

# Lekcija 6:

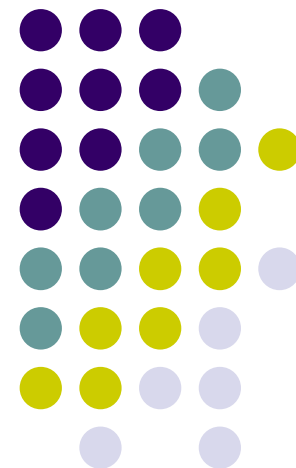
## *Senzori za mjerenje pozicije*

---

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić  
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Mehatronika

2012/2013



## 6. Određivanje pozicije

Poznavanje pozicije pokretnih objekata (robot, automobil, brod, avion, helikopter,...) je važno zbog planiranja odgovarajućih kretanja.

- Postupci određivanja pozicije mogu se svesti u dvije velike skupine:
- **Mjerenje relativne pozicije (dead-reckoning)**
  - Odometrija,
  - Inercijalna navigacija.
- **Mjerenje apsolutne pozicije (reference-based systems)**
  - Magnetni kompasi,
  - Aktivni svjetionici (active beackon),
  - Globalni pozicijski sistemi (GPS-global positioning systems),
  - Navigacija na temelju orijentira (landmark navigation),
  - Slaganje modela (model matching).
- Za svaki od navedenih postupaka koriste se različiti senzori, koji će se u nastavku obraditi.



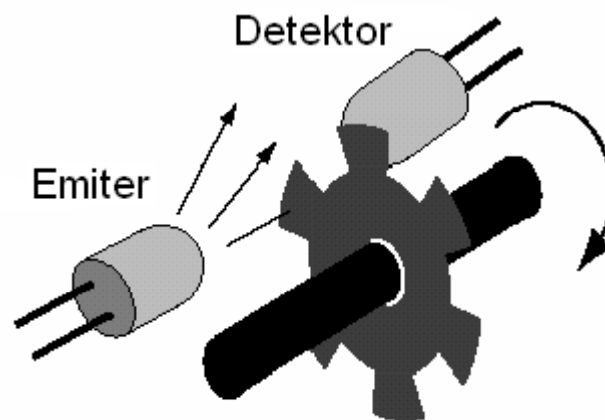
## 6.1. Optički enkoderi

- Postoje dvije vrste optičkih enkodera:
  - Inkrementalni,
  - Apsolutni.
- Inkrementalni optički enkoderi mjere rotacijsku brzinu i iz nje mogu izvući relativnu poziciju.
- Apsolutni optički enkoderi direktno mjere ugaonu poziciju i iz nje mogu izračunati brzinu.
- Apsolutni enkoderi se koriste samo kada nije moguć gubitak referentne veličine.



# Optički inkrementalni enkoder

- Mjeri ugaonu brzinu osovine na temelju isporučene informacije o poziciji i/ili brzini.

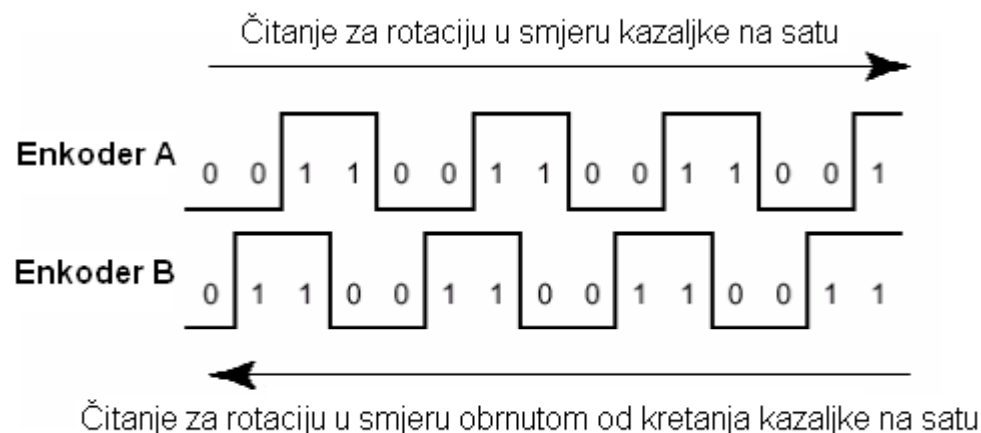


**Jednofazni enkoder**

- Disk je montiran na osovinu i smješten između para emiter-detektor.
- Kako osovina rotira otvori u disku presjecaju emitirane svjetlosne zrake.
- Hardver i softver, povezani na detektor, prate ove svjetlosne pulseve i pomoću njih opažaju rotaciju osovine.

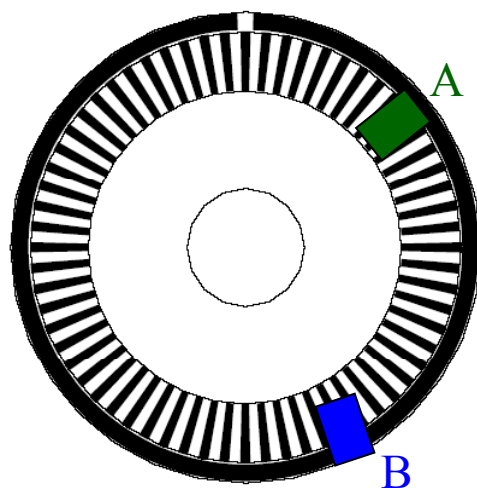
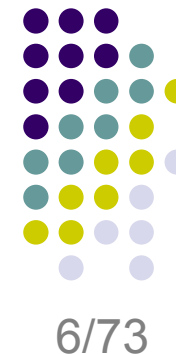
# Optički inkrementalni enkoder

- Jednofazni inkrementalni optički enkoder mjeri kojom brzinom osovina rotira, ali ne može detektirati **kada osovina mijenja smjer vrtnje**.
- Problem se rješava kvadraturnim kodiranjem: mjeri se precizno rotacija osovine i brzina kada osovina mijenja smjer rotacije.
- Za ovu svrhu se koristi dvofazni enkoder (fotopar).
- Generiranje pulseva proporcionalno brzini vrtnje osovine.

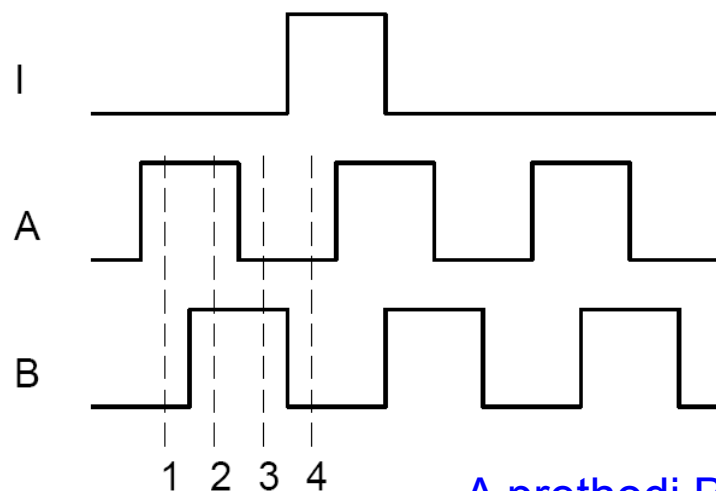


# Optički inkrementalni enkoder

- Par enkodera se koristi na jednoj osovini.
- Enkoderi se poravnavaju tako da su njihovi podatkovni nizovi na jednoj četvrtini ciklusa ( $90^\circ$ ) izvan faze.
- Kada se rapidno brzo uzorkuju podaci sa oba enkodera, **samo jedan enkoder će mijenjati stanje u jednom vremenskom trenutku.**
- Enkoder koji mijenja stanje određuje u koju stranu će rotirati osovina.

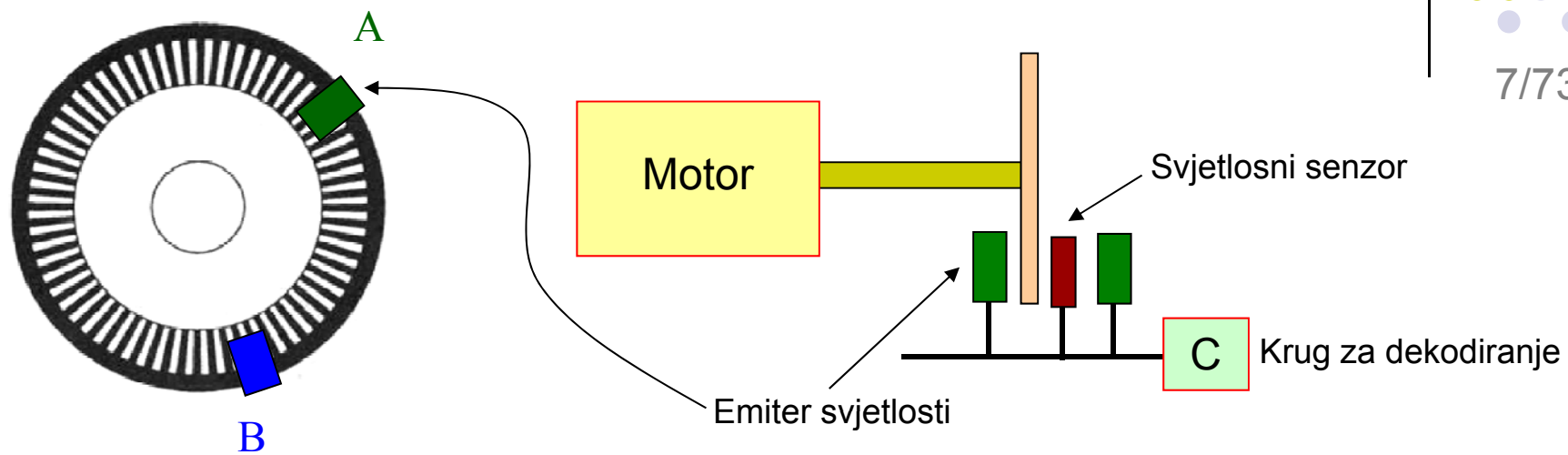


Stanja enkodera

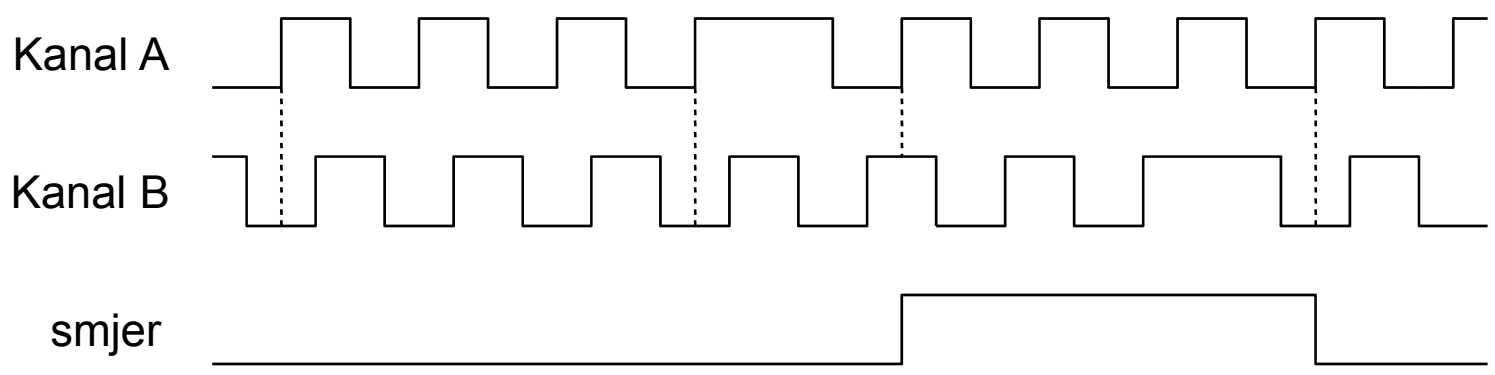


Stanje	Kanal A	Kanal B
S <sub>1</sub>	Visok	Nizak
S <sub>2</sub>	Visok	Visok
S <sub>3</sub>	Nizak	Visok
S <sub>4</sub>	Nizak	Nizak

# Optički inkrementalni enkoder



A prethodi B-u



Pulsevi motora i smjer vrtnje motora

# Optički inkrementalni enkoder

## Tablica prijelaza stanja

- Ako je trenutno i prethodno stanje isto, tada nema promjene u poziciji.
- Bilo koja promjena pojedinačnog bita odgovara povećanju/smanjenju vrijednosti brojača.
- Ako se promijeni stanje za dva bita to odgovara stanju u kome enkoderi A i B nisu poravnati ili da imamo kretanje koje je prebrzo između dva uzastopna stanja – ilegalni (neispravni) prijelaz.

		Trenutno stanje			
		00	01	10	11
Prethodno stanje	00	0	+1	-1	X
	01	-1	0	X	+1
	10	+1	X	0	-1
	11	X	-1	+1	0

0 = nema promjene  
-1 = smanjenje vrijednosti brojača  
+1 = povećanje vrijednosti brojača  
X = ilegalni prijelaz

“01” = Enkoder A je 0, a Enkoder B je 1

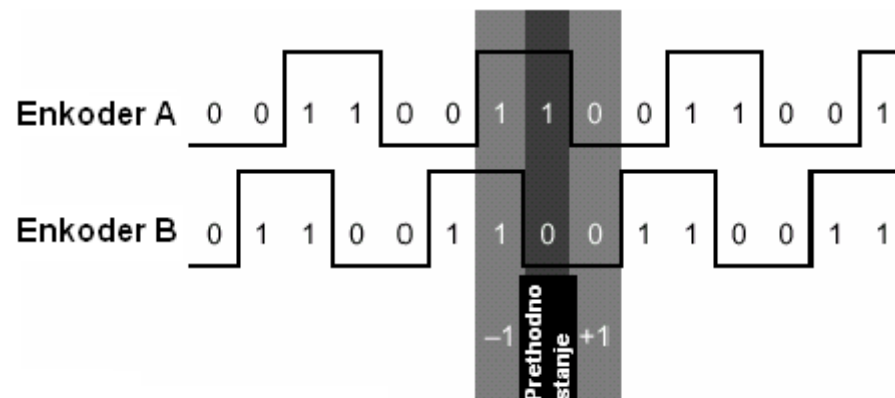




# Optički inkrementalni enkoder

U kojem smjeru će se vrtjeti osovina?

- Pretpostavimo da je prethodno stanje enkodera označeno crnom trakom (Enkoder A u stanju 1, Enkoder B u stanju 0).
- Za sljedeći korak provjera se vrši kako slijedi:
  - Ako se enkoderi pomiču u stanje AB=00, tada će se **povećati** iznos brojača pozicije.
  - Ako je enkoderi pomiču u stanje AB=11, tada će se **smanjiti** iznos brojača pozicije – promjena smjera vrtnje.



# Optički inkrementalni enkoder

## Primjene:

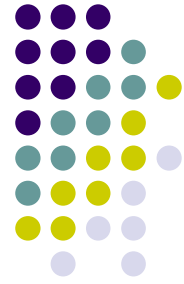
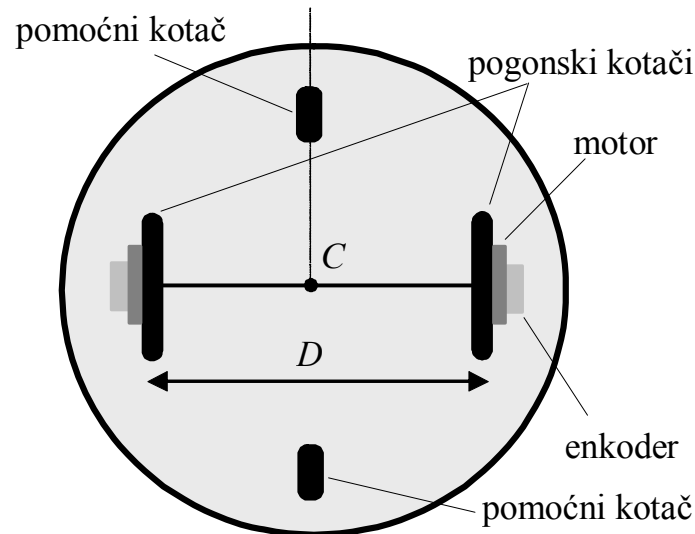
- **Upravljanje pozicijom sistema sa hvataljkom**, gdje mehanika sistema limitira kretanje između dvije putne tačke, npr. rotacijske robotske ruke, gdje se enkodери koriste za mjerenje zglobovskih uglova, i Kartezijevih robota, gdje se pomoću pužnog prijenosa mogu izduživati i skupljati segmenti.
- **Mjerenje kretanja robotskih kotača**, kao dio odometrijskog pozicijskog sistema.
- Rezultati kretanja kotača mobilnog robota se akumuliraju i na temelju njih se estimira pređeni put u određenom vremenskom intervalu.



