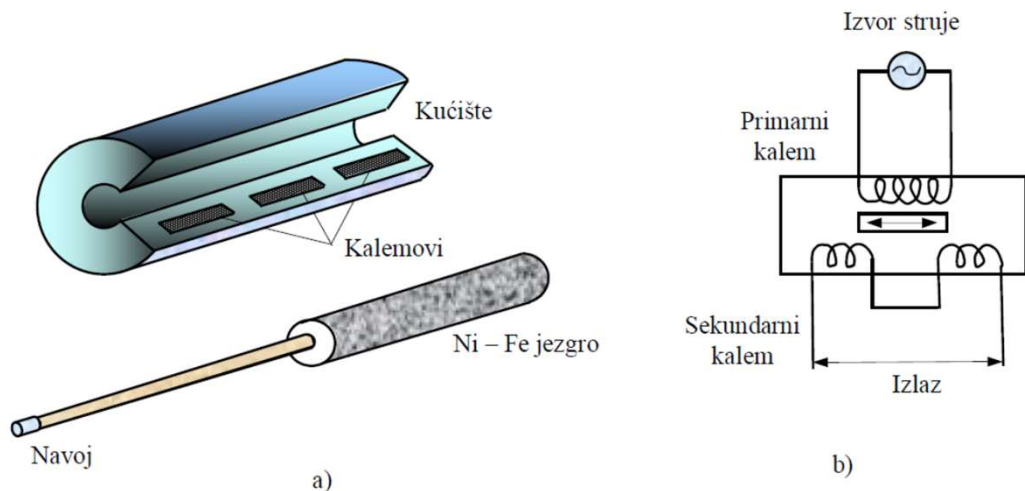
Za ugao  $\varphi$  koji će se kretati u intervalu  $0 < \varphi < 335^\circ$  napon  $u_i$  će imati linearnu zavisnost od  $\varphi$ .

## **Linearni diferencijalni transformator**

Diferencijalni transformator slika 6.13.a) služi za određivanje pomaka zglobova. Jedan diferencijalni transformator se sastoji od magnetnog jezgra koja se kreće unutar tri cilindrična kalema slika 6.13b).

Primarni ili centralni kalem se pobuđuje sa neizmjeničnom strujom. Sekundarni kalemovi se namotavaju suprotnim pravcima, tako da su njihovi izlazi naponi suprotnog polariteta.

Kada je šipkasto jezgro u centralnom položaju izlazni napon na sekundarnim namotajima je 0 slika 6.13 c).



Kretanjem jezgra dalje od centra, jezgro prekriva jedan sekundarni kalem više od drugog povećavajući fluks jednog kalema, a smanjujući fluks drugog kalema. Izlazni napon je proporcionalan rastojanju jezgra od centralnog položaja. Linearnost opada na 0,5 % na 150 % od nominalne daljine. Koriste se za mjerenje pomaka od  $\pm 125$  mm do  $\pm 250$  mm.

Slika 6.15. Linearni diferencijalni transformator

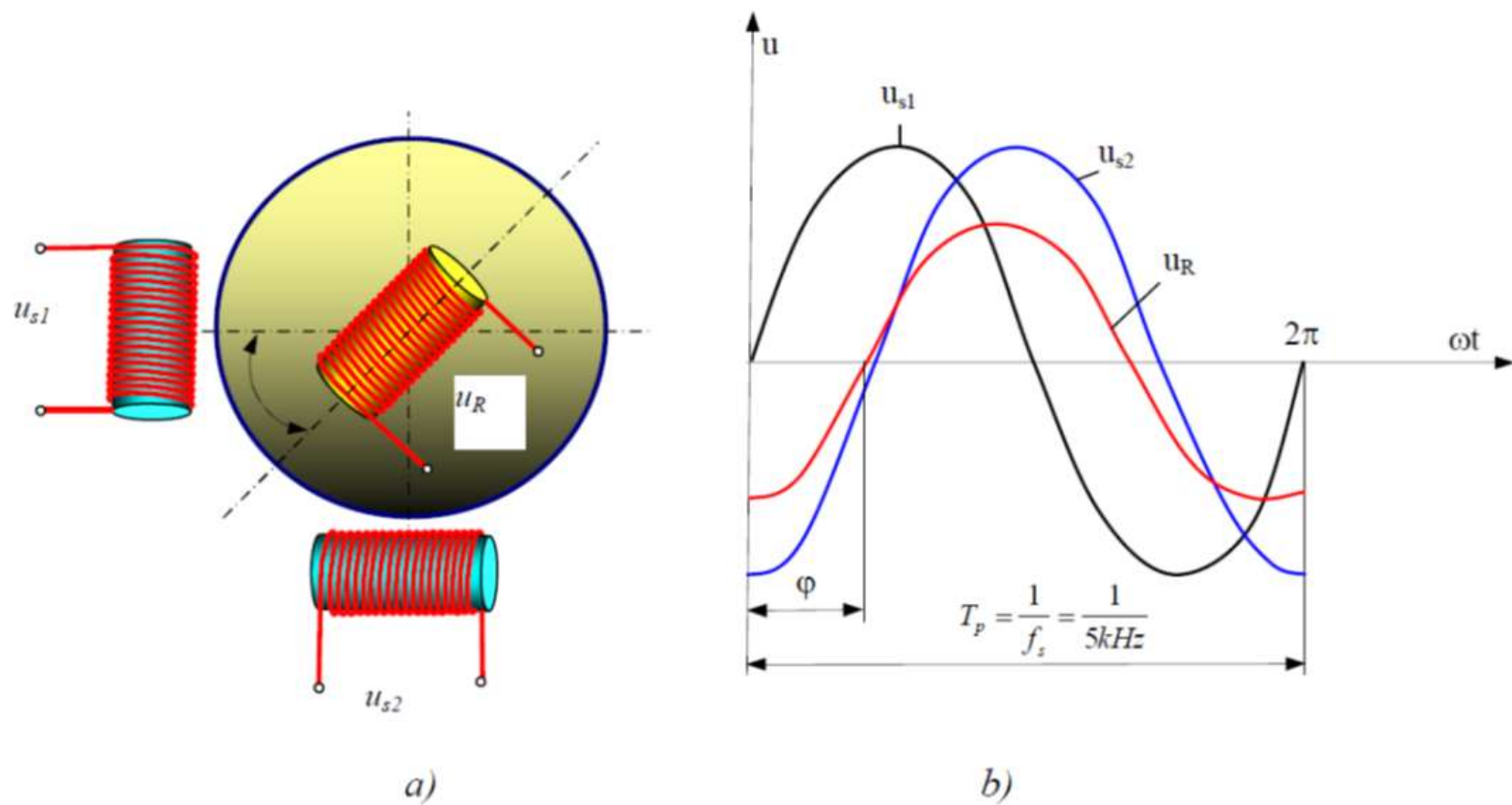
## Rezolver

Rezolveri koji su slični elektromotorima, spadaju u grupu elektromehaničkih mjernih uređaja za obrađivanje pozicije vratila zgloba robota. Rezolver se sastoji od statora sa dva namotaja geometrijskih postavljenih pod uglom od  $90^\circ$  i rotora u kojem se nalazi jedan namotaj. Šematski prikaz rezolvera je dat na slici 6.9.

Rad rezolvera je zasnovan na elektromagnetskoj indukciji. Na namotaj statora se dovode napon  $u_{s1}$  u i  $u_{s2}$ , čije su amplitude jednake, a tačno pomaknute za  $90^\circ$  :

$$u_{s1} = U_s \sin(\omega_s t)$$
$$u_{s2} = U_s \sin\left(\omega_s t - \frac{\pi}{2}\right) = U_s \cos \omega_s t$$

Vratilo zgloba pokreće rotor čiji se ugao  $\varphi$  mjeri .



Slika 6.9. Rezolver: a) shema djelovanja, b) grafički prikaz pobudnih napona

U namotaju rotora se indukuje napon:

$$u_R = K[u_{S1} \cos \varphi + u_{S2} \sin \varphi]$$

Uvrštavanjem izraza za napon  $u_{s1}$  u i korištenjem trigonometrijskih transformacija dobija se napon koji se indukuje u namotajima rotora:

$$u_R = U_R \sin(\omega_s t - \varphi)$$

Dakle, na izlazu se dobija naizmenični napon konstantne amplitude čiji je fazni pomeraaj jednak merenom uglu  $\varphi$ . Mjerenjem faznog pomjeraja dobijamo traženu vrijednost ugla.

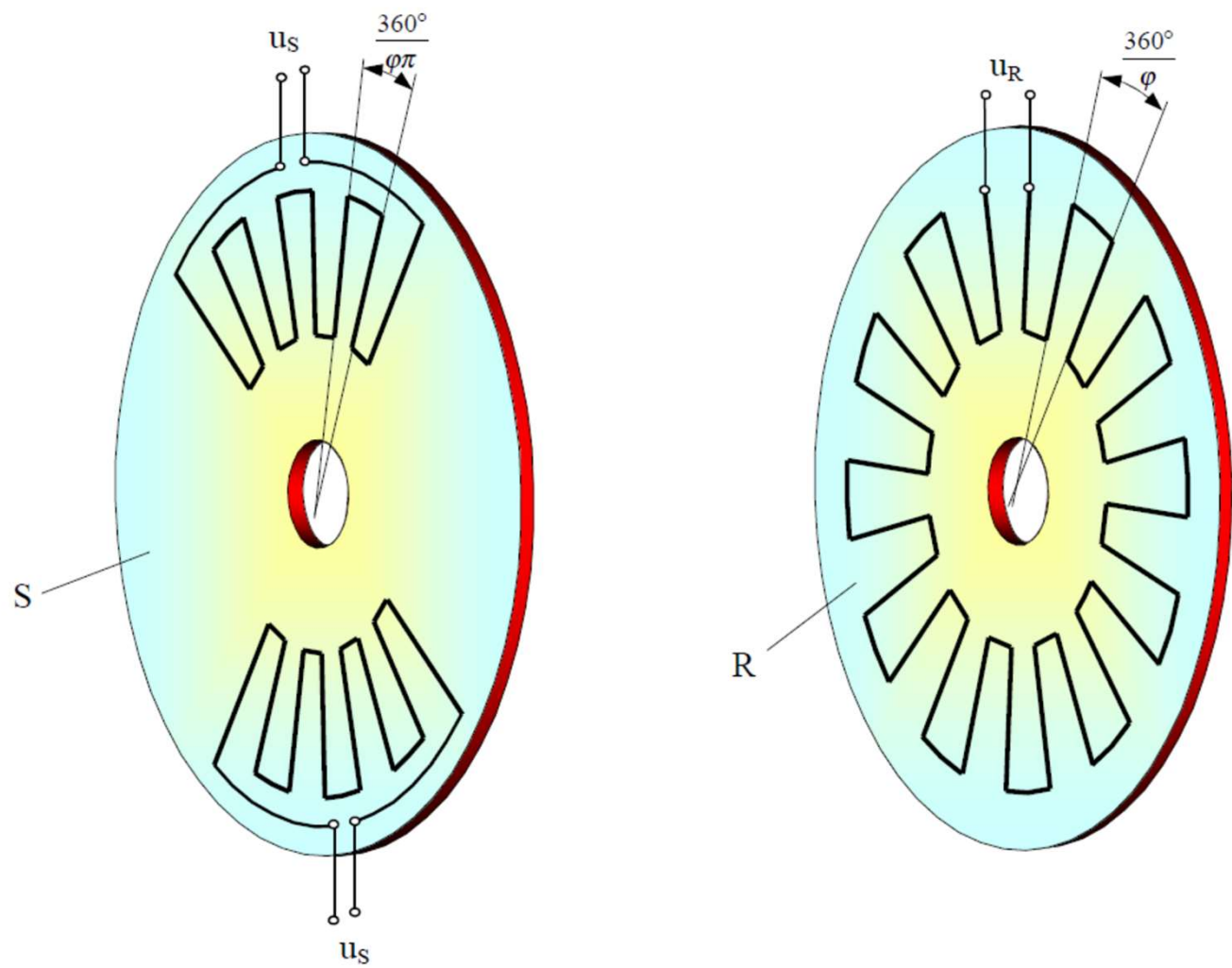


## Induktosin

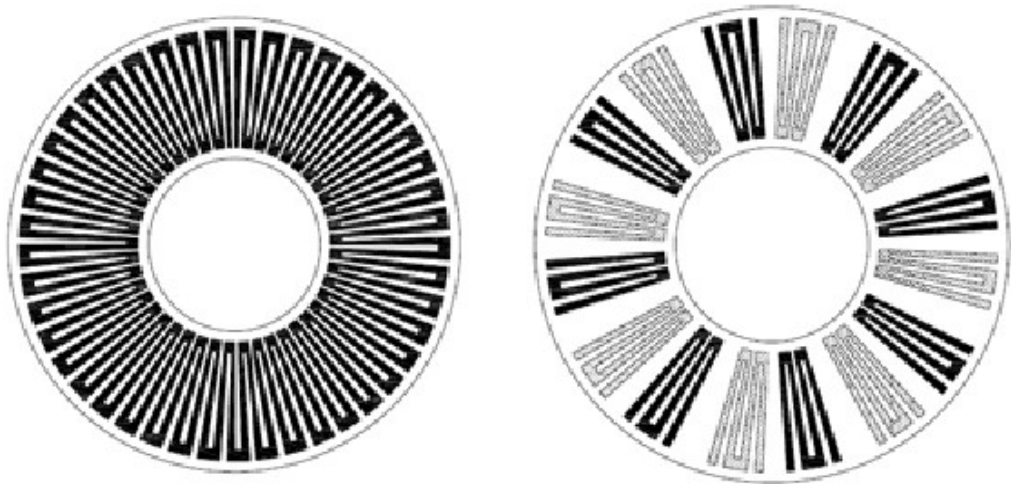
Induktosin se sastoji od statora i rotora, koji imaju oblik dviju okruglih ploča napravljenih od nemagnetskog materijala, kako je to prikazano na slici 6.10.

Princip rada induktosina je sličan principu rada rezolvera. Na statoru su nanešena 2 voda, a na rotoru 1.

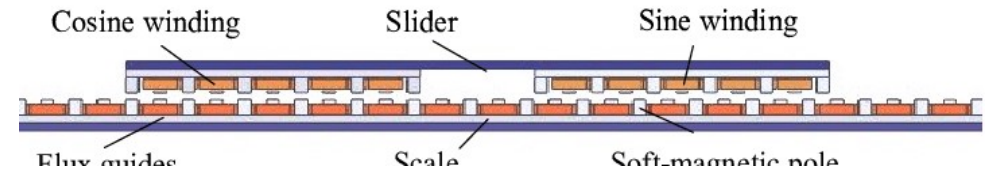
Obje ploče se montiraju jedna uz drugu sa zazorom od 0,15 do 0,4 mm. Održavanje uskih tolerancija zazora između ploča, njihova paralelnost i ekscentričnost čine ovaj mjerni sistem skupljim. Induktosinom se može postići i rezolucija do 1 sec (ugaone). Moguće su izvedbe induktosina za mjerenje linearnog pomaka, samo su u tom slučaju i stator i rotor u obliku lenjira.



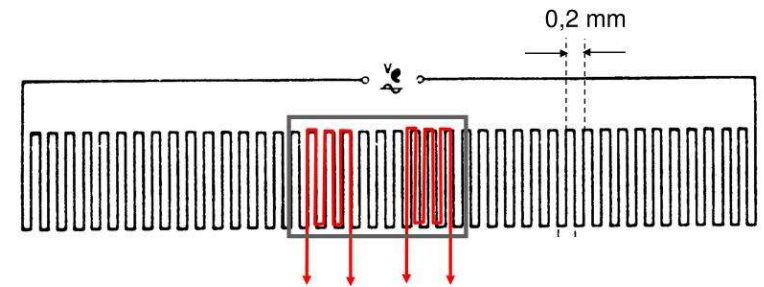
Slika 6.10. Induktosin



1) rotor (continuous winding)    2) stator (segmented winding)



## Inductosyn sensor



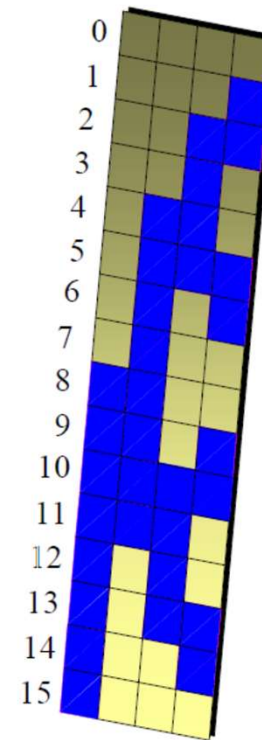
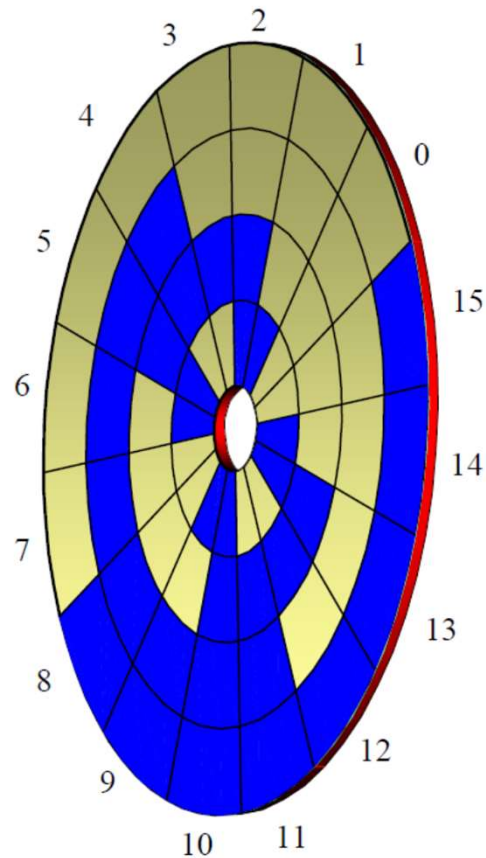
With two secondary sensors shifted  $90^\circ$ , the resolution is:  $0,2 / 2^8 < 0.001 \text{ mm}^*$

\* With an analog interpolation using a 8 bits ADC



## Apsolutni i inkrementalni enkoder

Apsolutni enkoder se temelji na apsolutnom mjernom postupku. Za svaki položaj pridružuje se binarna kombinacija. Rozetna apsolutnog enkodera može biti izveden kao podiona ploča odnosno kao kodni lenjir kako je to prikazano na slici 6.6.

