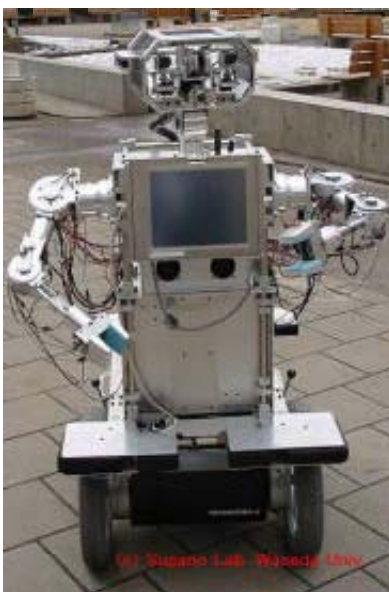


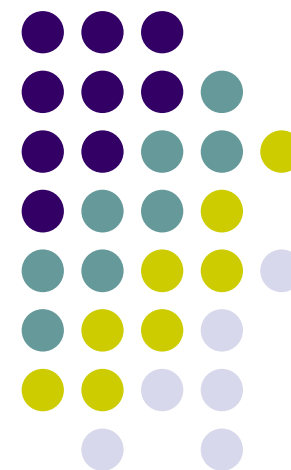
# Lekcija 7: *Odometrijska lokalizacija*



Prof.dr.sc. Jasmin Velagić  
Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Mobilna robotika

2012/2013





## 7.1. Uvod

- **Fundamentalni problem u mobilnoj robotici jest imati stvarno znanje o poziciji robota u svakom vremenskom trenutku, odnosno znati gdje se on nalazi.**
- Poznavanje pozicije robota je potrebno radi planiranja odgovarajućih kretanja.
- Problem pozicioniranja uključuje **estimaciju lokacija** robota s obzirom na globalni prikaz prostora.
- Ovakva definicija upućuje na **jaku lokalizaciju**.
- Za razliku od jake, **slaba lokalizacija** uključuje samo poznavanje da li je trenutna lokacija ranije posjećivana.

## Uvod

- Uz problem slabe lokalizacije je vezano pitanje: "**Da li sam ranije bio ovdje?**".
- Iz postupka slabe lokalizacije mogu se konstruirati mape.
- Između jake i slabe lokalizacije postoji čitav niz različitih problema koji uključuju poznavanje gdje je robot ili estimaciju poze robota.
- Tragajući za rješenjem, naučnici i istraživači su razvili različite sisteme, senzore i postupke za pozicioniranje mobilnog robota.



# Uvod

- Postupci određivanja (estimacije) pozicije mogu se svrstati u dvije velike grupe (Borenstein, Everett i Feng, 1996):
  - 1. Mjerenja relativne pozicije** (također poznata pod imenom dead-reckoning):
    - **Odometrija,**
    - **Inercijalna navigacija.**



# Uvod

## 2. Mjerenja apsolutne pozicije (engl. reference-based systems):

- **Magnetski kompasi.**
- **Aktivni svjetionici (engl. active beackon).**
- **Globalni pozicijski sistemi (engl. global positioning systems, GPS).**
- **Navigacija na temelju orijentira (engl. landmark navigation).**
- **Slaganje modela (engl. model matching).**



## Uvod

- Navedene dvije grupe metoda nazivaju se još i **unutarnje** i **vanjske** metode.
- Unutarnje metode se temelje na kretanju ili silama koje robot sam proizvodi, dok vanjske koriste određene signale iz okoline za registriranje robotske pozicije.
- Pri tome, signal može biti prirodno dešavajući, kao što je magnetno polje Zemlje, i umjetno kreiran u svrhu registracije pozicije, što je slučaj sa GPS-om.



## Uvod

- Često se kombinira više različitih metoda kada se radi o robusnoj estimaciji, naprimjer, korištenje GPS-a i inercijalnih sistema.
- U ovom slučaju, snage sistema su komplementarne.
- **GPS daje informaciju o globalnoj poziciji**, ali sa tendencijom pojave visokofrekvencijskih pogrešaka u kratkom vremenskom intervalu.
- **INS iskazuje drift s vremenom**, ali daje preciznu estimaciju za mala lokalna kretanja.





