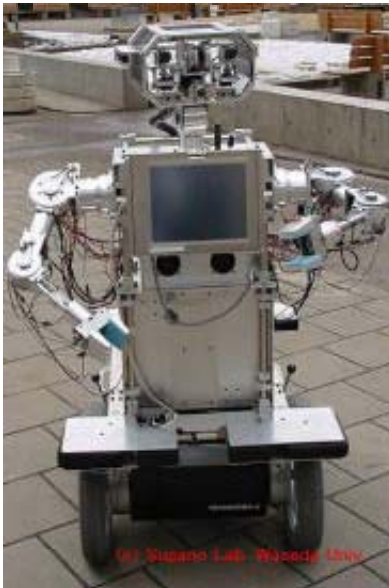


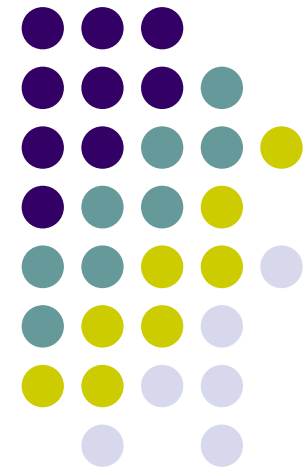
Lekcija 4: *Nevizualni senzori*



Prof.dr.sc. Jasmin Velagić
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Mobilna robotika

2012/2013



4.1. Senzori u mobilnoj robotici

- Mobilni robot pomoću **sistema opažanja** (percepcije) sudjeluje u inteligentnoj interakciji sa okolnim objektima, kao što su pokretni i nepokretni objekti, ljudi i drugi roboti.
- **Korištenje senzora u navigaciji autonomnih mobilnih robota u nepoznatom okruženju i dinamičkim sredinama je neizbježno**, budući da je u tim situacijama nemoguće posjedovati kompletne a priori informacije o okolini koje bi bile dostupne robotu prije obavljanja bilo koje operacije.
- U biološkim sistemima, vizualni sistemi prikupljaju većinu informacija koje su neophodne za procese navigacije, zaključivanja i planiranja kretanja.



Senzori u mobilnoj robotici

- Isto vrijedi i za autonomne mobilne robotske sistema kod kojih vizualni sistem postaje standardni senzorski alat za opažanje statusa okoline.
- Razvoj i unaprijeđenje tehnika obrade slike omogućuje ekstrakciju korisnih informacija iz snimka dobivenog sa kamere ugrađene na platformu.
- Prema tome, u mobilnoj robotici se koriste dvije vrste senzora za percepciju okoline: **vizualni** i **nevizualni** senzori.
- **Vizualni senzori** koriste svjetlost reflektiranu od objekata u okolini na temelju koje se obavlja postupak zaključavanja o strukturi objekta.
- **Nevizualni senzori** koriste različite audio, inercijalne i druge modalitete za opažanje okoline.



Senzori u mobilnoj robotici

- Najopćenitija podjela senzora je na ***proprioceptivne*** i ***eksteroceptivne***.
- Ovi senzori su poznati i pod imenima senzori ***unutarnjeg*** i senzori ***vanjskog stanja***.
- **Proprioceptivni senzori** detektiraju status samog robota, odnosno mjere vrijednosti unutarnjih parametara mobilnog robota, kao što su: brzina motora, napon baterije, opterećenje kotača, itd.
- **Eksteroceptivni senzori** detektiraju status okoline, odnosno prikupljaju informacije iz okruženja mobilnog robota, kao što su mjerenje udaljenosti do prepreke, intenziteta svjetlosti, amplitude zvuka, itd.



Senzori u mobilnoj robotici

- Druga podjela senzora je na **aktivne** i **pasivne** senzore.
- **Aktivni senzori** emitiraju energiju u okolinu i nakon toga registriraju reakciju okoline.
- Primjeri aktivnih senzora su: enkoderi, ultrazvučni senzori, laserski daljinomjeri.
- S druge strane, **pasivni senzori** primaju energiju iz okoline i na temelju nje obavljaju mjerenja.
- Temperaturne sonde, mikrofoni, CMOS i CCD kamere predstavljaju primjere pasivnih senzora.



Senzori u mobilnoj robotici

- **Problem detektiranja tačnog statusa bilo samog robota, bilo njegove okoline predstavlja izazov u mobilnoj robotici.**
- Razlozi za ovo su:
 - Mjerenja realnih senzora su obično prekrivena šumom. Često je distribucija šuma nepoznata, a rijetko se javlja Gausov šum.
 - Realni senzori daju nekompletan prikaz (opis) okruženja. Senzori često nisu sposobni direktno mjeriti kvantitavne značajke koje su od interesa za datu primjenu. Naprimjer, kamere mjere vrstu boje, osvjetljenje, itd., dok je za navigaciju relevantan iskaz tipa “vrata se nalaze ispred robota”.
 - Realni senzori se ne mogu u cijelosti modelirati.



Senzori u mobilnoj robotici

- Uzimajući u obzir karakteristike i svojstva realnih senzora, kao i složenost okruženja unutar kojeg se roboti kreću, može se konstatirati da tačno opažanje i navigacija mobilnog robota predstavljaju zaista veliku poteškoću i zahtijevaju razvoj sofisticiranih tehnika opažanja, lokalizacije i gradnje mape okruženja.
- Područje percepcije (opažanja) većine senzora je ograničeno na malo područje oko robota.
- Za formiranje globalne informacije, robot mora aktivno istražiti svoju okolinu.
- Tu je izražen problem rekonstrukcije okruženja robota na temelju mjerenja senzora.
- Ako se uzmu u obzir karakteristike i ograničenja realnih senzora onda je dosta teško dobiti tačan model okoline.



Senzori u mobilnoj robotici

- Također se i kretanje robota općenito određuju sa greškom.
- Na žalost, **odometrijske pogreške se akumuliraju sa vremenom.**
- Naprimjer, čak i najmanje pogreške u rotaciji mogu imati veliki utjecaj kada se estimira pozicija robota.
- Robotske okoline su po pravilu složene i dinamične, tako da je veoma teško, a ponekad i nemoguće, održavati njihove stvarne modele.
- Vremenska ograničenja često nameću da unutarnji model mora biti jednostavan i lahko dostupan.
- Naprimjer, tačni CAD modeli složenih unutarnjih prostora su često nezgodni ako se akcije moraju generirati brzo.



Senzori u mobilnoj robotici

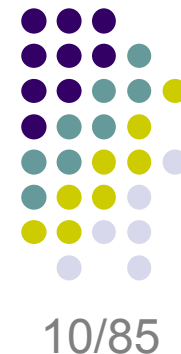
Kod izbora senzora za odgovarajuću primjenu treba se voditi računa o svojstvima senzora ili kriterijima, kao što su:

- **Brzina rada (odziva) senzora** izražava brzinu kojom senzor mjeri i daje mjerne informacije kada on radi kontinuirano ili kada postoji vremensko kašnjenje dok se osigura mjerenje na temelju njegovog zahtjeva.
- **Cijena senzora.** Razlike u cijenama senzora su drastične. Tako, naprimjer, infracrveni senzor košta nekoliko dolara, dok precizni žiroskop košta i po nekoliko hiljada dolara.
- **Pogreška mjerenja.** Različiti faktori mogu utjecati na pogreške mjerenja senzora. Oni mogu dovesti do netačnog i nekompletnog mjerenja, kao i do gubitka mjernih podataka.



Senzori u mobilnoj robotici

- **Robusnost senzora.** Pitanje toleriranja različitih odstupanja okoline od idealnih radnih uvjeta je važno za izbor odgovarajućeg senzora za danu primjenu. Relevantni faktori za ispitivanje robusnosti su: fizički poremećaji, šumovi okoline, električki šum, itd.
- **Računarski zahtjevi.** Jednostavni kontaktni prekidač ne zahtjeva gotovo nikakvu računarsku moć, za razliku od sistema vizije koji zahtjeva značajne računarske resurse i moćne procesore za obradu podataka.
- **Napajanje, masa i dimenzije senzora.** Neki sistemi zahtijevaju kontinuirano napajanje senzora, dok postoji i senzori koji se aktiviraju samo u trenutku mjerenja, a nakon toga se isključuju (troše značajnu energiju, naprimjer, ultrazvučni senzori).



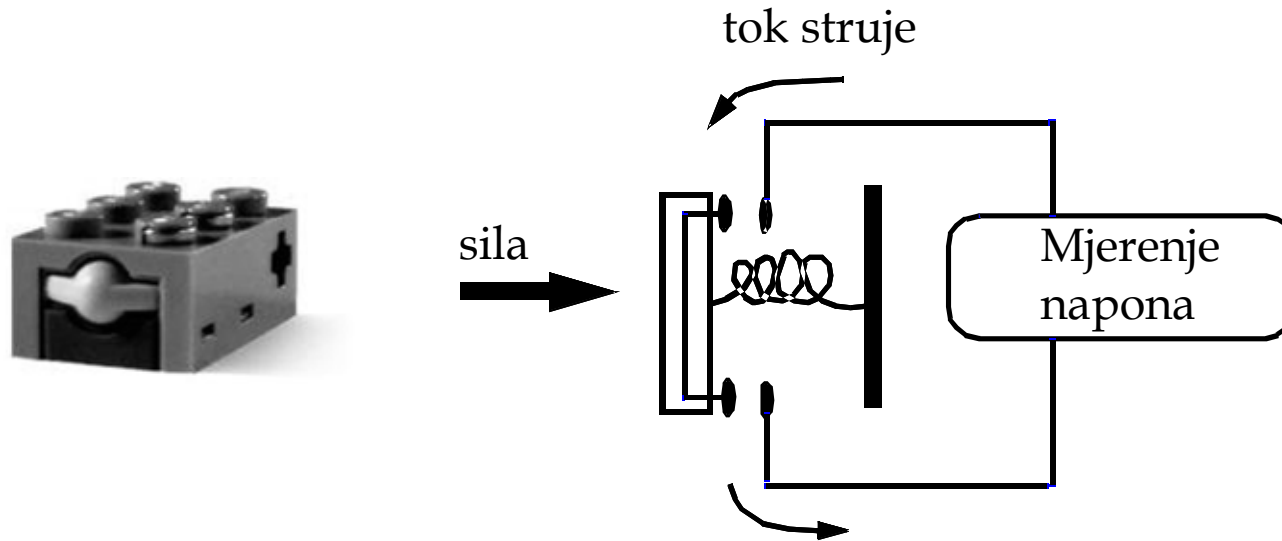
4.2. Kontaktni senzori

- **Kontaktni senzori rade na principu osjećaja dodira, odnosno mjerenja parametara kontakta između senzora i objekta.**
- Kontaktni senzori na mobilnim robotima se najčeće postavljaju u prsten oko mobilnog robota, tako da mogu osjetiti dodir robota sa okolnim objektima sa svih strana.
- Kao kontaktni senzori najviše se koriste mikroprekidači koji na svom izlazu generiraju binarnu vrijednost: **prekidač je otvoren** ili **zatvoren**.
- Osim u mobilnoj robotici, kontaktni senzori se koriste i kod robotskih manipulatora (smještaju se na vrh manipulatora).



Kontaktne senzori

Prikaz i izvedba kontaktnog senzora



- Sofisticiraniji pristupi osjeta dodira koriste senzore koji generiraju signal širokog dijapazona vrijednosti u odnosu na primijenjenu silu.
- Za ovu svrhu se najčešće koriste potenciometri ili neki drugi senzori koji rade na principu promjene otpornosti ili kapacitivnosti usljed djelovanja pritiska.

Kontaktne senzori

- Kako će kontaktne senzori rukovati podacima ovisi o arhitekturi pojedinačnog mobilnog robota.
- Kod nekih mobilnih robota (naprimjer, Nomad 200) kontaktne senzori daju informaciju o poziciji (i težini) kontakta, dok kod drugih robota se oni koriste za trigerovanje određenih električnih krugova kojima se zaustavlja kretanje robota (primjer: Cybermotion Navmaster).



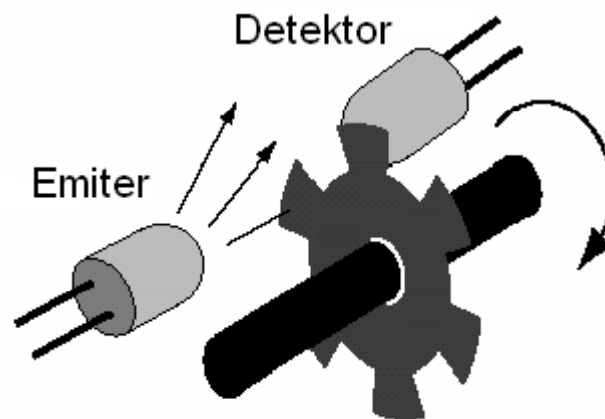
4.3. Optički enkoderi

- 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.

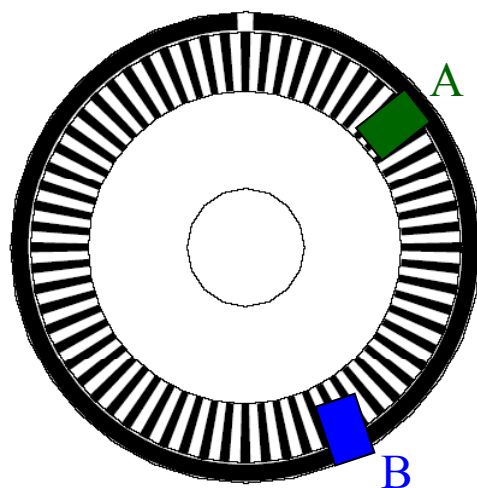
Optički inkrementalni enkoder

- 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 koristi se dvofazni enkoder (fotopar).
- Generiranje pulseva proporcionalno brzini vrtnje osovine.

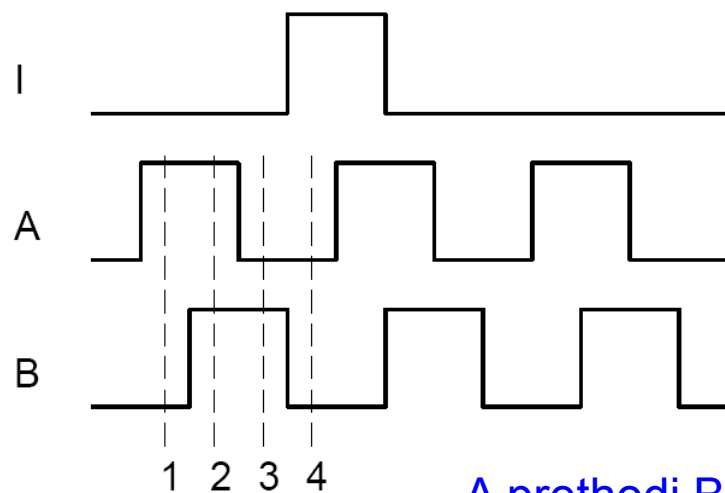


Optički inkrementalni enkoder

- Par enkodera se koristi na jednoj osovini.
- Enkoderi se poravnavaju tako da su njihovi podatkovni nizovi na jednoj četvrtini ciklusa (90°) 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.