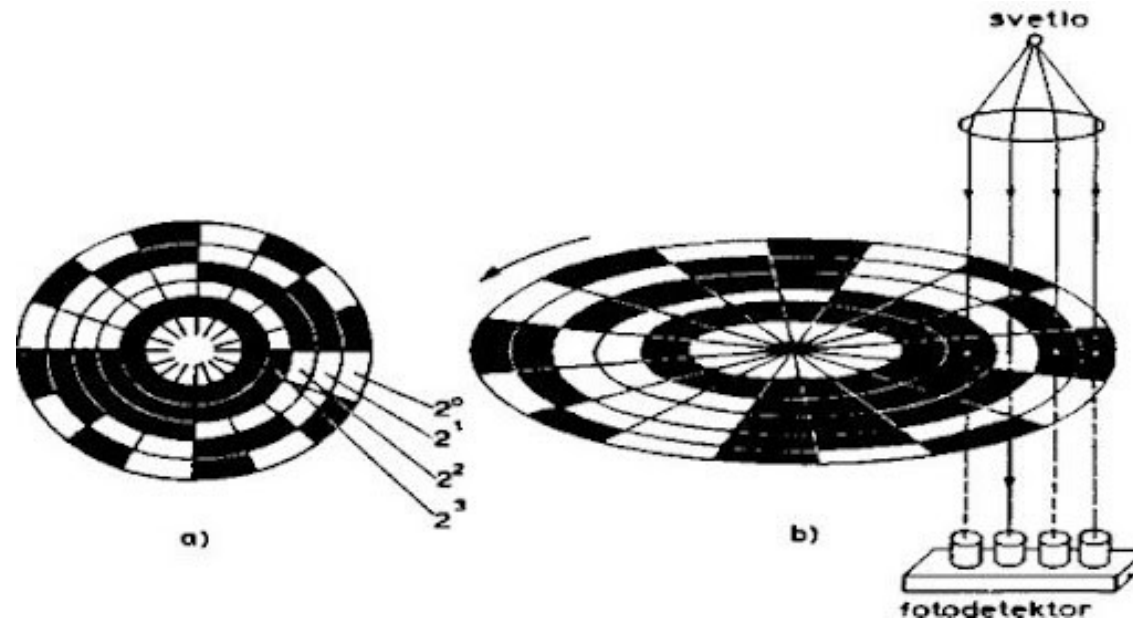


Kodna ploča se primjenjuje za mjerenje ugla i ona je izrađena od visoko kvalitetnog stakla. Svaki je korak na ploči kodno definisan.

Elementi koji utiču na tačnost apsolutnog enkodera su:

- kvaliteta radijalne mreže,
- greška pri uključivanju spojnice s rotorom,
- zazor u ležajevima,
- ekscentricitet podione ploče u odnosu na uležištenje.

Princip rada apsolutnog enkodera dat je na slici



Svjetlost pada aksijalno na kodnu ploču, a s donje strane se nalaze fotoćelije koje pri osvjetljenju daju fotonapon od 2,5 V i tom naponu se daje binarna cifra 1. Ako detektor svjetlosti nije osvjetljen napon je 0, što odgovara binarnoj cifri 0. Na slici je data kodna ploča sa četiri traga tako da imamo  $2^4 = 16$  kombinacija. To znači da se sa ovakvom kodnom pločom može identifikovati 16 položaja odnosno 16 uglova.

U praksi se primjenjuju kodne ploče sa 18–16 tragova a najčešće sa 12 tragova. Takva kodna ploča može idnetifikovati  $2^{12} = 4096$  mogućih položaja. U slučaju da treba pokriti  $360^\circ$ , imamo da je najmanja vrijednost razlučivanja:

$$s = \frac{360^\circ}{4096} \approx 0,088^\circ = 5,28'$$

Ako se želi povećati tačnost očitavanja uglova, potrebno je da ploča ima više tragova, a samim tim se i povećavaju dimenzije kodne ploče.

Ponekad se zbog klizanja iz različitih položaja mijenja više različitih bita, a to dovodi i do greške očitavanja. Zbog toga se kod označavanja niza kodnih brojeva upotrebljava Gray-ev kod, kod koga se između susjednih brojeva mijenja najviše 1bit.

Gray-ev kod spada u klasu cikličnih kodova. Zbog smanjenja mogućnosti greške našao je primjenu u A/D pretvaračima, apsolutni enkoderima i sl.

Osim Gray-ovog koda u robotici se koriste još BCD kod – 8421 koji predstavlja tzv. binarno dekadni brojni sistem.

Pored navedenog imamo još i Gray-eksces – 3 kod koji je ustvari mješavina BCD i Gray-evog koda.



ACURO®  
industry



Oblast primjene:

- Mašine za pakovanje
- Mašine za bržiganje
- Mašine za obradu drveta
- Montaža i rukovanje
- Transportne trake
- Mašine za štampanje

AC58 Profinet ENKODER

PROFINET Enkoder Profil PNO 3.162 Verzija  
4.1 i 4.2

Rezolucija do 34 Bit (22 Bit Singleturn + 12 Bit  
Multiturn)

Ažuriranje vrednosti 125 $\mu$ s / Vreme ciklusa  
31.25 $\mu$ s

LED dijagnostika

Širok temperaturni opseg od -40°C ... +85°C

Podaci uređaja: pozicija, brzina, ubrzanje,  
dijagnostički podaci, alarm

Konfiguracija uređaja: rezolucija, ukupni  
merni opseg, preset, offset, pravac, skaliranje,  
funkcija preostale vrednosti, ograničenje  
brzine, ograničenje ubrzanja

Veliki broj dostupnih varijanti

Visoka energetska efikasnost

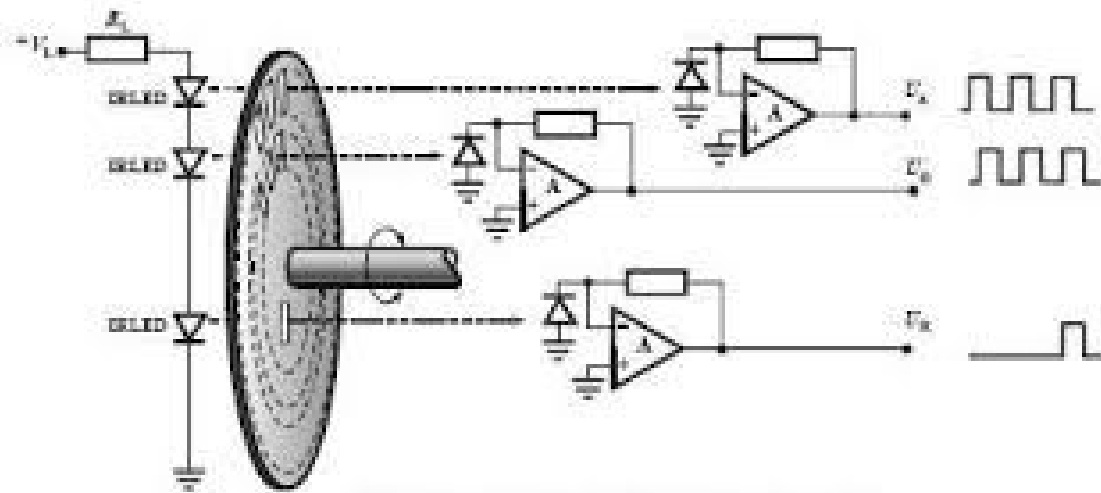


## Inkrementalni encoder

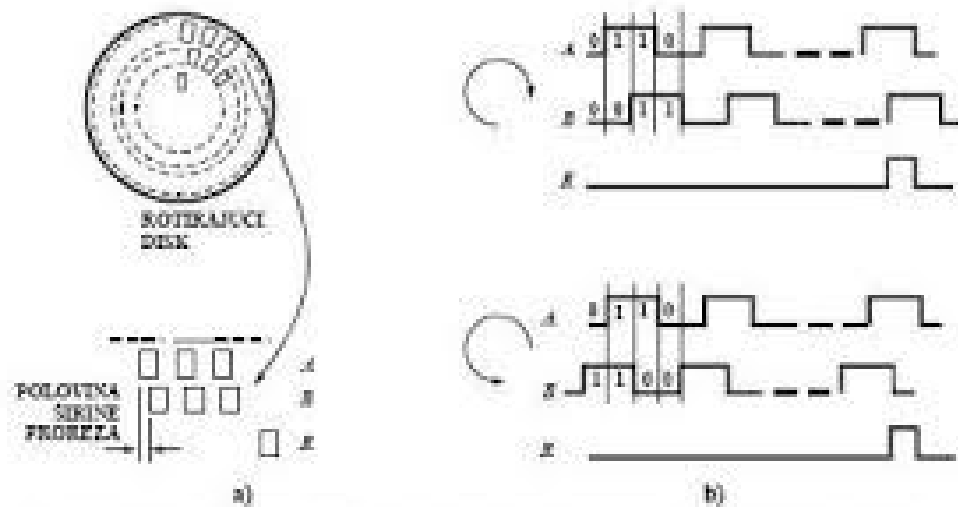
Ovaj enkoder je takođe optički uređaj za mjerenje ugla. Osnovni dio uređaja je disk koji je vezan za ulaznu osovinu čiji ugao obrtanja mjerimo. Na disku se nalazi niz zareza (ili prozirnih površina) kao što je prikazano na slici. Uglovni razmak između svaka dva zareza je  $\alpha = 2\pi / K$ , gde je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

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

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



Slika 13.23. Inkrementalni optoelektronski senzor

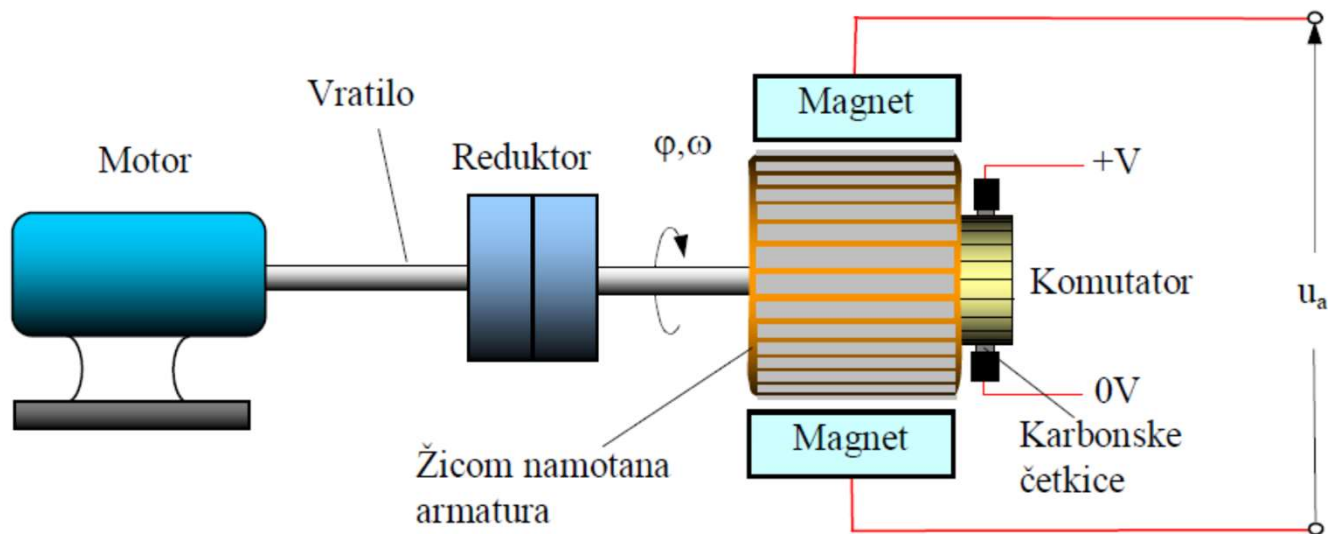


Slika 13.24. Generiranje impulsa na enkoderu: a) disk sa dve staze, b) meduzobni položaj impulsa za različite smerove rotacije

## Senzori brzine

U prethodnom dijelu razmotrili smo ukratko i prenos pogona od motora do zgloba. To je bilo neophodno da bismo uočili mjesta za postavljanje mjernih uređaja. Ukazano je i na relacije koje omogućavaju posredno merenje ugla  $\mathbf{q}_j$  i brzine  $\dot{\mathbf{q}}_j$ .

Ovdje ćemo razmotriti uređaje koji služe za mjerenje ugaonih brzina obrtanja u zglobovima. Ukoliko je zglob translatorni, njegova brzina produženog pomjeranja ne mjeri se direktno, već se pretvara u odgovarajuće obrtanje koje se može mjeriti.



Izlazni signal kod ovih senzora je proporcionalan ulaznoj ugaonoj brzini. Tahogenerator ustvari nije ništa drugo nego motor jednosmjerne struje sa permanentim magnetima. Njegova funkcija u ovom slučaju je obrnuta i on radi kao generator.

Da bi izmjerili ugaonu brzinu zgloba, vratilo tahogeneratorsa se preko reduktora spoji sa zglobom. Tahogenerator se sastoji od rotora sa namotajem koji rotira unutar magnetnog polja pobuđenog magnetima koji su fiksirani na statoru. Okretanjem osovine zgloba okreće se i rotor, tako da se u armaturnom namotaju indukuje napon  $u_a$ :

$$u_a = K \cdot \frac{d\varphi}{dt} = K \cdot \omega$$

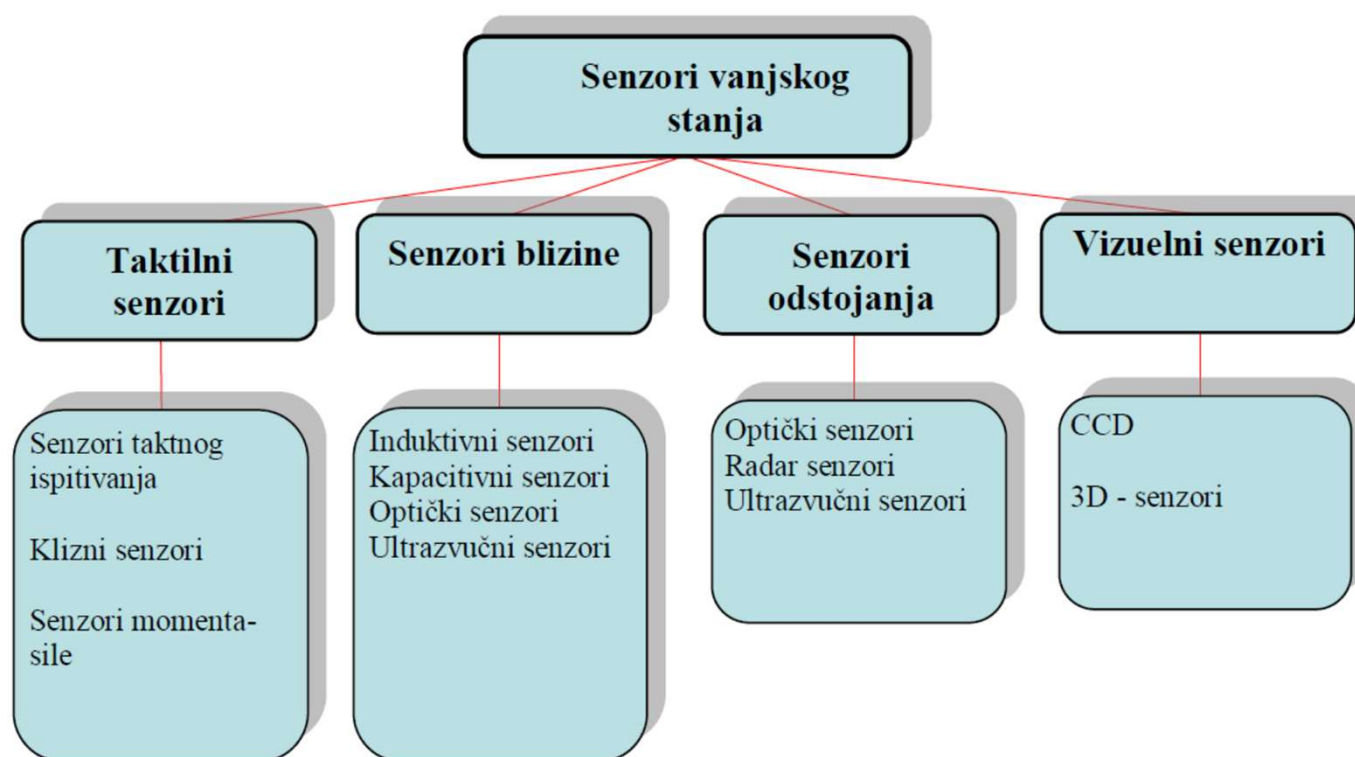
Pa možemo reći da je izlazni napon armature  $u_a$  proporcionalan ulaznoj ugaonoj brzini  $\omega$ .

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

## Senzori vanjskog stanja ( spoljašnji senzori)

Za pravilnu orijentaciju i ponašanje robota u okolini, nužno je da robot posjeduje takve mjerne instrumente koji će prikupljati podatke iz okoline.

Klasifikacija senzora vanjskog stanja data je na slici. Senzori vanjskog stanja se mogu klasificirati na kontaktne i beskontaktne, zavisno od togada li postoji kontakt ili ne.



## Taktilni senzori

Da bi robot mogao adekvatno djelovati na promjene okoline u kojoj radi, nužno je da posjeduje takve senzore koji će mjeriti fizičke veličine radne okoline robota. Ovi senzori spadaju u grupu binarnih uređaja. Jednim dijelovima spadaju u grupu senzora sile, jer u mnogim slučajevima daju informaciju, ne samo o obliku objekta, već i o sili stezanja datog objekta.

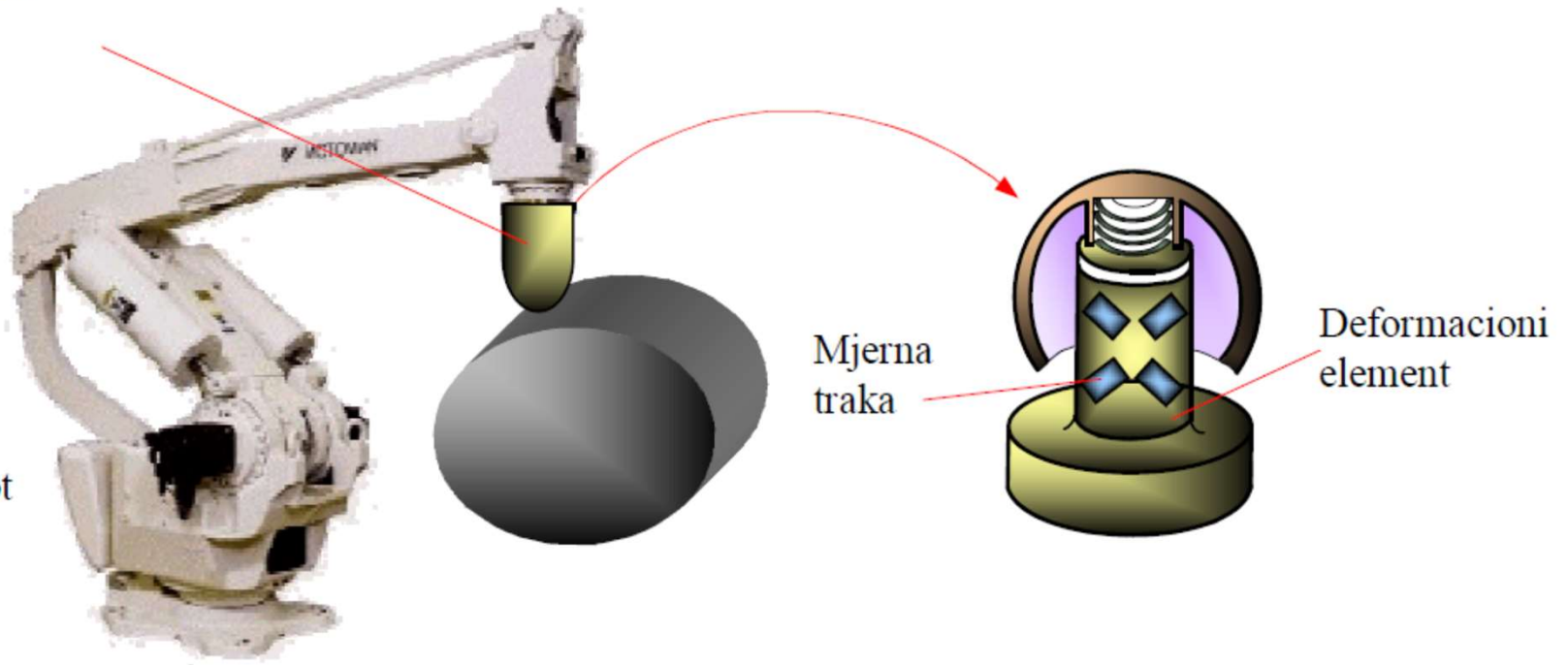
Ako se mjere samo rezultante pri dejstvu sila, momenata duž kontaktne linije ili površine, taktilni se senzor može da napravi kao minijaturni šestokomponentni senzor sile/momenta montiran na vrhu prsta.