# Optički inkrementalni enkoder

Primjer: estimacija pozicije mobilnog robota (odometrijska lokalizacija)

- Mobilni robot s diferencijalnim pogonom (dva kotača).
- Pomoćni kotač služi za održavanje stabilnosti platforme.
- Na oba kotača se nalaze inkrementalni enkoderi koji broje obrtaje kotača.
- Trenutna pozicija robota u odnosu na startnu se može odrediti pomoću jednostavnih geometrijskih jednadžbi, koristeći broj obrtaja u sekundi za oba kotača.



# Optički inkrementalni enkoder

## Primjer: estimacija pozicije mobilnog robota

- Neka u nekom trenutku enkoderi prikazuju prirast pulseva  $N_R$  i  $N_L$ .
- Koeficijent proporcionalnosti između enkoderskih pulseva i linijskog pomaka kotača iznosi:

$$c_m = \frac{\pi D_n}{n C_e}$$

gdje su:  $D_n$  = nominalni promjer kotača,  
 $C_e$  = rezolucija enkodera (u pulsima po okretaju),  
 $n$  = omjer redukcije zupčanika motora i pogonskog kotača

- Duljine pređenih puteva kotača u datom vremenskom intervalu iznose:

$$\Delta U_{L,i} = c_m N_{L,i}$$
$$\Delta U_{R,i} = c_m N_{R,i}$$

# Optički inkrementalni enkoder

Primjer: estimacija pozicije mobilnog robota

- Linearni pomak centralne tačke robota  $C$  računa se kao:

$$\Delta U_i = \frac{(\Delta U_R + \Delta U_L)}{2}$$

- Prirast promjene ugla osovine motora:

$$\Delta \theta_i = \frac{(\Delta U_R - \Delta U_L)}{D}$$

$D$  – duljina osovine kotača

- Nove vrijednosti pozicije i orijentacije mobilnog robota:

$$\begin{aligned}x_i &= x_{i-1} + \Delta U_i \cos \theta_i, \\y_i &= y_{i-1} + \Delta U_i \sin \theta_i, \\ \theta_i &= \theta_{i-1} + \Delta \theta_i.\end{aligned}$$



## 6.2. Infracrveni senzori udaljenosti

### Vrste infracrvenih senzora

- **Na intenzitetu zasnovani infracrveni senzori**
  - Refleksijski senzori.
  - Jednostavni za implementirati.
  - Osjetljivi na svjetlost ambijenta.
- **Modulirajući infracrveni senzori**
  - Senzori blizine.
  - Zahtijevaju modulirajući IR signal.
  - Neosjetljiv na svjetlost ambijenta.
- **Infracrveni senzori udaljenosti**
  - Senzori udaljenosti (distance).
  - Mjerenje malog rastojanja (do 1.5 m).
  - Nепropustljiv za okolnu svjetlost, boju i reflektivnost objekta.
- U nastavku se razmatraju infracrveni senzori udaljenosti.



# Infracrveni senzori udaljenosti

## Princip rada

IR emiter + fokusne leće + pozicijski osjetljiv detektor

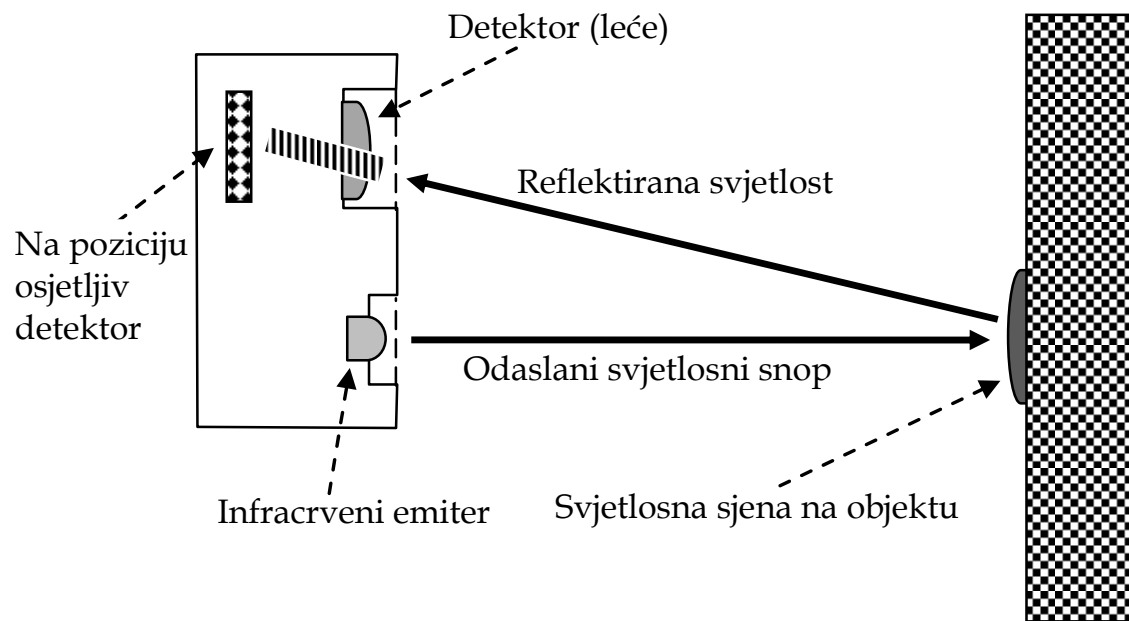
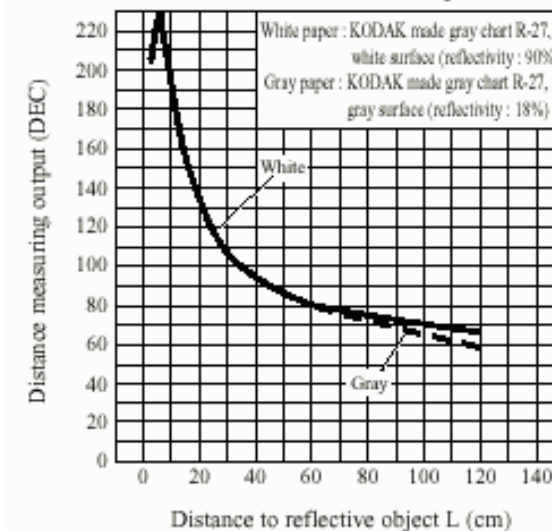


Fig. 1 Distance Measuring Output vs. Distance to Reflective Object

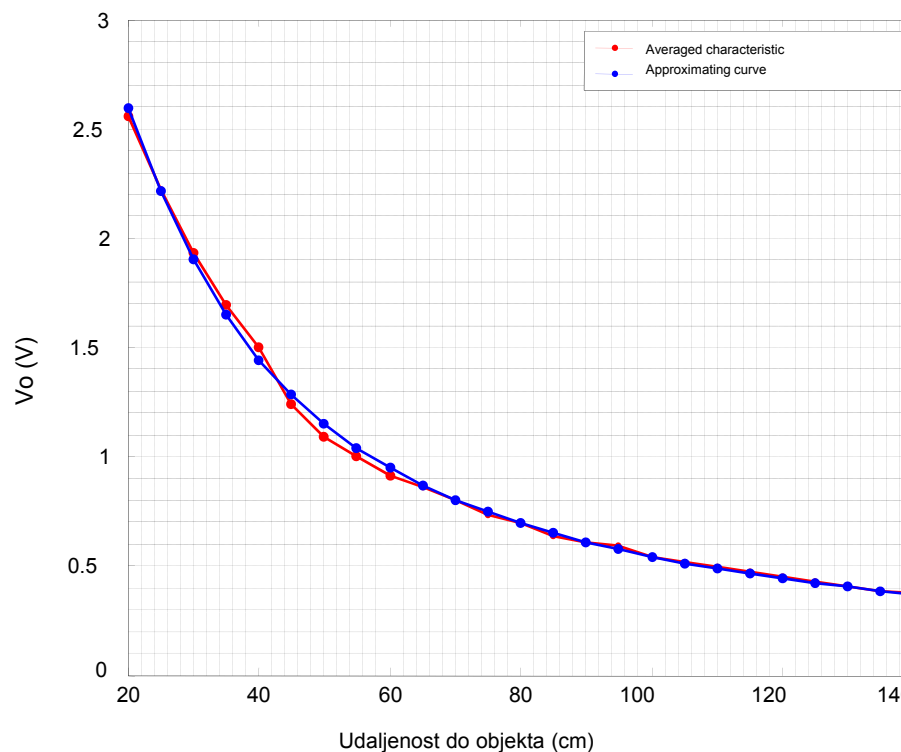
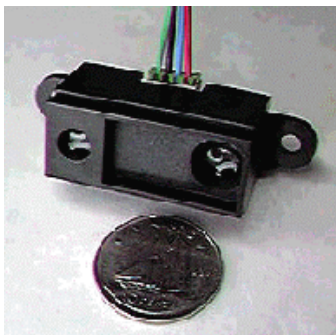
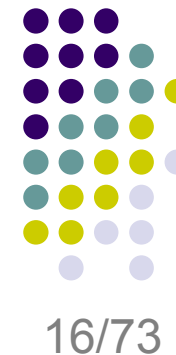


Lokacija svjetlosne sjene na detektoru odgovara udaljenosti do ciljne površine.

# Infracrveni senzori udaljenosti

## Određivanje karakteristike IR senzora

- Koristi se Sharp GP2Y0A02YK senzor
  - Može prepoznati objekte na odaljenostima od 20 cm do 150 cm.
- Testirana su tri IR senzora i dobivena “srednja” karakteristika.



Na temelju izmjerenog napona dobiva se informacija o udaljenosti do objekta.



# Infracrveni senzori udaljenosti

## Određivanje karakteristike IR senzora

- Dobivena je sljedeća aproksimacija eksperimentalne karakteristike:

$$V_o(d) \approx \frac{\frac{1}{21}d^2 + 57d - 128}{d^2 - \frac{65}{9}d + 127}$$

gdje je:  $d$  – udaljenost do objekta,  
 $V_o$  – napon.

- Iz gornjeg izraza dobiva se izraz za udaljenost do objekta:

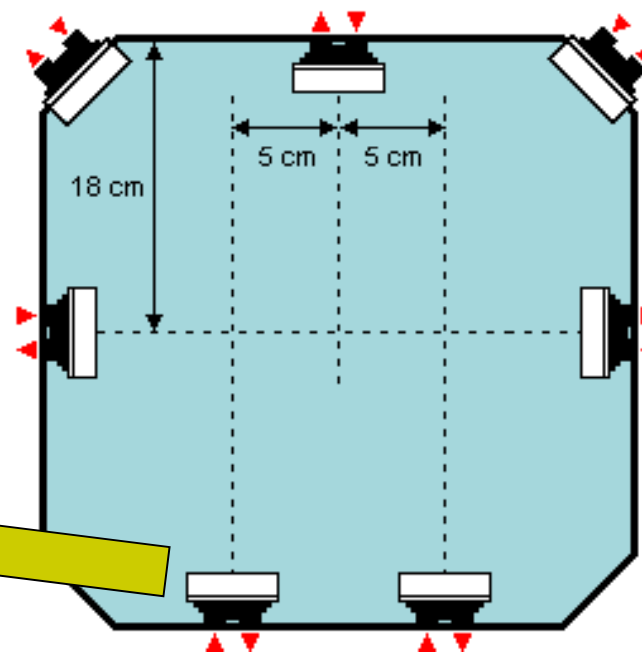
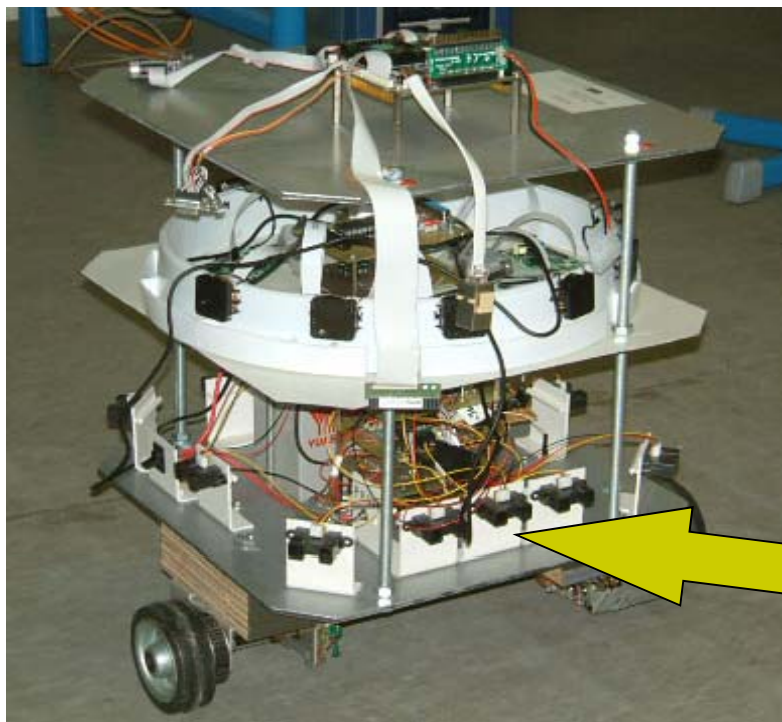
$$d(V_o) \approx \frac{-2.88V_o + 64.62}{V_o - 0.01467}$$



# Infracrveni senzori udaljenosti

## Primjer: korištenje na mobilnoj platformi

- Mobilni robot EMIR razvijen na ETF-u u Sarajevu.

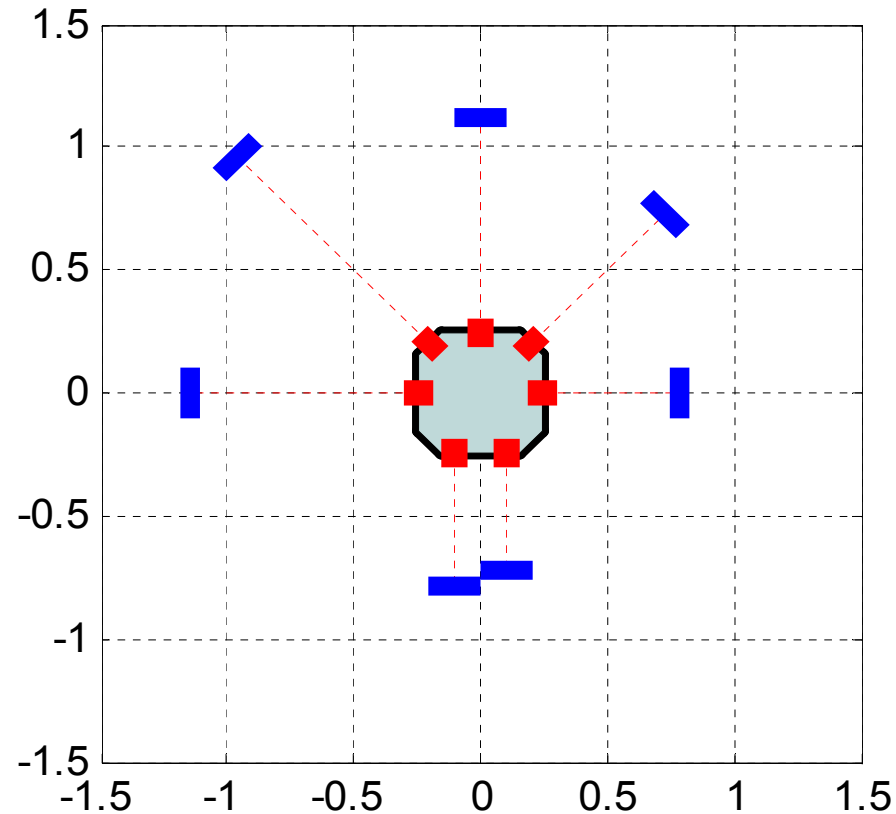


Raspored infracrvenih senzora na mobilnoj platformi

# Infracrveni senzori udaljenosti

## Primjer: korištenje na mobilnoj platformi

- Detektiranje prepreka u području dometa infracrvenih senzora



Softver  
razvijen u  
Matlab-u.