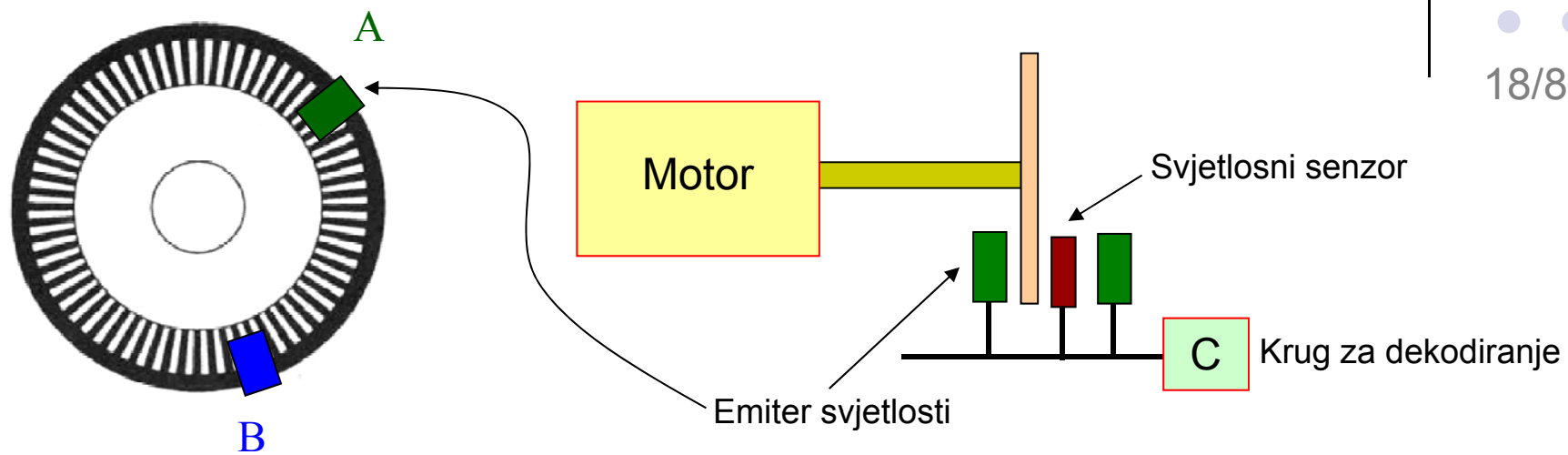
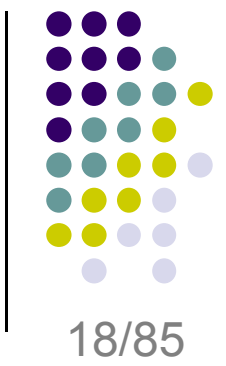


Stanja enkodera

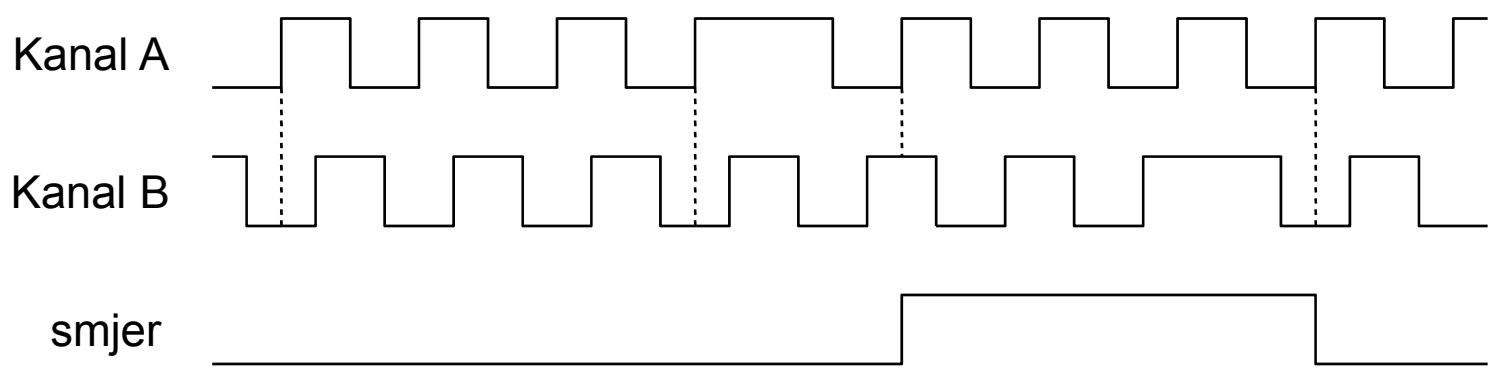


Stanje	Kanal A	Kanal B
S ₁	Visok	Nizak
S ₂	Visok	Visok
S ₃	Nizak	Visok
S ₄	Nizak	Nizak

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

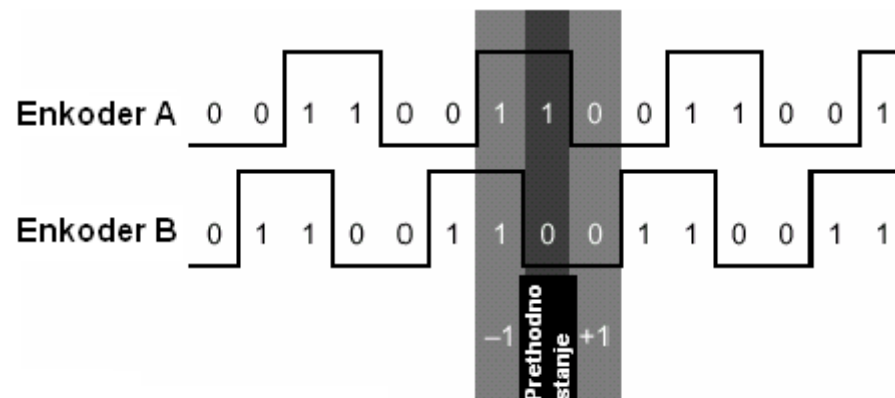
“01” = Enkoder A je 0, a Enkoder B je 1



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 slijedeći 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:

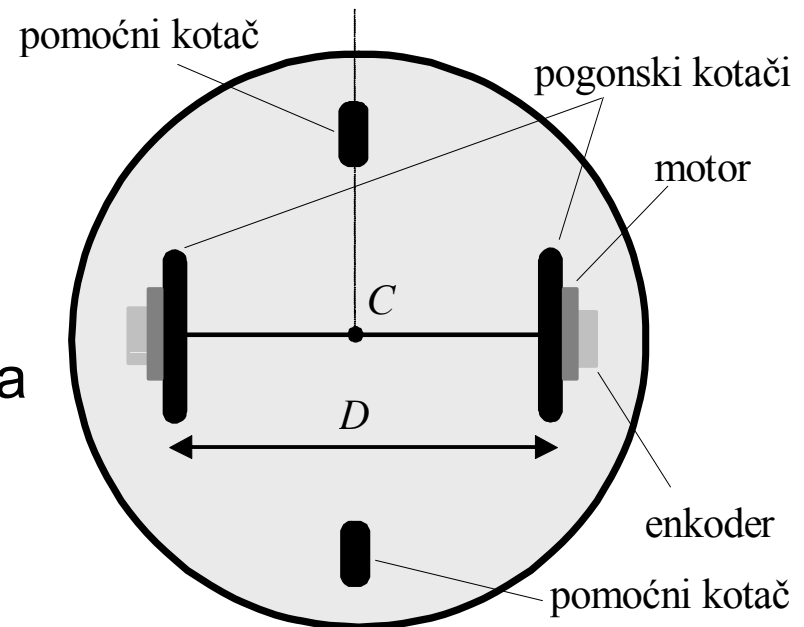
- **Upravljanje pozicijom sistema sa hvataljkom**, gdje mehanika sistema limitira kretanje između dvije putne tačke, npr. rotacijske robotske ruke, gdje se enkodери koriste za mjerenje zglobovskih uglova, i Kartezijevih robota, gdje se pomoću pužnog prijenosa mogu izduživati i skupljati segmenti.
- **Mjerenje 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:

$$\Delta \theta_i = \frac{(\Delta U_R - \Delta U_L)}{D} \quad D - \text{duljina osovine kotača}$$

- Nove vrijednosti pozicije i orijentacije mobilnog robota:

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



4.4. Infracrveni senzori udaljenosti

- **Infracrveni senzori rade na principu emitiranja infracrvenih pulseva i detektiranja reflektiranog signala od objekta.**
- Estimacija udaljenosti do objekta se obavlja na temelju rekonstruiranog signala i pretpostavke da se infracrvena svjetlost reflektirala od objekta.
- Da bi se izbjegla potencijalna opasnost zbog drugih izvora infracrvene svjetlosti u okolini, emitirani infracrveni signal se kodira a detektirani signali se ignoriraju dok se ne detektira signal odgovarajućeg valnog oblika unutar njih.
- Infracrveni senzori imaju brz odziv i jako su jeftini (reda 10-ak američkih dolara).



Infracrveni senzori udaljenosti

Vrste infracrvenih senzora

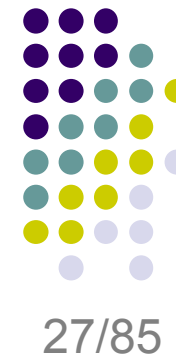
- **Na intenzitetu zasnovani infracrveni senzori**
 - Refleksijski senzori.
 - Jednostavni za implementirati.
 - Osjetljivi na svjetlost ambijenta.
- **Modulirajući infracrveni senzori**
 - Senzori blizine.
 - Zahtijevaju modulirajući IR signal.
 - Neosjetljiv na svjetlost ambijenta.
- **Infracrveni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



Infracrveni senzori udaljenosti

Princip rada

IR emiter + fokusne leće + pozicijski osjetljiv detektor



27/85

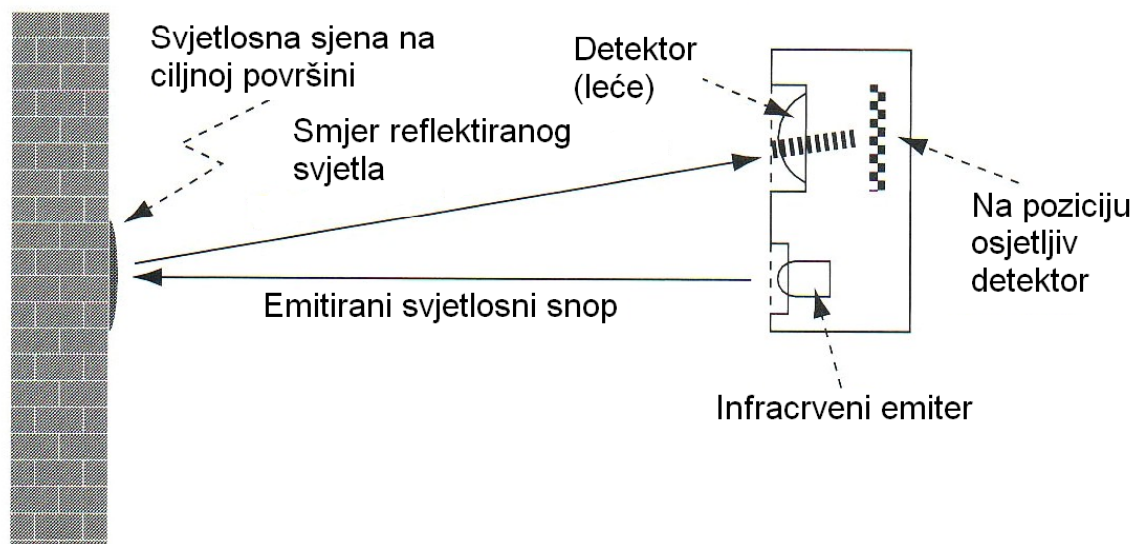
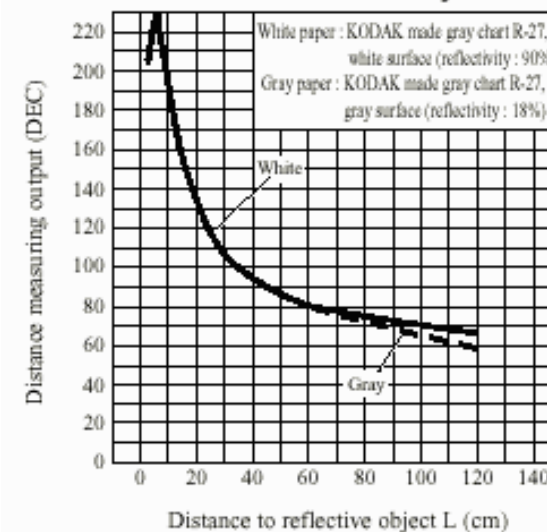


Fig. 1 Distance Measuring Output vs. Distance to Reflective Object

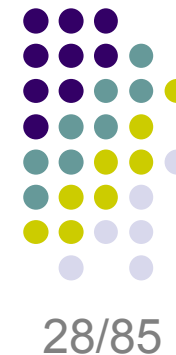


Lokacija svjetlosne sjene na detektoru odgovara udaljenosti do ciljne površine.