Vršenjem manipulacije predmeta neophodno je praćenje svih sila u tačkama kontakta. Tada je potrebno imati niz senzora koji su poredani u matice.

Postoji veliki broj senzora ove vrste, međutim samo neki od njih će biti obrađeni u narednim naslovima.

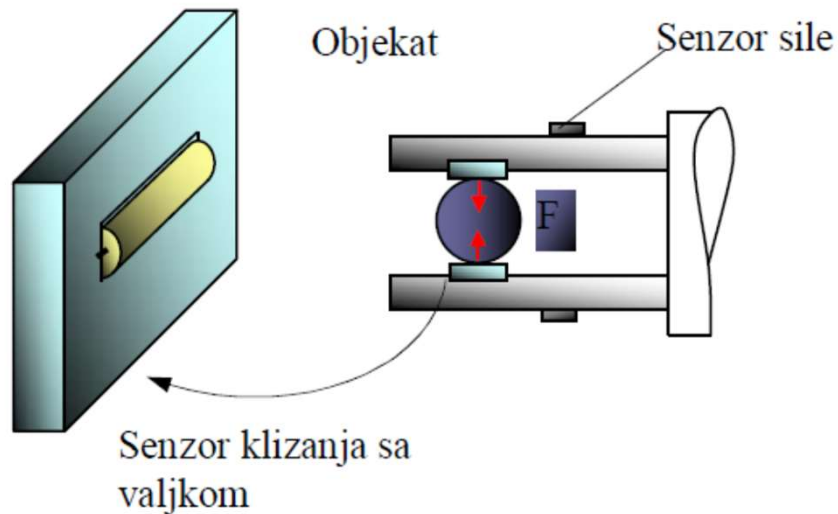
Šestokomponentni senzor  
sile/momenta sa mjernim  
trakama

Robot



## Senzor klizanja

Klizanje je česta pojava i ona se manifestuje kao kretanje objekta između prstiju. Zbog toga je potrebno ugraditi i takve senzore koji će vršiti kontrolu i detekciju, a sve u cilju pouzdanijih i stabilnijih držanja objekta. Jedan takav jednostavniji senzor je prikazan na slici.



Veoma je bitno voditi računa o tangencijalnom trenju, jer povećanjem tangencijalnog trenja dolazi do širenja zone klizanja.

Da bi imali stabilnu kontrolu klizanja, potrebno je ugraditi senzor koji će razlikovati normalne sile i sile smicanja.

To se postiže na dva načina:

- ugradnjom senzora klizanja koji će se pomjerati proporcionalno klizanju objekta,
- primjenom programa koji će vršiti poređenje slika dobijenih u obliku niza ili matrice za određeni vremenski period.

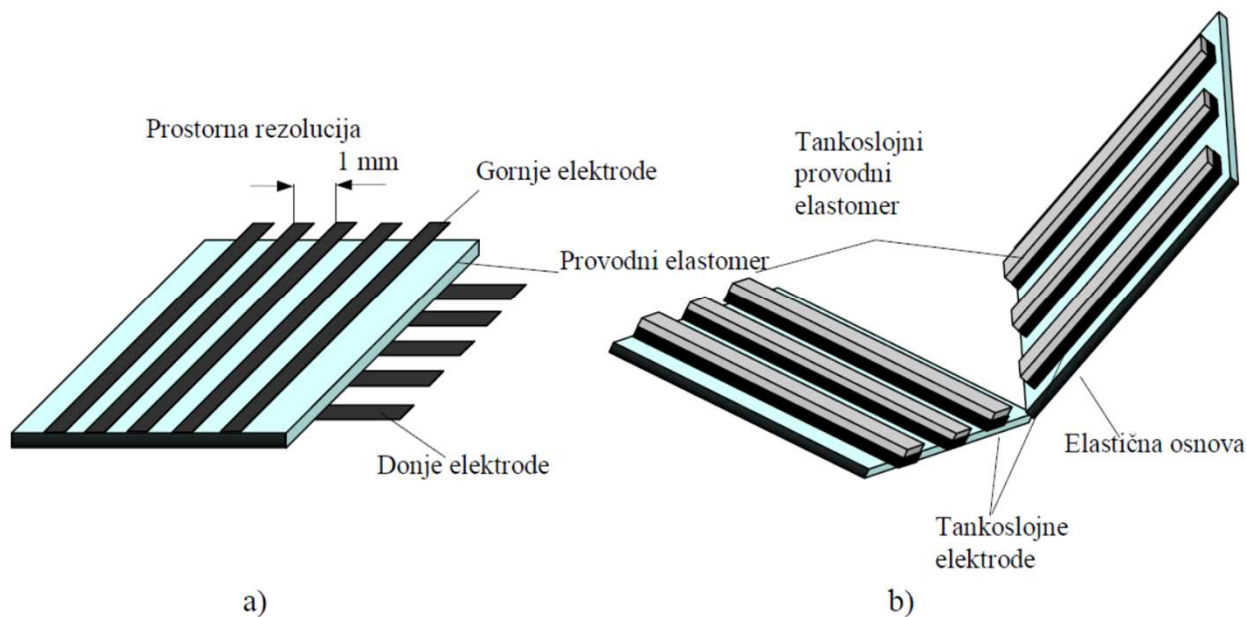
Prvi način je dosta jednostavniji.



## Senzori bazirani na promjeni otpora

Jedan od ovakvih senzora je prikazan na slici a). Struktura ovakvih senzora se sastoji od dva niza paralelnih elektroda. Između niza paralelnih elektroda nalazi se sloj elastomera koji je provodan.

Nizovi elektroda su poredani normalno jedni u odnosu na druge. Usled kontaktne sile dolazi do pojave lokalne deformacije elastičnog sloja, odnosno do promjene otpora koja se detektuje između dviju elektroda.



Ovakvi se senzori uglavnom ugrađuju na prst robota. Postavljanjem ovakvog senzora na sve prste robota dobija se jasna slika predmeta. Po jednostavnosti bez premca su među taktilnim sensorima. Glavni nedostatak im je veliki broj žica potrebnih za povezivanje.

Savremenija konstrukcija je data na slici b).

Sastavljena je od dvije osnovne polimerske osnove na koje su nanijete tankoslojne metalne trake provodnika, a preko njih tankoslojni otpornički polimer debljine 0,05 mm. Dvije ovakve strukture se spajaju pod uglom od 90°.

Ukupna debljina ovakvog senzora može da bude svega od 0,125 mm.

Kako su "gornji" provodnici postavljeni pod pravim uglom u odnosu na "donje", onda svaka tačka ukrštaja predstavlja jedan senzorski elemenat. Kada se gornja površina pritisne, tada se, u zavisnosti od raspodjele sile, pojavljuje određena raspodjela mehaničkog napona i deformacije u međusloju. Zavisno do veličine mehaničkog napona u pojedinim tačkama mijenja se i električna otpornost.

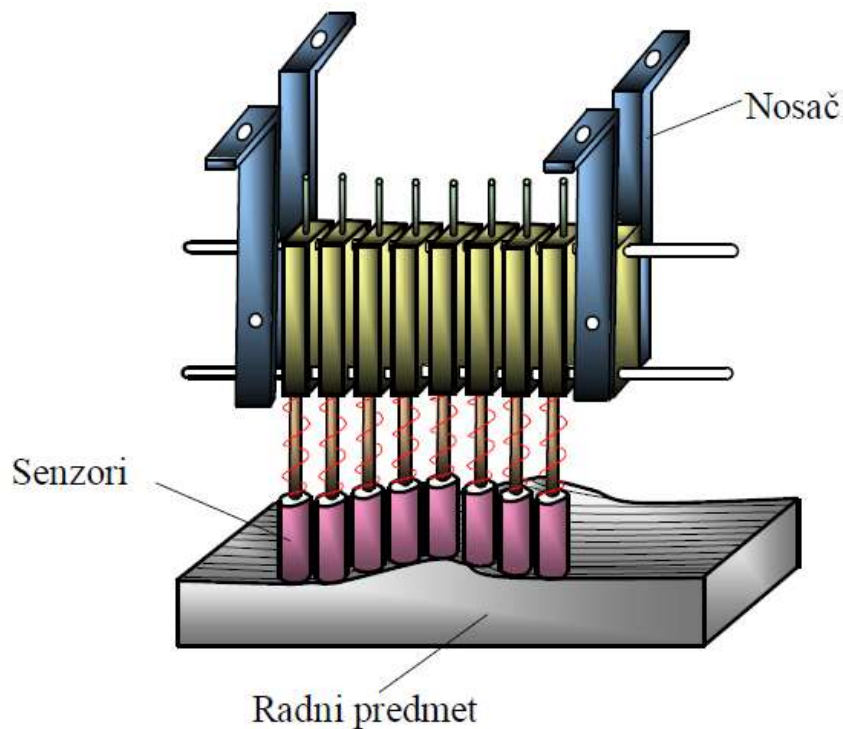
Očitavanje senzorskog sistema vrši se na sledeći način. Pobuđuje se električnim impulsom jedan od gornjih provodnika i posmatraju se odzivi na donjim provodnicima. Time se očitava jedan linijski niz elemenata. Zatim se pobuđuje drugi gornji provodnik, i tako redom dok se ne očita cela površina. Očitani podaci se sada obrađuju kako bi se dobila cjelovita informacija.

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

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

## Elektromagnetski induktivni senzor

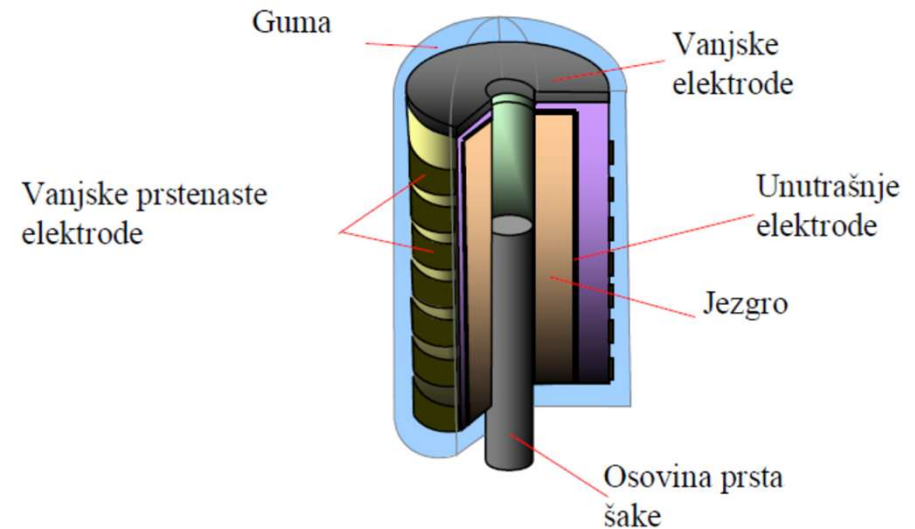
Ovi senzori su robusnije građe i oni kao takvi su pogodni za detekciju većih objekata. Na slici je prikazan jedan takav senzor koji ima 8x8 induktivnih elemenata transformatorskog tipa. Svaki element se sastoji od čeličnog šiljka koji je smješten u plastičnom cilindru i opruge od fosforne bronz



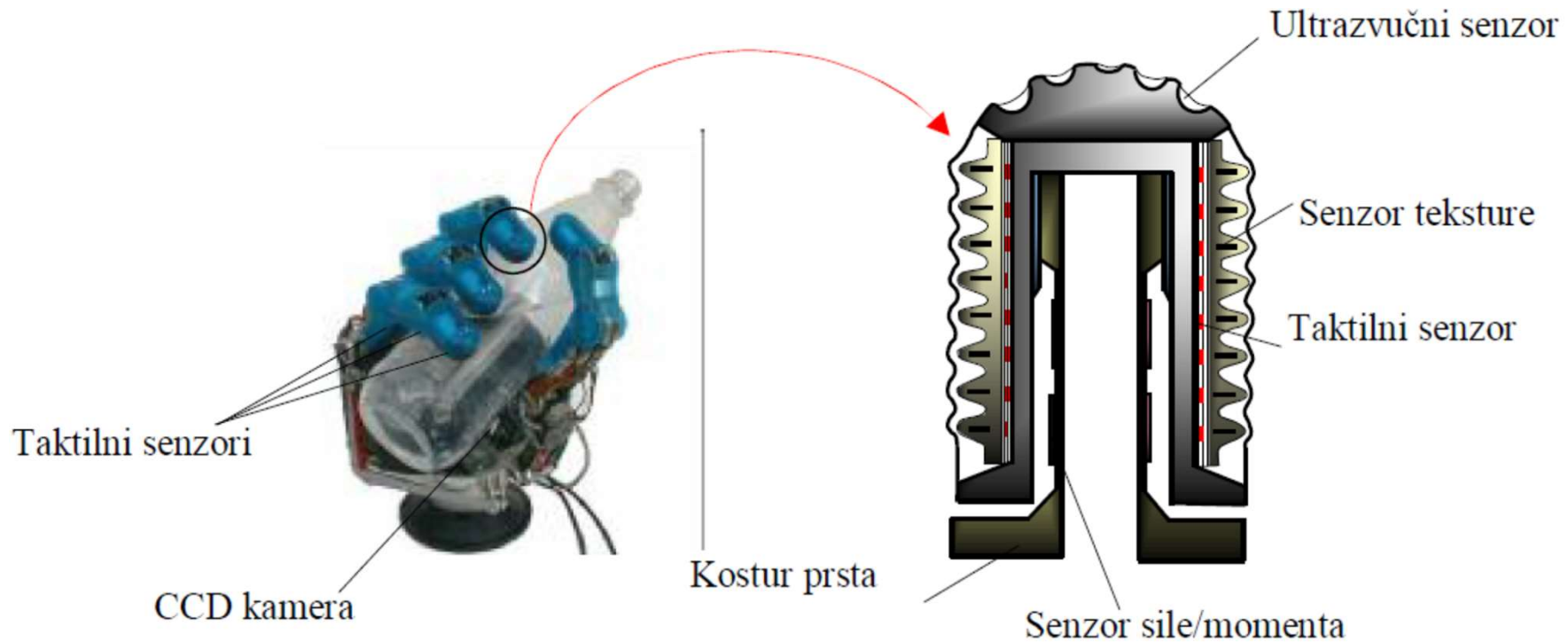
Ova bronza je upotrebljena za izradu opruga, čime opruga dobija dobra elastična svojstva i ne ometa magnetsko polje. Pomjeranjem mjernog šiljka mijenja se napon u primarnim i sekundarnim namotajima smještenim u gornjem dijelu uređaja. I ovdje imamo da je izlazni signal binaran, tako da se pomoću određenog sklopa može dobiti binarna slika objekta koji se mjeri. Poželjno je da senzor prati što manje krivine i posebno treba voditi računa da ne dođe do zaglavlivanja šiljaka u cijevi.

## Kapacitivni taktilni senzor

Kapacitivni senzori mogu ostvariti rezoluciju od 1 mm pri detekciji predmeta. Većinom se koriste odnosno nalaze u prstima šake robota kako je to prikazano na slici. Većinom se prsti robota u obliku cilindra sa jezgrom od plastike. Oko jezgra imamo postavljene cilindrične elektrode, a izvan imamo elektrode u obliku matrice 7x7 do 7x20. Usljed pomjeranja vanjskih elektroda dolazi do promjene kapacitivnosti kondenzatora. Opisani taktilni senzor nam omogućuje da se odredi oblik predmeta



Pored prethodnih vrsta senzora postoje još i pijezelektrični, ultrazvučni, optoelektronski, termički i drugi senzori. Sve prednosti i nedostaci različitih vrsta senzora kombinuje se u jedan složeni taktilni sistem radi dobijanja potpunije informacije o predmetima u šaci robota. Svaki sensor ima definisanu namjenu, tako npr. šestokomponentni senzor služi za mijenjanje rezultante sile momenta.