## 6.3. Ultrazvučni senzori udaljenosti

- Ultrazvučni senzori zajedno sa laserskim sensorima udaljenosti spadaju u tzv. grupu daljinomjera (range finder).
- Za ultrazvučne senzore je svojstven koncept putovanja zrake:



- Određivanje udaljenosti do objekta:

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

gdje je:

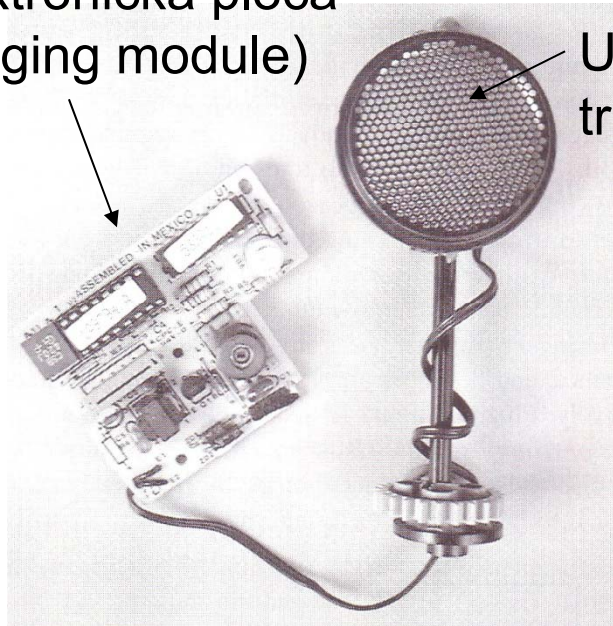
$v$  – brzina zvuka kroz zrak,

$t$  – vrijeme putovanja ultrazvučnog i eho signala.

# Ultrazvučni senzori udaljenosti

- Transducer = predajnik + prijemnik.

Elektronička ploča  
(ranging module)



Ultrazvučni  
transducer

Na ETF-u u Sarajevu koristimo:

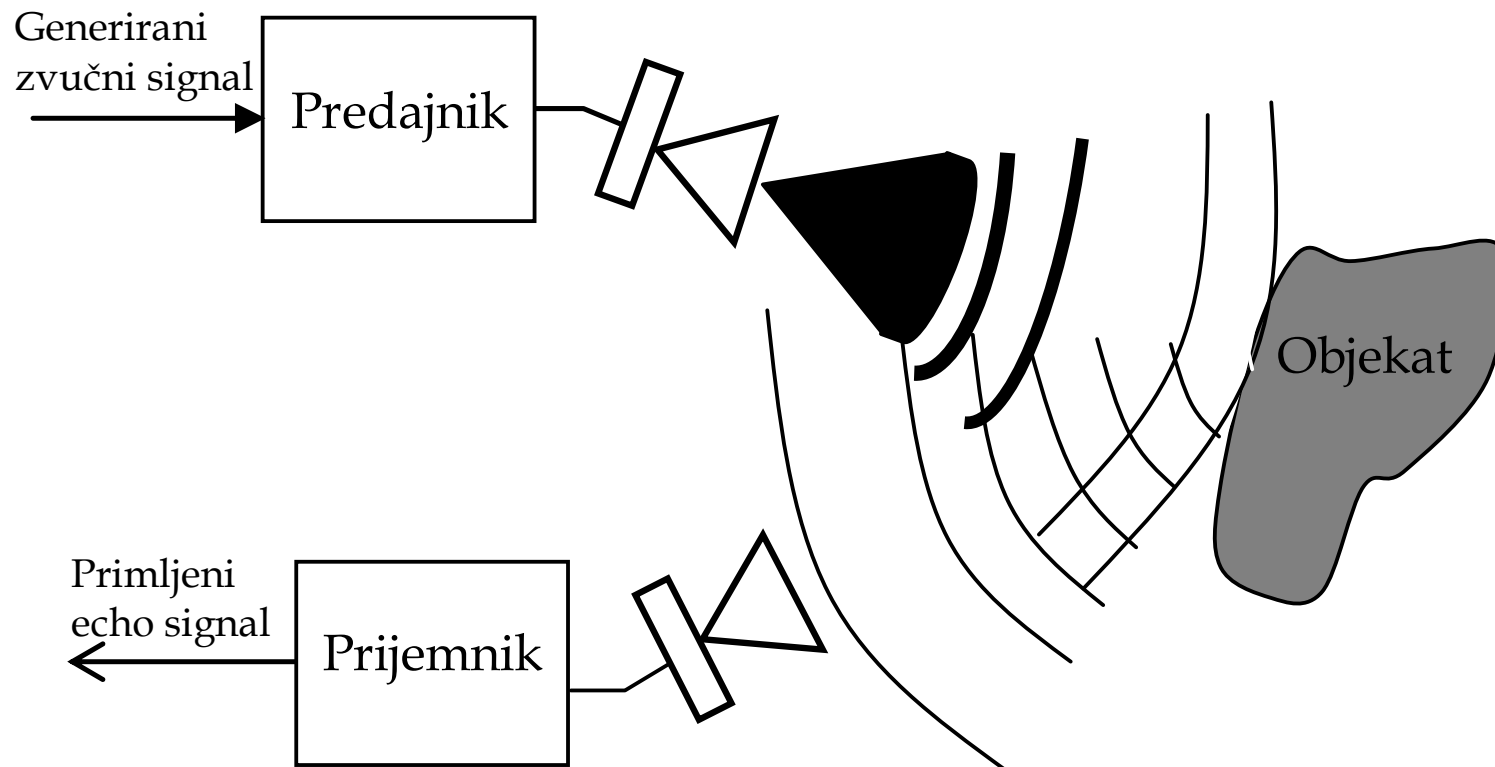
- POLAROID 7000 Series Transducer
- POLAROID 6500 Ranging Module



# Ultrazvučni senzori udaljenosti

## Princip rada

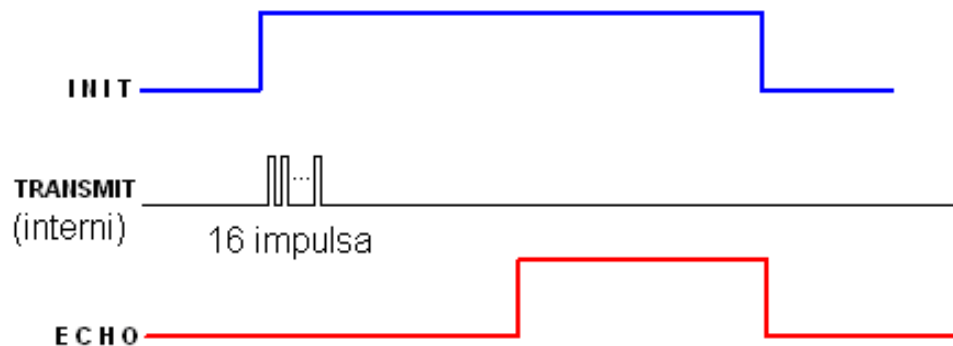
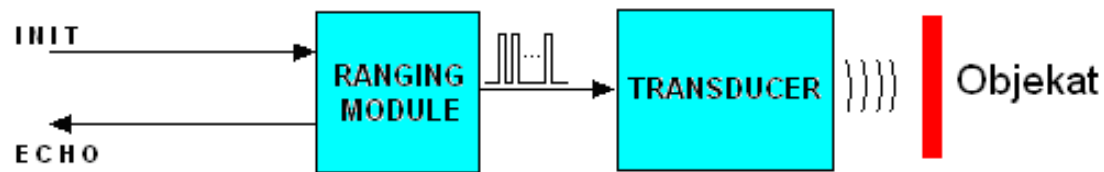
- Predajnik emitira brzi, kratkotrajni, ultrazvučni signal (49 kHz).
- Mjerenje putovanja signala do trenutka kada prijemnik indicira prijem echo signala.
- Određivanje udaljenosti najbližeg objekta od senzora.



# Ultrazvučni senzori udaljenosti

## Princip rada

- INIT – signal za trigerovanje senzora (+5 V).
- TRANSMIT – slanje 16 pulseva (impulsa).
- ECHO – detektiranje povratnog echo signala.



Udaljenost do objekta:

$$d \approx \frac{1}{2} (t_{ECHO} - t_{INIT}) \cdot c$$

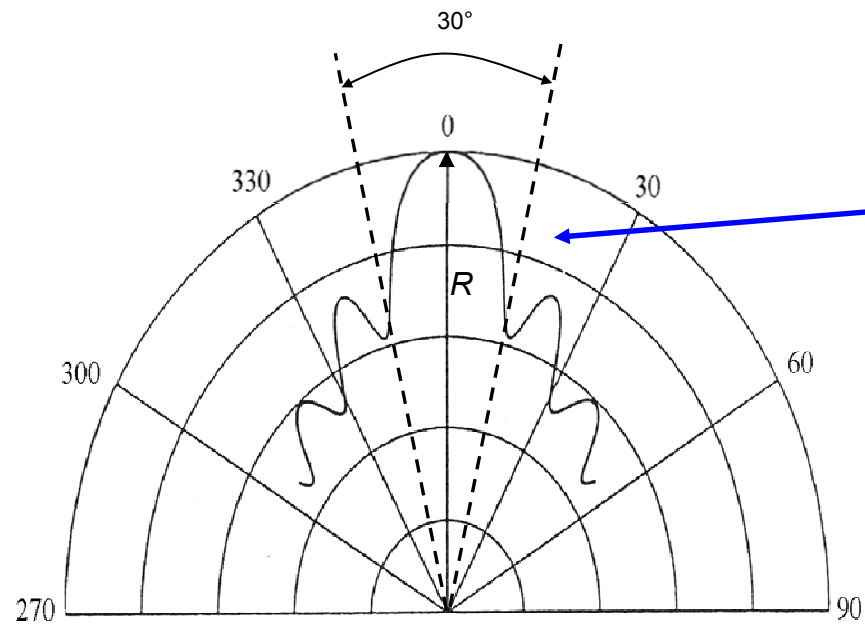
$c = 340 \text{ m/s}$ .

# Ultrazvučni senzori udaljenosti



## Model senzora

- Specifikacija senzora.
- Profil amplitude sonara koji pokazuje snagu signala sonara kao funkciju orijentacije u odnosu na centar zrake. Većina snage ograničena je na jediničnu laticu (osa na kojoj se najbolje čuje signal) blizu centra zrake.



Isijavanje ultrazvučnog senzora:

$$D(\vartheta) = 2 \frac{J_1(k\eta \sin \varphi)}{k\eta \sin \varphi}$$

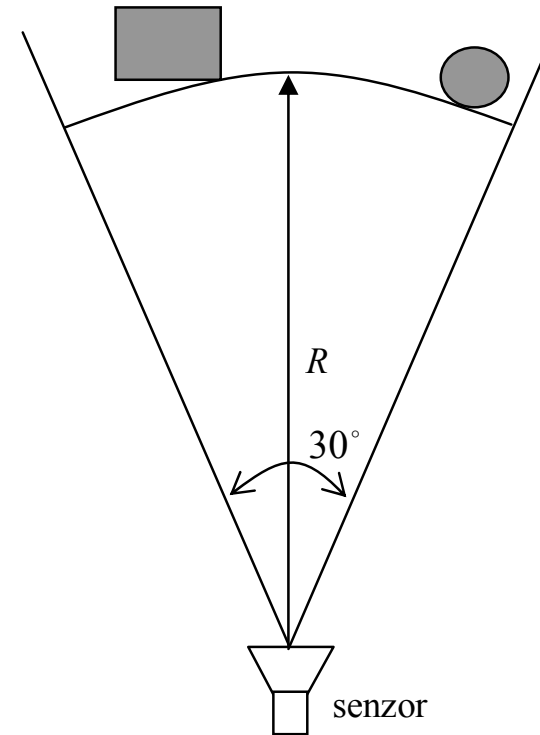
gdje je  $J_1(\cdot)$  Besselova funkcija prvog reda,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  je valna dužina;  $\eta$  je radijus klipa i  $\varphi$  je azimutni ugao mjeren u odnosu na centralnu os isijavanja.  
Za Polaroid® transdjusere  $\eta = 0,01921$  m i  $\lambda = c/\nu$ , gdje je  $\nu = 49,41$  kHz.



# Ultrazvučni senzori udaljenosti

## Model senzora

- Za praktičnu primjenu dovoljno je uzeti u obzir samo prvu laticu ove funkcije, što nam dopušta razmatranje prostiranje vala samo duž emisionog konusa širine  $30^\circ$ .
- Područje čitanja je oblast gdje postoji sigurna informacija o tome da li se jedna, ili više, prepreka nalazi bilo gdje unutar luka konusa radijusa  $R$  i ugla  $30^\circ$ .
- Jedno očitavanje pruža informacije da se jedna ili više prepreka nalazi negdje na luku obima  $(\pi \times R)/6$ . Dok se tačke locirane blizu ovoga luka mogu smatrati okupiranim, tačke unutar kružnog isječka radijusa  $r$  mogu se smatrati praznim (razmatranje vršimo u 2D prostoru  $xy$ ).



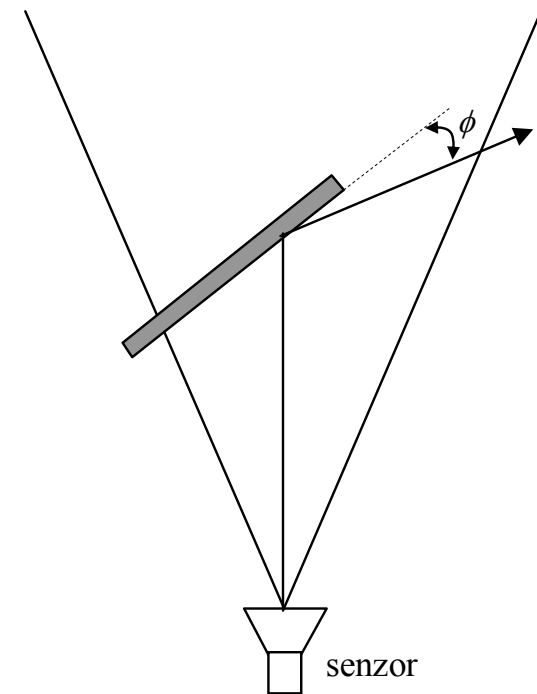
Emisioni konus senzora



# Ultrazvučni senzori udaljenosti

## Model senzora

- Svako mjerenje udaljenosti praćeno je sa tri osnovna izvora neodređenosti:
  1. Senzor ima ograničenu radijalnu rezoluciju. Standardni Polaroid® senzori mogu detektirati udaljenosti od 0,12 do 6,5 m sa pouzdanošću od 1% unutar tog opsega.
  2. Ugaona pozicija objekta koji je detektiran unutar emisionog konusa nije određena. Tako npr. na prethodnoj slici obje prepreke daju istu vrijednost mjerenja.
  3. U slučaju ugla većeg od kritične vrijednosti  $\phi$ , mjerenja nisu pouzdana jer su očitana nakon više refleksija ili nikakav odjek uopće nije očitana na prijemniku (slika desno). Ugao  $\phi$  ovisi o karakteristikama reflektivne površine, i za glatke površine iznosi 7-8° a za veoma hrapave površine može iznositi gotovo 90°.

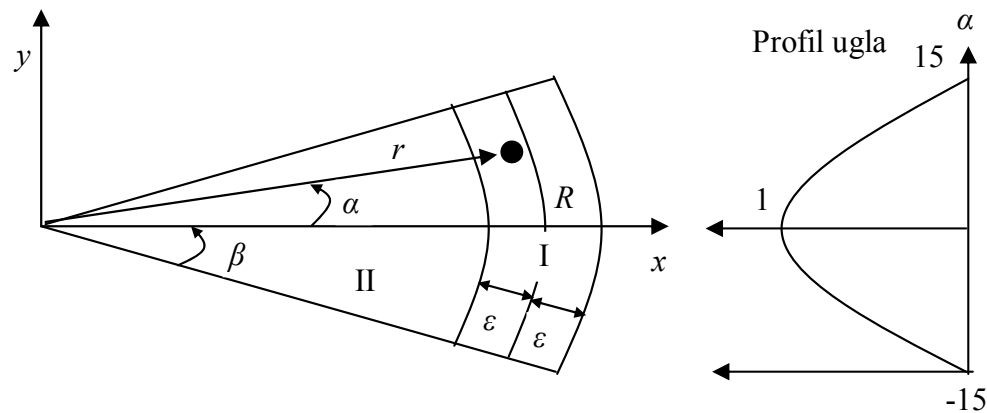
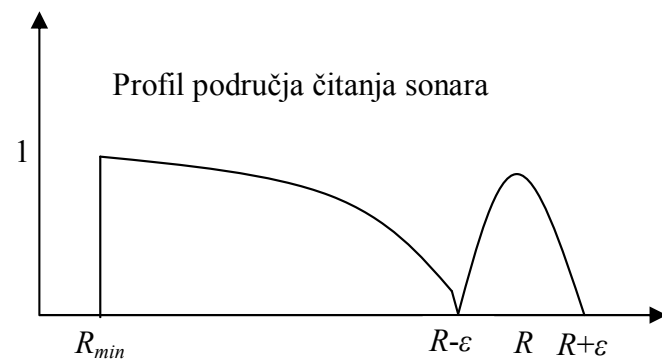


Lažno očitavanje senzora

# Ultrazvučni senzori udaljenosti

## Model senzora

### Profil modela senzora



Gdje su  $(r, \alpha)$  koordinate tačke unutar konusa sonara (pozicija i orijentacija), a  $\varepsilon$  označava toleranciju za područje zauzeća.