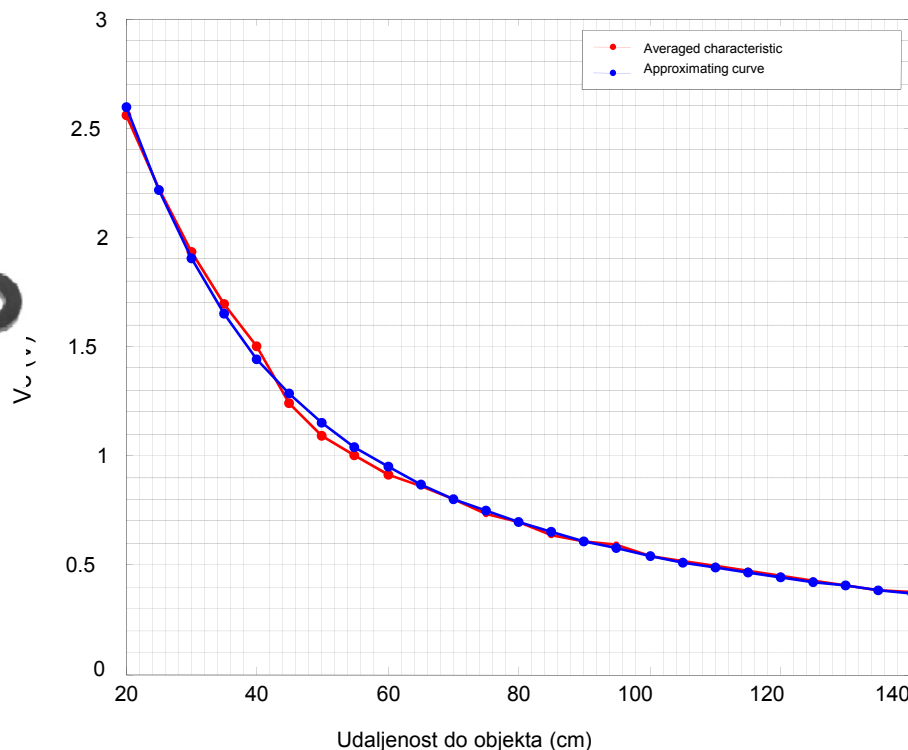
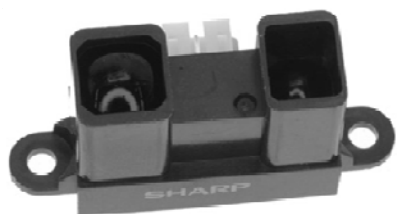
Infracrveni senzori udaljenosti

Određivanje karakteristike IR senzora

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



28/85



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



Infracrveni senzori udaljenosti

Određivanje karakteristike IR senzora

- Dobivena je slijedeća 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.

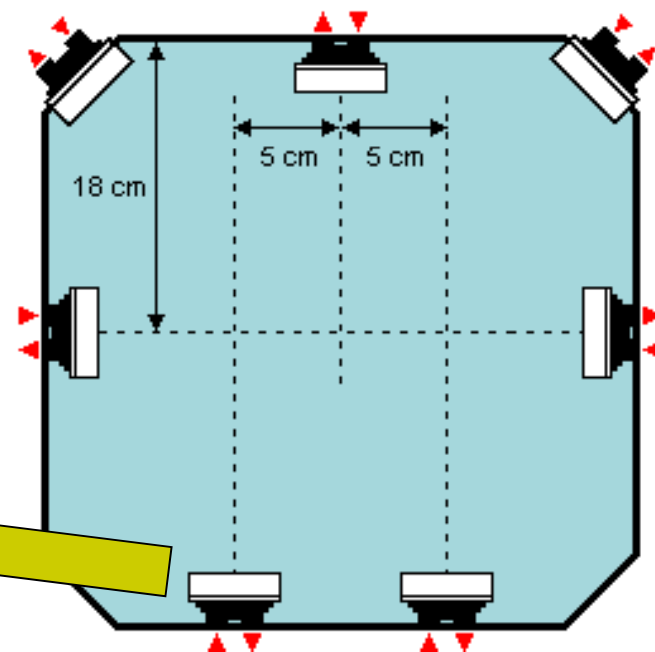
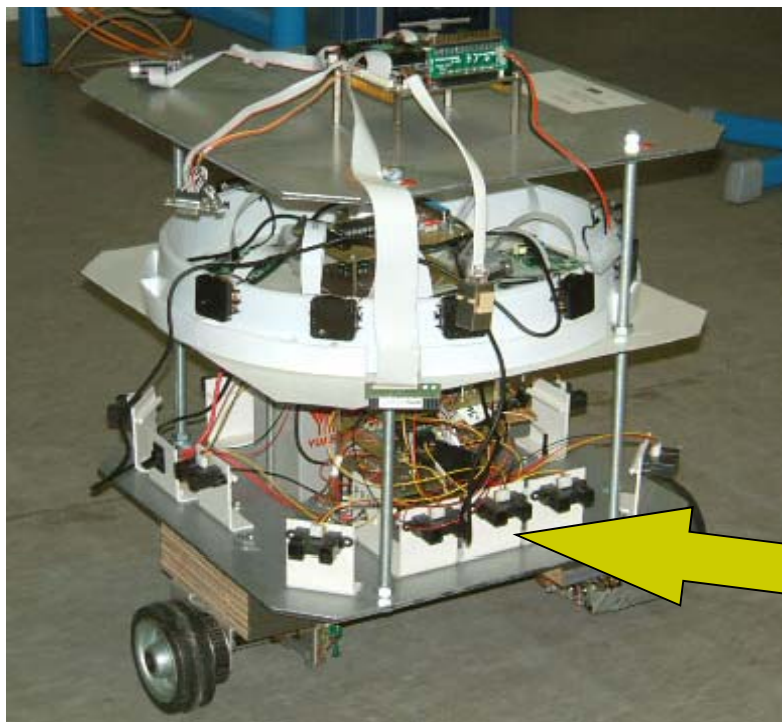
- Iz gornjeg izraza dobiva se izraz za udaljenost do objekta:

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

Infracrveni senzori udaljenosti

Primjer: korištenje na mobilnoj platformi

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

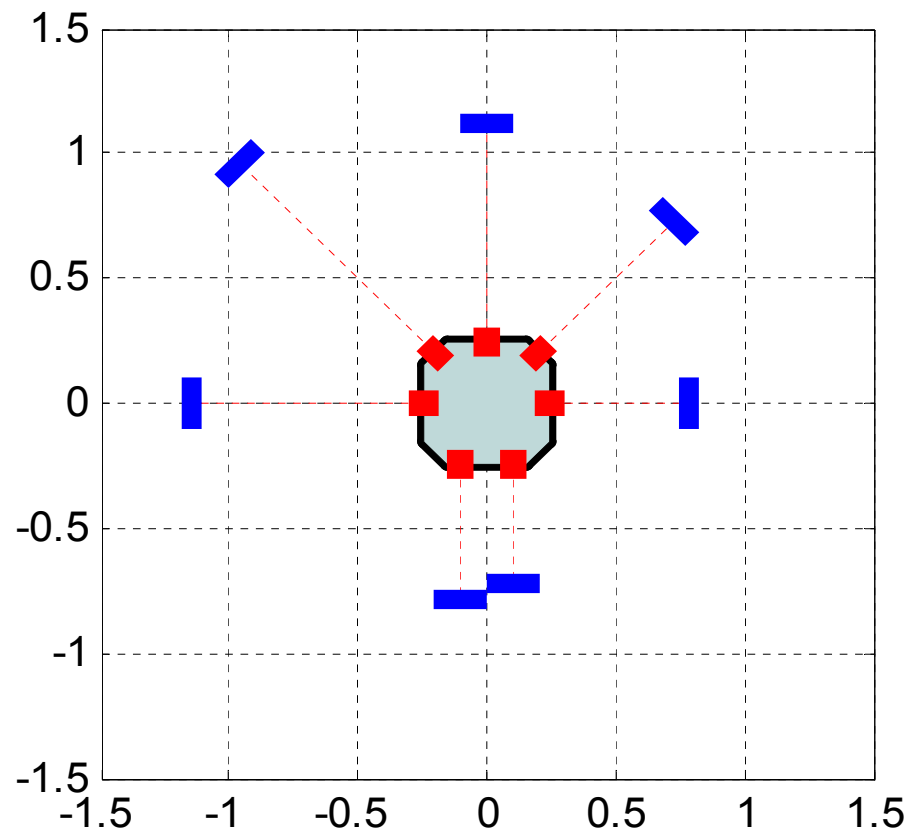


Raspored infracrvenih senzora na mobilnoj platformi

Infracrveni senzori udaljenosti

Primjer: korištenje na mobilnoj platformi

- Detektiranje prepreka u području dometa infracrvenih senzora



Softver
razvijen u
Matlab-u.

4.5. Ultrazvučni senzori udaljenosti

- **Ultrazvučni senzori, poznati također i pod imenom sonari, koriste se za mjerenje udaljenosti robota od prepreke na temelju mjerenja vremena prostiranja ultrazvučnog vala kroz zrak.**
- Mobilni robot je najčešće opremljen prstenom od 16 ultrazvučnih senzora raspoređenih tako pokrivaju pun krug od 360° .
- Svaki od njih je ustvari jedan transducer, to jest senzor je istovremeno i predajnik i prijemnik.





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:

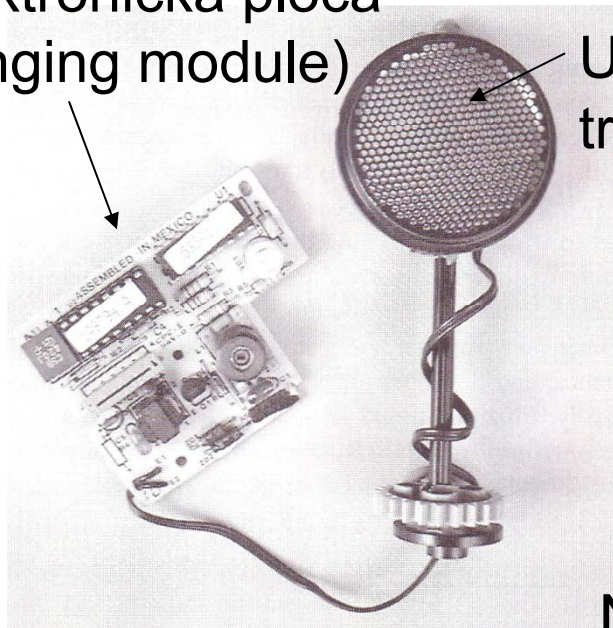
v – brzina zvuka kroz zrak,

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:

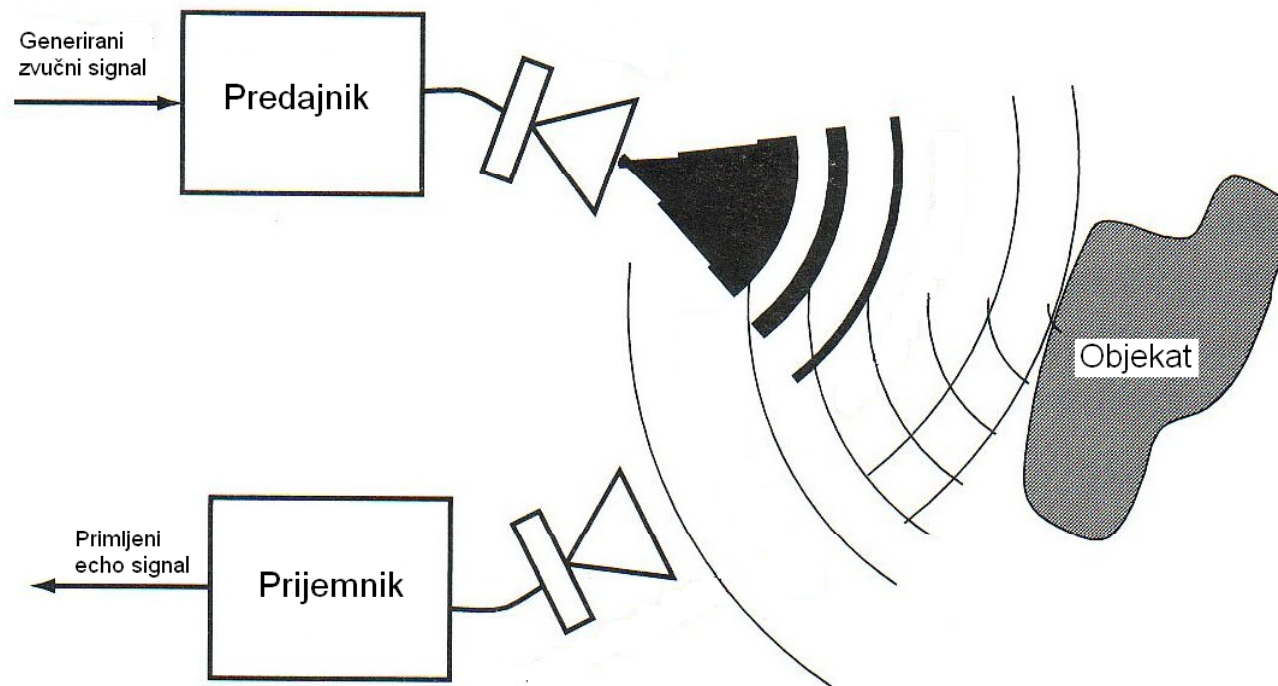
- POLAROID 7000 Series Transducer
- POLAROID 6500 Ranging Module



Ultrazvučni senzori udaljenosti

Princip rada

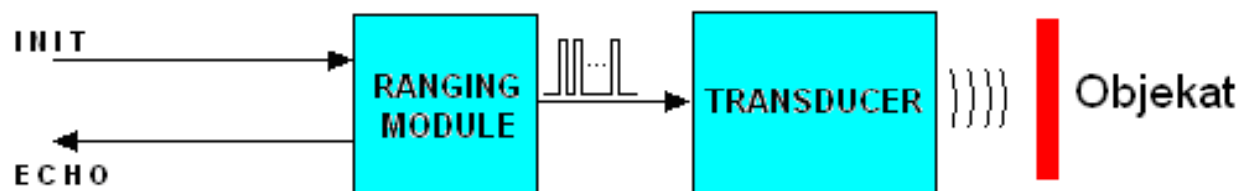
- Predajnik emitira brzi, kratkotrajni, ultrazvučni signal (49 kHz).
- Mjerenje putovanja signala do trenutka kada prijemnik indicira prijem echo signala.
- Određivanje udaljenosti najbližeg objekta od senzora.



Ultrazvučni senzori udaljenosti

Princip rada

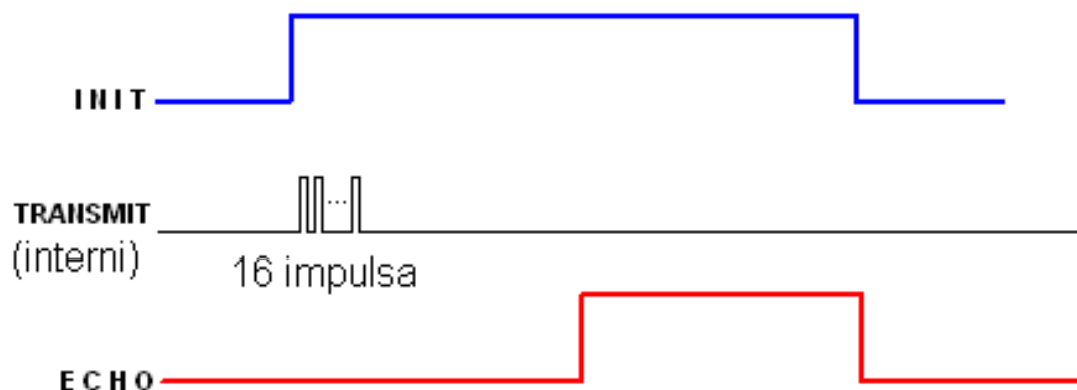
- INIT – signal za trigerovanje senzora (+5 V).
- TRANSMIT – slanje 16 pulseva (impulsa).
- ECHO – detektiranje povratnog echo signala.