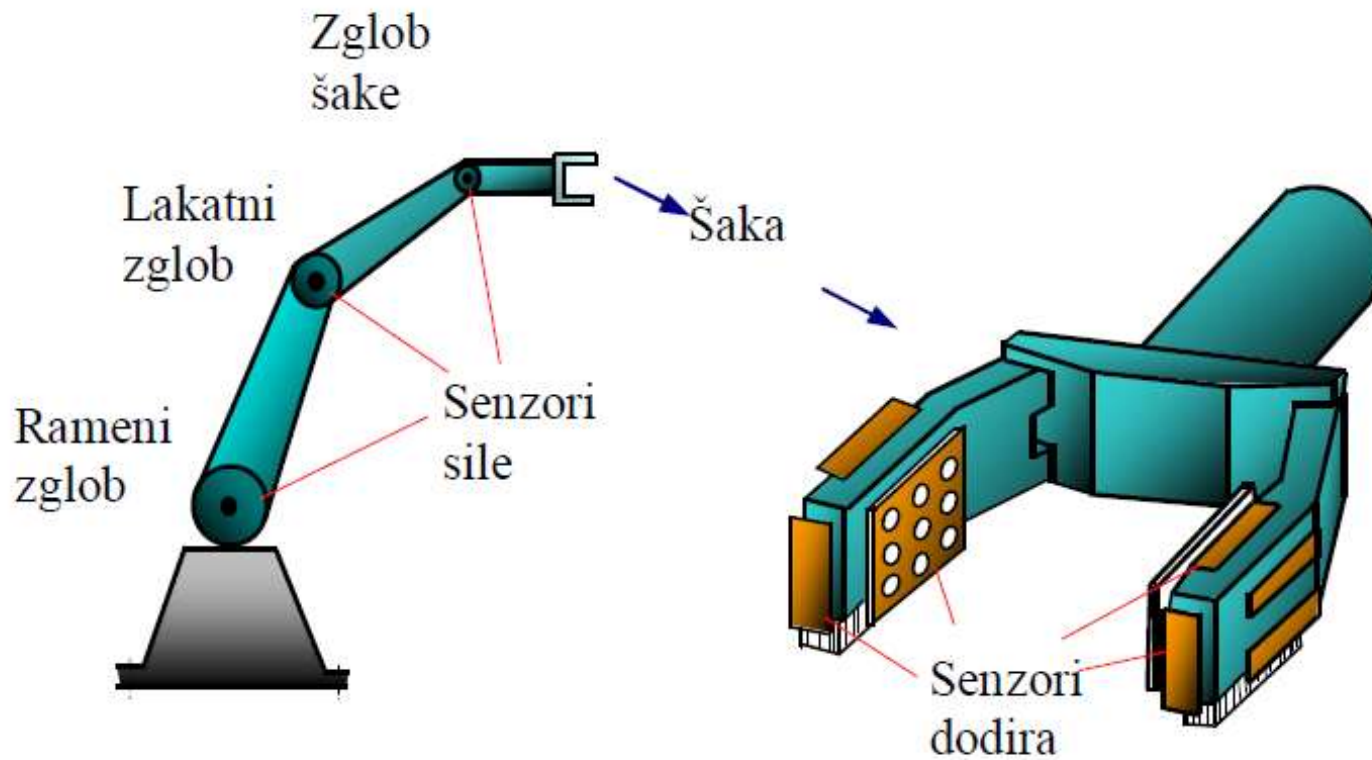


## Senzori sile i momenta

Postoji više različitih senzora za mjerenje sile i momenta. U robotici nije dovoljno izmjeriti samo jednu komponentu sile, već je potrebno da se izmjere sve tri komponente sile i momenta.

Postoje dva temeljna principa mjerenja sile. Kod prvog principa imamo promjenu osobina materijala kao što su npr. induktivnost, električna otpornost itd; tada je materijal pod dejstvom sile. Drugi princip obuhvata mjerenje elastične deformacije.

Usled deformacije izazvanih dejstvom sile, elastične komponente mjernog uređaja se deformišu, pa se tako dobijaju pomjeranja koja sadrže informacije o sili. Na slici 6.27. su prikazana osnovna mjesta ugradnje senzora sile i momenta.



To su uglavnom:

- zglob šake,
- zglob lakta,
- zglob ramena i
- šaka.

*Slika 6.27. Mjesta ugradnje senzora sile/momenta*



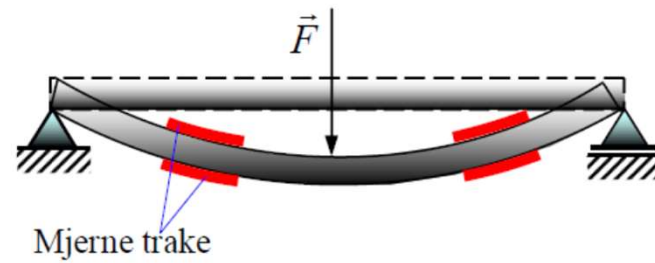
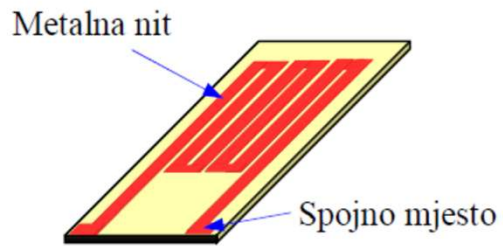
Tokom obavljanja nekih zadataka kao što su poliranje, lakiranje, montaža itd. upravljačka jedinica robota kontroliše sva kretanja na osnovu zadatih pozicija sve dok ne nastupi kontakt hvataljke sa radnim objektom.

U tom slučaju moramo imati senzore koji će nam davati informacije o sili. U memoriji upravljačke jedinice robota memorisana je tzv. referentna konstanta sile koja se tokom kretanja upoređuje sa dodirnom sile. Upravljački algoritam se projektuje tako da omogućuje smanjivanje razlike između njih.

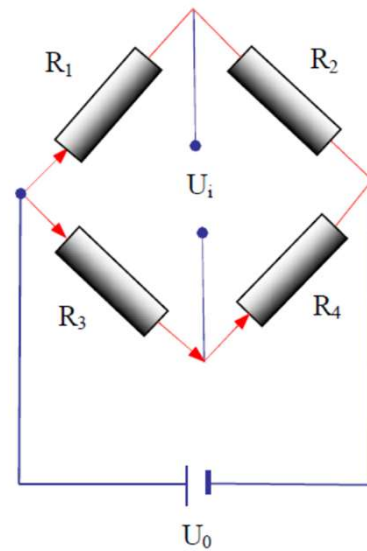
### **Primjena mjernih traka kod senzora sile/momenta**

Mjerne trake se danas dosta primjenjuju na onim mjestima kada je potrebno odrediti pomjeranje uzrokovano opterećenjem. To pomjeranje mjerne trake mjere na osnovu električne otpornosti koja nastaje kao posljedica promjene dužine otpornika.

Tanka nit debljine 20-50  $\mu\text{m}$ , od legure bakra i nikla lijepi se između dva lista papira ili plastične folije (kod temperatura viših od 300°C koriste se niti od platine ili njenih legura).



Mjerne se trake ugrađuju u Wheastaneov most. Na taj se način poništavaju utjecaji okoline a povećava linearnost.



## Šestokomponentni senzori sile šake

Kod robota nam je potrebna informacija o sili i momentu reakcije okoline (u opštem slučaju tri F i tri M). Ta informacija se dobija ili preko senzora sila i momenata montiranih u korijenu šake što je mnogo češći slučaj ili preko senzora F i/ili M u zglobovima robota.

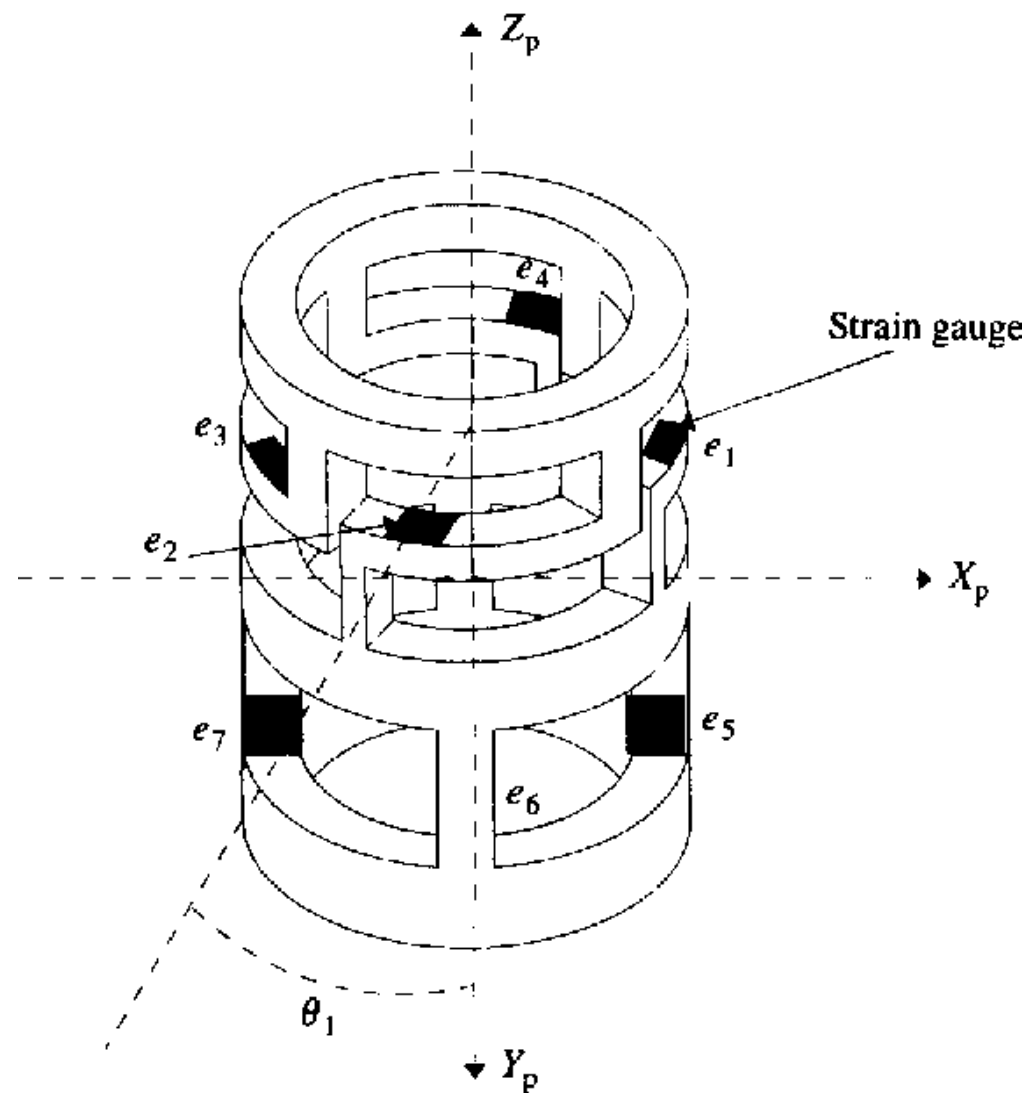
U nekim slučajevima je moguće i same aktuatore koristiti kao senzore u zglobovima npr. Kod DD motora, merenjem struje armature može se dobiti informacija o momentu u zglobu ili merenjem pritiska ulja kod hidromotora takođe možemo imati informaciju o sili i momentu.

Korišćenjem senzora u korijenu šake uz jaku hardversku podršku moguća je aktivna povratna sprega koja je veoma važna u nekim zadacima kao što su obrada ili montaža (insertovanje) kada robot postaje zatvoren kinematički lanac. Ova povratna sprega omogućava korekciju poziciju i orijentaciju čime se sprečava havarija.

Na slici je prikazan šestokomponentni senzor sile šake u obliku šupljog cilindra.

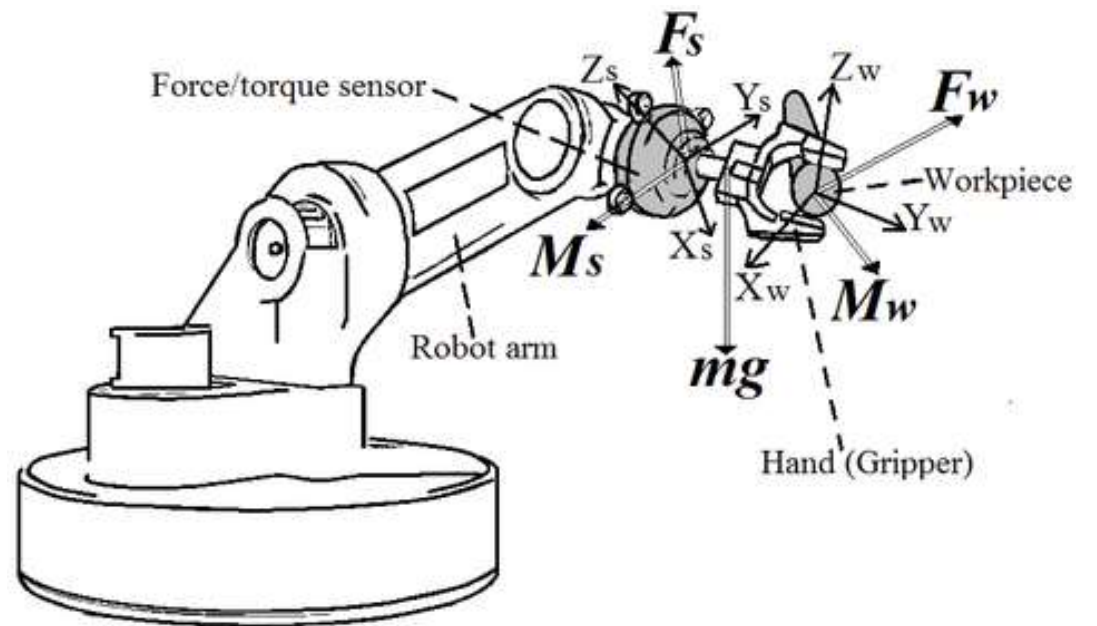
Deformirajuće tijelo je specijalno oblikovan šupli cilindar prečnika 75mm. Struktura ovoga cilindra se sastoji od 4 uzdužna i 4 poprečna elastična pera koja su osjetljiva na uzdužnu i poprečnu deformaciju cilindra.

Na svakom peru se nalaze po dvije mjerne trake koje služe za mjerenje lokalnih deformacija istog intenziteta, a suprotnih znakova. Zadatak senzora je mjerenje tri komponentenata sile i tri komponentenata momenta



**Fig. 1** The tube design six-component force sensor

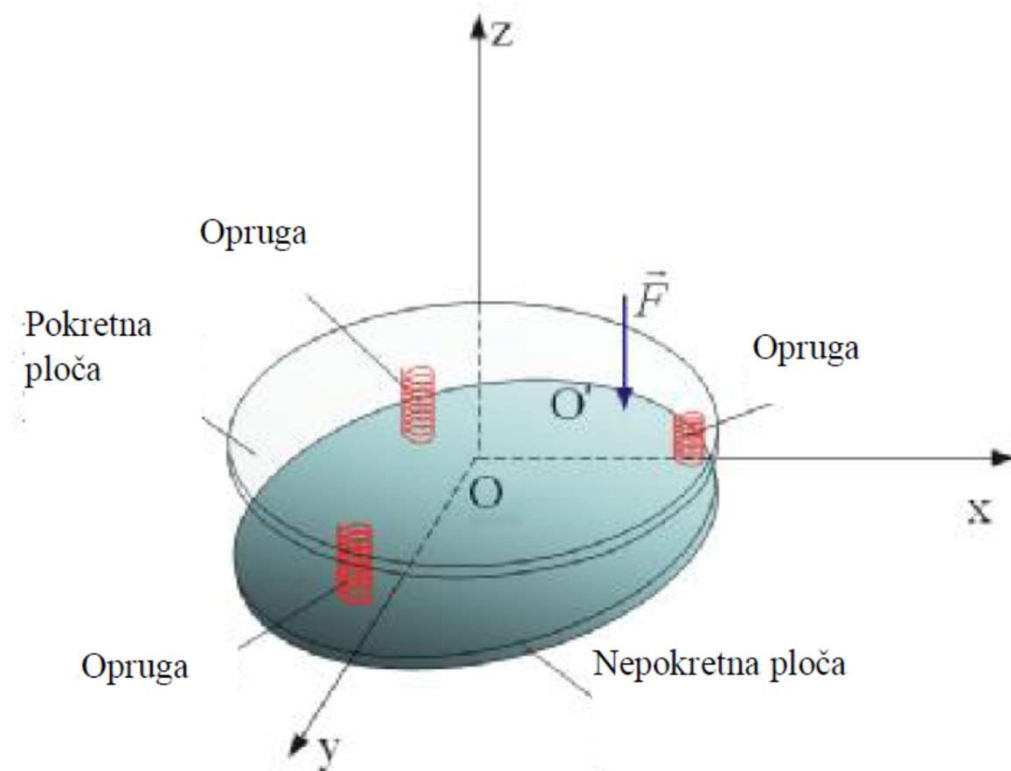
# GOLDSHINE



## Induktivni šestokomponentni senzor sile

Ovaj senzor je jednostavne konstrukcije. Senzor se sastoji od dvije ploče, gdje je jedna ploča pričvršćena na posljednji segment robota a druga je ploča spojena sa hvataljkom. Između ploča se nalaze tri opruge. Dejstvom sile ploče se sabiju duž ose  $z$ . Sila i moment se određuju na osnovu međusobnog položaja ploča. S obzirom da je pomjeraj određen sa šest komponenti to je potrebno najmanje šest mjernih uređaja (senzora).

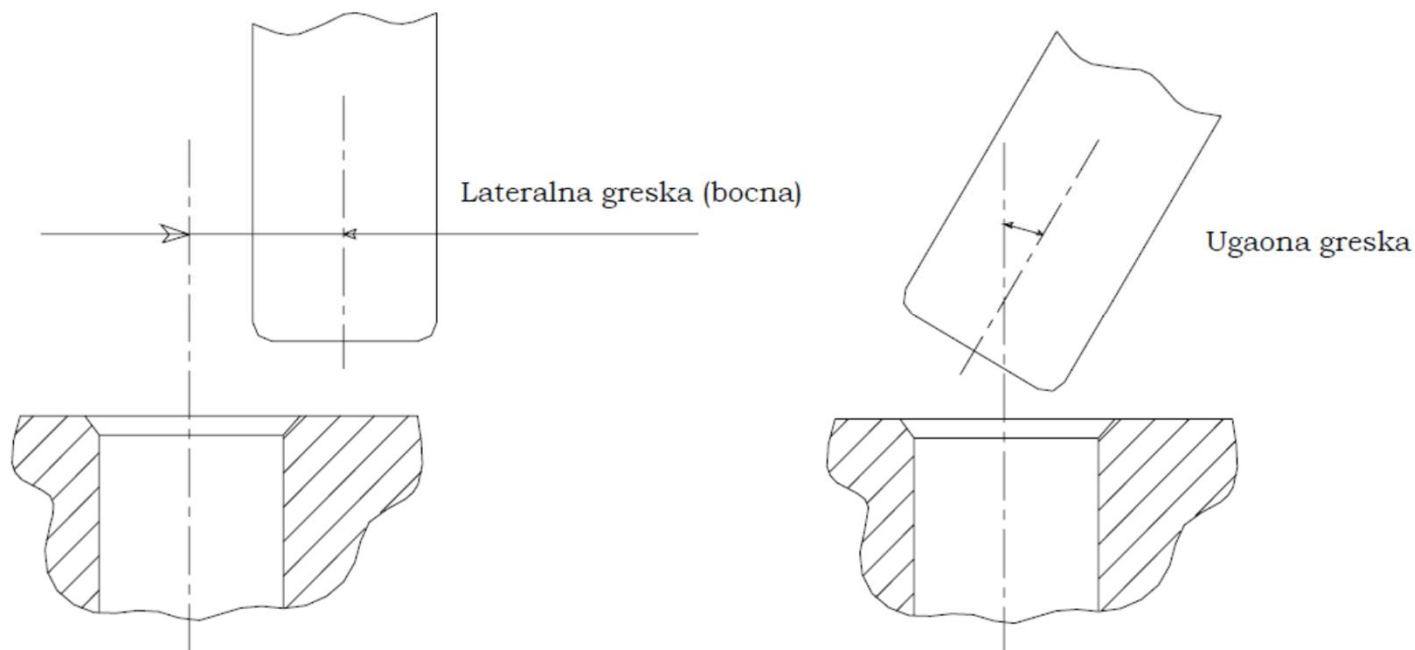
Kao mjerni elementi se najčešće koriste kapacitivni i induktivni senzori. Prikaz takvog jednog šestokomponentnog senzora dat je na slici

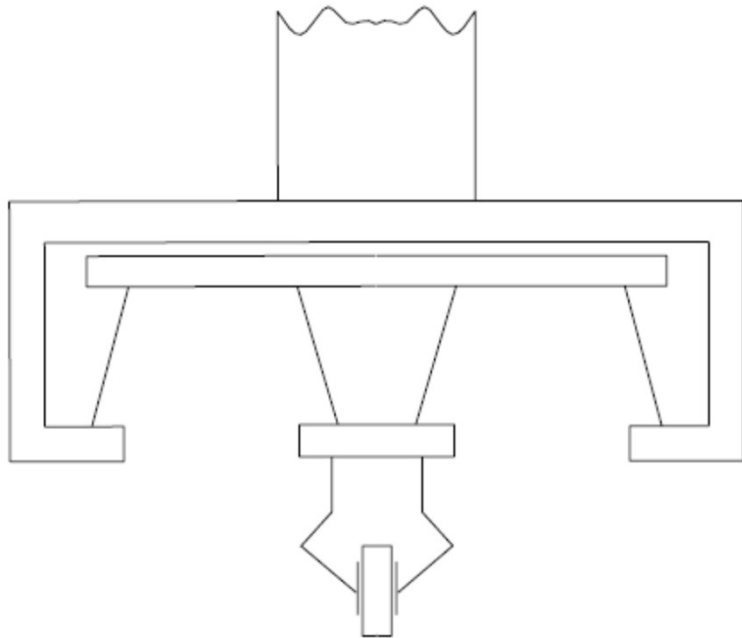


Za zadatke montaže (insertovanje trna u otvor) razvijene su tkz. RCC jedinice ili jedinice sa udaljenim centrom popustljivosti, odnosno adapteri.