27/73

a) Područje I, gdje je  $R - \varepsilon < r < R + \varepsilon$ :

$$m(Z) = \frac{\left(\frac{\beta - \alpha}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon - |R - r|}{\varepsilon}\right)^2}{2}$$

$$m(P) = 0$$

$$m(\{P, Z\}) = 1 - m(Z)$$

b) Područje II, gdje je  $R_{min} < r < R - \varepsilon$ :

$$m(Z) = 0$$

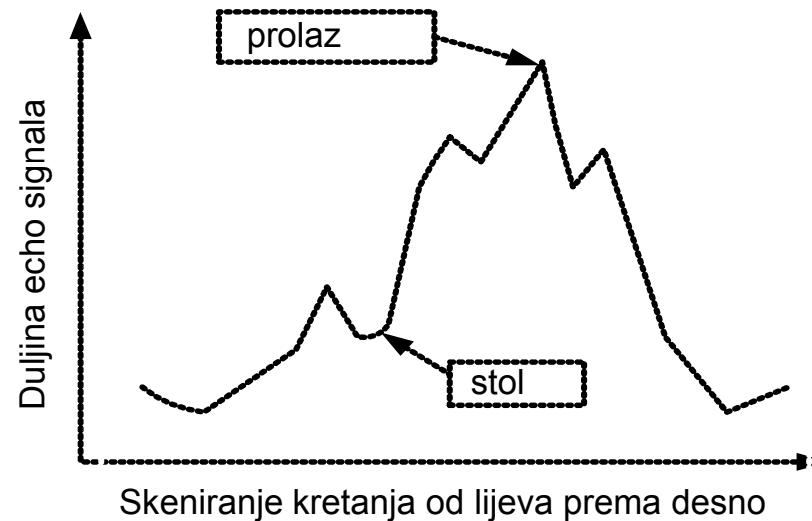
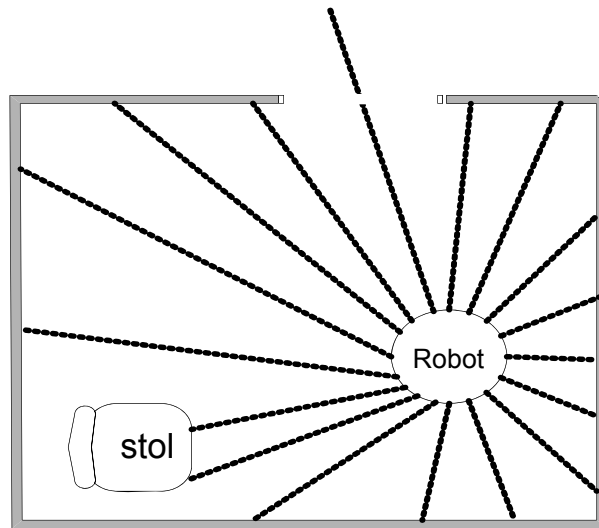
$$m(P) = \frac{\left(\frac{\beta - \alpha}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{R - \varepsilon - r}{R - \varepsilon}\right)^2}{2}$$

$$m(\{P, Z\}) = 1 - m(P)$$

# Ultrazvučni senzori udaljenosti

## Primjena

- Mjerenje udaljenosti.
- Gradnja mape kretanja: rotacijsko skeniranje blizine (preslikava (mapira) blizinu objekata u okruženju robota)



- Skeniranje sa prstenom senzora (24 kom.), gdje svaki pokriva po  $15^\circ$  daje najbolje rezultate.
- Sonari se aktiviraju u nizu, jedan za drugim (samo jedan istovremeno aktivan), zbog uštede energije i da jedan senzor ne bi ometao mjerenje drugih senzora (za 0.6 sekundi se obavi mjerenje 16 sonara)

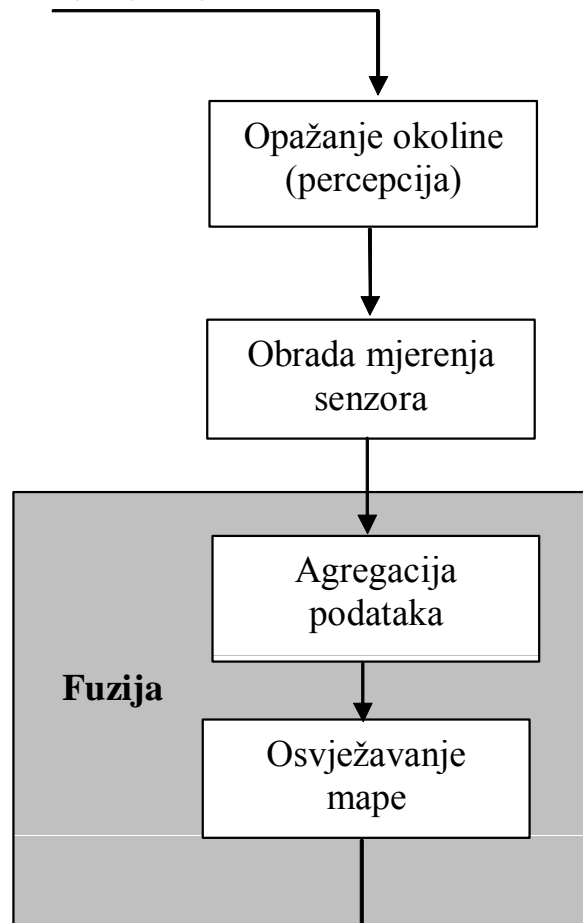


# Ultrazvučni senzori udaljenosti

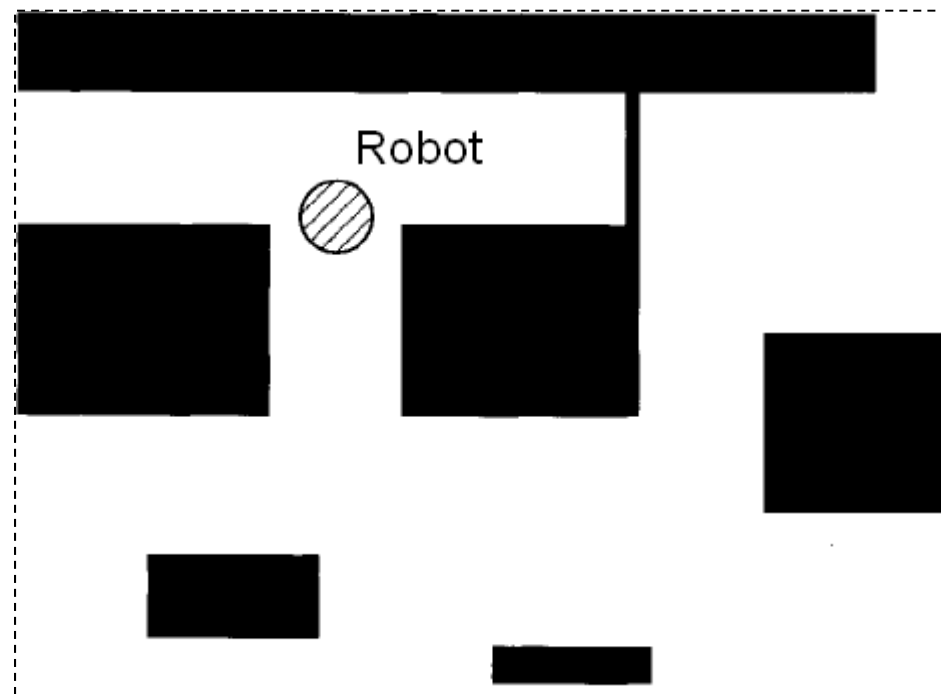
Primjena: proces gradnje mape na temelju mjerenja ultrazvučnih senzora – reaktivno planiranje kretanja



Iz navigacijskog sistema



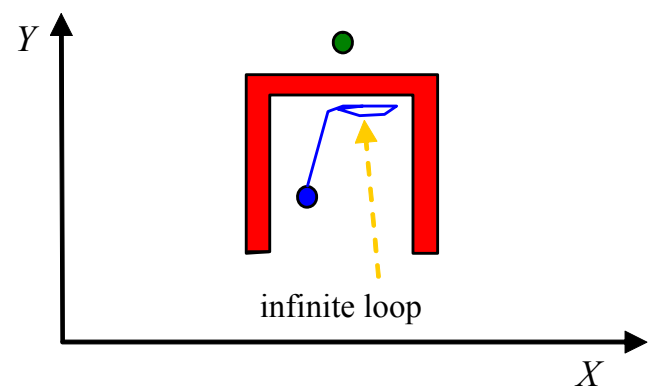
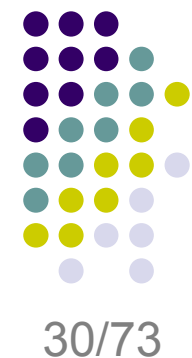
Mapa dobivena na temelju mjerenja ultrazvučnih senzora (mrežaste mape zauzeća)



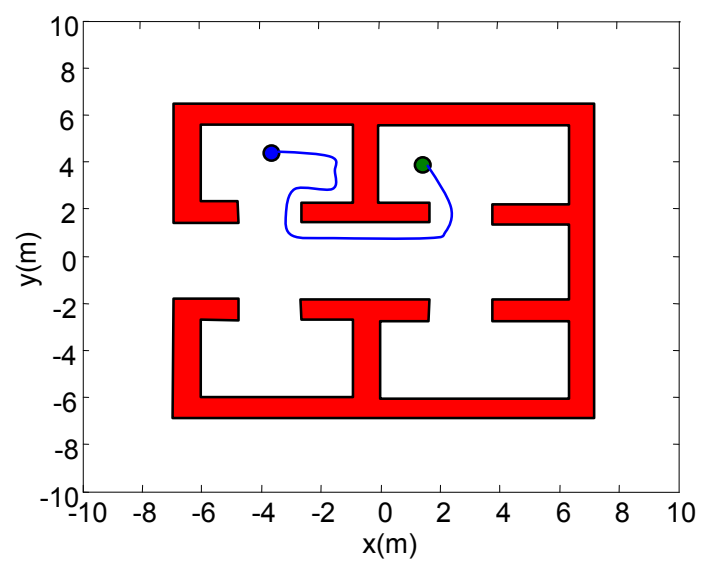
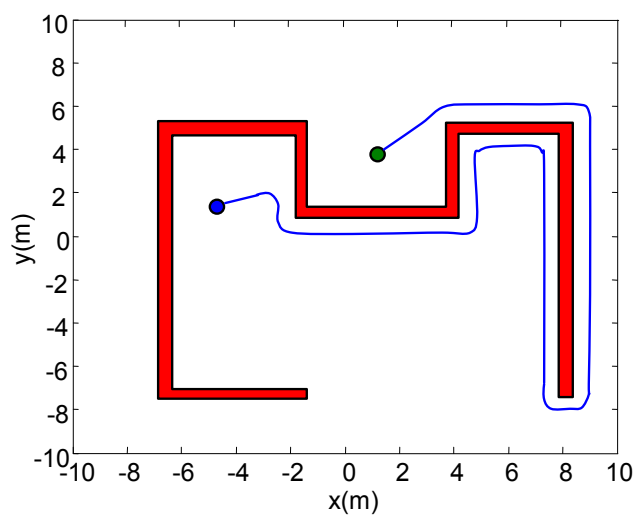
U navigacijski sistem

# Ultrazvučni senzori udaljenosti

Primjena: proces kretanja na temelju mjerenja ultrazvučnih senzora (nestrukturirana sredina sa statičkim preprekama)



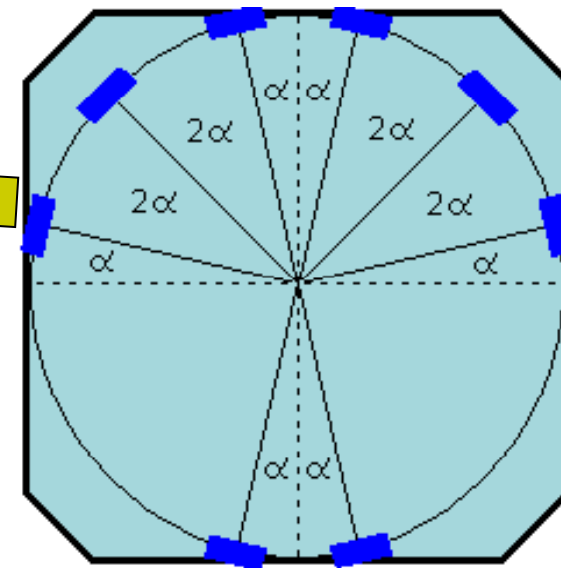
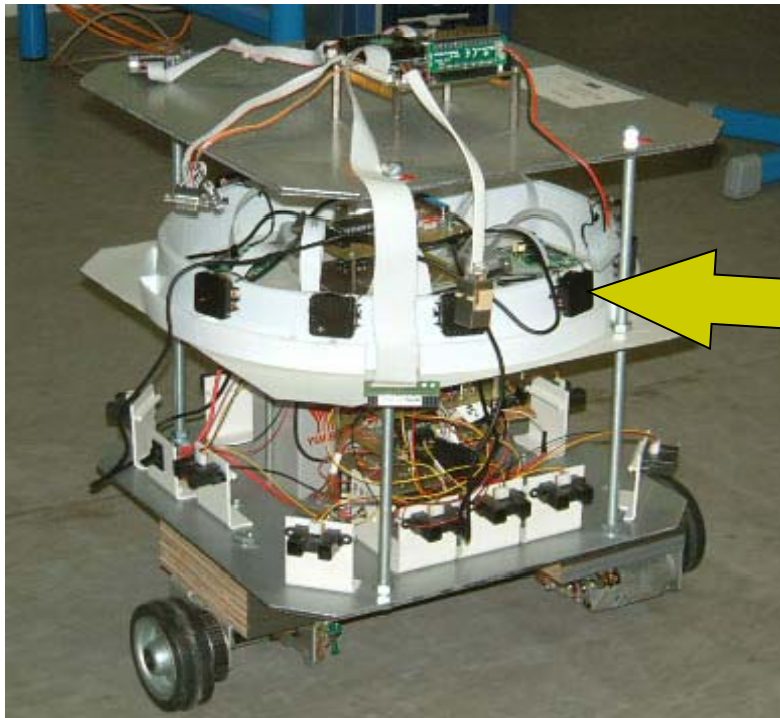
➔ Problem lokalnog minimuma



# Ultrazvučni senzori udaljenosti

## Primjer: korištenje na mobilnoj platformi

- Mobilni robot EMIR – raspored niza ultrazvučnih senzora na mobilnoj platformi.

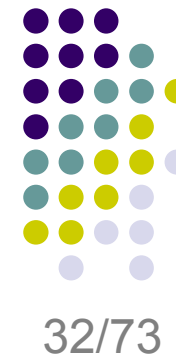


$$\alpha = 15^\circ$$

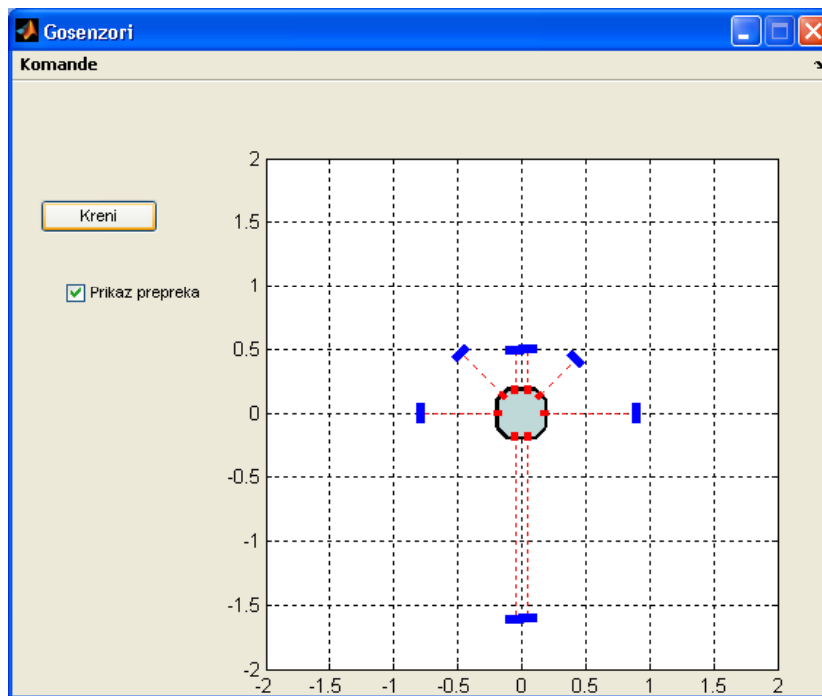
# Ultrazvučni senzori udaljenosti

## Primjer: korištenje na mobilnoj platformi

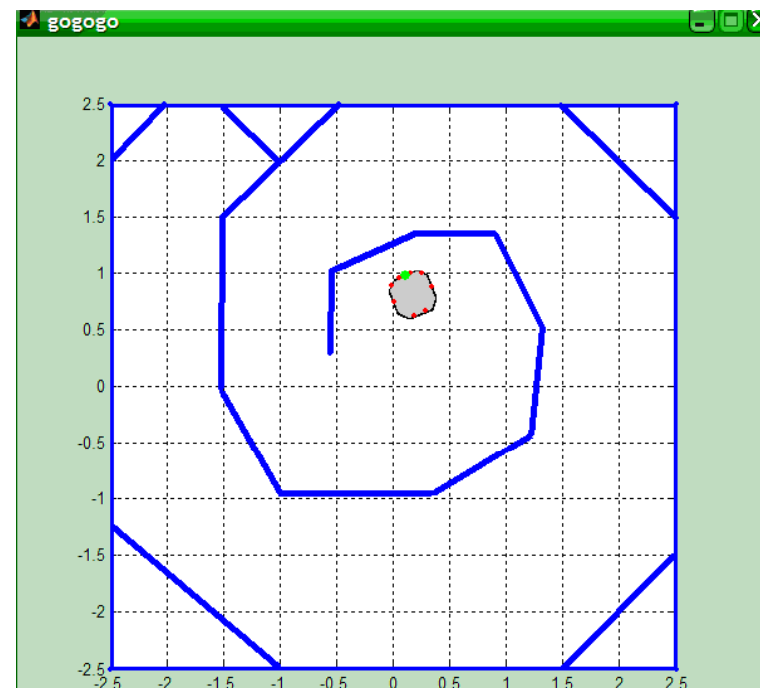
- Simulator za daljinsko upravljanje EMIR-a.