Udaljenost do objekta:

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

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



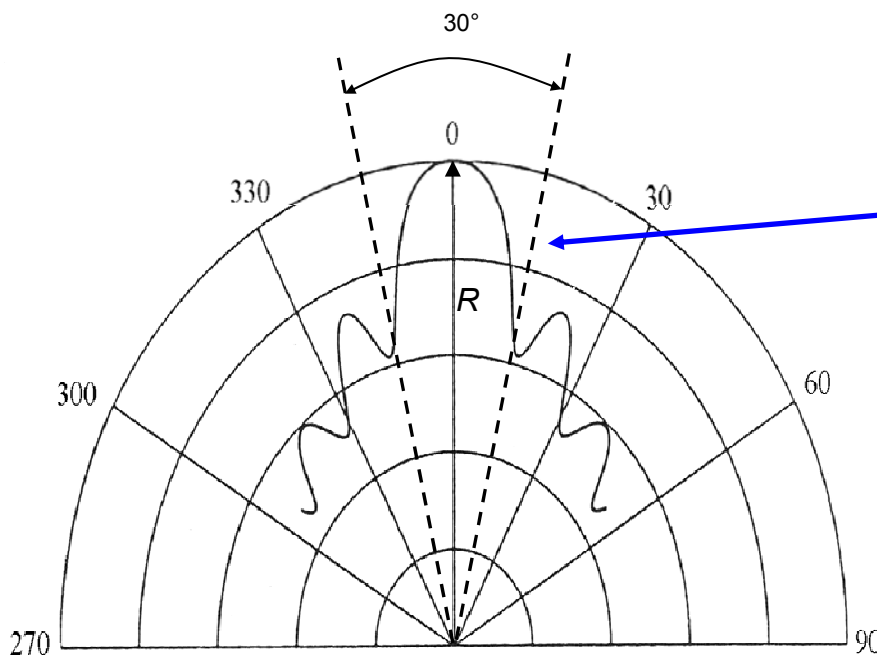
Ultrazvučni senzori udaljenosti



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:



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

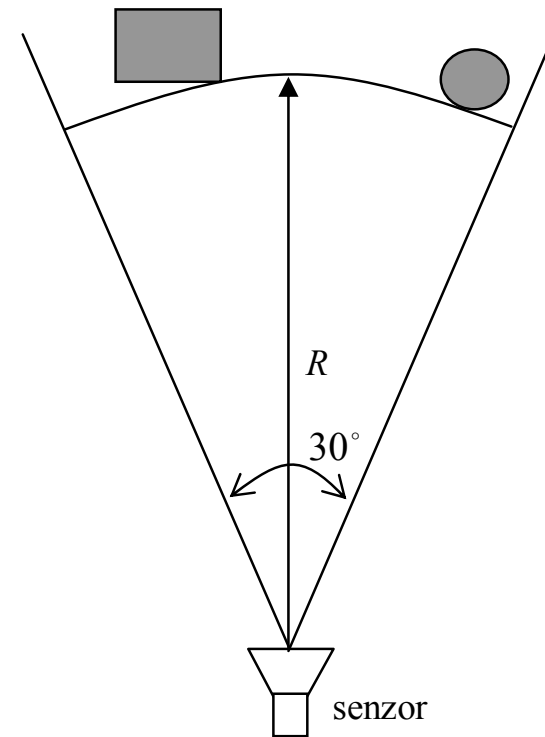
gdje je $J_1(\cdot)$ Besselova funkcija prvog reda, $k = 2\pi/\lambda$, λ je valna dužina; η je radijus klipa i φ je azimutni ugao mjeran u odnosu na centralnu os isijavanja.

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 prostiranja vala samo duž emisionog konusa širine 30° .
- **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° .
- 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).

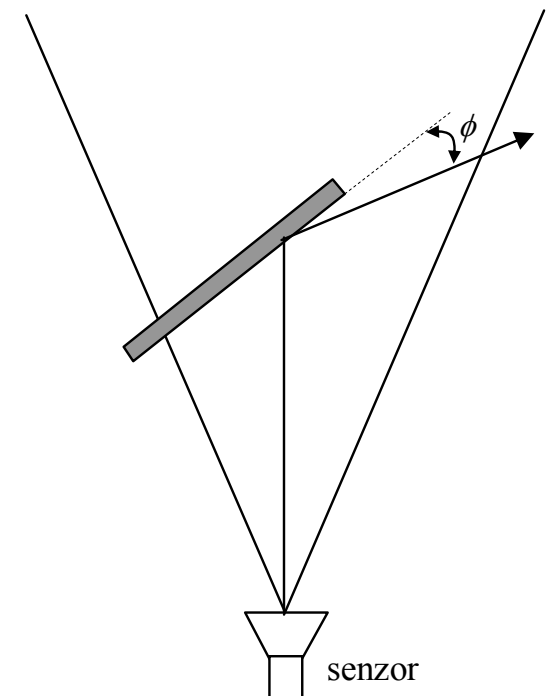
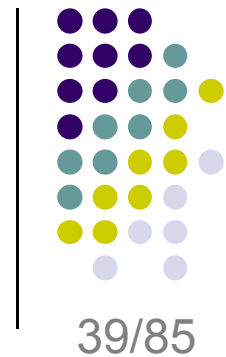


Emisioni konus senzora

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 ϕ , mjerenja nisu pouzdana jer su očitana nakon više refleksija ili nikakav odjek uopće nije očitana na prijemniku (slika desno).** Ugao ϕ ovisi o karakteristikama reflektivne površine, i za glatke površine iznosi 7-8° a za veoma hrapave površine može iznositi gotovo 90°.

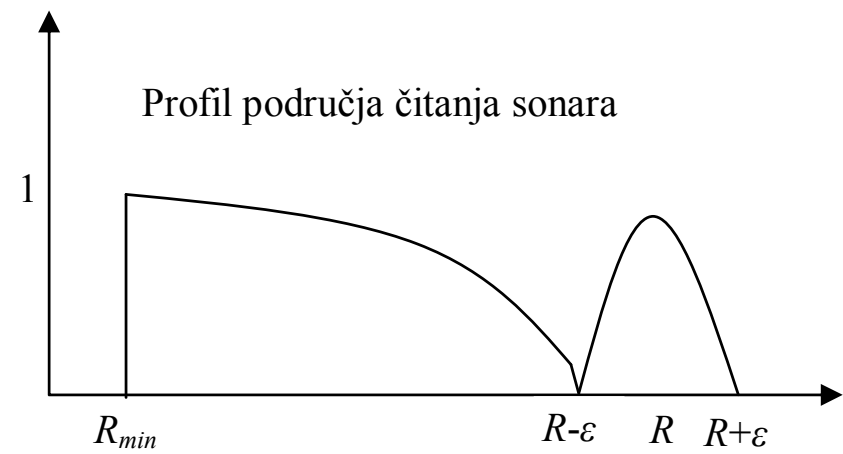


Lažno očitavanje senzora

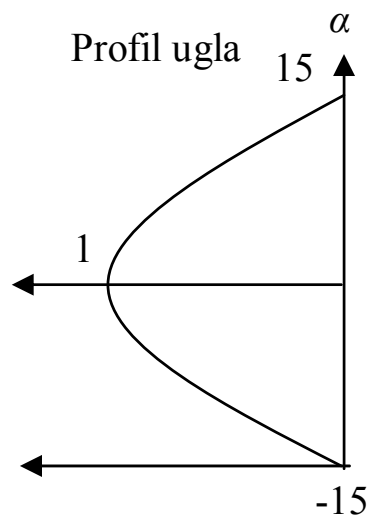
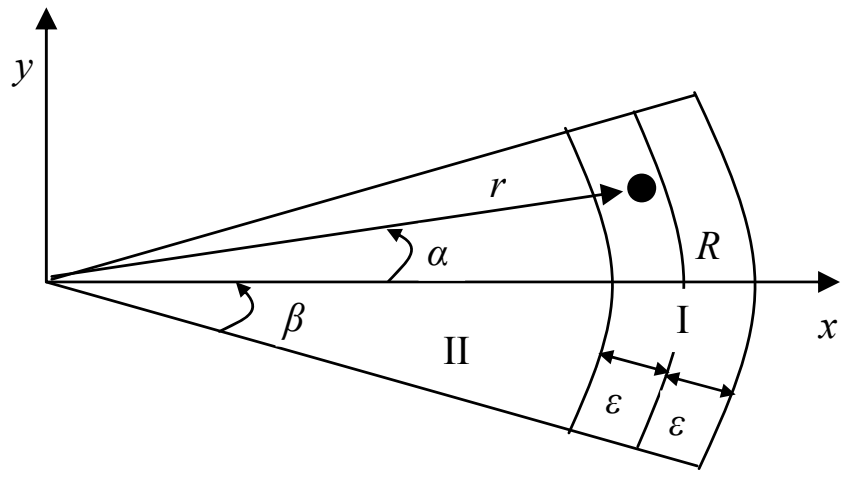
Ultrazvučni senzori udaljenosti

Model senzora

Profil modela senzora



Gdje su (r, α) koordinate tačke unutar konusa sonara (pozicija i orijentacija), a ε označava toleranciju za područje zauzeća.



Ultrazvučni senzori udaljenosti

Model senzora



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 $R_{min} < r < R - \varepsilon$:

$$m(Z) = 0$$

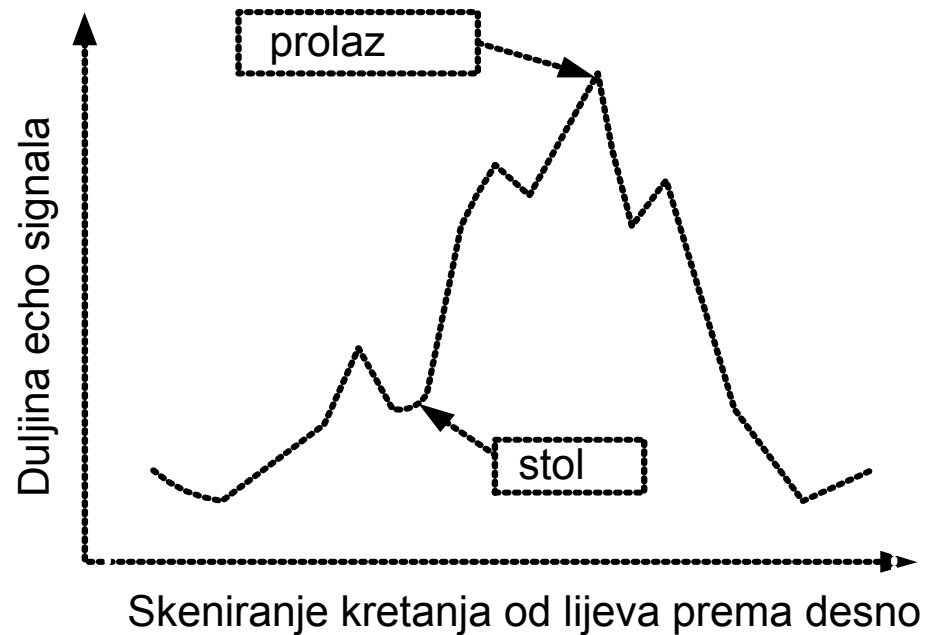
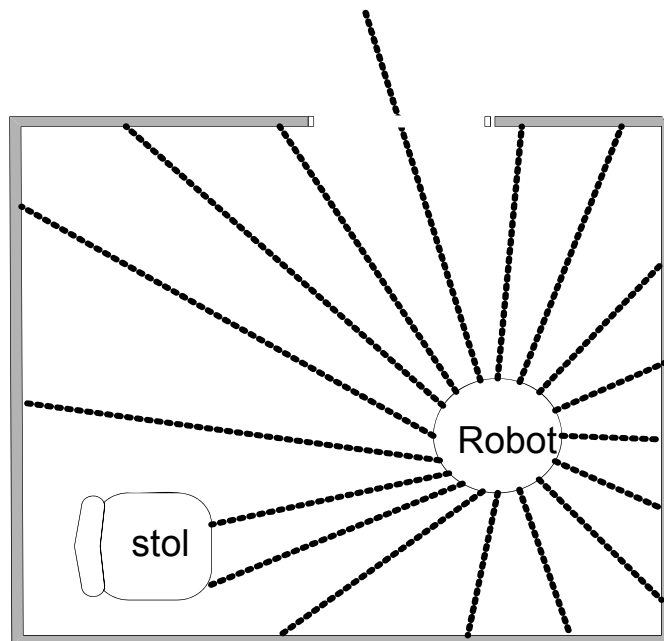
$$m(P) = \frac{\left(\frac{\beta - \alpha}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{R - \varepsilon - r}{R - \varepsilon}\right)^2}{2}$$