## **RCC – Remote Centre Compliance**

Ove jedinice se postavljaju izmedju ploča za vezu i EE (end efector) i predstavljaju dodatke, odnosno neosnažene ili pasivne stepene slobode.





S obzirom da obično pri montaži (i uopšte u mašinstvu) imamo oborene ivice ili zaobljenja i na trnu i na otvoru, to se pri manjim greškama, ovim pridodatim stepenima slobode, efikasno mogu kompenzovati bočne i ugaone greške. Ovim se trn bez zaglavlivanja može uvesti u otvor. Prednosti ovih sistema su što su veoma brzi i ne povećavaju cijenu upravljačkog sistema robota. Nedostaci su relativno velika masa i ograničenost na klasu zadatka (centar popustljivosti – vektor sile i vektor pomjeraja su kolinearni i u uskim granicama). Pored pasivnih RCC jedinica, danas se i aktivne ili instrumentalizovane (IRCC) jedinice za rješavanje problema pri montaži.



## SENZORI BLIZINE I RASTOJANJA

### **Senzori blizine**

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

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

Karakteristika ovih senzora je da imaju izlazni signal koji se mjenja kada je blizina objekta veća ili manja od određene vrijednosti. Često se još zovu i relejnim senzorima odnosno prekidačima. Senzori blizine su jeftini, jednostavni i izdržljivi.

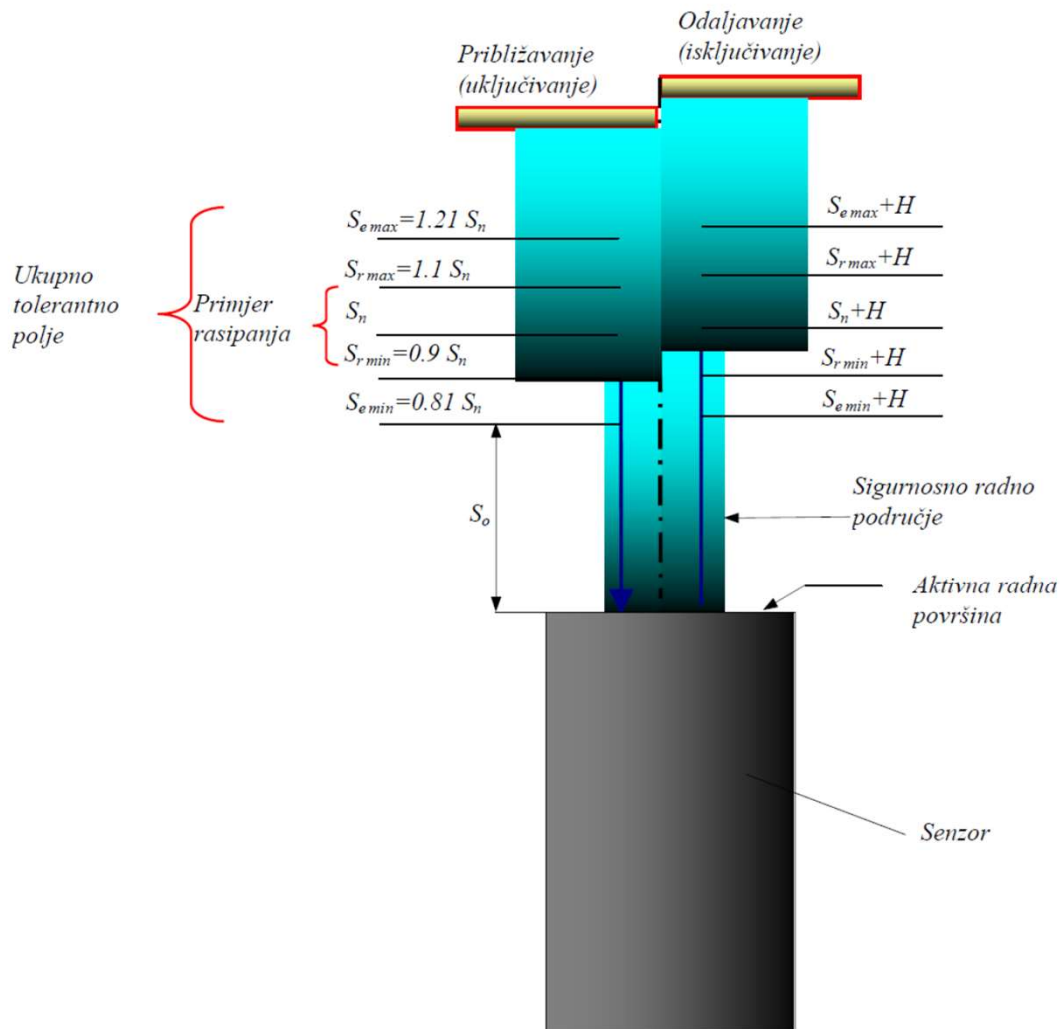
Osnovna primjena ovih senzora u robotici je kod brojanja komada i pri detekciji prisustva objekta i prepreka.

Kućišta, kablovi, primjena u eksplozivno opasnim sredinama propisani su evropskim standardima EN50008 - EN50044. Senzori blizine imaju relejnu statičku karakteristiku sa histerezisom. Za tehničku primjenu ovih senzora, slika 6.32 relevantni su sljedeći podaci:

**Rastojanje uključivanja „S”** predstavlja rastojanje objekta od aktivne površine senzora pri kojoj dolazi do uključivanja senzora.

**Realno rastojanje uključivanja „Sr”** predstavlja rastojanje objekta od aktivne površine senzora koje obuhvata proizvodne i konstrukcione tolerancije pri nominalnom naponu napajanja i radnoj temperaturi 20°C. Vrijednost mu se kreće u granicama  $\pm 10\%$  od „Sn”, odnosno  $0,9S_n < S_r < 1,1S_n$ .

**Nominalno rastojanje uključivanja „Sn”** predstavlja rastojanje objekta od aktivne površine senzora pri kojoj dolazi do uključivanja senzora. Naravno tu se zanemaruju odstupanja određenih parametara kao što su: utjecaj temperature, nestabilnost napona napajanja i dr.



**Efektivno rastojanje uključivanja „Se”** je udaljenost od objekta do aktivne površine pri čemu se uzima u obzir i uticaj temperature. Njegov iznos je  $S_e = (0,81-1,21) S_n$ .

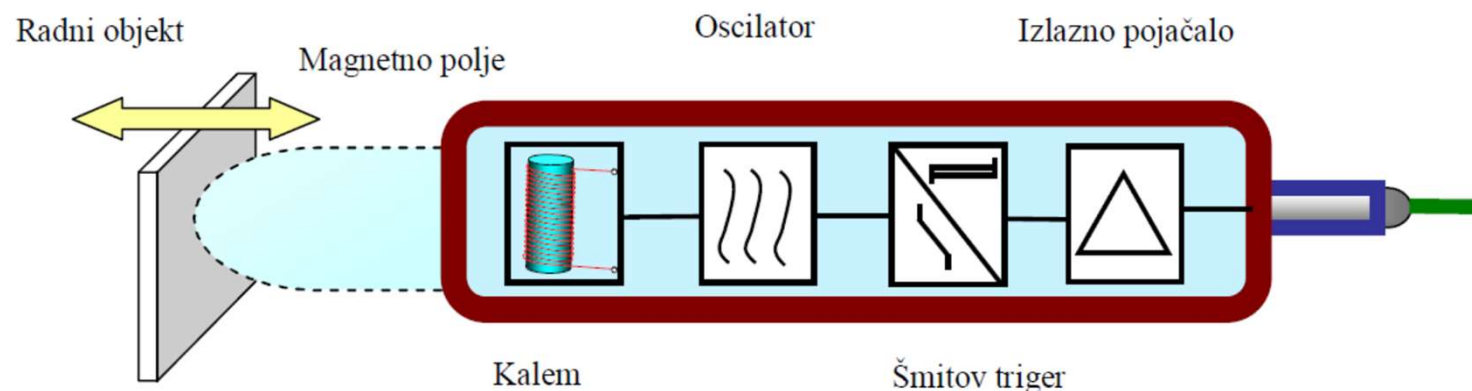
**Operativno rastojanje uključivanja „So”** je rastojanje objekta od aktivne površine senzora koje obezbjeđuje siguran rad, a obično se kreće u granicama  $0 < S_o < 0,8S_n$ .

U slučaju da imamo da je radni objekt veći od test objekta ova se rastojanja neznatno mijenjaju. U ovu grupu senzora spadaju: induktivni, kapacitivni, ultrazvučni, optički itd.

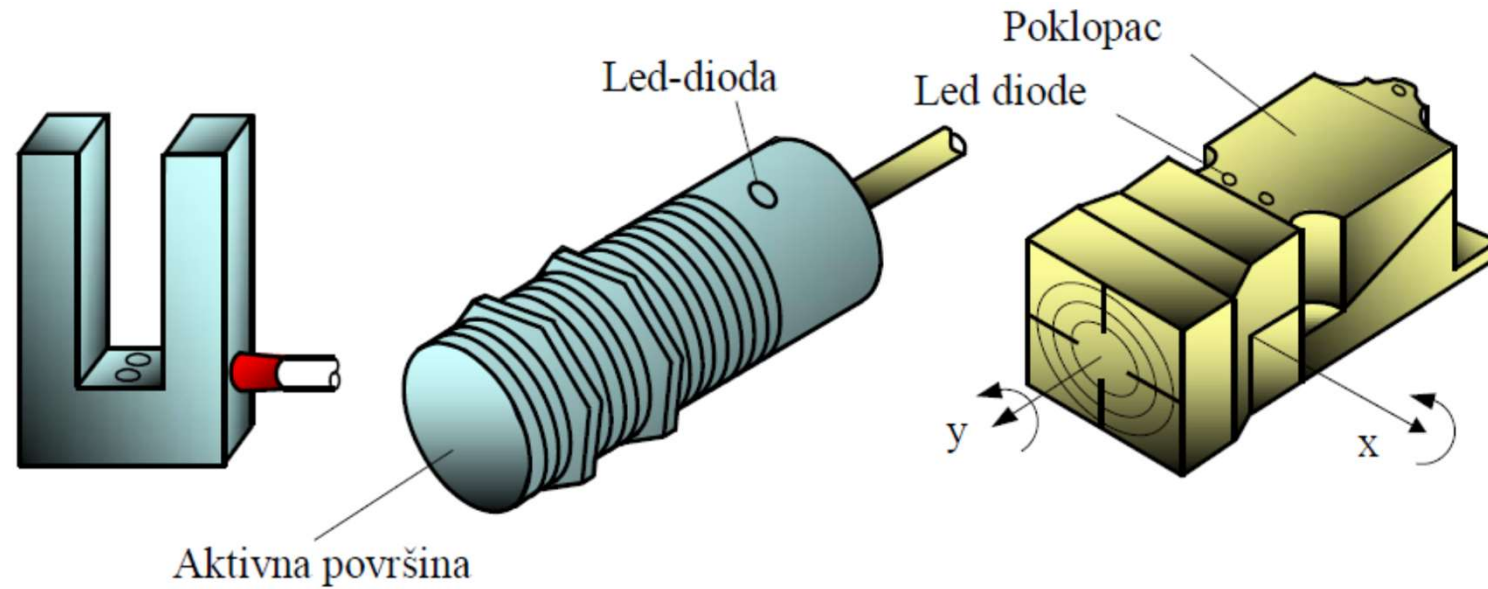
Slika 6.32. Mjerenje rastojanja uključivanja po normama EN 50010

## Induktivni senzori blizine

Princip rada ovih senzora se zasniva na zavisnosti induktivnosti kalema od promjene magnetne otpornosti. Približavanjem predmeta senzoru raste induktivnost, udaljavanjem predmeta dešava se suprotno. Blok šema jednog induktivnog senzora data je na slici

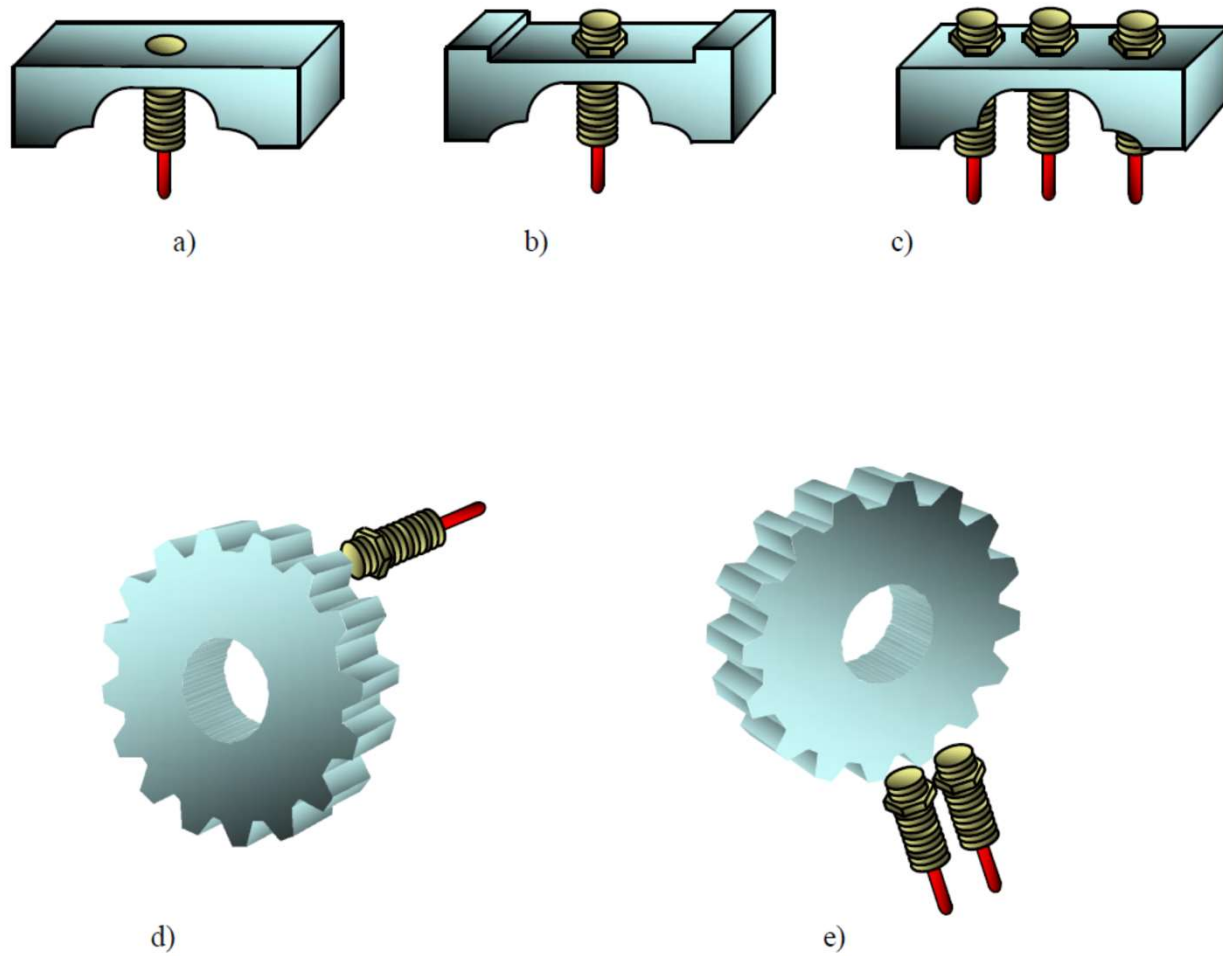


Priključenjem senzora na izvor napajanja električnom energijom dolazi do oscilacija na rezonantnoj frekvenciji. Ove oscilacije su uzrok stvaranja elektromagnetnog polja čiji je pravac prostiranja u smjeru ose senzora. Izlazni se signal mijenja s promjenom udaljenosti predmeta. Induktivni senzori se prave kao: U-profil, cilindrični profil i prizmatični profil, kako je to prikazano na slici



*Slika 6.34. Konstruktivne izvedbe induktivnih senzora*

Kućište ovih senzora se uglavnom pravi od nerđajućeg čelika ili polimera. Na samom kućištu se često ugrađuju LED-diode za vizualnu indikaciju stanja i ispravnost napajanja. Induktivni senzori se lako ugrađuju

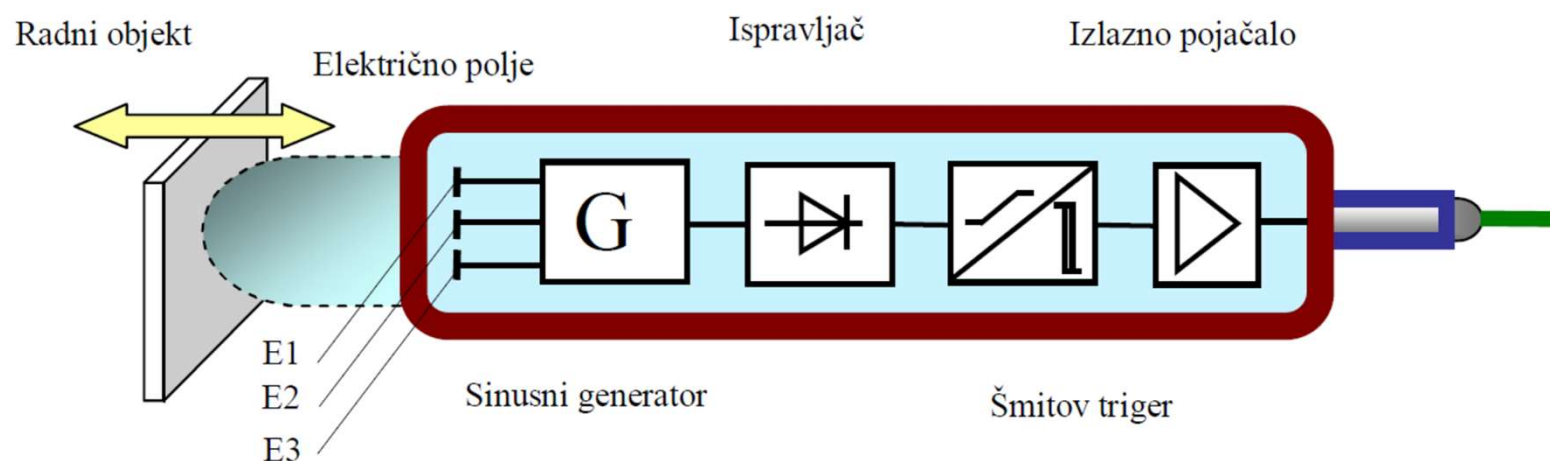


*Slika 6.35. Konstrukcioni detalji ugradnje induktivnih senzora: a) direktna ugradnja, b) ugradnja u udubljenju, c) ugradnja u nizu, d) detekcija ugaone brzine, e) detekcija ugaonog ubrzanja*

## Kapacitivni senzori blizine

Princip rada ovih senzora sličan je principu rada induktivnih senzora. Rad senzora je miran i beskontaktno. Spadaju u grupu senzora za određivanje blizine objekta, a mogu poslužiti i za mjerenje zglobne brzine.