32/73



Simulator na master računaru



Simulator na slave računaru

Bežična komunikacija



## 6.4. Laserski senzor udaljenosti

- Značajno poboljšava mjerenja u odnosu na ultrazvučne senzore jer koristi svjetlosne signale umjesto zvučnih.
- Temelji se na mjerenju vremena prostiranja zrake.
- Sastoji se od predajnika koji osvjetljava cilj laserskom svjetlošću i prijemnika koji je sposoban detektirati komponentu svjetlosti koja je koaksijalna sa odaslanom zrakom.
- Postoje tri načina mjerenja vremena prostiranja svjetlosnog vala do objekta i nazad.
- Najjednostavnija i najefikasnija metoda temelji se na mjerenju faznog pomaka između odaslanog i primljenog, odnosno reflektiranog vala.

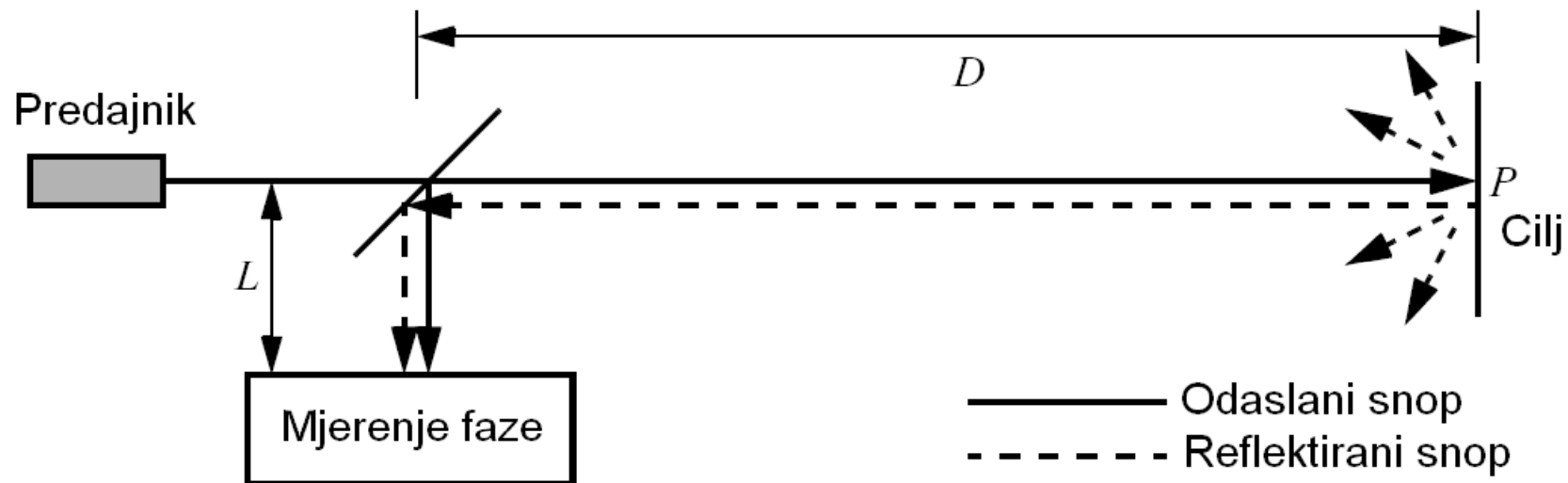


# Laserski senzor udaljenosti

- Mjerenje faze između zraka.
- Usmjereni snop zraka se odašilje i udara u tačku  $P$ .
- Senzor šalje modulirani signal svjetlosti poznate frekvencije i mjeri fazni pomjeraj između odaslane i primljene zrake.



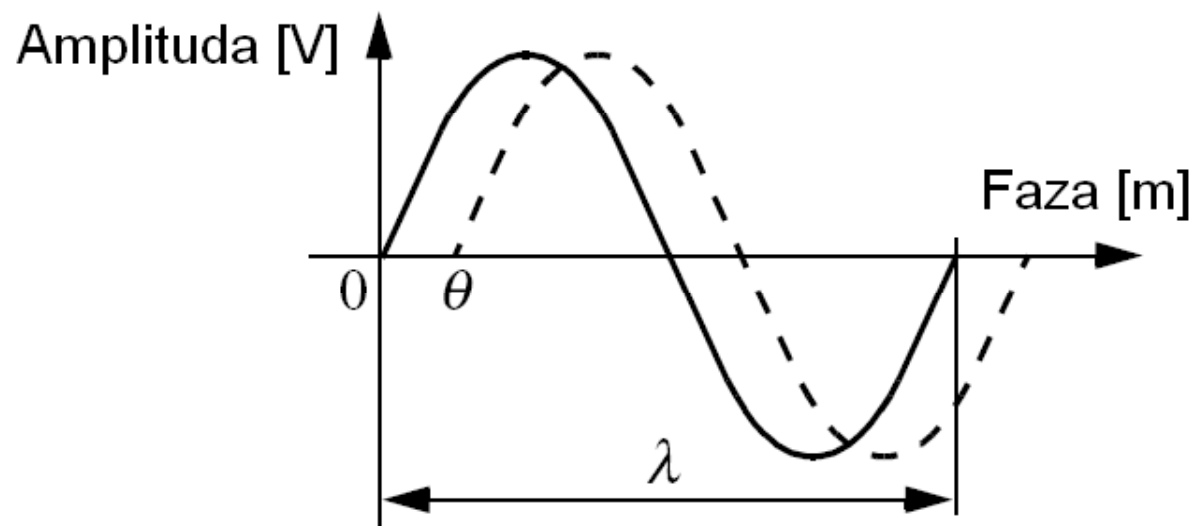
34/73



# Laserski senzor udaljenosti

- Valna duljina modulirajućeg signala zadovoljava jednadžbu:

$$c = \lambda f$$



————— Odaslana zraka  
- - - - - Reflektirana zraka



# Laserski senzor udaljenosti

- Ukupna udaljenost koju je prešao emitirani signal iznosi:

$$D' = L + 2D = L + \frac{\theta}{2\pi} \lambda$$

- Zahtjevana udaljenost između lasera i cilja iznosi:

$$D = \frac{\lambda}{4\pi} \theta$$

gdje je  $\theta$  elektronički mjereni fazni pomak između odaslane i reflektirane zrake, a  $\lambda$  je poznata valna duljina.

- Problem: prijenos pojedinačne frekvencije odaslanog signala može rezultirati u dvosmislenom estimiranom području.



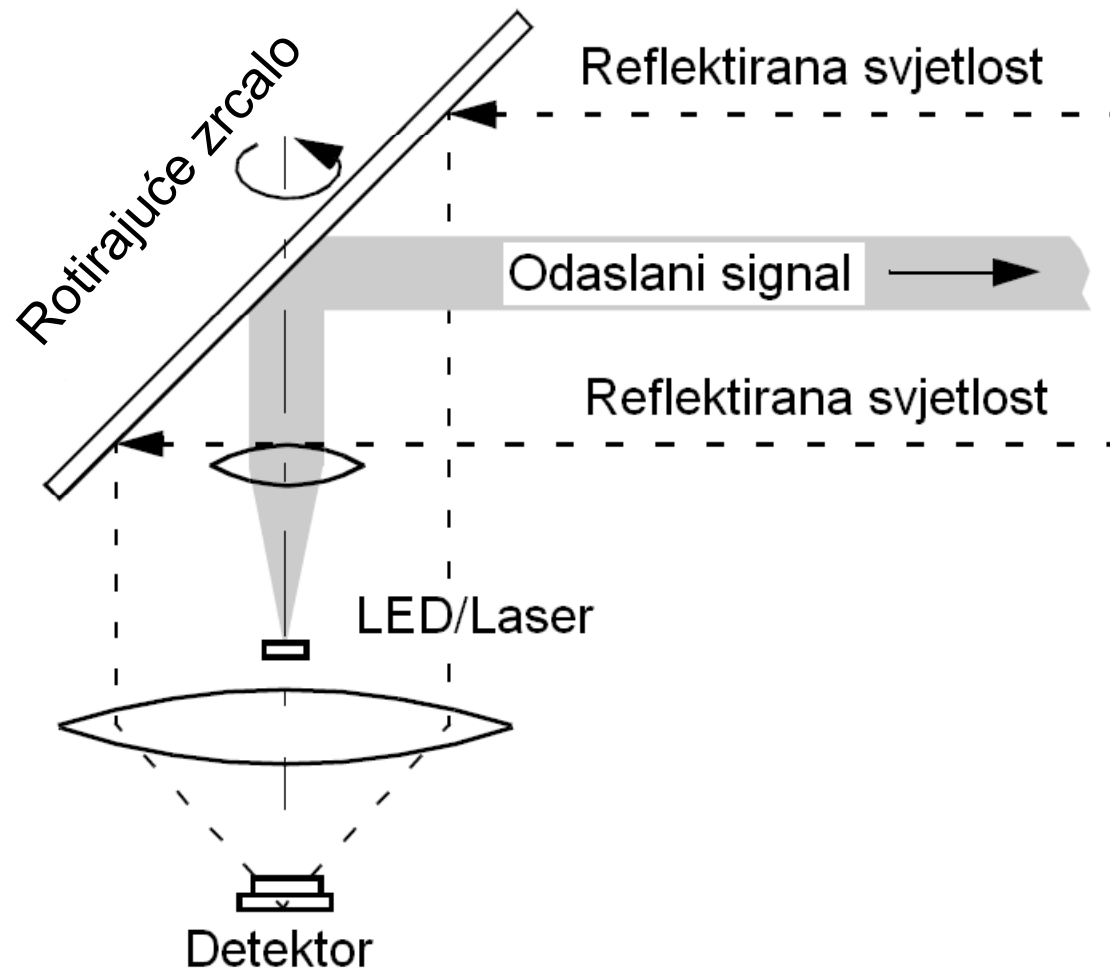
# Laserski senzor udaljenosti

- Naprimjer ako je  $\lambda=60$  m, cilj na udaljenosti od 5 m može imati fazni pomak koji se ne može razlikovati od onoga koji je dobijen za udaljenost do cilja od 65 m.
- Da bi se to izbjeglo, može se definirati interval dvoznačnosti za  $\lambda$ .
- U praksi se područje mjerenja laserskog senzora odabire znatno manjim od iznosa  $\lambda$ .
- Razlog za ovo je slabljenje signala prilikom prostiranja kroz zrak.
- Može se pokazati da je povjerenje u tačnost mjerenja (estimacija faze) inverzno proporcionalno kvadratu amplitude primljenog signala, što direktno utječe na tačnost senzora.
- Tamni, udaljeni objekti neće omogućiti dobru estimaciju područja, za razliku od svjetlijih objekata.



# Laserski senzor udaljenosti

- Laserski skener može imati polje gledanja od  $360^\circ$  ako se koristi rotirajuće zrcalo.



# Laserski senzor udaljenosti

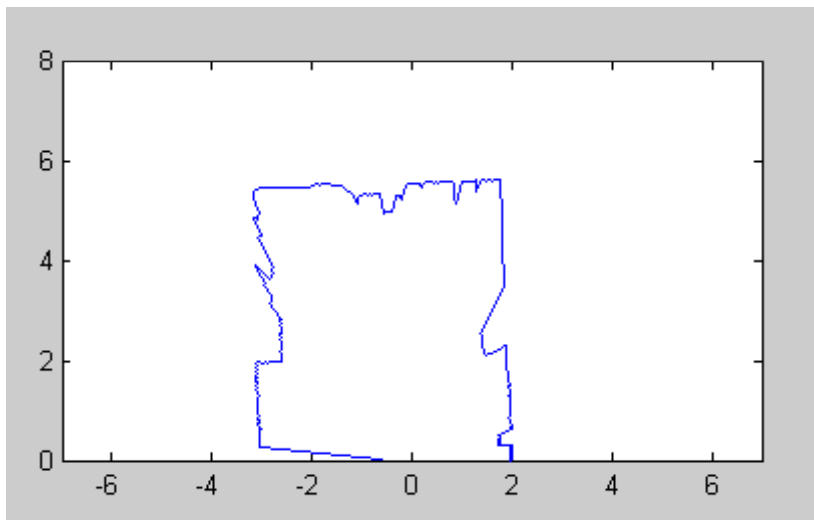
- Primjer laserskog senzora udaljenosti
  - Područje detekcije : 2-500 metara.
  - Rezolucija : 10 mm.
  - Polje pogleda : 100 - 180 stupnjeva.
  - Ugaona rezolucija : 0.25 stupnjeva.
  - Vrijeme skeniranja : 13 - 40 ms.
  - Imuni su na maglu i prašinu.



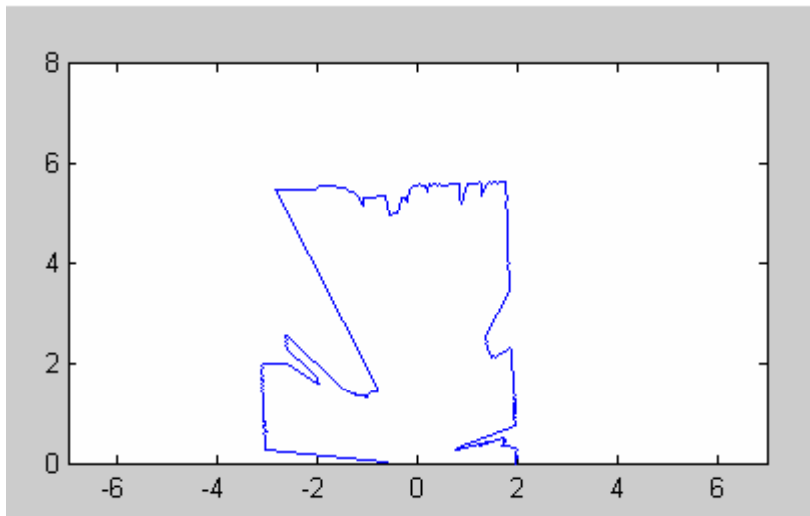
# Laserski senzor udaljenosti

- Skeniranje prostora (180° polje pogleda).

Rezultati dobiveni sa LMS 220 laserskim skenerom.



Obrisi prostorije i objekata u njoj.