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

Ultrazvučni senzori udaljenosti

Primjena

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



Ultrazvučni senzori udaljenosti

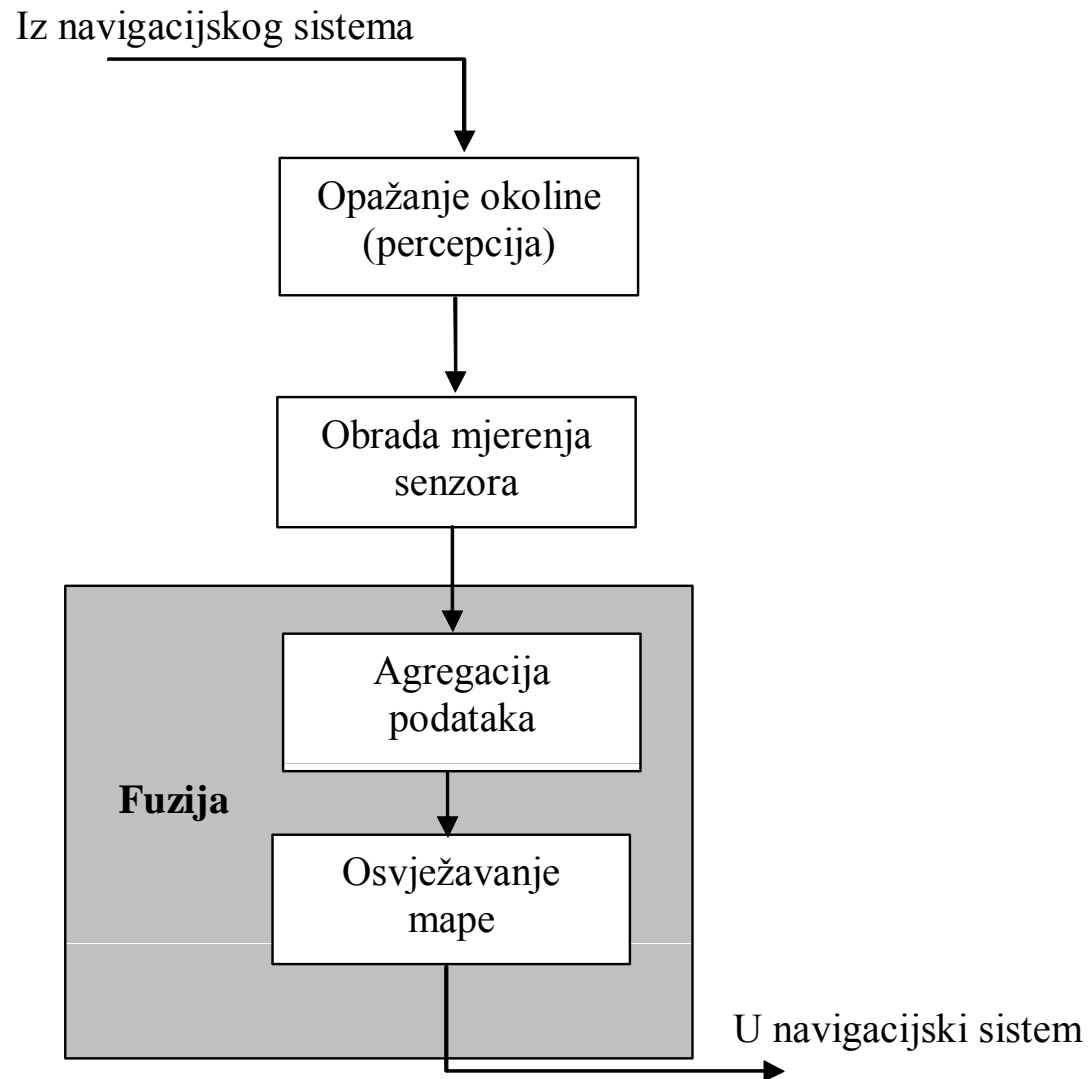
Primjena

- Skeniranje sa prstenom senzora (16 komada), gdje svaki pokriva po 15° 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 (generiraju signale jednakih frekvencija 49 kHz).
- Za otprilike 0.6 sekundi se obavi mjerenje svih 16 sonara.



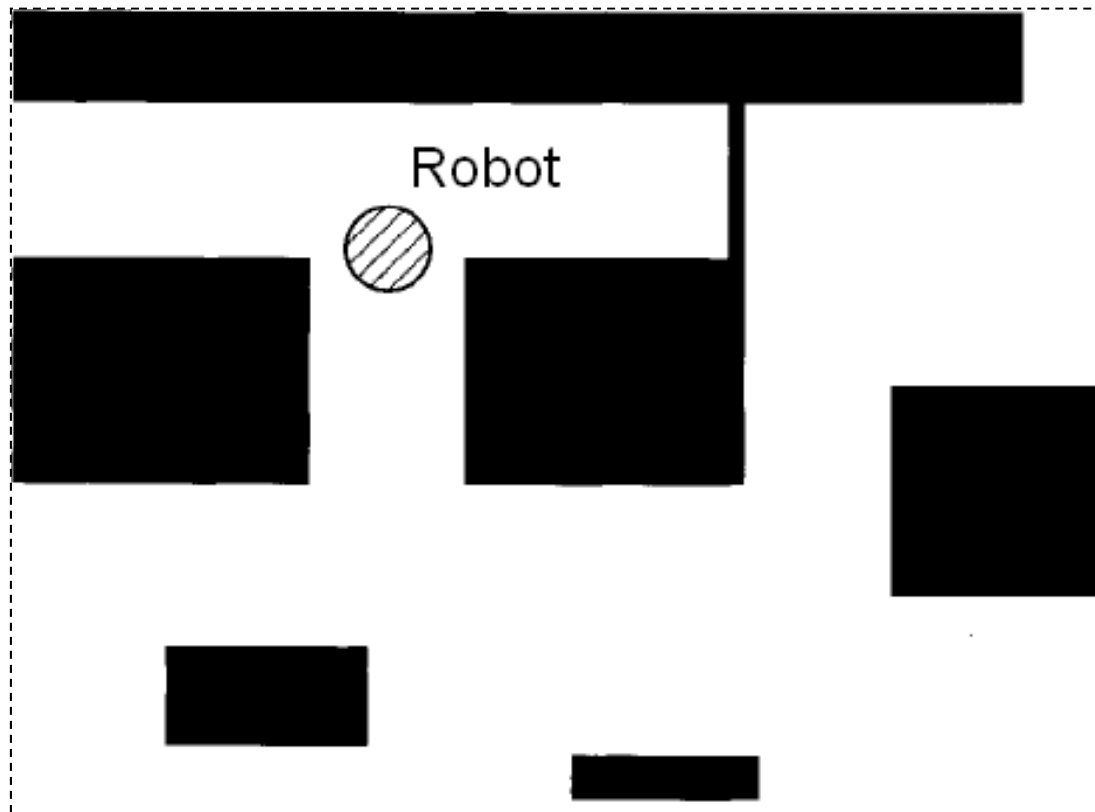
Ultrazvučni senzori udaljenosti

Primjena: proces gradnje mape



Ultrazvučni senzori udaljenosti

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

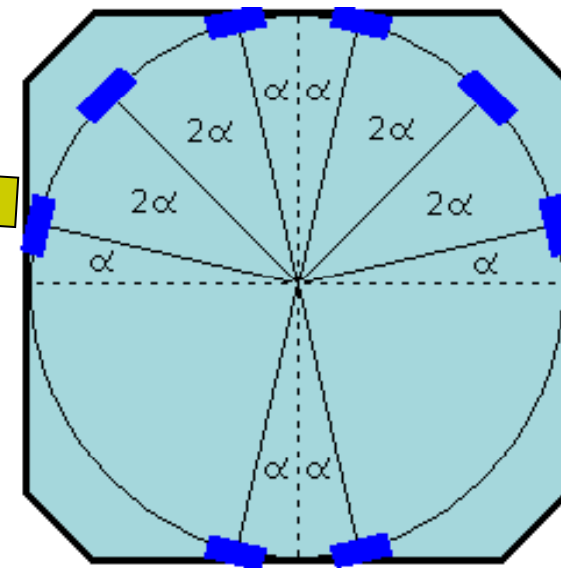
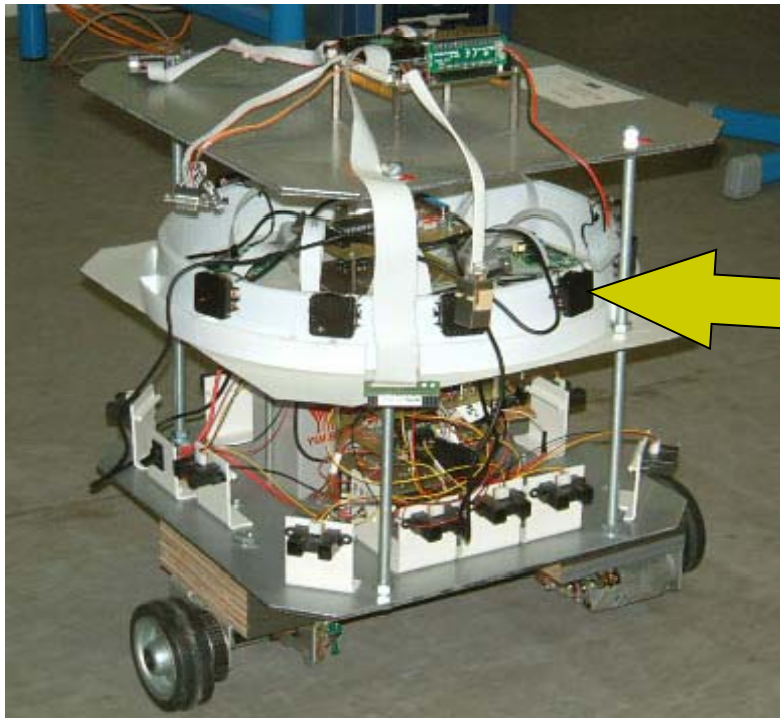


Mapa dobivena na temelju mjerenja ultrazvučnih senzora (mrežaste mape zauzeća)

Ultrazvučni senzori udaljenosti

Primjer: korištenje na mobilnoj platformi

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

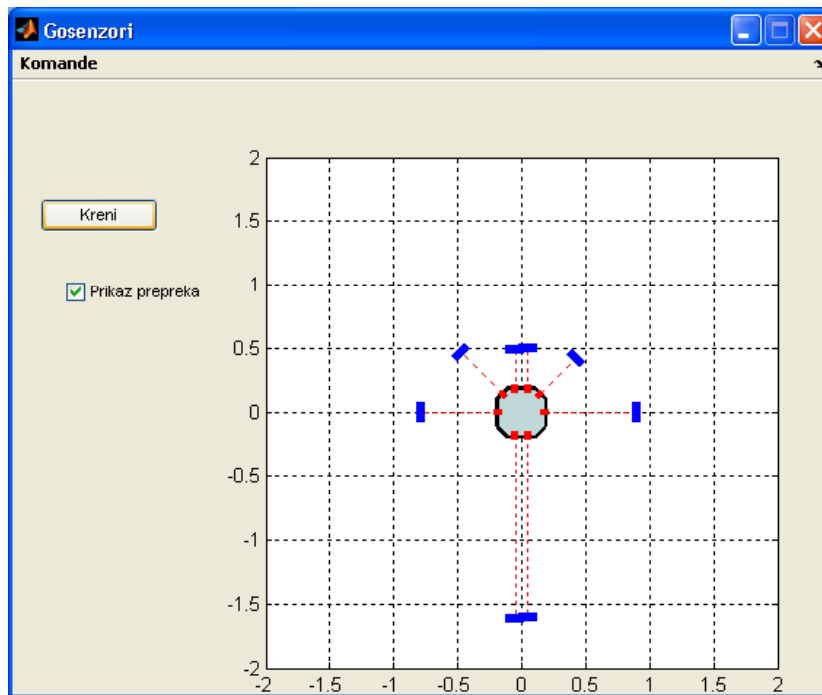


$$\alpha = 15^\circ$$

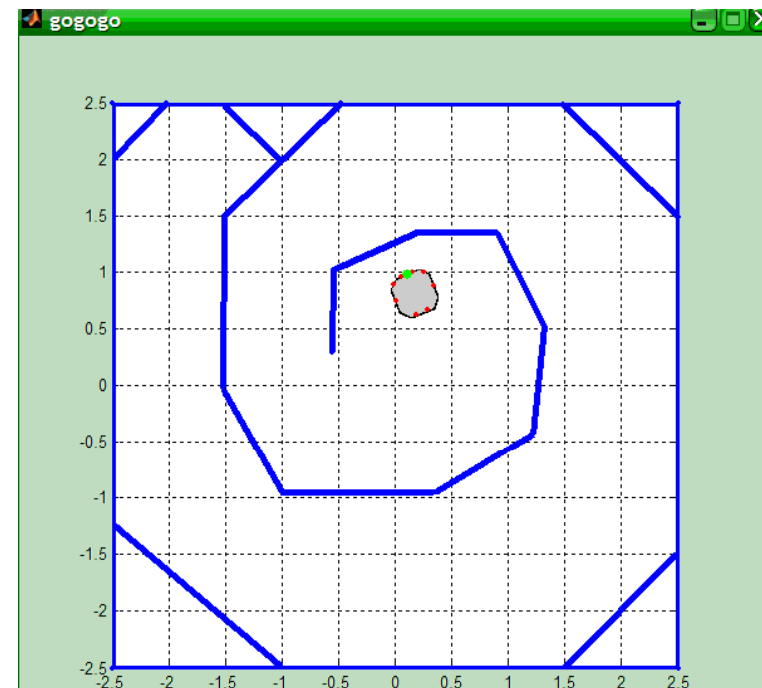
Ultrazvučni senzori udaljenosti

Primjer: korištenje na mobilnoj platformi

- Simulator za daljinsko upravljanje EMIR-a.



Simulator na master računaru



Simulator na slave računaru

Bežična komunikacija

4.6. Laserski senzor udaljenosti

- Značajno poboljšava mjerenja u odnosu na ultrazvučne senzore jer koristi **svjetlosne signale** umjesto zvučnih.
- **Njegov rad se temelji na mjerenju vremena prostiranja zrake.**
- Sastoji se od predajnika koji osvjetljava cilj sa 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.

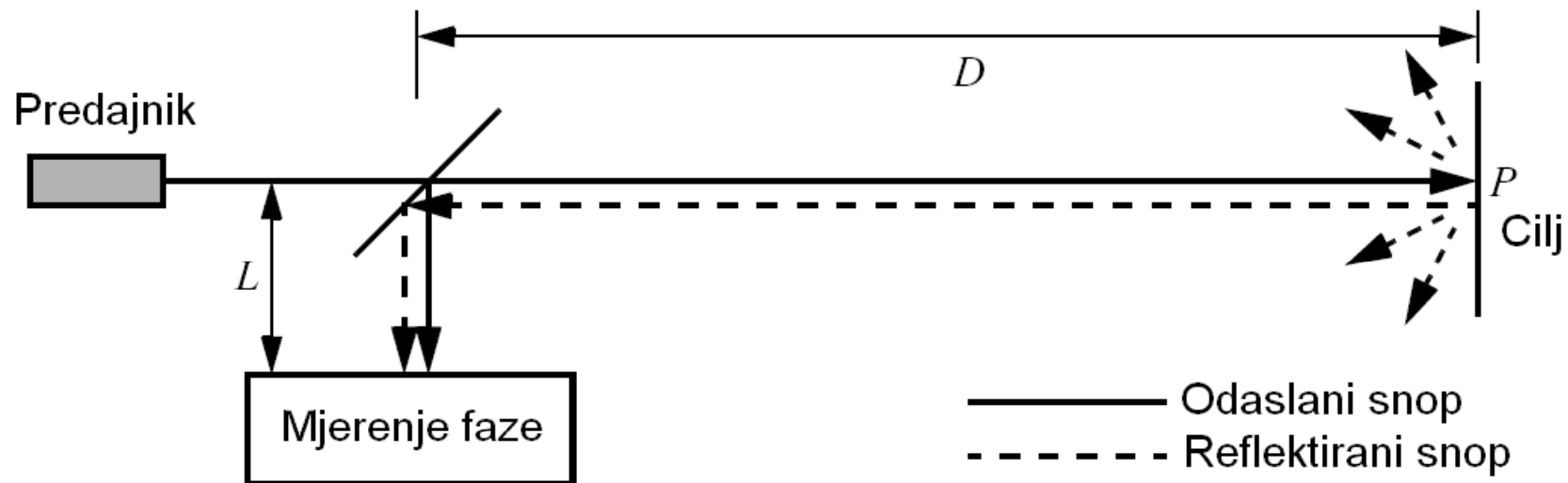


Laserski senzor udaljenosti

- 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.