Osnovni element senzora je kondenzator koji se priključuje na oscilator ili pojačivač. Konstrukcija jednog ovakvog senzora data je na slici

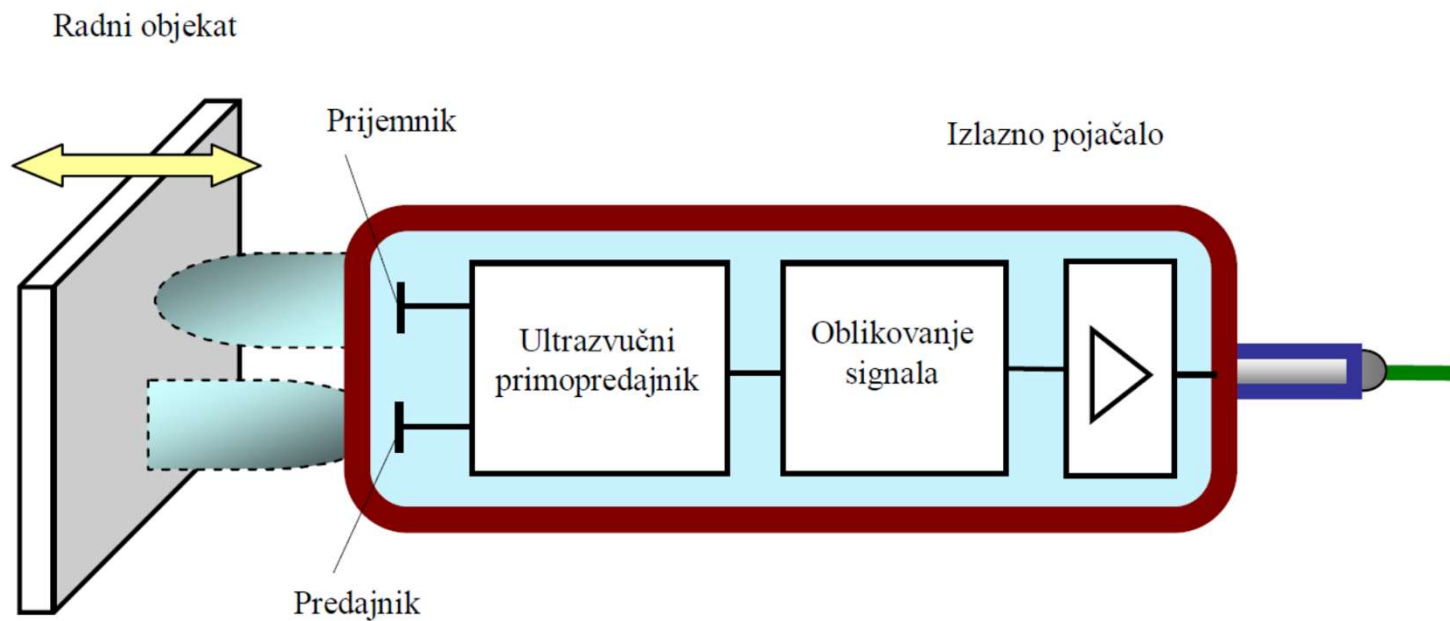


Pojavom objekta između elektroda dolazi do stvaranja naizmjeničnog napona. Dobijeni naizmjenični napon se ispravlja i poredi sa naponom praga Šmitovog trigerera koji je najčešće podešen na ekvivalentnom preklopnom rastojanju. Do porasta rastojanja uključivanja doći će zbog prisustva vlage i prašine, kao i usljed porasta temperature. Obično se tačno očitavanje vrijednosti priključivanja određuje uz tačno definirane uslove. Kod ovih se senzora dielektrična konstanta kreće blizu jedinice. Zbog toga nijesu pogodni za detekciju predmeta od prozirnih materijala.

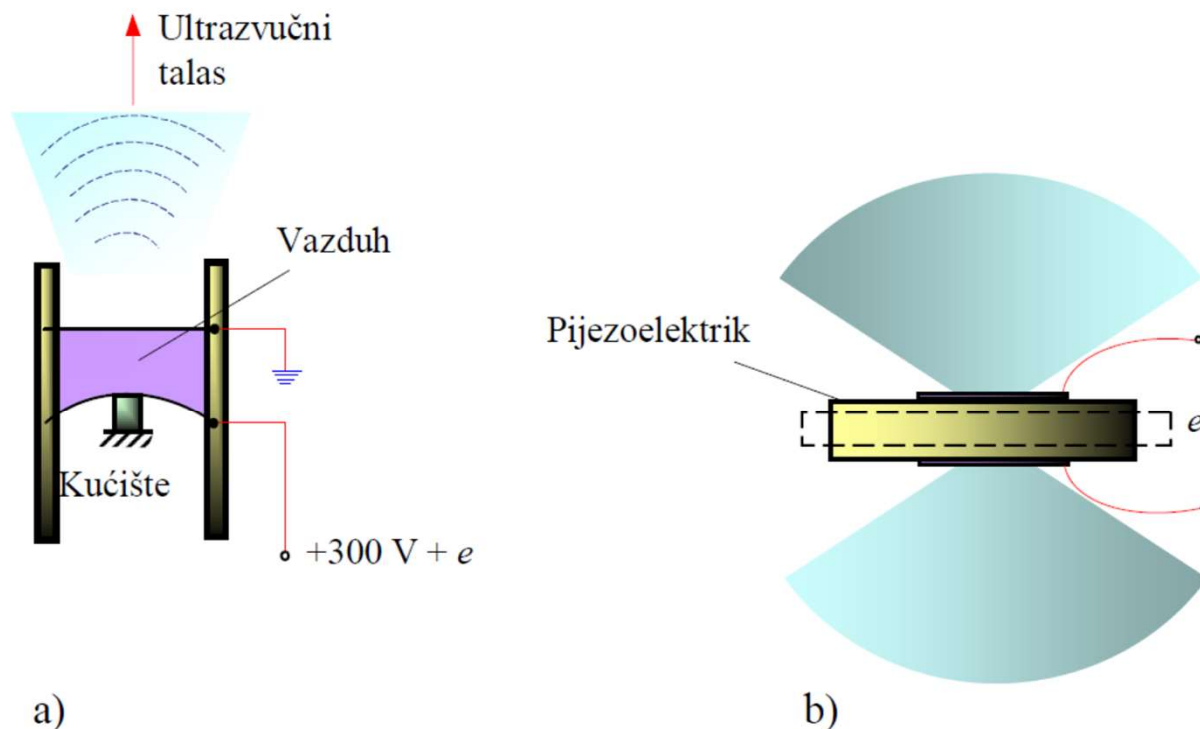


## Ultrazvučni senzori blizine

Osnovni elementi ultrazvučnog senzora blizine su: ultrazvučni primopredajnik, uređaj za formiranje izlaznog signala i pojačivač, kako je to prikazano na slici



Ovi senzori se koriste kao senzori blizine, a mogu poslužiti i za određivanje zglobne brzine. Mogu biti izvedeni kao pijezelektrični, a obično se prave kao elektrostatički. Radna frekvencija elektrostatičkih senzora je 250kHz. Izgrađeni su od dvije metalne elektrode prikjučene na jednosmjerni prednapon (300V), tako da se međusobno privlače (slika 6.38.a).



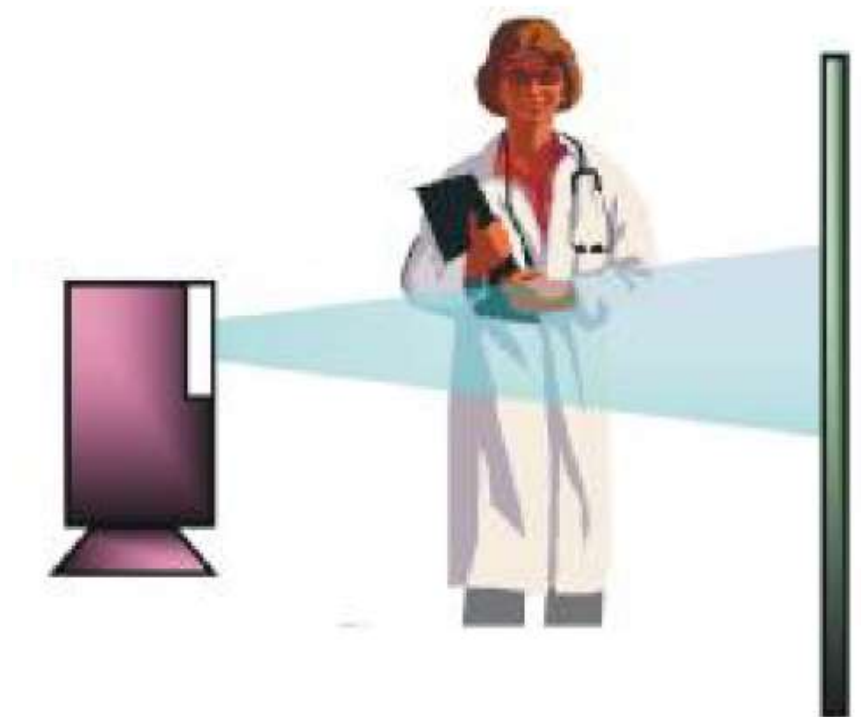
Slika 6.38. Ultrazvučni senzori : a) elektrostatički, b) pijezelektrični

Jedna elektroda je fiksirana, dok druga koja je pričvršćena po obodu počinje vibrirati u skladu sa silom stvarajući ultrazvučne talase.

Pijezoelektrični primopredajnici se prave od pijezoelektričnih materijala. Priključenjem pijezoelektrične membrane na naizmjenični napon, ona počne da osciluje i djeluje kao generator ultrazvuka (slika 6.38.b).

Pri gradnji ovih senzora javlja se više problema (nejednaka brzina prostiranja ultrazvuka u različitim medijima, zavisnost brzine od temperature i pritiska vazduha, slabljenje intenziteta zbog radialnog širenja i apsorpcije, djelovanje šuma i dr.)

Primjeri primjene ovih senzora su različiti. Jedan od primjera dat je na slici 6.39.



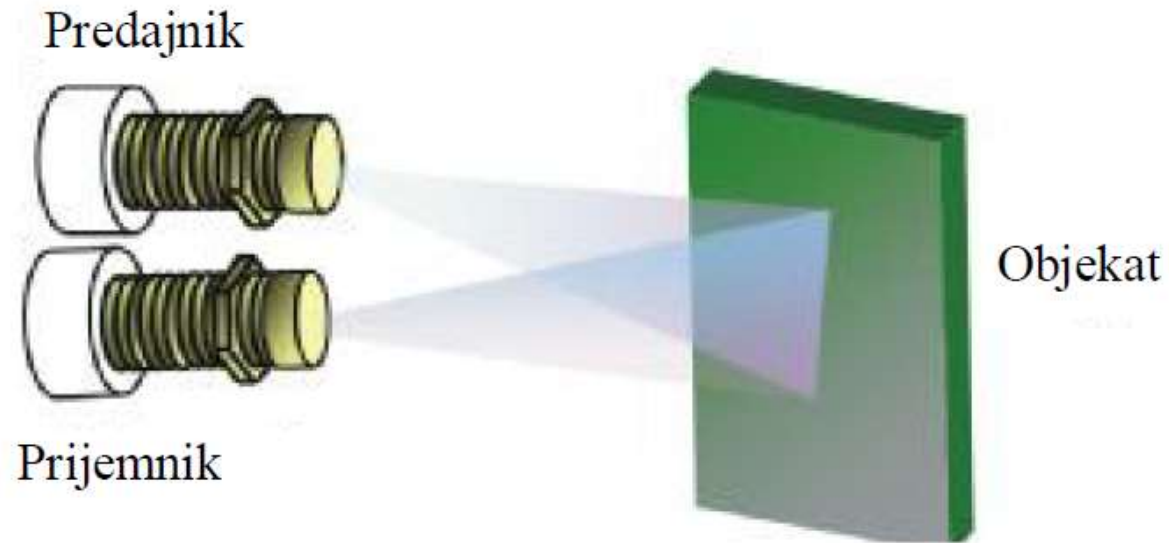
*Slika 6.39. Detekcija ulaza/izlaza*

## **Optički senzori blizine**

Ovi senzori se sastoje od optičkog para-predajnika i prijemnika. Kao predajnici većinom se koriste LED-diode i laserske diode, dok se kao prijemnici koriste fototranzistori, fotodiode i fotootpornici. Najčešća kombinacija je LED-dioda i fototranzistor.

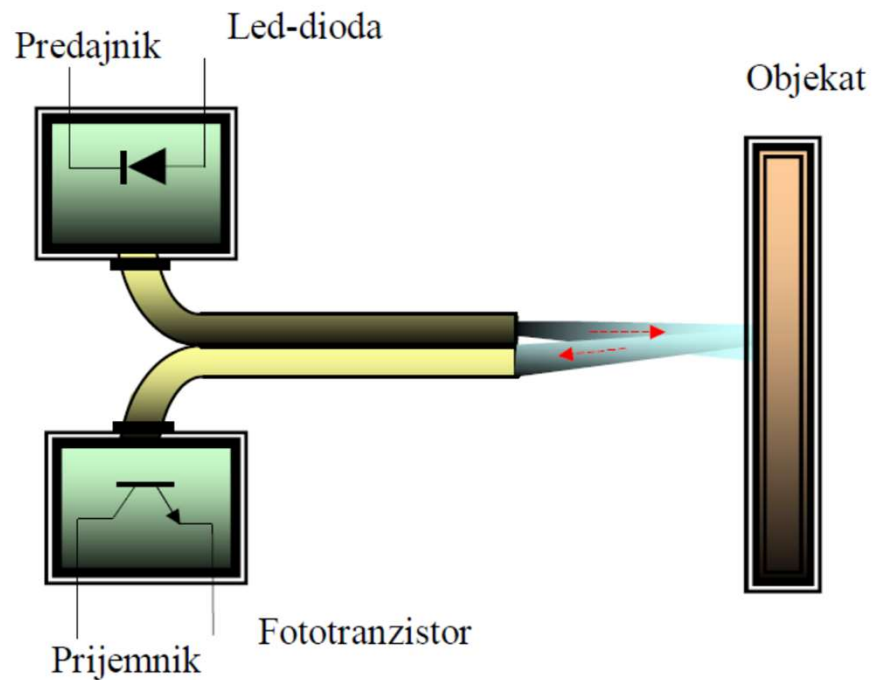
Optički par radi usaglašeno u određenom području optičkog spektra. Obično je optički signal u području vidljive svjetlosti, u području kratkotalasne infracrvene svjetlosti ili u području srednjetalasne infracrvene svjetlosti.

Optički senzori koji imaju refleksiju na objektu tačno prepoznaju objekt na određenoj udaljenosti, koja je zavisna od intenziteta emitovane svjetlosti, položaja predmeta u odnosu na prijemnik i predajnik, slika 6.40.



*Slika 6.40. Optički senzor kod prepoznavanja predmeta*

Ovi se senzori uglavnom izgrađuju u kućištima od plastike. Ako se radi o manje dostupnim mjestima, optički se zrak može dovesti pomoću optičkih vlakana i ogledala. Na slici 6.41. je prikazan jedan optički senzor s produžecima od optičkih vlakana.

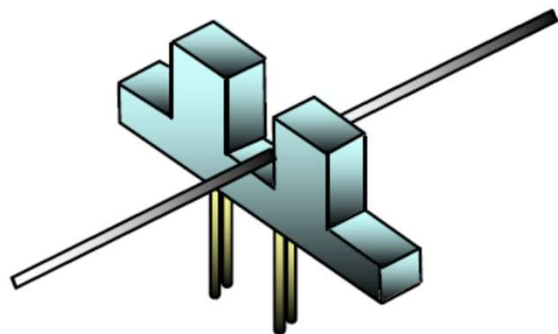


Dovodno vlakno je povezano sa LED-diodom, a odvodno sa fototranzistorom.

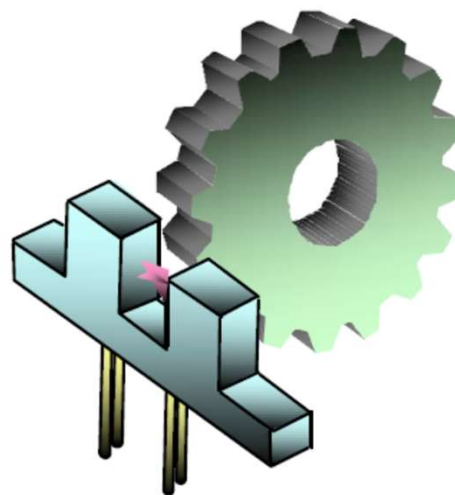
Zbog svojih malih dimenzija mogu se ugrađivati skoro na svakom mjestu.