Skeniranje prostorije u trenutku kretanja pokretnog objekta





## 6.5. Sistem vizije

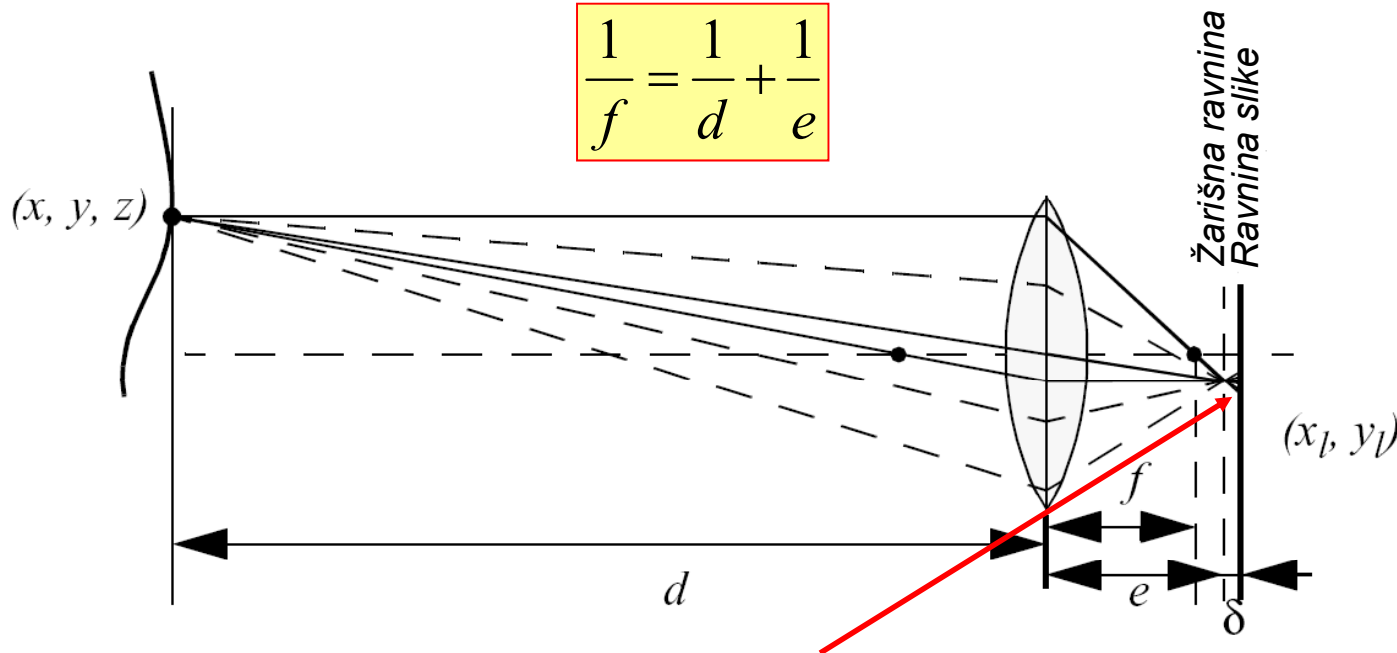
- Vizija je najmoćniji način opažanja okoline.
- Sistem vizije nastoji oponašati sposobnosti i značajke ljudskog vizualnog sistema.
- Osigurava veliki broj informacija iz okoline na temelju kojih se ostvaruje inteligentna interakcija u dinamičkim okruženjima.
- Opažanje područja je izuzetno važno u mobilnoj robotici za izbjegavanje prepreka pri obavljanju nekog zadatka.
- Kod vizualnog sistema (kamera) izražen je **problem gubitka informacija o dubini**.
- Ako se mogu predvidjeti informacije o dimenzijama objekta, ili pak o njegovoj boji i refleksiji, tada se mogu izvući informacije o dubini.



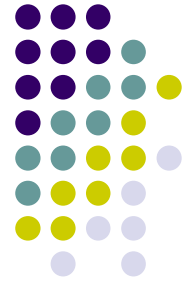
# Sistem vizije

- Svojstva slike ne ovise samo o promjenama u sceni već i o parametrima kamere.
- Veza između parametara kamere i svojstava slike prikazana je na sljedećoj slici.
- Veza između udaljenosti leće do objekta  $d$  i razmaka između leće i žarišta (žiža)  $e$  na temelju žarišne duljine leće  $f$  dana je sljedećim izrazom:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{e}$$



Slika je rezultat refleksije svjetlosti od objekta u smjeru kamere



# Sistem vizije

- Udaljenost između leće i ravnine slike je  $e$  – tada se nakon refleksije na ravnini slike dobiva tačka.
- Kada ravnina slike nije na udaljenosti  $e$  od leće, tada će se svjetlost od objekta reflektirati na ravnini slike u obliku zamagljenog kruga.
- Kao prva aproksimacija – svjetlost je homogeno distribuirana duž tog kruga i njegov promjer iznosi:

$$R = \frac{L\delta}{2e}$$

$L$  – promjer leće,  $\delta$  – razmak između ravnine slike i žižne ravnine.

- Različit  $\delta$  sugerira različite pozicije fokusiranja za istu scenu.



# Sistem vizije

- Na slikama se zapaža različitost u oštrom rubova tekstone (bliži rubovi imaju veću oštrinu) – slike su dobivene za dvije različite vrijednosti  $\delta$ .
- Slijedi da se iz niza slika iste scene, dobivenih sa različitim geometrijama kamere, može rekonstruirati dubina slike, tj. izvući treća dimenzija.



# Sistem vizije

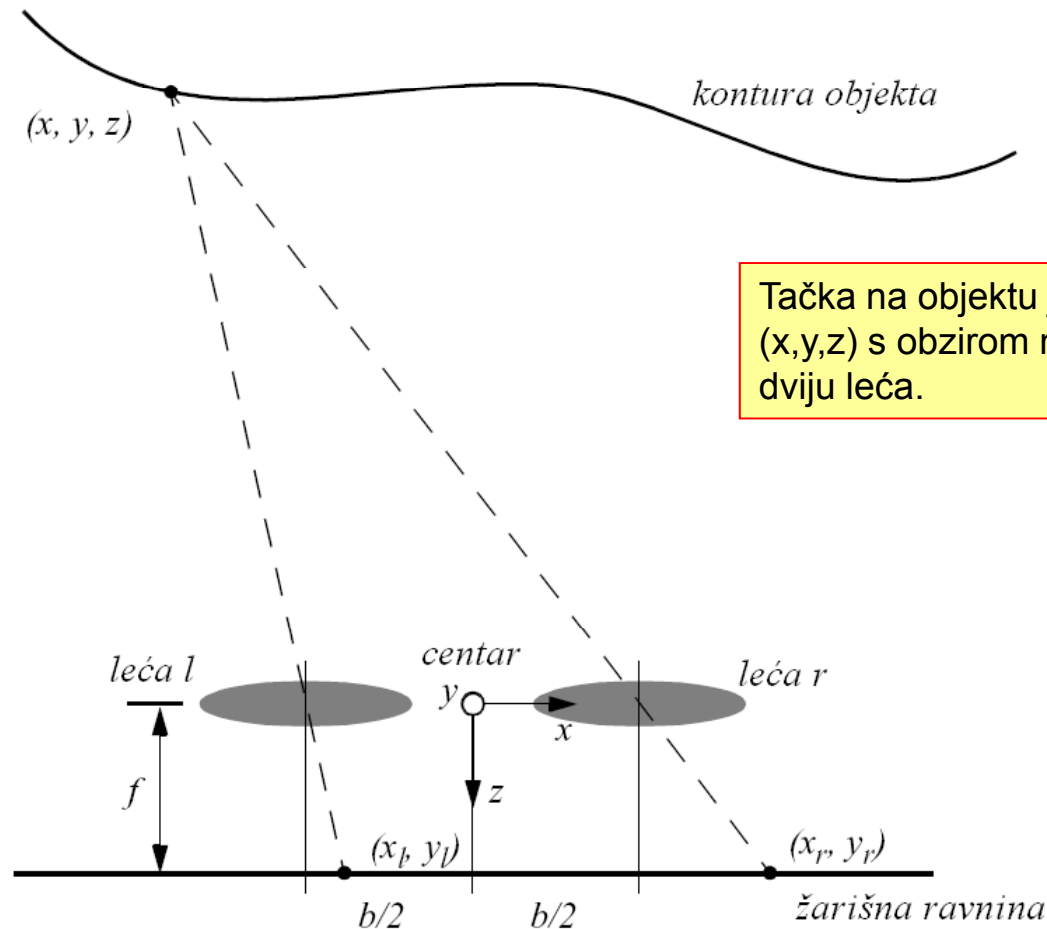
- Jedna kamera ne može lokalizirati objekat u 3D prostoru, ona daje **informaciju o smjeru**, a ne o udaljenosti do njega.
- Korištenjem kamere, 3D slika se pretvara u 2D sliku.
- Postavlja se pitanja: “Kako iz kanoničkih koordinata slike  $x_l, y_l$ , izvući informaciju o koordinatama objekta  $x,y,z$ ?”
- Za određivanje udaljenosti do objekta nužno je koristiti više slika i identificirati značajke u njima.
- U mobilnoj robotici je važno izbjeći objekat, a ne imati informacije o njegovoj boji, ...
- U vezi s tim je zgodno izdvojiti rubne tačke (piksele) i povezati ih i na taj način dobiti linijski segment.
- Na ovaj način se smanjuje količina podataka sa kojima je prikazana slika.



# Sistem vizije

## Stereovizija

- Izvlačenje informacija o dubini na temelju dvije slike koje oslikavaju scenu iz različitih perspektiva.



Tačka na objektu je opisna koordinatama  $(x, y, z)$  s obzirom na centar između osi dviju leća.

# Sistem vizije

## Stereovizija

- Iz prethodne slike slijedi:

$$\frac{x_l}{f} = \frac{x + b/2}{z}$$
$$\frac{x_r}{f} = \frac{x - b/2}{z}$$

odnosno

$$\frac{y_l}{f} = \frac{y_r}{f} = \frac{y}{z}$$

Iz gornjih izraza dobiva se izraz za disparitet (razlika u koordinatama slike ( $x_r - x_l$ )):

$$\frac{x_l - x_r}{f} = \frac{b}{z}$$



# Sistem vizije

## Stereovizija

- Samo se mjerenjem dispariteta mogu izlučiti informacije o dubini.
- Na temelju gornjih jednadžbi dobivaju se izrazi za koordinate objekta:

$$x = b \frac{(x_l + x_r) / 2}{x_l - x_r}$$
$$y = b \frac{(y_l + y_r) / 2}{x_l - x_r}$$
$$z = b \frac{f}{x_l - x_r}$$

- Udaljenost kamere do objekta je inverzno proporcionalna disparitetu.
- Disparitet je proporcionalan sa  $b$ ; za zadanu pogrešku dispariteta sa povećanjem  $b$ -a povećava se tačnost estimacije dubine.
- Kako  $b$  raste, zbog fizičke odvojenosti kamera, neki objekti se mogu pojaviti na jednoj kameri, a na drugoj ne.

Sva navedena priča vrijedi ako su kamere idealno poravnate, što u praksi nije slučaj – tada se koristi kalibracija kamere.



# Sistem vizije

## CCD (Charged Coupled Device) kamera

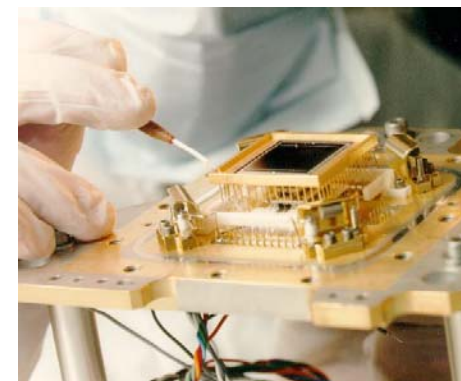
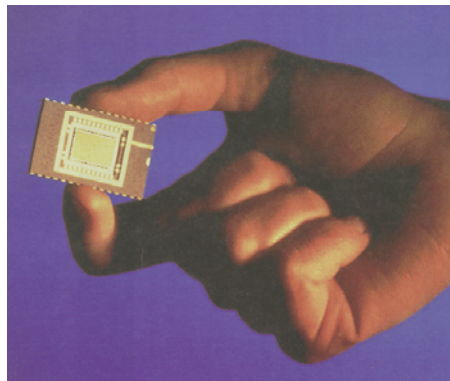
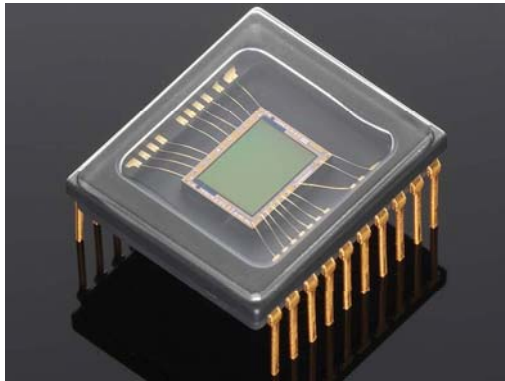
- Danas najpopularniji sistem vizije.
- Osnovni element je CCD čip koji se sastoji od polja svjetlosno osjetljivih elemenata, ili piksela, obično između 20.000 i nekoliko miliona piksela (trenutno).
- Svaki piksel je dimenzija od  $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$  do  $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$  i ima mogućnost kapacitivnog punjenja, odnosno pražnjenja.
- Prvo se kondenzatori svih piksela u cijelosti napune, nakon čega započinje **proces integracije (generiranja)**.
- Fotoni svjetlosti udaraju u svaki piksel, oslobađaju elektrone koji su obuhvaćeni električkim poljem i zaustavljaju se na pikselu (fotoelektrički efekt).
- Tokom vremena svaki piksel će akumulirati različit iznos energije na temelju ukupnog broja fotona koji su “udarili” u njega.
- Nakon što se period integracije kompletira, relativan iznos energije piksela se pohranjuje i čita – **proces kolekcije**.



# Sistem vizije

## CCD kamera

- CCD čip



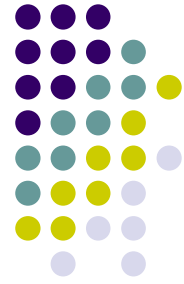
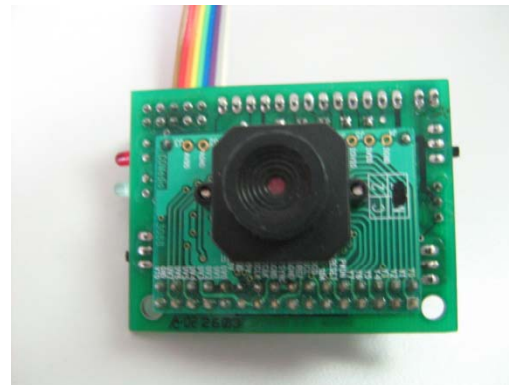
Dolazi u različitim oblicima i dimenzijama:

- Ukupan broj piksela -  $4008 \times 2672 = 11$  Mega Piksela
  - Veličina piksela – između 5 i 25  $\mu\text{m}$ .
  - Veličina dijafragme – između 5 i 36 mm po osi.
- Fotodiode koje se koriste u CCD čipu nemaju jednaku osjetljivost na sve frekvencije svjetlosnog signala.

# Sistem vizije

## CMOS kamera

- CMOS čip se značajno razlikuje od CCD čipa.
- On također ima polje piksela, ali su oni locirani paralelno i svaki piksel koristi nekoliko tranzistora za svoje lociranje.
- **Proces integracije** (akumuliranje energije u pikselima) je isti kao kod CCD čipa.
- U **fazi kolekcije** CMOS koristi drukčiji pristup, gdje se svaki piksel mjeri i pojačava se njegov signal, pri čemu se to odvija paralelno za svaki piksel u polju.
- Rezultirajuće vrijednosti piksela se prenose do njihovih destinacija.



# Sistem vizije

## Vizualni senzori za praćenje boja

- Važan aspekt opažanja vizualnog sistema je detektiranje i praćenje odgovarajuće boje (objekta) u okolini.
- Opažanje boje ima dvije važne prednosti:
  - Detekcija boje je funkcija pojedinačne slike.
  - Omogućuje kombinaciju sa drugim izvorima, recimo stereovizijom ili laserskim senzorom, kako bi se značajno poboljšale informacije.
- Danas postoje komercijalne verzije kamera sa dodatnom elektronikom koja omogućuje detektiranje i praćenje objekta na temelju njegove boje.



# Sistem vizije

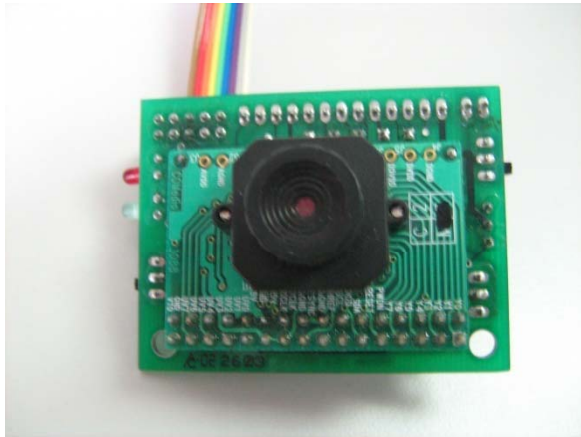
## Vizualni senzori za praćenje boja

- Vrlo je interesantan CMUcam vizualni senzor za robote.
- Ovaj vizualni sistem se sastoji od CMOS kamere, mikroprocesora koji radi na 50 MHz.
- Radi se o jeftinom inteligentnom vizualnom sistemu (smart kamera).
- Ovaj sistem osigurava visoko-kvalitetne informacije izvučene iz slike navedenom, vanjskom procesoru, koji obrađuje dobivene informacije i može upravljati, recimo, mobilnim robotom.
- Vanjski procesor konfigurira mod podataka koji se koristi za praćenje.