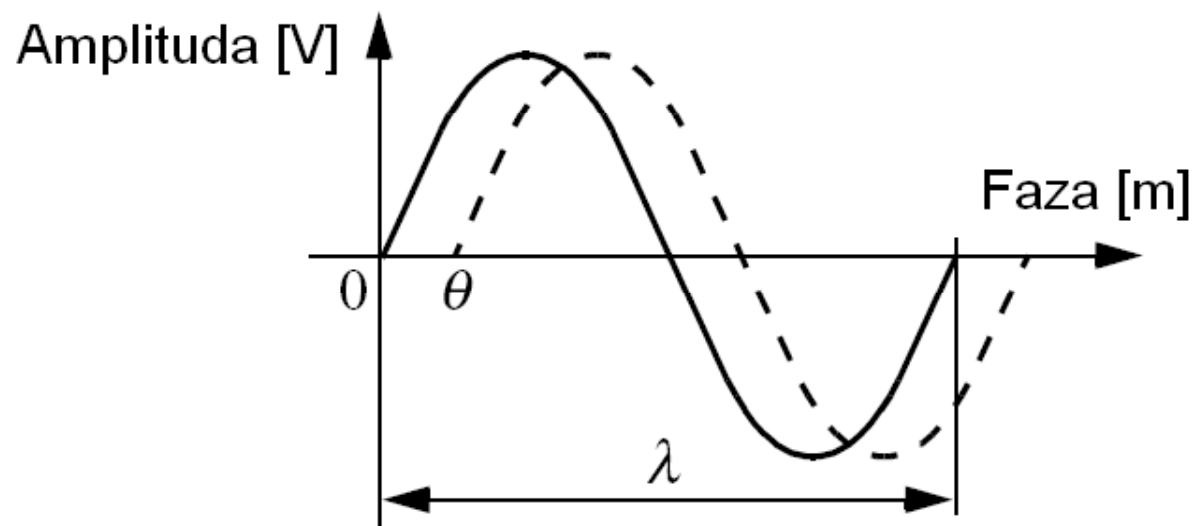
50/85



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 θ elektronički mjereni fazni pomak između odaslane i reflektirane zrake, a λ je poznata valna duljina.

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



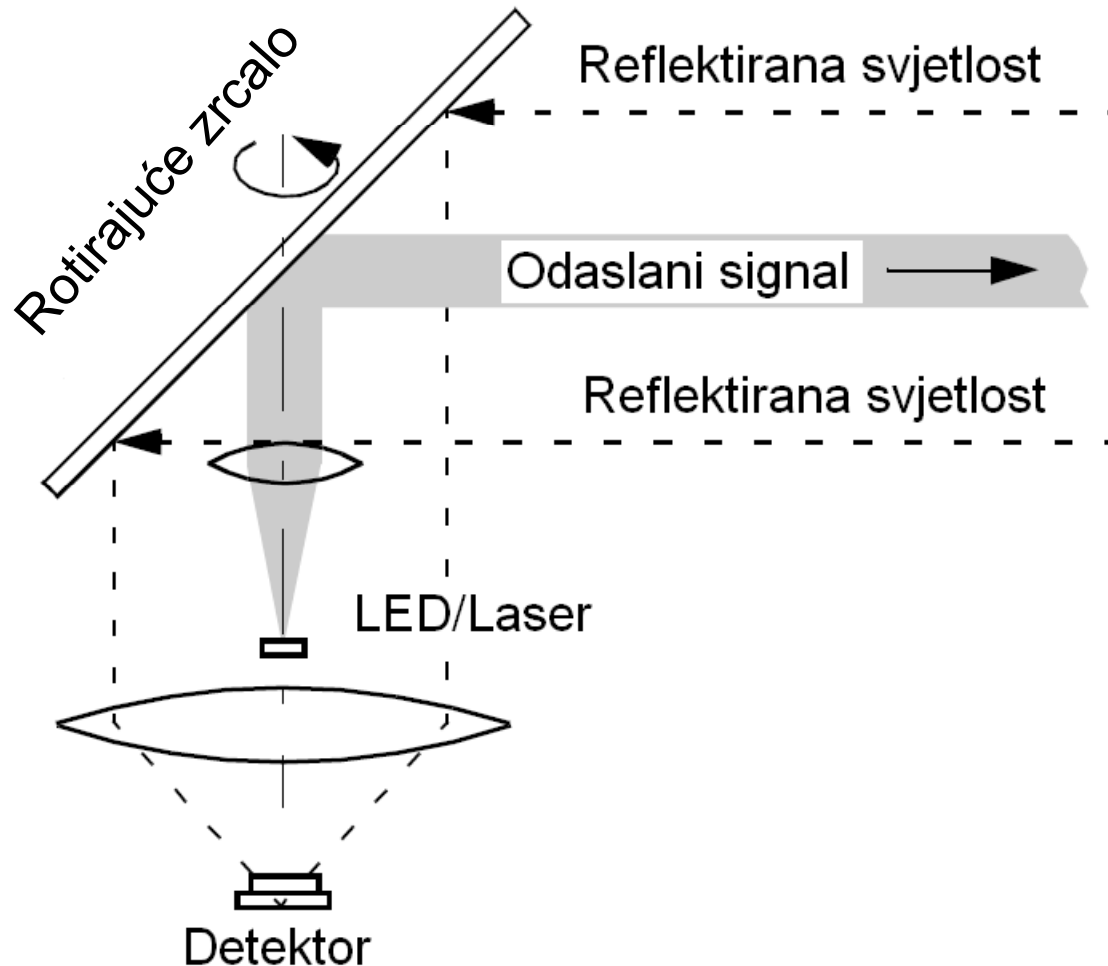
Laserski senzor udaljenosti

- 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 λ .
- U praksi se područje mjerenja laserskog senzora odabire znatno manjim od iznosa λ .
- 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° ako se koristi rotirajuće zrcalo.



Laserski senzor udaljenosti

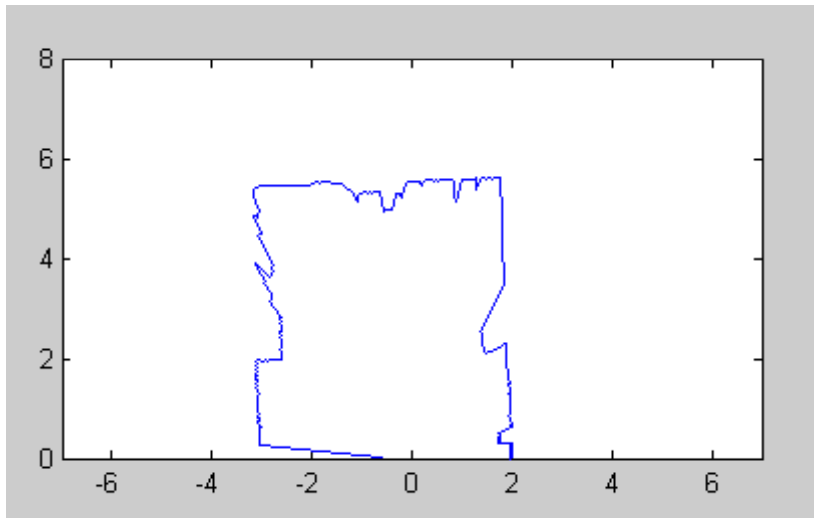
- **Primjer laserskog senzora udaljenosti**
 - Područje detekcije : 2-500 metara.
 - Rezolucija : 10 mm.
 - Polje pogleda : 100 - 180 stupnjeva.
 - Ugaona rezolucija : 0.25 stupnjeva.
 - Vrijeme skeniranja : 13 - 40 ms.
 - Imuni su na maglu i prašinu.



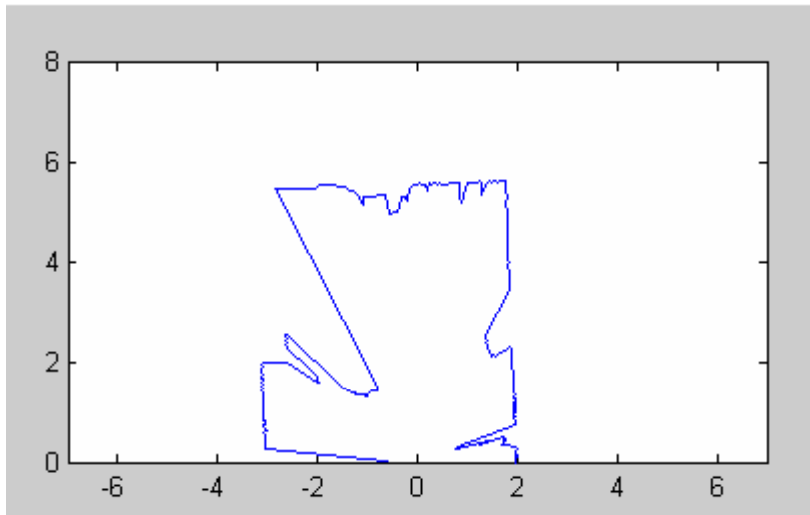
Laserski senzor udaljenosti

- 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



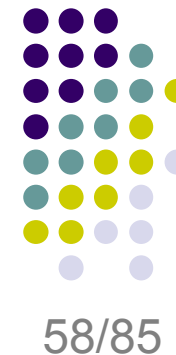
4.7. Senzor za globalno pozicioniranje

- 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).

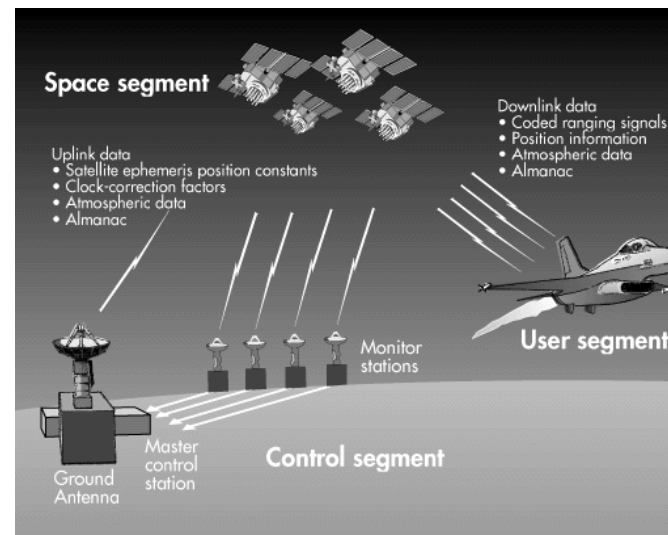


Senzor za globalno pozicioniranje

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.



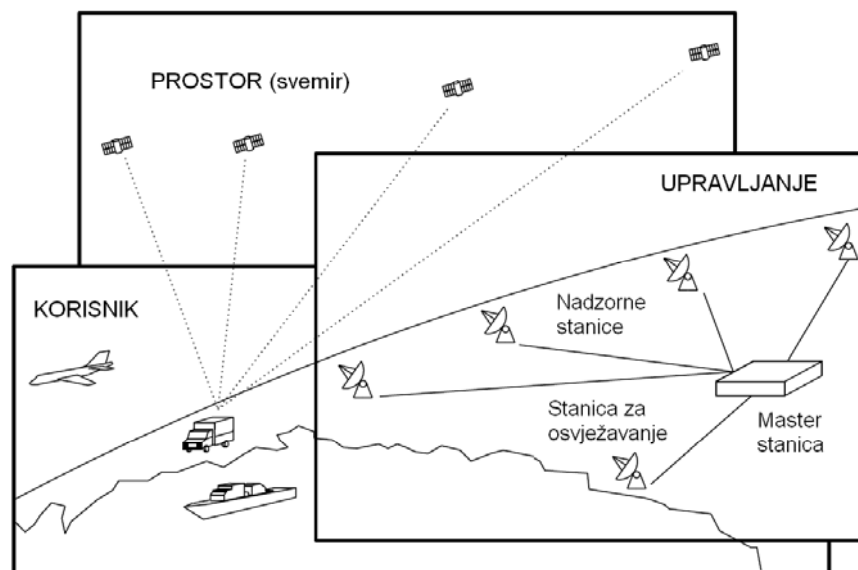
58/85



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 klokov**e (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.**