Neki od primjera ugradnje ovih senzora dati su na slici 6.42.

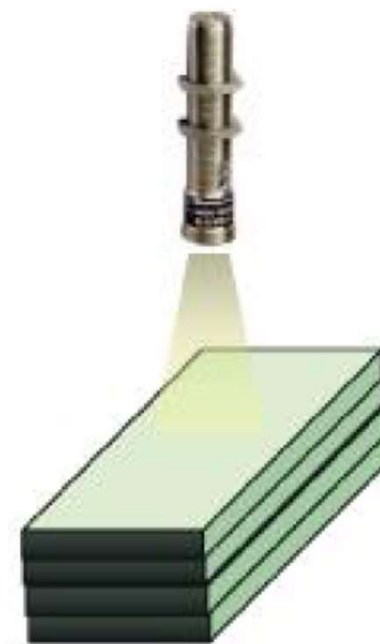
*Slika 6.41. Optički senzor sa produžecima od optičkih vlakana*



a)



b)



c)

*Slika 6.42. Primjeri ugradnje optičkih senzora: a) detekcija žice, b) detekcija broja obrtaja zupčanika, c) detekcija visine*

## Senzori vizije

Vještačka vizija ima za cilj povezivanje računara, elektronike i robotike, a sve to da bi se donekle postigla čovjekova vizualna sposobnost. Oponašanje čovjekovih triju komponenti (oka, optičkog nerva i moždanih funkcija) u pojedinim aspektima je bolje od uzora, a u ponekim i slabije. No uvijek kada su u pitanju brzina, mogućnost rada u nekim nepogodnim sredinama prednost se daje sistemima vještačke vizije.

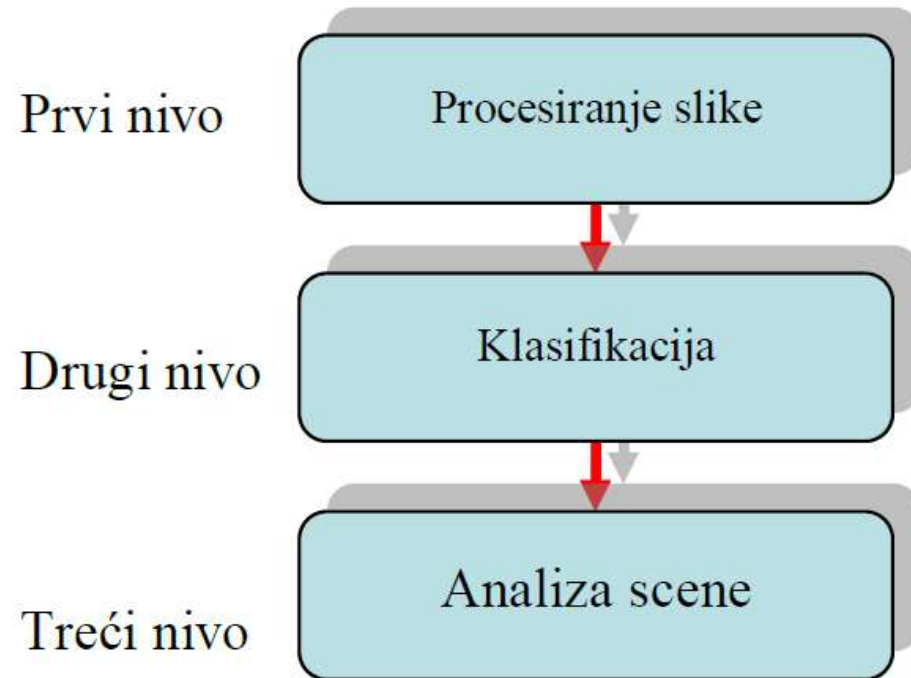
Razvijanjem vještačkog čula vida, robot se razvija u pogledu samostalnosti u izvršavanju postavljenih zadataka. Kompjuterska tehnika nam daje 2D sliku 3D elemenata.

Postoje tzv. polarizacijske naočale pomoću kojih je moguće dobiti prividnu dubinu. Karakteristično za te naočale je da posjeduju polarizacijske filtere koji propuštaju zelenu i crvenu svjetlost. Računari pomoću kojih se želi vidjeti trodimenzionalna slika moraju posjedovati dodatni hardverski dio sa sofisticiranim grafičkim sposobnostima.



Osnovna tri elementa ili nivoa senzora vizije su:

- procesiranje slike,
- klasifikacija i
- analiza scene.



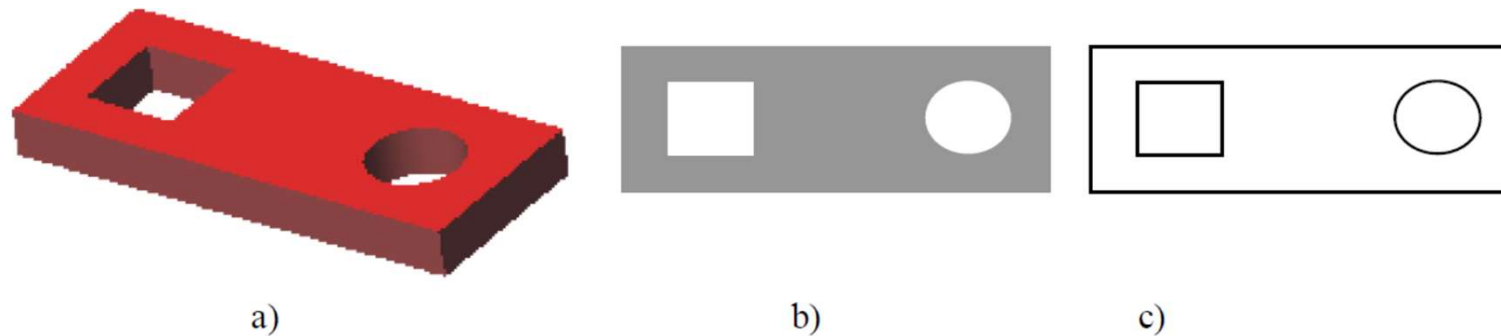
*Slika 6.43. Osnovna tri nivoa senzora vizije*

**Prvi nivo** nam omogućava podešavanje slike odnosno dobijanje slike i njene poboljšane verzije.

Jedna od najvažnijih etapa prvog nivoa je filtracija šuma. Pojava šumova dovodi do problema osvjetljenosti nekih detalja. Npr. ivica objekta postaje tamnija ili svjetlija nego što bi trebala biti. Za slučaj kada imamo da je slika tamnija od željene vršimo podešavanje sjajnosti i kontrasta slike. Da bi se to postiglo vrši se oduzimanje ili dodavanje sjajnosti od svih piksela. Piksel je element slike dobijen pomoću jednog optoelektronskog senzora.

**Drugi nivo** predstavlja sposobnost prepoznavanja likova na sceni. Iz prethodnog nivoa smo dobili 2D sliku scene sa izvršenim korekcijama zbog poboljšanja kvaliteta slike. Prvi korak drugog nivoa je dijeljenje slike na elementarne ivice i njihovo spajanje u linije i konture objekta.

Da bi došlo do smanjenja obrade velikog broja informacija, u rasteru slike se preko A/D-pretvarača propušta niz gradacija sjajnosti slike nekog objekta. To je tzv. siva slika koja prikazuje siluetu objekta (slika 6.44.). Kontura (ivica) je još jednostavnija zbog binarne gradacije slike tj. radi se o dvije gradacije sjajnosti slike (crna/bijela – 0/1).



*Slika 6.44. Slika predmeta (a) sa siluetom (b) i konturom (c)*

Sam prelaz siluete na konturu predstavlja derivaciju pomoću diferencijalnih operatora. Ekstrakcija i klasifikacija se odnose na identifikaciju istovrsnih karakteristika različitih objekata radi njihovog poređenja i prepoznavanja.

**Treći nivo** je analiza scene. Analiza scene se odvija kroz interpretaciju i akciju. Vizualni sistemi imaju sposobnost znanja o klasi objekta i opremljeni su bazama podataka. Rezultati interpretacije usklađuju se kroz interakciju između robota i scene.

Neki od problema rješavanja su:

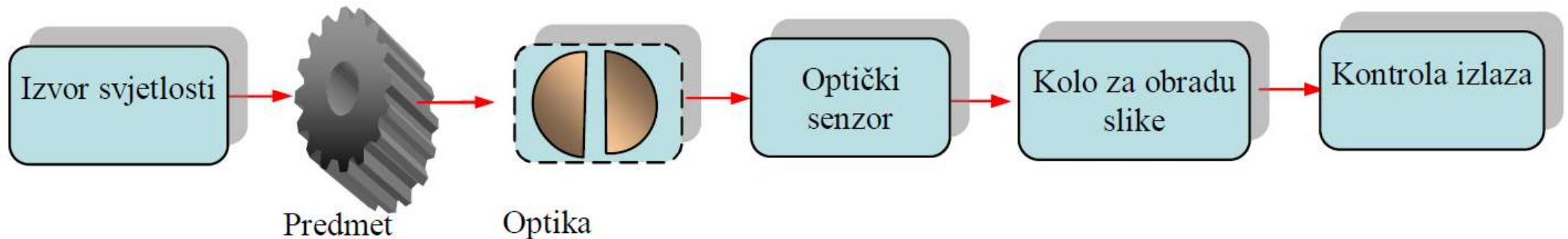
- analiza međusobnih objekata na sceni,
- grupisanje pojedinih oblasti radi dobijanja konture,
- traženje linija i kontura.

## Struktura senzora vizije

Senzori vizije su se prvo razvijali kao optički senzori blizine, da bi se danas koristili optički nizovi i 2D-matrice.

Vizuelni senzor je ustvari optički senzor koji optičko zračenje pretvara u sliku. Današnji senzori vizije su opremljeni kamerama kao fundamentalnim sensorima, a nastojanja su da viziju dobijemo primjenom lasera i optičkih vlakana.

Komponente jednog senzora vizije su date na slici. U zavisnosti od cilja vizije se biraju parametri komponenti senzora.



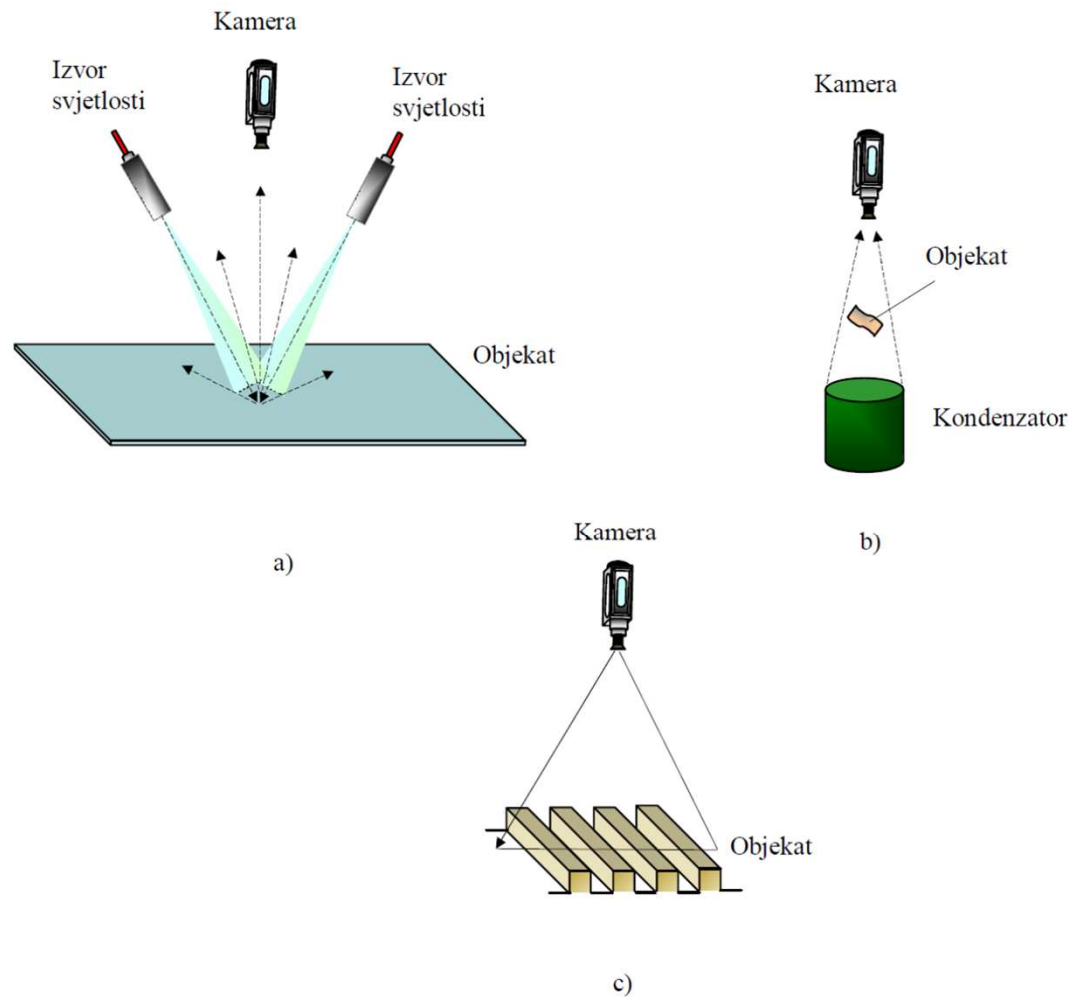
Tu se mogu izdvojiti komponente:

- upravljačka jedinica, kojom se vrši koordinacija rada sistema i ostvaruje veza s displejem
- osvetljenje
- obrađivači signala slike (A/D-pretvarači, mikroprocesor) i softver
- optički senzor s dodatnim uređajima (U/I konvertor, pojačivač, mehanizam za hlađenje)
- optički elementi (sočivo, prizma, ogledalo).

Osnovni elementi su poziciono osjetljive foto-diode i poluprovodnički detektori.

Jedan od problema kod senzora vizije je način osvetljenja predmeta u radnom prostoru. Da bi se izvršila identifikacija objekta potreban je dobar kontrast tj. visok odnos signal/šum.

Neki od načina osvetljenja dati su na slici 6.46.



Slika 6.46. Način osvjetljenja: a) direktna metoda  
 b) pomoću kondenzatora  
 c) pomoću formiranja sjenki

## CCD – poluprovodničke kamere

Postoje različiti tipovi kamera. Najstarija je svakako TV kamera koja nije pouzdana zbog lomljivosti, kratkog vijeka trajanja i nelinearnosti napona. Nadalje tu imamo vidikon kamere. Vidikon kamera je kamera na bazi vakumske cijevi sa senzorskom elektrodom od  $Sb_2S_3$  (antimon sulfid). Iako se čine odgovarajuća poboljšanja (gusto pakovanje fotodiode), sve se manje koriste zbog nedostataka. Neki nedostaci su: veće dimenzije, osjetljivost na vibracije i manja pouzdanost.

Danas se najviše primjenjuju poluprovodničke CCD-kamere.

Počeci ovih kamera datiraju još početkom 60-tih godina prošlog vijeka. Mjesta ugradnje ovih kamera su većinom u šaci robotske ruke. Njihov princip se zasniva na konverziji fotona u naelektrisanje. Ta se konverzija može opisati ili pomoću fotodiode ili pomoću MOS kondenzatora.

Rezolucija kamere je 512x512. Razmaci između elemenata su  $30\mu m$ . Primjer kamera ovakvog tipa su dati na slici 6.47.





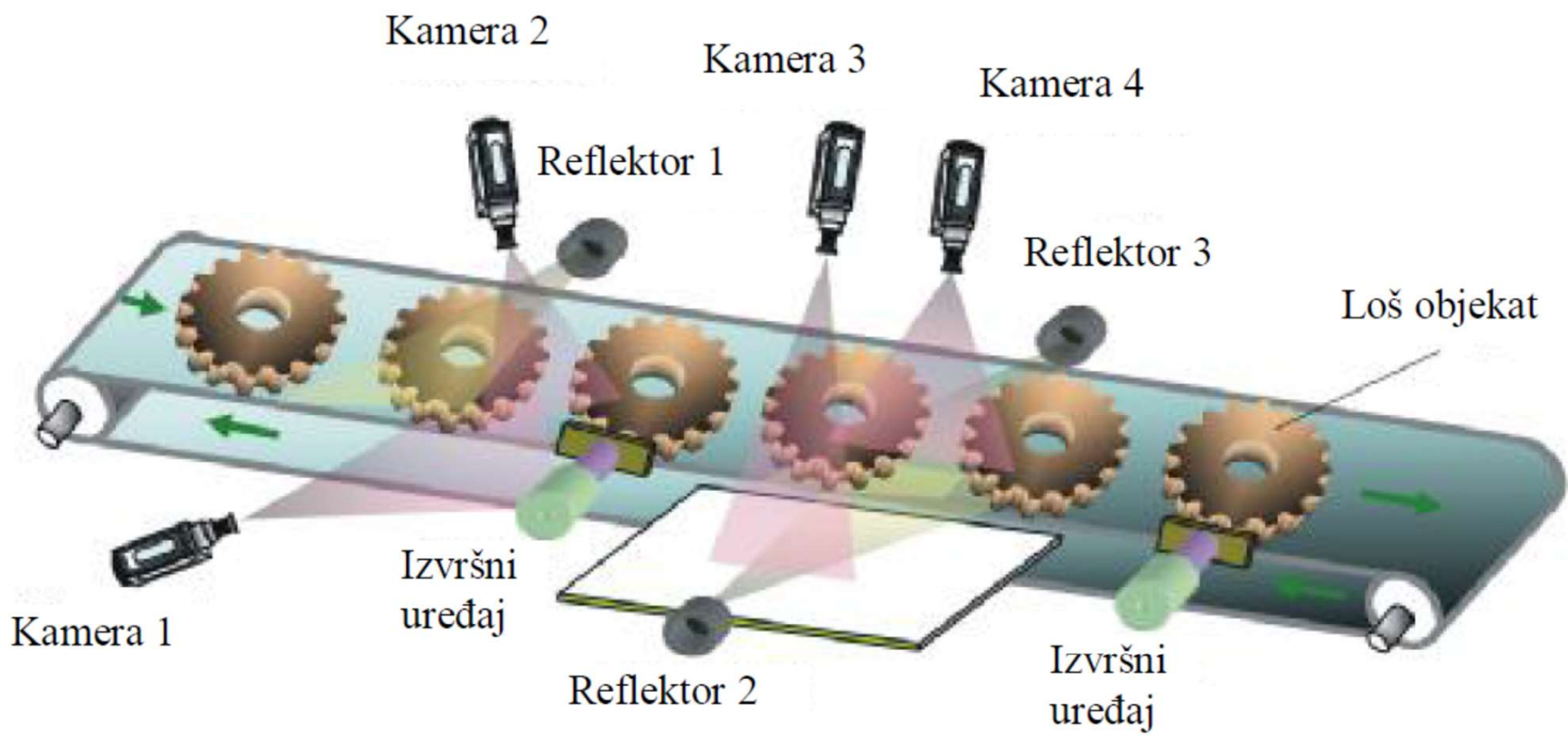
*Slika 6.47. CCD kamere izvedene u obliku niza MOS tranzistora*

## **Primjena senzora vizije u robotici**

Vještačka vizija je prvo našla primjenu u sistemima prepoznavanja znakova, biološkog materijala i u prepoznavanju različitih objekata vojne namjene.