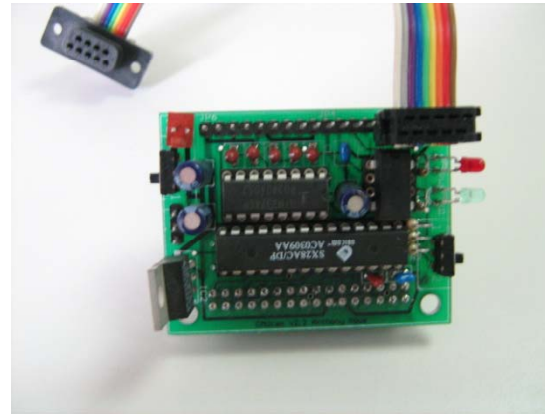


# Sistem vizije

## Vizualni senzori za praćenje boja

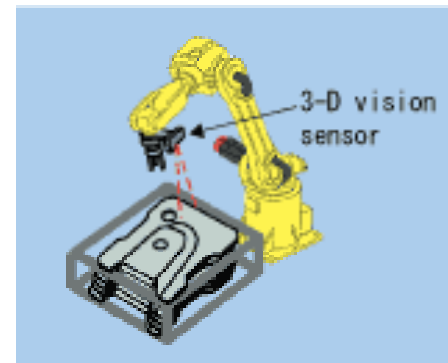
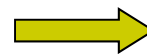


CMOS kamera



+ Mikroprocesorski bazirani sistem

## 3D senzor – primjena u robotici (za inspekciju)



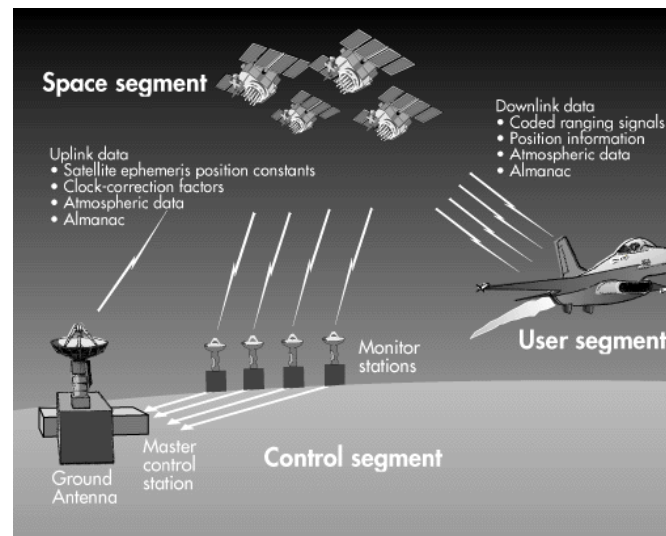
## 6.6. Senzor za globalno pozicioniranje

- Senzor za globalno pozicioniranje (GPS – Global Positioning System)
- Osigurava informacije za pozicioniranje (2Hz) 24 sata na dan.
- Prvi GPS sistem: TRANSIT od 1964. godine (vojni).
- Prvi civilni GPS: STARFIX od 1986.
- Postoji mnogo signala koje može koristiti kao i različite načine korištenja GPS-a.
- Preciznost se kreće od 0.1 cm do 0.1 km, ovisno o tome kako se sistem koristi.
- Komplementaran sa inercijalnim navigacijskim sistemom (INS).



# Senzor za globalno pozicioniranje

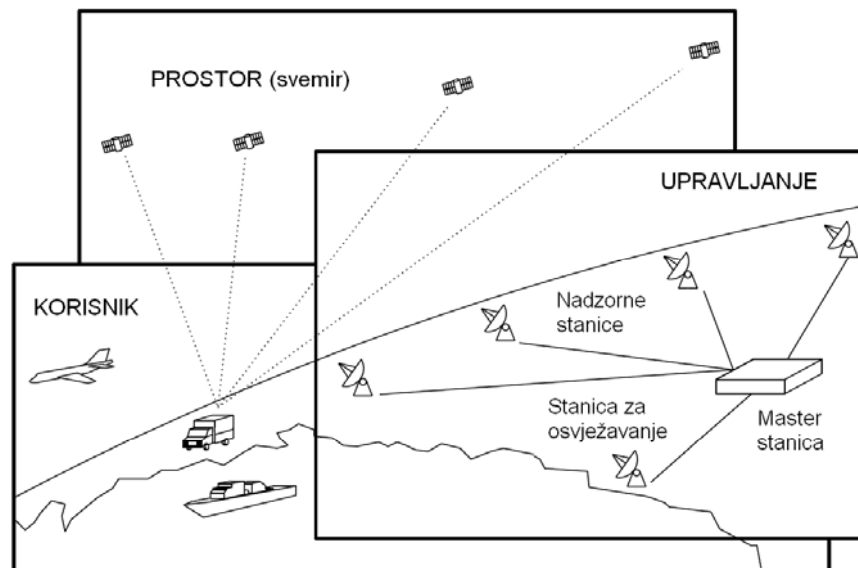
24 satelita (+nekoliko rezervnih)  
Vrijeme prostiranja radio signala, identitet, orbitalni parametri (širina, duljina, visina).  
**NAVSTAR GPS sistem** ima tri segmenta: prostorni (svemir), upravljački i korisnički.



## Prostorni segment



## NAVSTAR GPS sistem





# Senzor za globalno pozicioniranje

## Mjerenje pozicije

- Princip rada se temelji na triangulaciji područja.
- Triangulacija određena rasporedom satelita u zemljinoj orbiti.
- Prijemnici na zemlji primaju signale od satelita.
- Sateliti odašilju radio signale:
  - broj korisnika nije ograničen,
  - slobodno korištenje.
- Prijemnici mjere udaljenost do satelita.
- Sateliti prenose vrijednosti njihovih pozicija:

$$r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2},$$

$$r_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}$$

3D slučaj predstavlja presjek sfera.



# Senzor za globalno pozicioniranje

## Mjerenje pozicije

- Udaljenost se mjeri na temelju vremena prostiranja radio signala.
- Osjetljivost je 1 m u 50 000 000 m.
- Sateliti koriste atomske klokove (cesium atomic oscillators) koji su sinhronizirani sa zemljanim stanicama (reda ns).
- Postoji bias (pomak) između klokova koji uzrokuju pogreške u mjerenju udaljenosti – ove pogreške se nazivaju lažna područja (udaljenosti) (pseudo područja).
- Budući da su sateliti sinhronizirani, pogreške klokova uzrokuju jednake pogreške u udaljenosti za sve satelite.



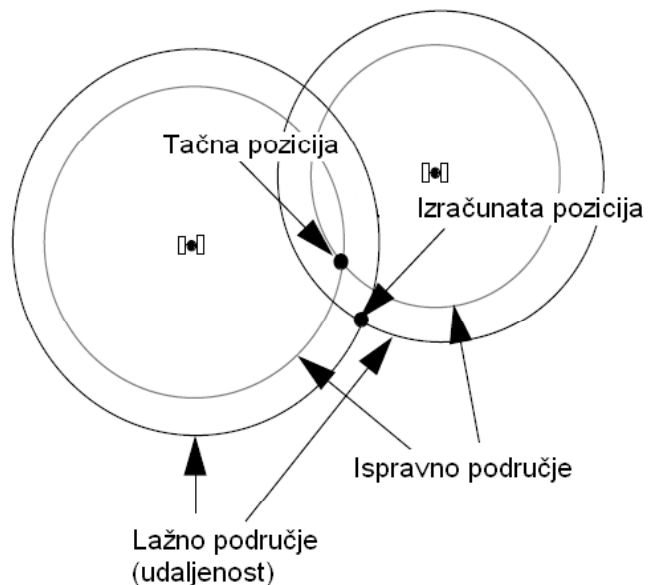
# Senzor za globalno pozicioniranje

## Mjerenje pozicije

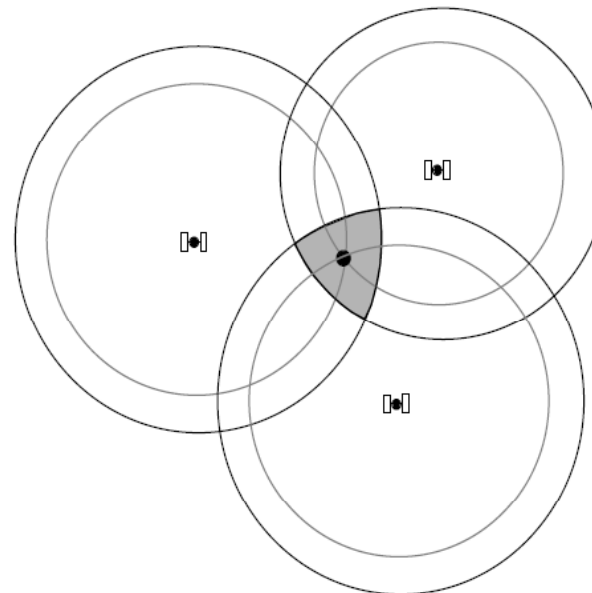


59/73

2 satelita u 2D



3 satelita u 2D



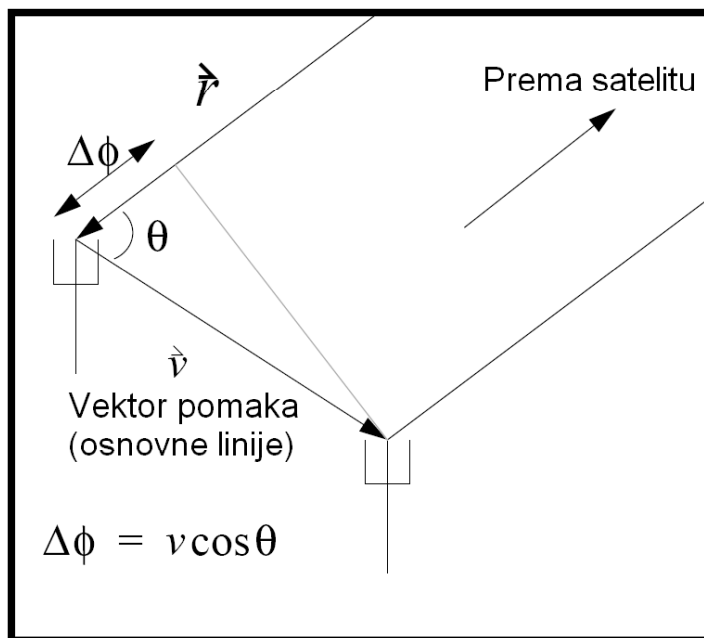
$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + c\Delta t \\ r_2 &= \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} + c\Delta t \\ r_3 &= \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} + c\Delta t \\ r_4 &= \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} + c\Delta t \end{aligned}$$

$c\Delta t$  – jednaka odstupanja za sve satelite.

# Senzor za globalno pozicioniranje

## Mjerenje orijentacije

- Princip se temelji na mjerenju položaja različitih antena smještenih na vozila.



- Mjerenje fazne razlike.
- Tri satelita osiguravaju projekciju vektora osnovne linije na satelitsku os zrake.

$$\begin{aligned}
 \Delta\phi_1 &= v \cos\theta_1 = (\hat{v} \cdot \hat{r}_1) / |\hat{r}_1| \\
 \Delta\phi_2 &= v \cos\theta_2 = (\hat{v} \cdot \hat{r}_2) / |\hat{r}_2| \\
 \Delta\phi_3 &= v \cos\theta_3 = (\hat{v} \cdot \hat{r}_3) / |\hat{r}_3|
 \end{aligned}
 \begin{bmatrix} \hat{r}_{1x} & \hat{r}_{1y} & \hat{r}_{1z} \\ \hat{r}_{2x} & \hat{r}_{2y} & \hat{r}_{2z} \\ \hat{r}_{3x} & \hat{r}_{3y} & \hat{r}_{3z} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{bmatrix}$$

# Senzor za globalno pozicioniranje

## Karakteristike signala

- Signali se moduliraju signalima nosioca.
- Koriste se dva nosioca: L1 (1575.42 MHz) i L2 (1227.60 MHz).
- Ovo omogućuje mjerenje atmosferskog kašnjenja.
- Modulatori uključuju:
  - C/A (Coarse Acquisition) PRN (Pseudo Random Noise) kodove.
  - P (precise) PRN kod.
  - Tajni Y kod.
  - Navigacijsku poruku.
  - Svaki satelit ima svoj vlastiti, različiti kod.

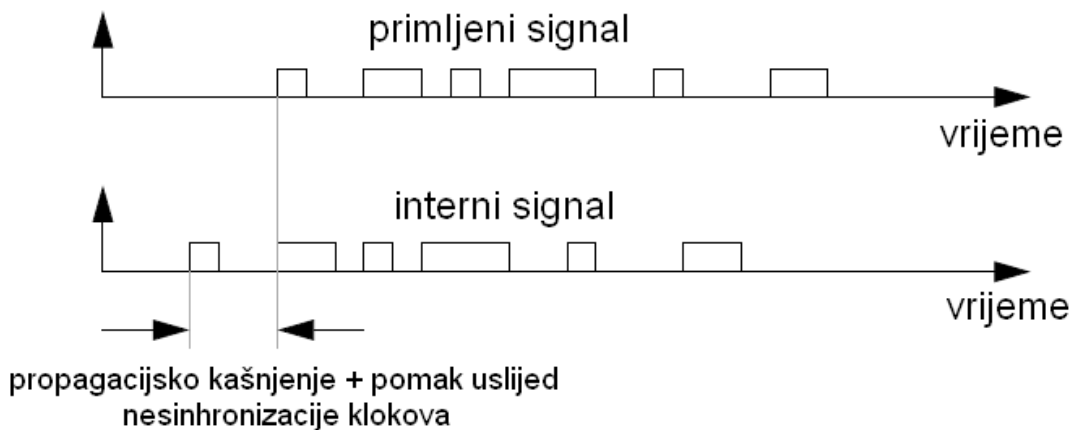
	C/A	P	NAV
L1	✓	✓	✓
L2		✓	✓



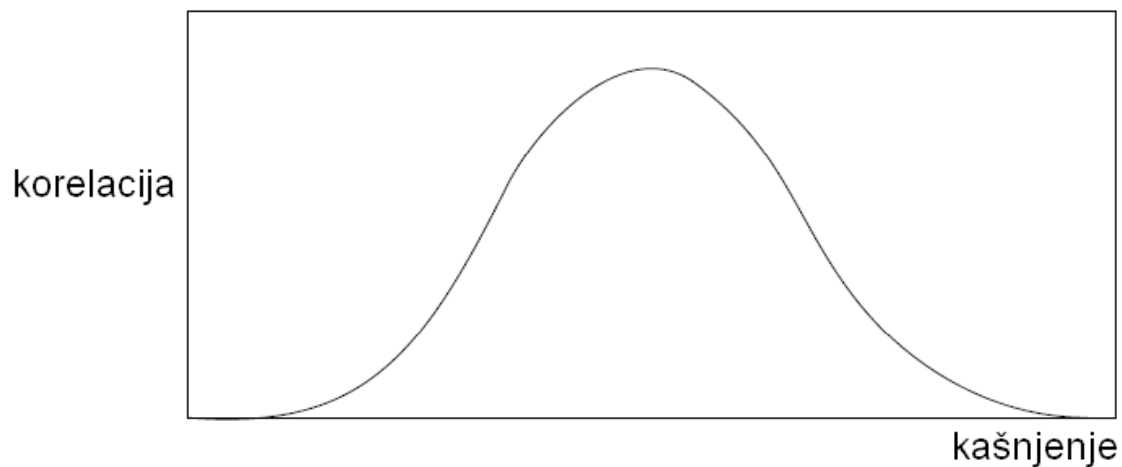
# Senzor za globalno pozicioniranje

## Operacije prijemnika (segment korisnika)

- Osnovna operacija je kodna korelacija za rekonstruiranje vremenskog kašnjenja prouzročenog lažnom udaljenošću.