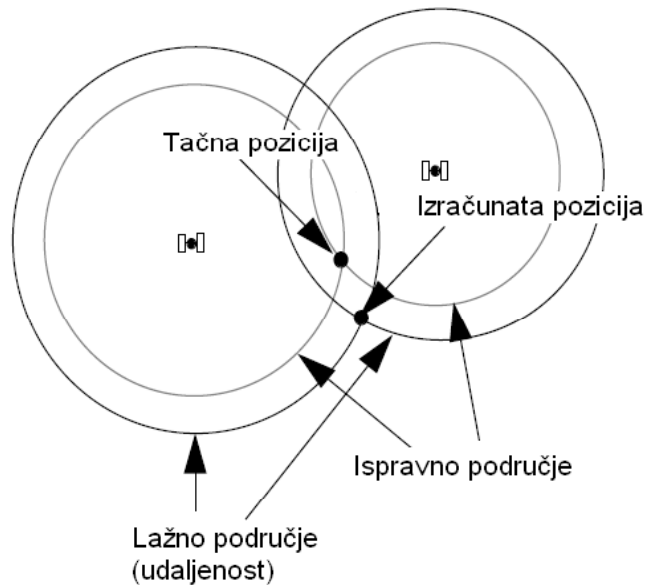
Senzor za globalno pozicioniranje

Mjerenje pozicije

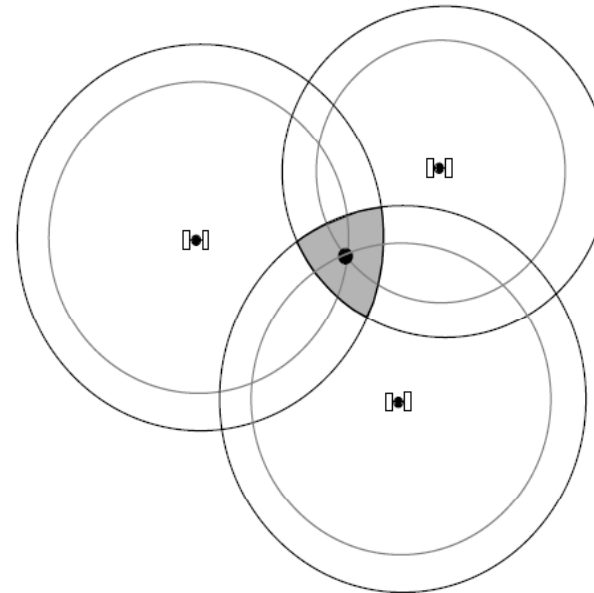


61/85

2 satelita u 2D



3 satelita u 2D



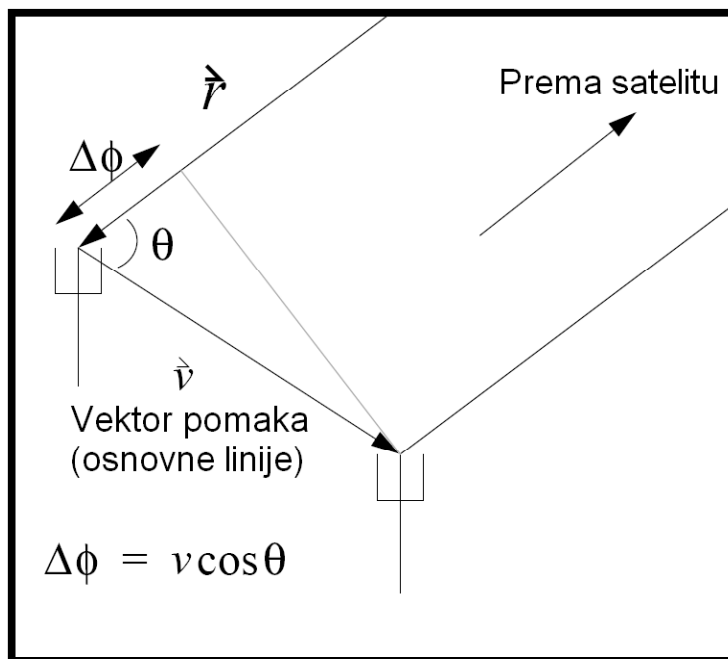
$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + c\Delta t \\ r_2 &= \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} + c\Delta t \\ r_3 &= \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} + c\Delta t \\ r_4 &= \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} + c\Delta t \end{aligned}$$

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

Senzor za globalno pozicioniranje

Mjerenje orijentacije

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



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

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

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.

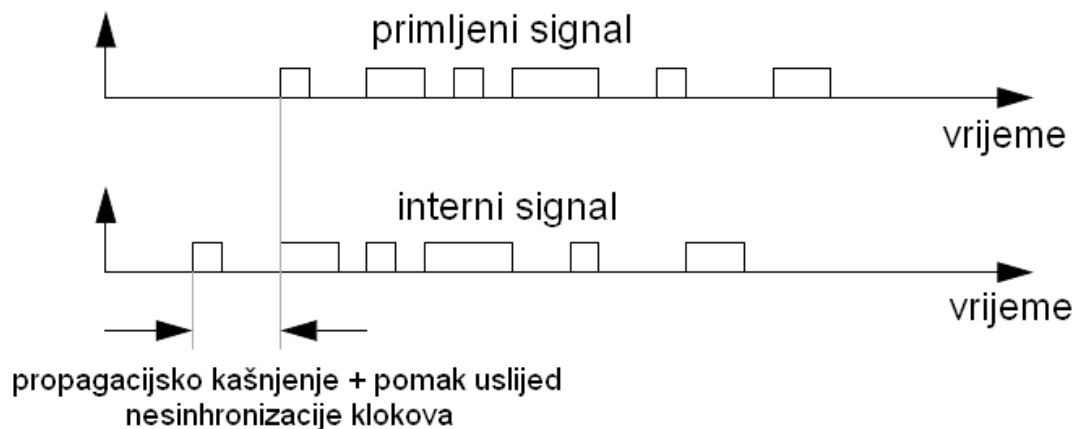
	C/A	P	NAV
L1	✓	✓	✓
L2		✓	✓



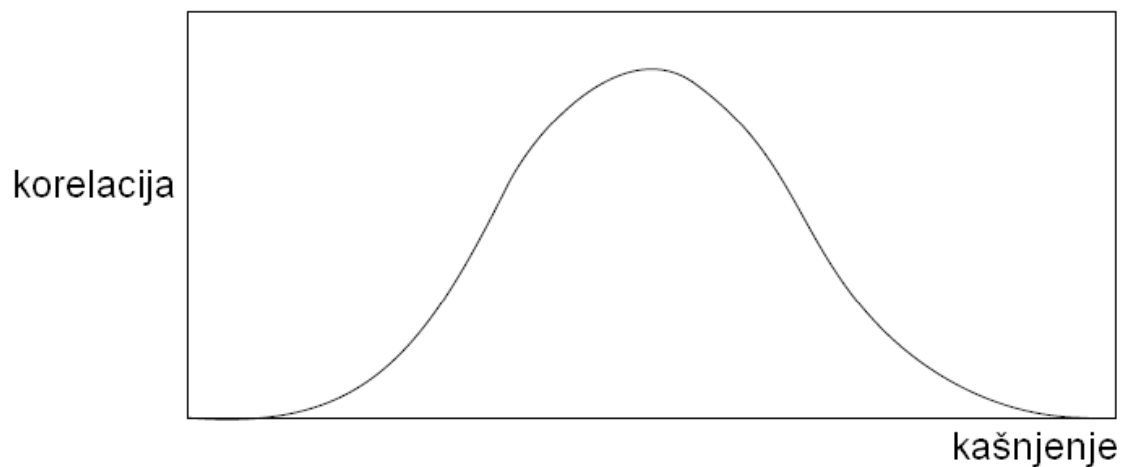
Senzor za globalno pozicioniranje

Operacije prijemnika (segment korisnika)

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



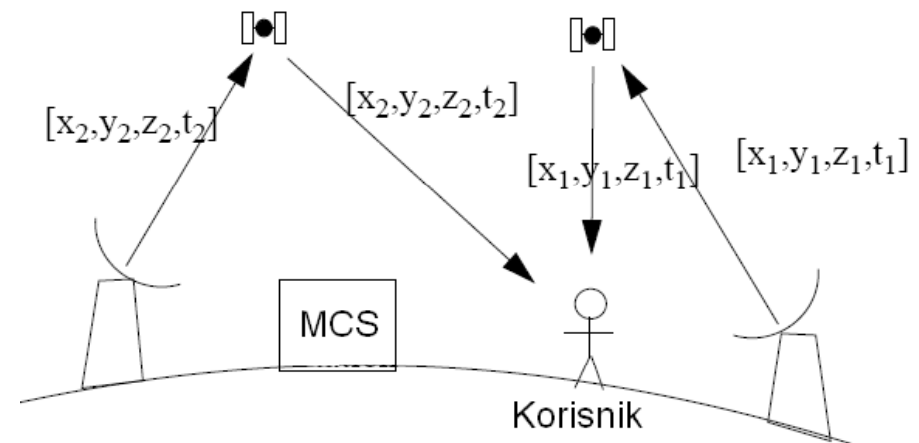
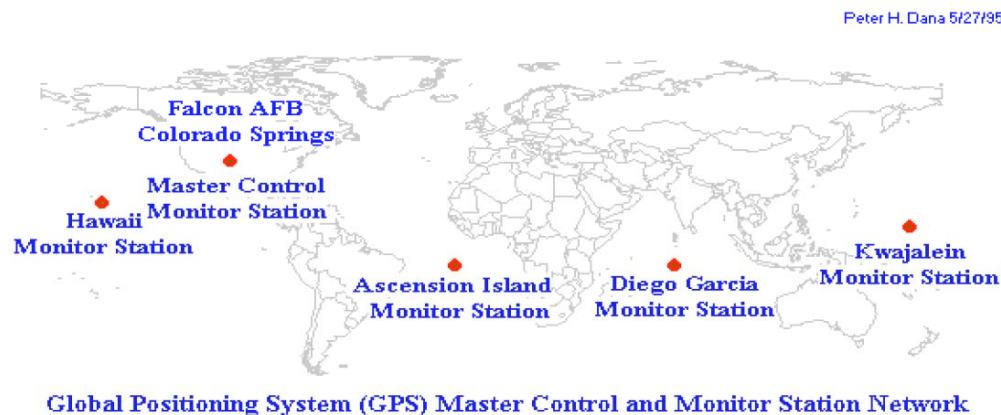
Prijemnik duplicira PRN kodove interno kako bi se slagao (poklapao) sa primljenim signalima.



Senzor za globalno pozicioniranje

Zemljani segment GPS sistema

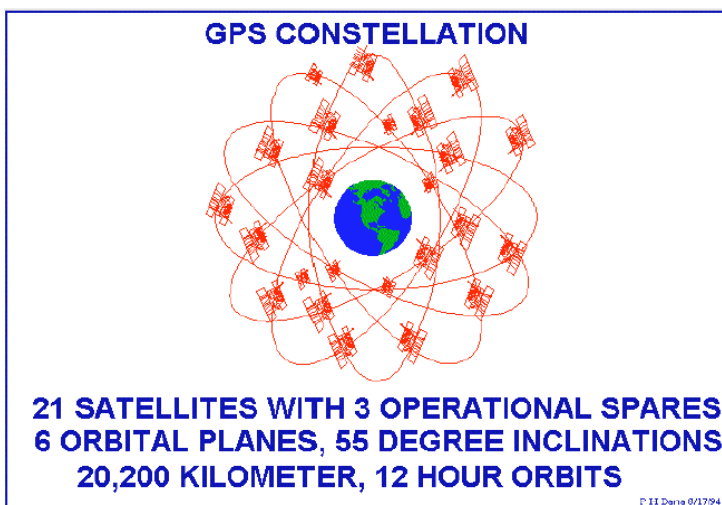
- Pet zemljanih stanica koje pokrivaju cijeli Svijet.
- Jedna od stanica predstavlja MCS (Master Control Station) koja veoma precizno prati satelite i održava cjelokupni sistem.
- Sateliti se prepodešavaju na svoje pozicije za kasniju retransmisiju ka prijemnicima.
- Ovo prepodešavanje (osvježavanje)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

4.8. Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Osnovni pojmovi

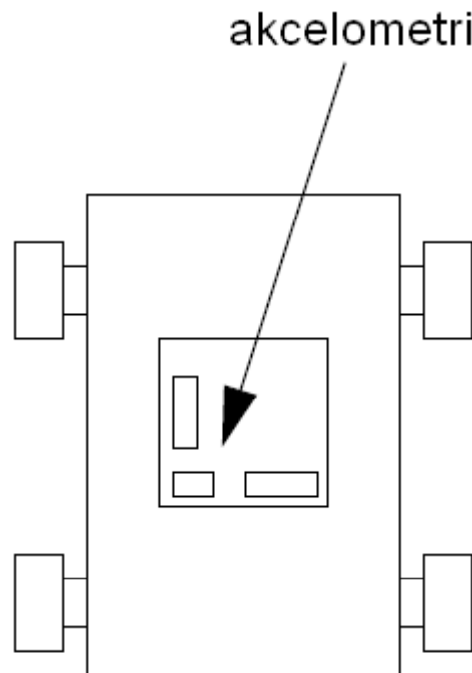
- Princip rada se temelji na konceptima zakona inercije (Newton-ovi zakoni).
- **Prednosti:**
 - mnogo su precizniji od standardnih odometrijskih sistema,
 - koriste se za potrebe navigacije u otvorenim, vanjskim prostorima,
 - funkcioniraju svuda gdje je informacija o gravitaciji dostupna,
 - ne zahtijevaju 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.

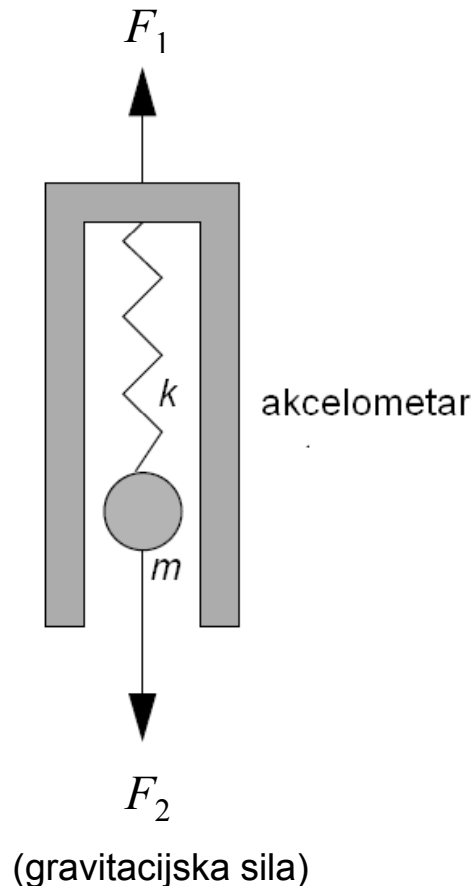


**Osim akcelometara,
mogu se koristiti
žiroskopi i
žirokompasi.**

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 koordinatnog 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 jednadžbu 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 zvati 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:

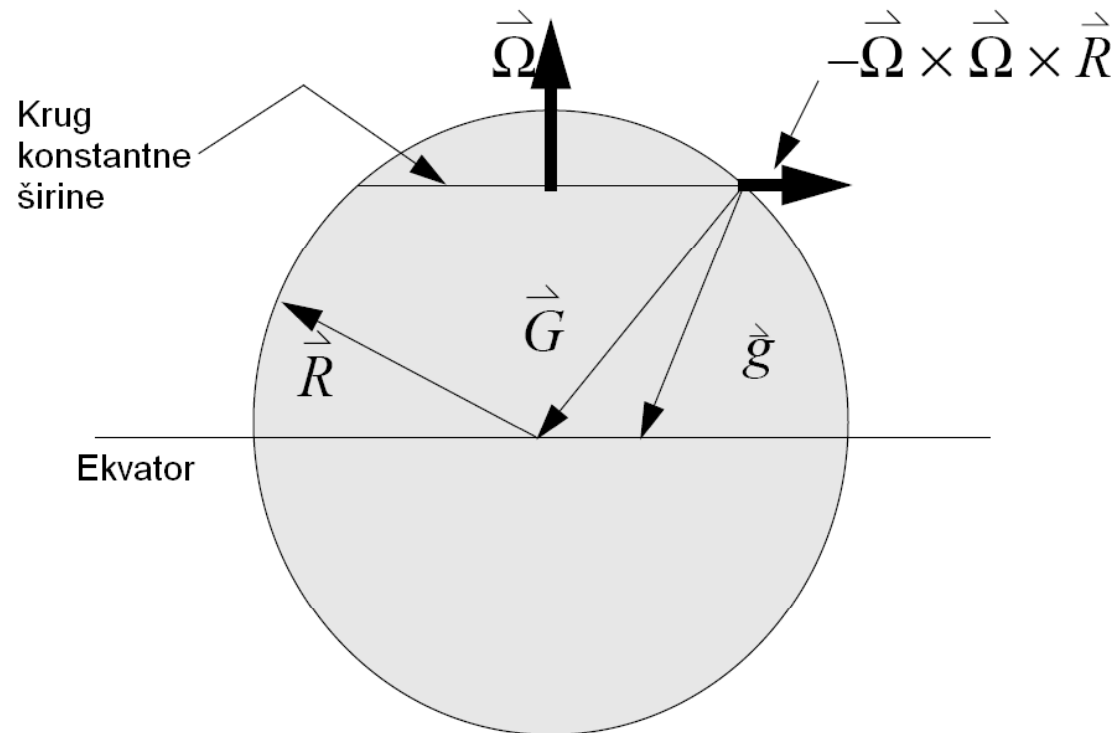
$$\vec{v}_e = \int_0^t [\vec{f}_1 - (\vec{\omega} + \vec{\Omega}) \times \vec{v}_e + \vec{g}] dt + \vec{v}_{e_0}$$
$$\vec{r}_e = \int_0^t \vec{v}_e dt + \vec{r}_{e_0}$$

Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Mehanizam inercijalnog sistema

- Newton-ov zakon gravitacije:

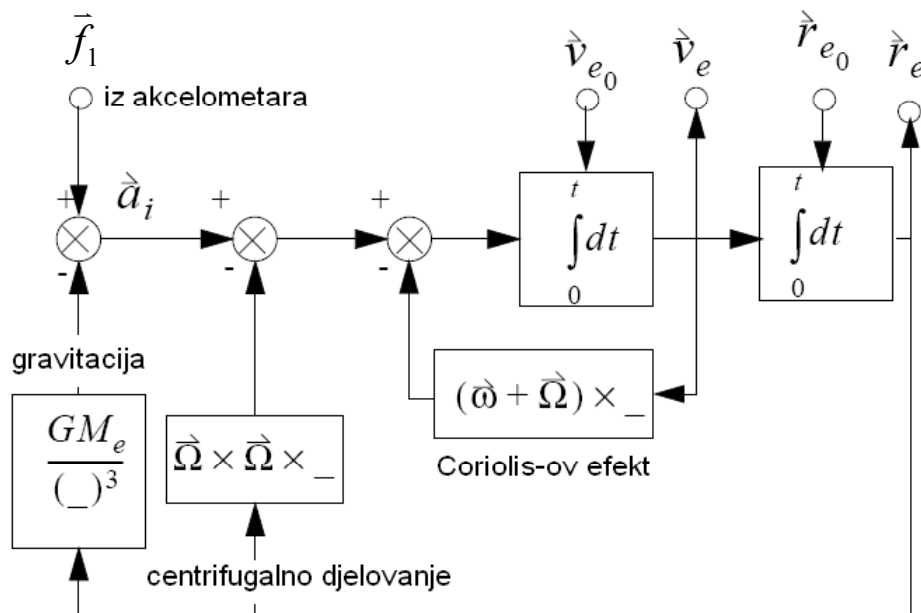
$$\vec{F}_2 = \frac{\vec{f}_2}{m} = - \left[\frac{GM_e}{R^3} \vec{R} \right]$$



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 slijedećoj 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	$\vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}_e$	1.5×10^{-4} g

Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Žiroskopi

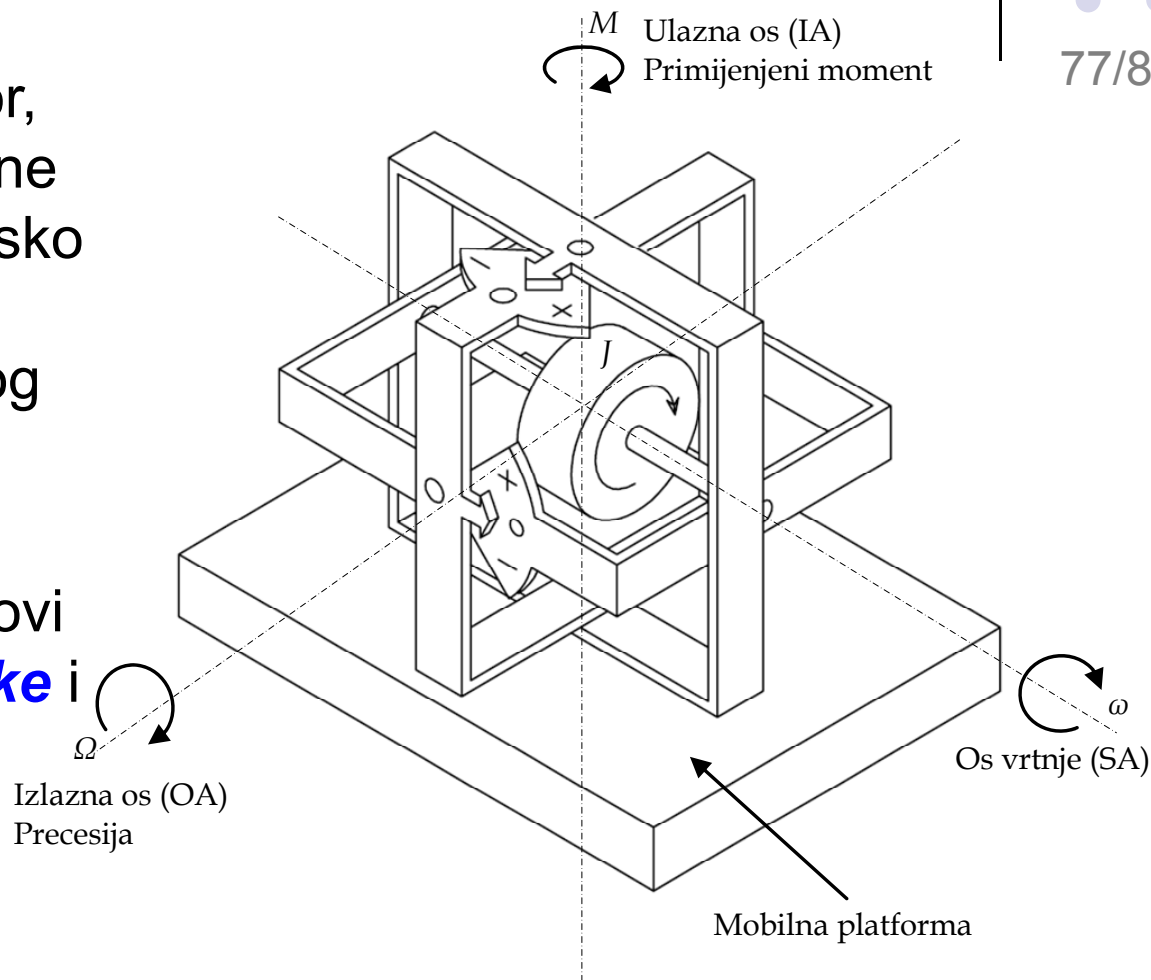
- Žiroskopi spadaju u skupinu orijentacijskih senzora koji mjere ugaono ubrzanje korištenjem Newtonovih zakona mehanike.
- Djelovanje žiroskopa temelji se na načelu konverzije ugaonog impulsa kretanja - **ukupni ugaoni impuls kretanja bilo koje čestice u sistemu s obzirom na neku fiksnu tačku u prostoru je konstantan, ukoliko na sistem ne djeluju vanjske sile.**
- Budući da je ugaoni impuls kretanja sačuvan, bilo koji pokušaj promjene orijentacije žiroskopa rezultira u efektivnoj sili koja će, ukoliko nije smetnja, voditi ka *precesiji*.
- Na temelju mjerenja ove sile određuje se promjena orijentacije. Tako se žiroskop može opisati kao diferencijalni kompas koji mjeri relativnu orijentaciju.



Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Žiroskopi

- Žiroskop je važan orijentacijski senzor, osobito tamo gdje ne postoji geomagnetsko polje (svemir) ili je jako izobličeno zbog utjecaja lokalnih magnetskih polja.
- Žiroskopi se u osnovi dijela na **mehaničke** i **optičke**.



Mehanički žiroskop

Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Žiroskopi

- Precesija žiroskopa:

$$\Omega = \frac{M}{J\omega}$$

- Za rad žiroskopa je od presudnog značaja Newtonov zakon kretanja za vrtnju, koji glasi:
vremenska promjena ugaonog impulsa kretanja oko neke osi jednaka je momentu primijenjenom oko te osi.
- Mehanički žiroskopi se obično koriste u računarski upravljanoj navigaciji, gdje mehanički žiroskop uključuje električki pogonski motor i električki čitač precesije, odnosno promjene orijentacije. Ovakav uređaj se naziva **brzinski žiroskop**.



Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Žiroskopi

- **Problem koji se javlja u estimaciji žiroskopske orijentacije je pojava malih pogreški koje se tokom vremena akumuliraju i dovode do posmaka (*drift*).**
- U mehaničkim sistemima, posmak nastaje uslijed trenja i neizbježnih nesavršenosti žiroskopa.
- Brzina porasta pogreške može varirati od 0.1 do nekoliko desetaka stupnjeva po sekundi ovisno o preciznosti strojne obrade.
- Alternativni pristup mjerenja apsolutne orijentacije koristi ***optički fenomen*** kojeg je otkrio George Sagnac 1913. godine, koji je po njemu dobio naziv *Sagnacov efekat*.



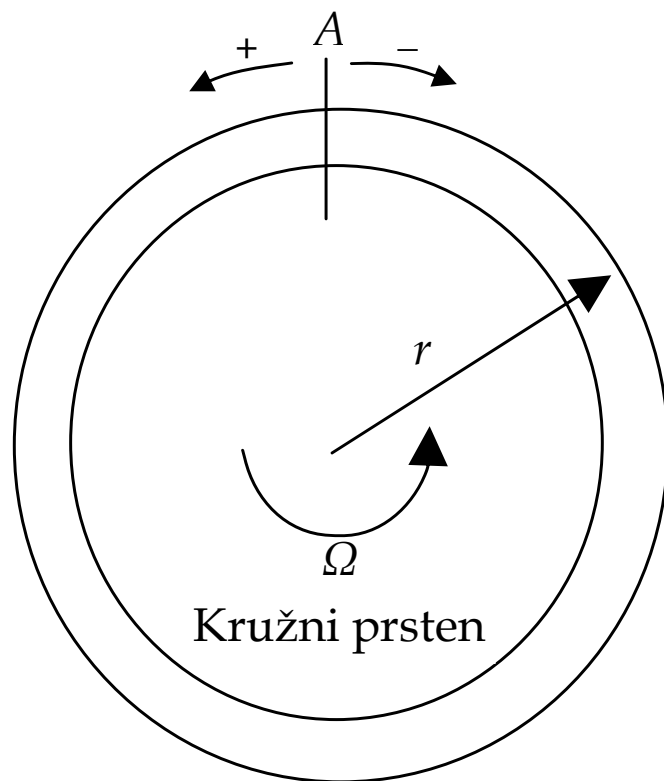
Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Žiroskopi

- Sagnacov fenomen je omogućio razvoj optičkog žiroskopa koji ne posjeduje pokretne dijelove.



80/85



Sagnacov efekat se temelji na tvrdnji da dvije svjetlosne zrake koje ulaze u rotirajući optički prsten u tački A imaju različita vremena prolaska punog kruga. Vremena punog kruga za navedena dva slučaja iznose:

$$t_+ = \frac{2\pi r + r\Omega t_+}{c} \quad t_- = \frac{2\pi r - r\Omega t_-}{c}$$

Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Žiroskopi

- Razlika prijeđenih puteva (u praktičnim situacijama vrijedi: $((r\Omega)^2 \ll c^2)$):

$$\Delta L = c\Delta t = \frac{4\pi r^2 \Omega}{c}$$

- **Laserski optički žiroskop** (RLG – ring laser gyros) mjeri ΔL na principu optičke rezonancije.
- Temelji se na svojstvima "optičke šupljine" prstena da generira koherentnu svjetlost, pri čemu je prsten ispunjen svjetlećim medijem, obično helij-neonom.



Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Žiroskopi

- Da bi se ovaj efekat pojavio, mora biti ispunjen uvjet rezonancije: "Pređeni put svjetlosne zrake L kroz prsten mora biti cjelobrojni višekratnik m valne duljine λ ".
- Ovo se može iskazati slijedećim izrazom:

$$m\lambda = L$$

- Uvjet rezonancije se može iskazati i preko rezonantne frekvencije ($\lambda = c/f$):

$$f = \frac{mc}{L}$$



Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Žiroskopi

- Iz gornjeg izraza slijedi:

$$\Delta f = f_+ - f_- = \frac{mc}{L_+} - \frac{mc}{L_-} \approx \frac{mc\Delta L}{L^2} = f \frac{\Delta L}{L}$$

- Prema tome, laserski optički žiroskop mjeri razliku frekvencija svjetlosnih zraka (Dopplerov efekat).
- Osim ovog žiroskopa postoji i **fiber optički žiroskop** (FOG – fibre optic gyros).
- Ovaj optički žiroskop koristi tehnologiju jednomodalnih optičkih vlakana.



Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Kompasi i inklinometri

- Kompasi mjere orijentaciju mobilnog robota u odnosu na magnetske polove Zemlje.
- Oni također spadaju u skupinu orijentacijskih senzora.
- Postoje dvije vrste kompasa:
- **Magnetski kompasi** koriste magnetsko polje Zemlje za orijentiranje kompasa omogućujući magnetu rotiranje u horizontalnoj ravnini i poravnavanje sa vektorom magnetskog polja Zemlje. Važno je napomenuti da magnetsko polje Zemlje nije konstantno i uniformno. Drugim riječima ono se mijenja i vremenski i prostorno.



Inercijalni navigacijski sistemi (INS)

Kompasi i inklinometri

- **Žirotekpas** uvijek pokazuje na Sjeverni pol Zemljine kugle.
- Ako ne pokazuje na Sjeverni pol tada se pojavljuje precesijski moment koji ga vraća natrag.
- Smjer i iznos nagiba diska žirotekpassa proporcionalan je smjeru i iznosu ugla između osi vrtnje diska tekpasa i osi vrtnje Zemlje.
- U mobilnoj robotici se najčešće susreću "fluxgate" žirotekpassi.
- **Inklinometri** mjere orijentaciju vektora gravitacije.