Daljem razvoju vještačke vizije svakako su doprinijeli razvoj računara i robotike. Svoju primjenu ovi senzori nalaze u kontroli kvaliteta proizvoda. Kad kažemo kontrola kvaliteta, tu se misli na kontrolu dimenzija (oblika) predmeta. To se posebno odražava u automobilskoj, tekstilnoj, prehrambenoj i metalsko-prerađivačkoj industriji.

Proizvodi koji odstupaju od tolerancija skidaju se sa trake. Da bi se izbjegli određeni problemi, bilo da se radi o nedostatku nekog dijela, stavljaju se dvije kamere pod uglom  $90^\circ$  ili  $180^\circ$  slika 6.48.



*Slika 6.48. Kontrola dimenzija objekta na traci*

Kontrola dimenzija predmeta se vrši kamerama 1 i 2. Kad imamo slučaj da dimenzije odstupaju od referentnih, signalizira se izvršnom uređaju koji je najčešće solenoid, pa se onda predmet udaljava sa trake. Kamerama 3 i 4 se vrši kontrola površinskih oštećenja i to na taj način da se dobijena slika upoređuje sa referentnom.

Svako snimanje je snabdjeveno sa osvjetljenjima. Osvjetljenje ukoliko se priključi na pokretne dijelove robota, može dovesti do oštećenja performance robota. Jedan od problema je i kretanje robota, gdje može doći do oštećenja osvjetilnih uređaja ili do prikrivanja nekih dijelova objekta. Zbog tih razloga je najbolje imati što više uređaja za osvjetljavanje kako bi imali što bolju kontrolu.

Ovo je samo jedan primjer primjene senzora vizije. Senzori vizije imaju svoju primjenu i kod kontrole različitih otvora, identifikaciji predmeta itd.

Ovi senzori su našli primjenu i kod mobilnih robota. Mobilni se roboti mogu kretati po određenim površinama u prostoru. Kakvo je to kretanje zavisi od načina vođenja mobilnog robota. To vođenje može biti po unaprijed zadanom programu i pomoću senzora. Naravno, mobilni robot pri kretanju mora posjedovati informacije o okolini u kojoj se kreće

### 3D – senzori vizije

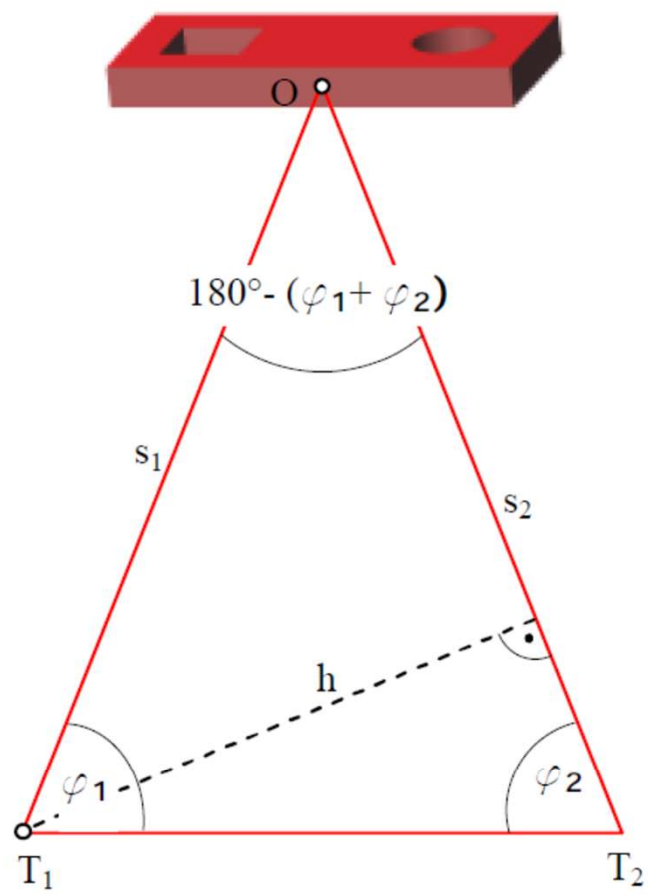
Za trodimenzionalnu viziju potrebno je izmjeriti udaljenost između senzora i svake tačke scene. Za ostvarenje trodimenzionalne vizije postoji nekoliko različitih metoda. Jedna od metoda je tzv. triangulaciona. Triangulacija predstavlja mjerenje rastojanja na osnovu tri tačke koje čine vrhove trougla. Triangulacija može biti pasivna i aktivna što zavisi od toga dali se kamera kreće ili ne.

Na slici 6.50. je prikazana triangulacija.

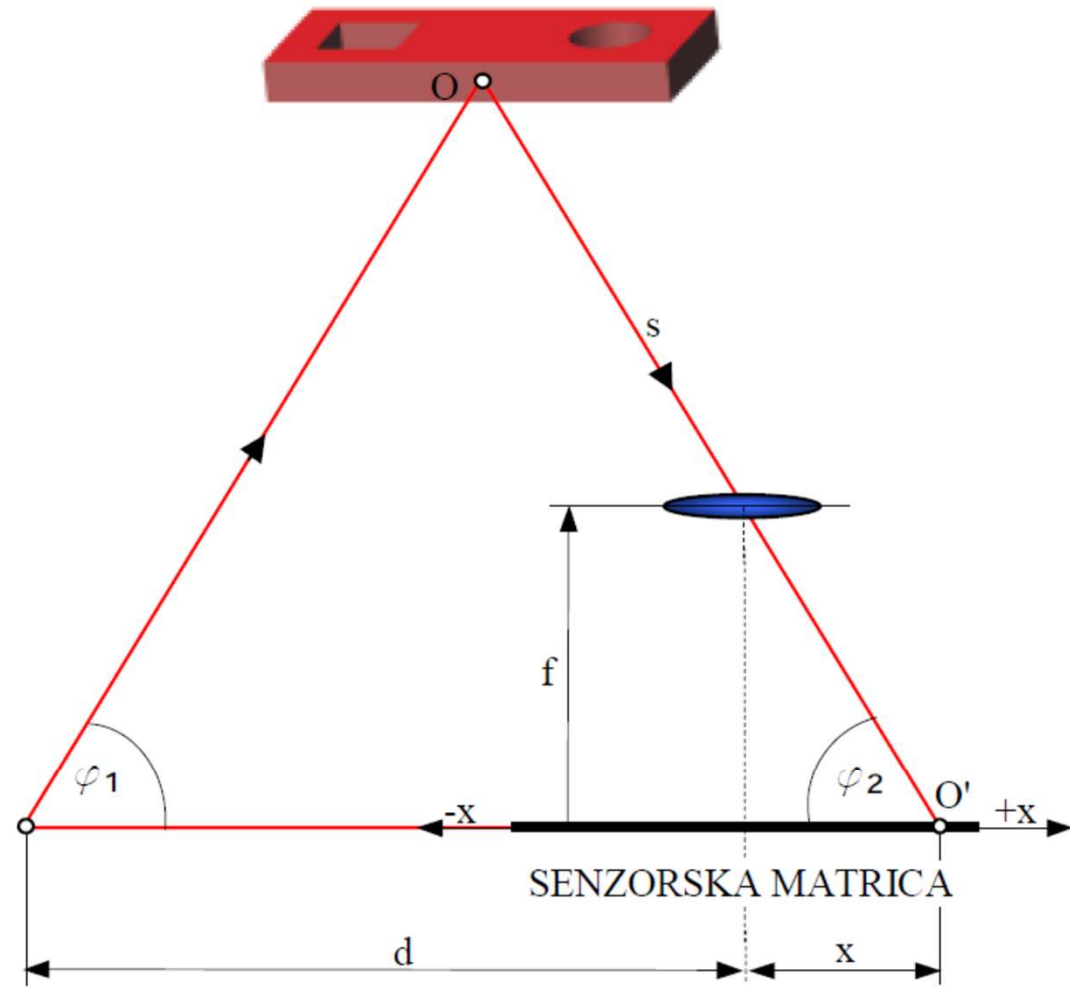
Tačke T1 i T2 su fiksne i poznato je rastojanje između njih. Pomoćna se veličina  $h$  može izračunati na dva načina:

$$h = s_1 \cdot \sin [180^\circ - (\varphi_1 + \varphi_2)]$$

$$h = d \cdot \sin \varphi_2$$



a)



b)

Slika 6.50. Triangulacija: a) pasivna, b) aktivna

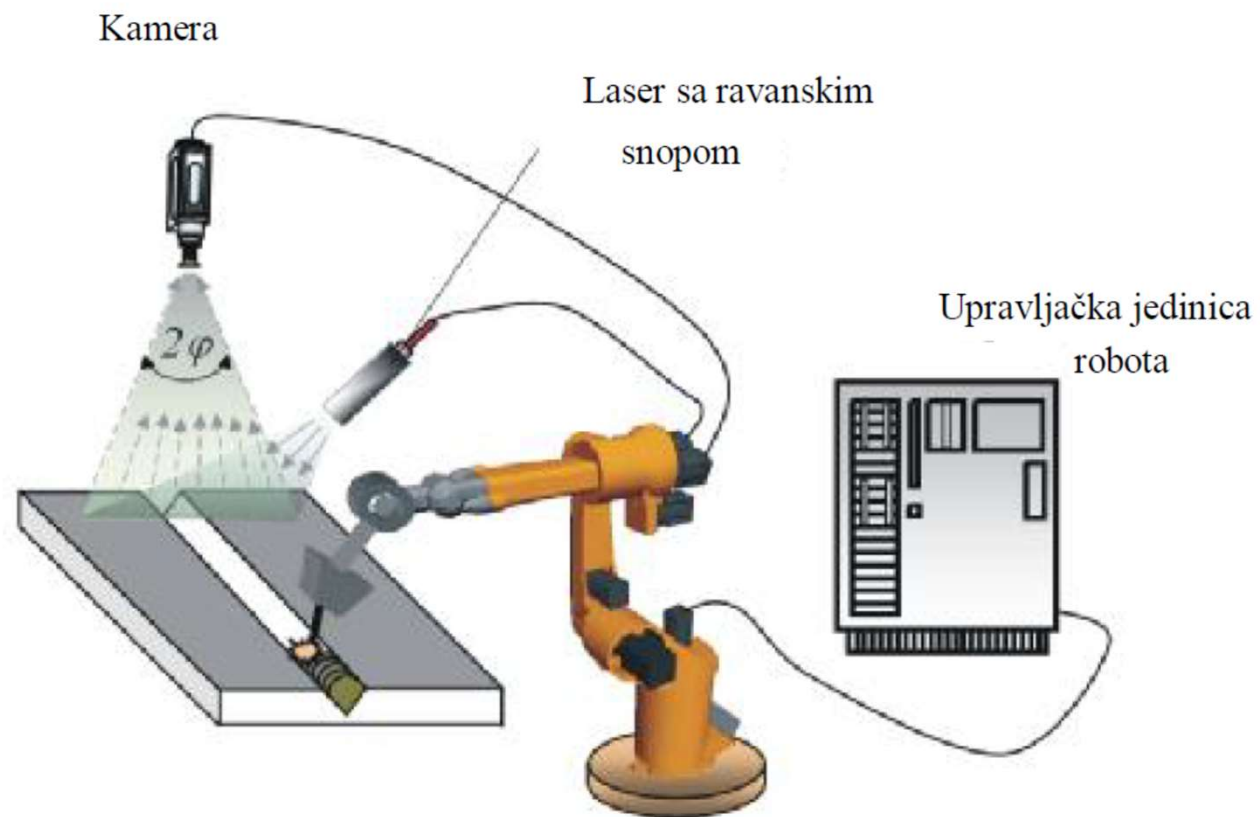
Izjednačavanjem desnih strana dobijemo da je:

$$s_1 = \frac{d \cdot \sin \varphi_2}{\sin[180^\circ - (\varphi_1 + \varphi_2)]}$$

Slično možemo dobiti i vrijednost udaljenosti od druge triangulacione tačke:

$$s_2 = \frac{d \cdot \sin \varphi_1}{\sin[180^\circ - (\varphi_1 + \varphi_2)]}$$

Tipičan primjer triangulacije i strukturnog svjetla je kod automatskog zavarivanja (slika 6.51.). Na osnovu programa upravljačka jedinica dolazi do podataka potrebnih za servovođenje robota, kao i za proračun utroška materijala potrebnog za zavarivanje.



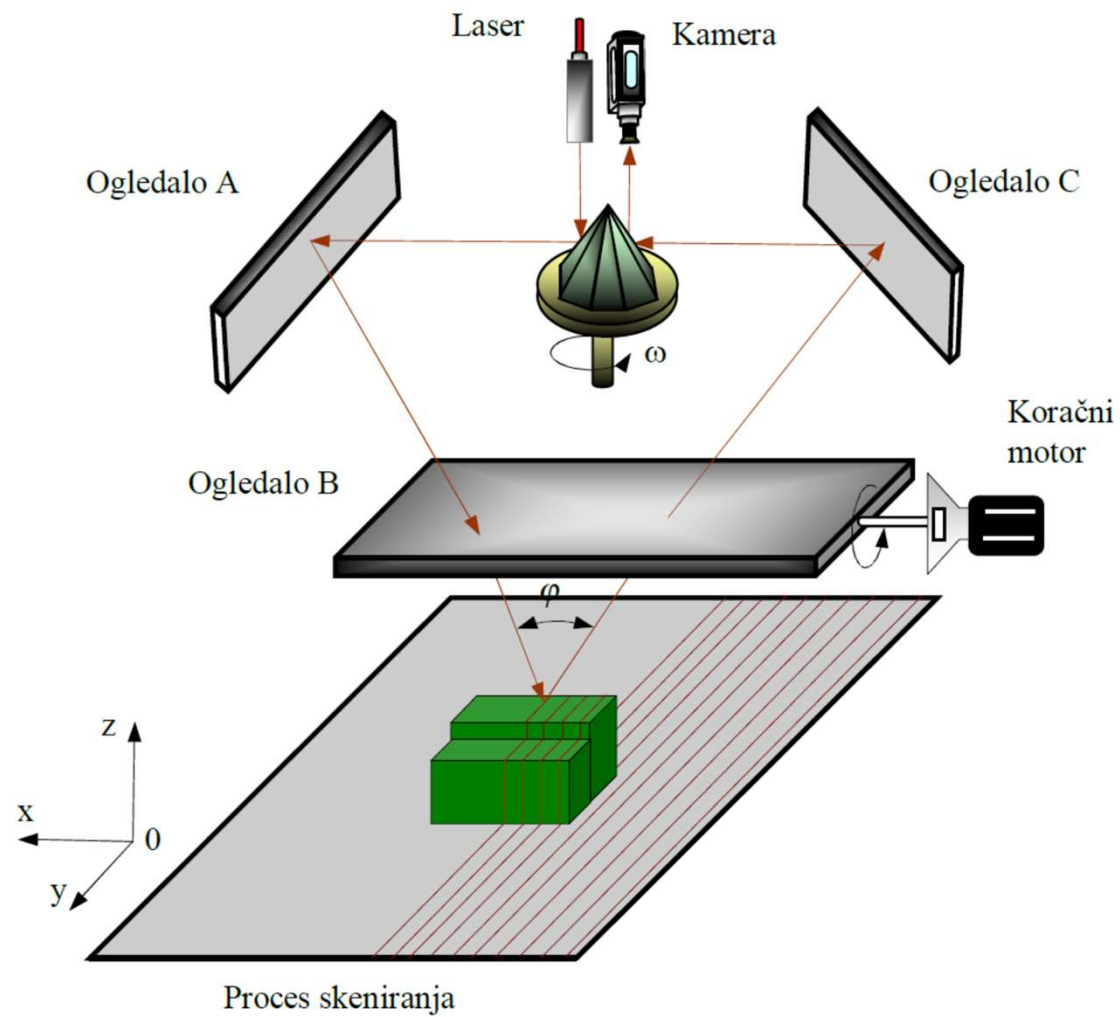
*Slika 6.51. Automatsko zavarivanje robotom*



Uspostavlja se korespondencija između slike na senzoru i dimenzija šava. Sve slike šava se memorišu pomoću odgovarajućeg podprograma. Za veće dimenzije šava potrebno je češće uzorkovanje i procesiranje. Kameru i laser nosi manipulator.

Zbog kontinualnosti zavora najčešće se koristi zavarivanje neprekidnom žicom, naročito u automobilske industriji. Laserski daljinomjeri se najčešće koriste kod detekcije trodimenzionalnih objekata. U ovu grupu se uvrštavaju kombinacije lasera i kamere.

Princip skeniranja pomoću laserskog zraka se svodi na određivanje udaljenosti između lasera i objekta. Danas se najviše primjenjuju sistemi sa autosinhronizacijom koji sadrže piramidalna ogledala, gdje jedna strana služi za detekciju lasera a druga za njegovo projektovanje (slika 6.52.).



Slika 6.52. Trodimenzionalni senzor sa autosinhronizacijskim skeniranjem objekta

Kao što vidimo sa slike, tu imamo piramidalno ogledalo na koje pada laserski zrak. Ogledalo se rotira konstantnom ugaonom brzinom  $\omega$ . Sa piramidalnog ogledala zrak se reflektuje na fiksno ogledalo "A", a potom na rotirajuće ogledalo "B". Na kraju se zrak preko fiksnog ogledala "C" reflektuje do kamere kao senzora. Pomoću piramidalnog ogledala se vrši skeniranje duž ose x, a uzduž ose y skeniranje se postiže rotacijom ogledala "B". Rotacija ogledala "B" se postiže pomoćnu koračnog motora. Samim tim dobijemo sliku sastavljenu iz uzdužnih i poprečnih linija. Na taj način imamo skeniranu sliku koja predstavlja reljefnu sliku scene. Povećanje rezolucije skenirane slike se postiže smanjenjem ugaonog koraka rotacije ogledala "B".

Skeniranje je danas čest slučaj sensorisanja 3D objekata. Posebno skeneri novije konstrukcije primjenjuju kod detekcije 3D objekata. Ovi nam senzori omogućuju kontrolu kvaliteta i dimenzija zadanog predmeta. Osim kontrole kvaliteta i dimenzija, nalaze uveliko primjenu i u drugim situacijama. To se odnosi prije svega na orijentaciju, nailaženje na prepreke kao i upoznavanje okoliša. Danas se za skeniranje koriste laserski i ultrazvučni skeneri. Primjenom senzora ovakve izvedbe nastoji se dobiti što bolja prostorna slika, odnosno ovakvom izvedbom senzora dobijamo tzv. "tehničko oko".