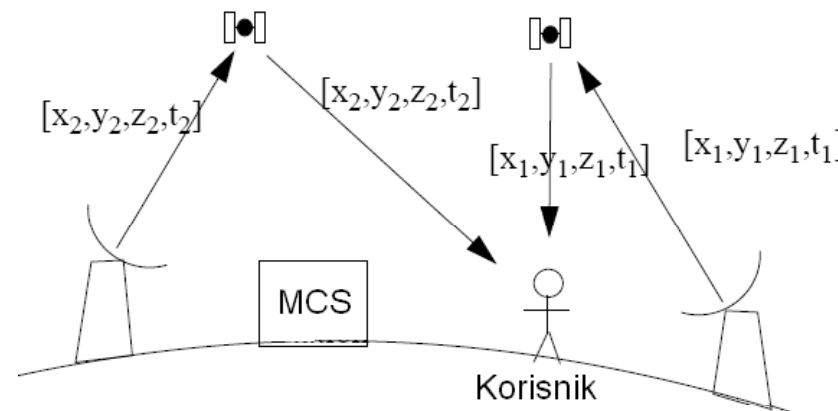
Prijemnik duplicira PRN kodove interno kako bi se slagao (poklapao) sa primljenim signalima.



# Senzor za globalno pozicioniranje

## Zemljani segment GPS sistema

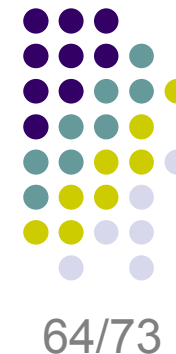
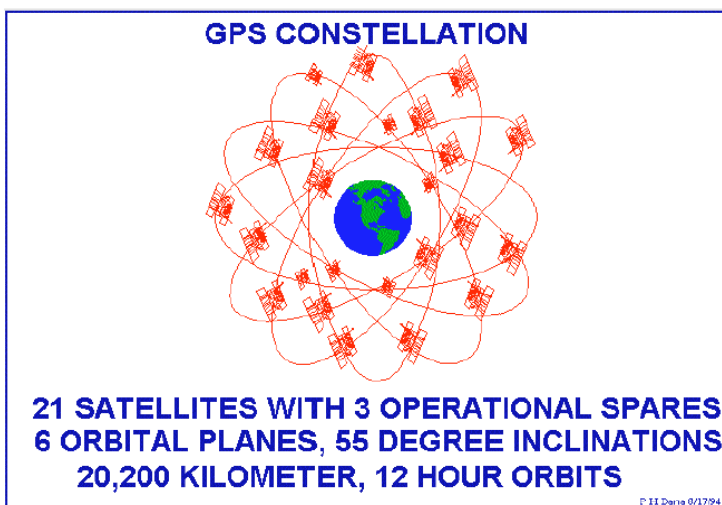
- Pet zemljanih stanica koje pokrivaju cijeli Svijet.
- Jedna od stanica predstavlja MCS (Master Control Station) koja veoma precizno prati satelite i održava cjelokupni sistem.
- Sateliti se prepodešavaju na svoje pozicije za kasniju retransmisiju ka prijemnicima.
- Ovo prepodešavanje (osvježavanje) se obavlja na temelju njihovih atomskih klokova iz GPS vremenskog sistema za kasniju retransmisiju ka prijemnicima.



# Senzor za globalno pozicioniranje

## Prostorni segment GPS sistema

- 21 satelit i tri rezervna u 6 orbita.
- Orbite su pod nagibom  $55^\circ$  u odnosu na ravninu Ekvatora.
- Orbitalni krugovi imaju amplitudu 11.000 milja.
- Satelit za 12 sati pređe orbitalni krug.
- Istovremeno su najmanje 4 satelita vidljiva (dostupna).



- Četiri parametra su važna za određivanje pozicije pomoću GPS-a:
  1. Vrijeme sinhronizacije između pojedinačnih satelita i GPS prijemnika.
  2. Tačna real-time pozicija satelita.
  3. Precizno mjerenje vremena prostiranja signala.
  4. Određeni omjer signal/šum za izvodivost operacije u prisustvu interferencije i prigušenja signala.



## 6.7. Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

### Osnovni pojmovi

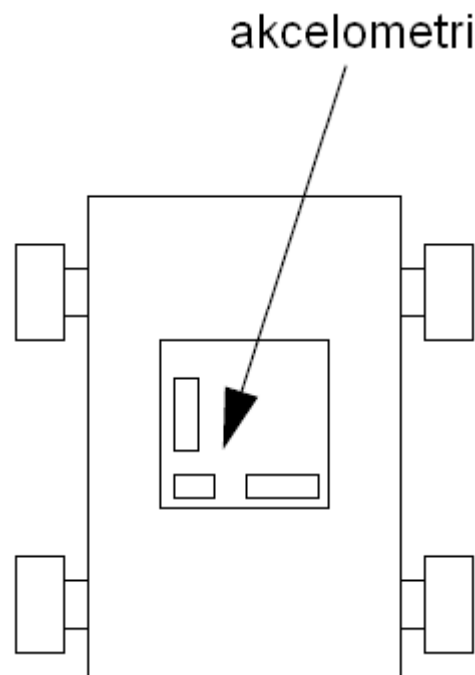
- Princip rada se temelji na konceptima zakona inercije (Newton-ovi zakoni).
- Prednosti:
  - mnogo su precizniji od standardnih odometrijskih sistema,
  - koriste se za potrebe navigacije u otvorenim, vanjskim prostorima,
  - funkcioniraju svuda gdje je informacija o gravitaciji dostupna,
  - ne zahtijevaju vanjske signale i nisu radioaktivni.
- Nedostaci:
  - ne mogu detektirati ubrzanje neenergijskih prostornih signala,
  - pogreške koje se javljaju su vremenski ovisne,
  - zahtijeva početne uvjete (ulaz).



# Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

## Princip rada

- Ideja se temelji na korištenju tri akcelometra duž tri ortogonalne osi.
- Dva puta integrirati mjerenja da bi se odredila pozicija.

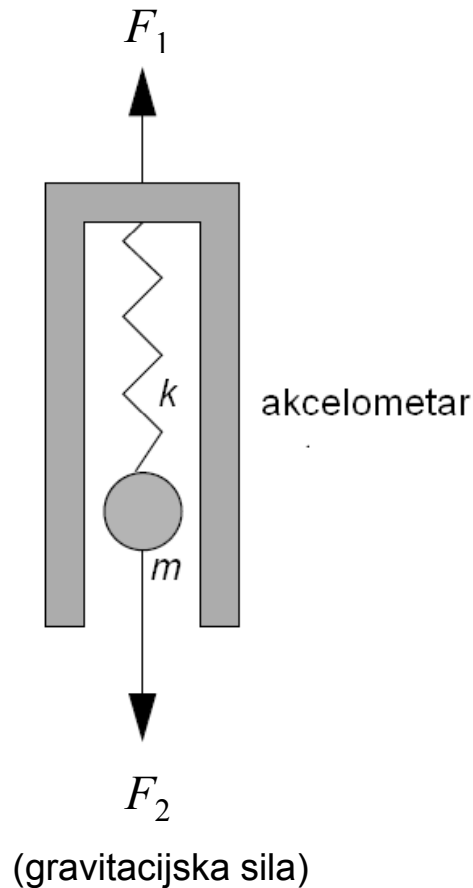


**Osim akcelometara,  
mogu se koristiti  
žiroskopi i žirompasari.**

# Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

## Akcelometar

- Senzor, odnosno pretvornik sile koji reagira na silu u opruzi, ne na silu mase.



- Drugi Newton-ov zakon:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = m\vec{a}_i$$

- Iz ove jednačbe se dobiva izraz za ubrzanje:

$$\vec{a}_i = \frac{\vec{F}_1}{m} + \frac{\vec{F}_2}{m} = \vec{f}_1 + \vec{f}_2$$

- Zahtijeva se eksplicitno poznavanje jačine gravitacijskog polja za svaku poziciju vozila.

# Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

## Mehanizam inercijalnog sistema

- Tri koordinatna sistema:
  - $i$  – geocentrični,
  - $e$  – zemljani (rotirajući),
  - $v$  – sistem učvršćen na akcelometre.
- Inercijalna rotacija vozila:

$$\vec{\omega} = \vec{\Omega} + \vec{\rho}$$

- $\vec{\rho}$  označava rotaciju koordinatnog sistema vozila s obzirom na Zemlju.
- $\vec{\Omega}$  predstavlja inercijalnu rotaciju kordinatnog sistema vozila brzinom  $\vec{\omega}$
- Vektor pozicije je isti u inercijalnom i Zemljanom koordinatnom sistemu, slijedi da je inercijalna brzina vozila jednaka (sa  $r$  je označena pozicija):

$$\vec{v}_i = \left( \frac{d\vec{r}_i}{dt} \right)_i = \left( \frac{d\vec{r}_e}{dt} \right)_i = \left( \frac{d\vec{r}_e}{dt} \right)_e + \vec{\Omega} \times \vec{r}_e = \vec{v}_e + \vec{\Omega} \times \vec{r}_e \quad (*)$$



# Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

## Mehanizam inercijalnog sistema

- Deriviranjem se dobije izraz za ubrzanje (akceleraciju):

$$\bar{a}_i = \left( \frac{d\bar{v}_i}{dt} \right)_i = \left( \frac{d\bar{v}_e}{dt} \right)_i + \bar{\Omega} \times \left( \frac{d\bar{r}_e}{dt} \right)_i$$

- Akcelometar inherentno omogućuje mjerenja duž osi koordinatnog sistema vozila. U praksi je zgodnije izraziti derivacije na način da se izlaz izrazi u obliku koji se može direktno integrirati:

$$\left( \frac{d\bar{v}_e}{dt} \right)_i = \left( \frac{d\bar{v}_e}{dt} \right)_v + \bar{\omega} \times \bar{v}_e$$

- Supstitucijom ovog izraza u gornju jednažbu dobiva se:

$$\bar{a}_i = \left( \frac{d\bar{v}_e}{dt} \right)_v + (\bar{\omega} + \bar{\Omega}) \times \bar{v}_e + \bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times \bar{r}_e)$$

# Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

## Mehanizam inercijalnog sistema

- Korištenjem prethodnih izraza dobiva se jednačba kretanja vozila:

$$\left(\frac{d\vec{v}_e}{dt}\right)_v = \vec{f}_1 - (\vec{\omega} + \vec{\Omega}) \times \vec{v}_e + \vec{f}_2 - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}_e)$$

- Zadnja dva člana desne strane jednačbe su funkcije samo pozicije, pa ćemo ih grupirati i taj dio zvatı gravitacija (sila gravitacije minus centrifugalna sila):

$$\vec{g} = \vec{f}_2 - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}_e)$$

- Rješavanjem jednačbe (\*) dobiva se izraz za brzinu i poziciju:

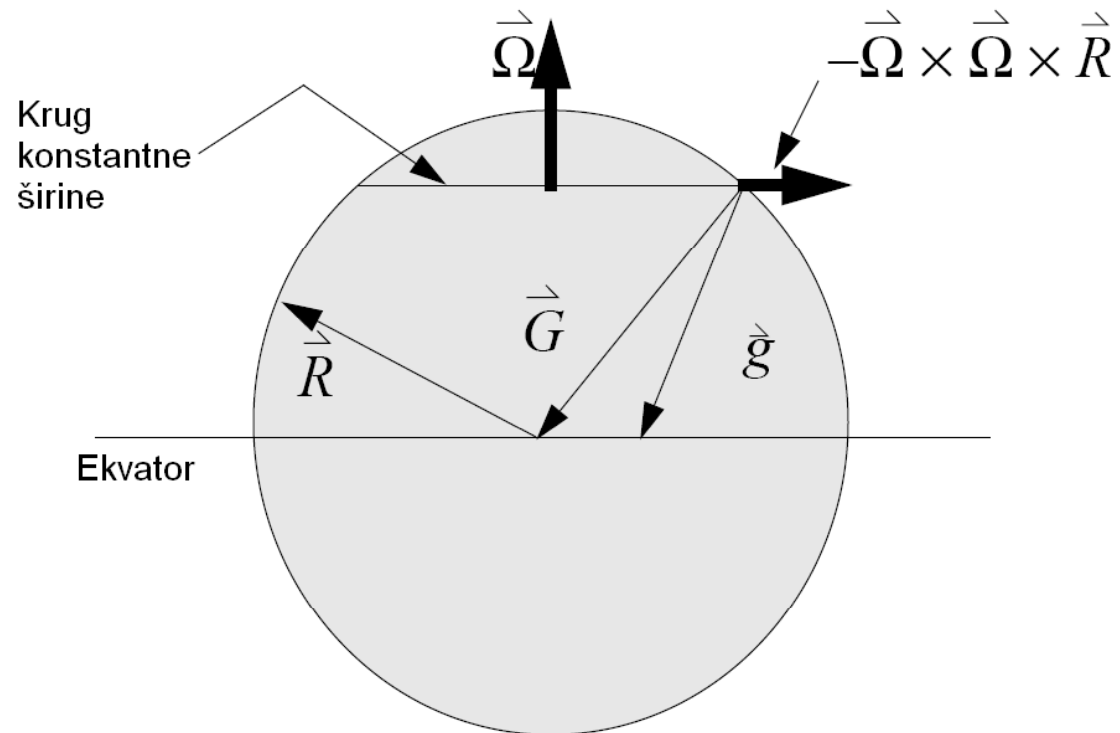
$$\vec{v}_e = \int_0^t [\vec{f}_1 - (\vec{\omega} + \vec{\Omega}) \times \vec{v}_e + \vec{g}] dt + \vec{v}_{e_0}$$
$$\vec{r}_e = \int_0^t \vec{v}_e dt + \vec{r}_{e_0}$$

# Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

## Mehanizam inercijalnog sistema

- Newton-ov zakon gravitacije:

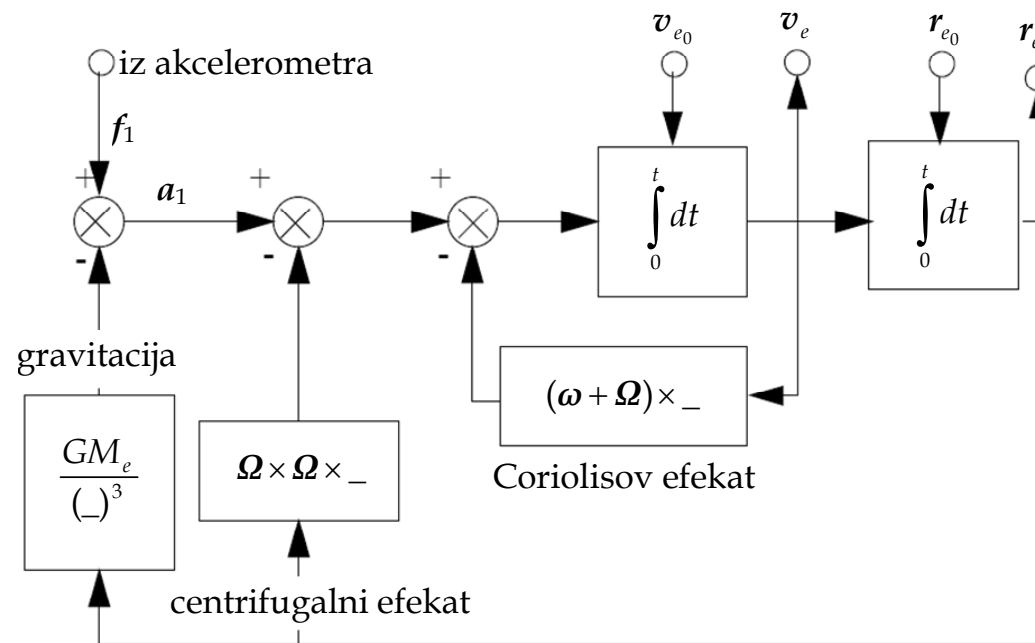
$$\vec{F}_2 = \frac{\vec{f}_2}{m} = - \left[ \frac{GM_e}{R^3} \vec{R} \right]$$



# Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

## Mehanizam inercijalnog sistema

- Dodati gravitaciju za specifičnu silu.
- Ukloniti centrifugalnu silu usljed odstupanja centra mase vozila od centra Zemlje.
- Ukloniti djelovanje Coriolis-ove sile usljed kretanja vozila po površini Zemljine kore.
- Obaviti dvostruku integraciju (uvrštavajući početne uvjete) da bi se dobila informacija o pozicija.

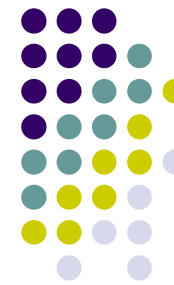




# Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

## Mehanizam inercijalnog sistema

- Za vozilo koje se kreće po Ekvatoru brzinom 10 m/s i ubrzava se sa 0.1g vrijednosti pojedinih sila su dani u sljedećoj tabeli.



Naziv	Izraz	Nominalna vrijednost
Specifična sila	$\vec{f}_1$	0.1 g
Gravitacijska	$\vec{g}$	1.0 g
Coriolis-ova	$2\vec{\Omega} \times \vec{v}_e$	0.03 g
Centrifugalna	$\vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}_e$	$1.5 \times 10^{-4}$ g