## 7.2. Odometrijska lokalizacija

- U tipičnoj zatvorenoj sredini (engl. indoor) sa ravnom podlogom, **lokalizacija podrazumijeva određivanje pozicije  $(x,y)$  i orijentacije  $\theta$  robota u dvodimenzionalnom prostoru (ravnini).**
- Kod robota sa dva kotača, odometrija (izračunavanje koordinata položaja - engl. dead-reckoning) predstavlja jedan od najvažnijih postupaka izvršenja navedenog zadatka.
- **Odometrija mjeri rotaciju kotača kao funkciju vremena.**



## Odometrijska lokalizacija

- **Ako su oba kotača mobilnog robota spojena preko zajedničke osovine, tada se pozicija i orijentacija osovine u odnosu na prethodnu poziciju i orijentaciju može odrediti odometrijskim mjerenjima provedenim na oba kotača.**
- U praksi, optički enkoderi, ugrađeni na oba pogonska kotača, daju diskretizirane inkrementalne informacije centralnom procesoru, koji po ustaljenom redoslijedu kontinuirano prepodešava stanje robota, korištenjem geometrijskih jednažbi.





## Odometrijska lokalizacija

- Međutim, s vremenom, **odometrijska lokalizacija akumulira pogreške** na neograničen način zbog **klizanja kotača**, **hrapavosti podloge** i **diskretiziranog uzorkovanja pomaka kotača**.
- U idealiziranom slučaju, bez postojanja pogreški, položaj mobilnog robota može se estimirati integracijom vektora brzina:

$$\mathbf{x} = \int_{t_0}^{t_f} \frac{d\mathbf{x}}{dt} dt$$

gdje se promatra kretanje od trenutka  $t_0$  do trenutka  $t_f$ .

# Odometrijska lokalizacija

- Ako se informacija o kretanju robota dobiva iz derivacija višeg reda, npr. ubrzanja, tada se položaj robota određuje pomoću dvije uzastopne integracije.
- **U slučajevima višestrukih integracija, pogreške senzorskih mjerenja poprimaju oblike polinoma višeg reda, ovisno o broju provedenih integracija.**
- Položaj mobilnog robota u diskretnom slučaju se mijenja u ovisnosti o vektoru diferencije brzina  $\delta_i$ :

$$\mathbf{x} = \sum_i \delta_i$$



# Odometrijska lokalizacija

- Ovaj postupak estimacije pozicije igra važnu ulogu u mnogim mobilnim robotskim sistemima.
- **Poznavanjem startne pozicije, nakon nekoliko ponovljenih kretanja, može se izračunati ciljna pozicija.**
- **Za veća ili složenija kretanja, međutim, neizbježne su pogreške u pojedinačnim estimacijama pozicije koje imaju dominantno djelovanje na performanse sistema.**
- Jednostavne pogreške se mogu na neki način korigirati, ali znatno složenije pogreške je gotovo nemoguće eliminirati.



# Odometrijska lokalizacija

- Odometrija se koristi gotovo u svim mobilnim robotima zbog sljedećih razloga:
- Odometrijski podaci se mogu kombinirati (izvršiti fuzija) sa mjerenjima apsolutne pozicije s ciljem postizanja bolje i tačnije estimacije položaja.
- Odometrija se može koristiti unutar pretpodešavanja pozicije pomoću orijentira. Za zadanu zahtijevanu tačnost pozicioniranja, povećanje tačnosti odometrije omogućuje pretpodešavanje apsolutne pozicije za manje frekvencije. Kao rezultat, potrebno je manje orijentira za prelaženje zadane udaljenosti.



# Odometrijska lokalizacija

- Mnogi algoritmi planiranja i slaganja orijentira pretpostavljaju da robot može održavati svoju poziciju dovoljno dugo kako bi mogao vidjeti orijentire u ograničenom području i usporediti karakteristike u ograničenom prostoru bržim vremenskim procesiranjem i poboljšati korektnost poklapanja.
- U nekim slučajevima odometrije samo su informacije o navigaciji raspoložive, naprimjer, kada vanjske reference nisu dostupne, kada okolnosti ne dozvoljavaju pozicioniranje ili izbor orijentira u okolini, ili kada neki drugi senzorski podsistem zakaže u osiguravanju potrebnih podataka.



## 7.3. Pogreške odometrije

- Postupak odometrije, kako je ranije navedeno, temelji se na jednostavnim jednadžbama koje se jednostavno implementiraju i koje koriste podatke iz jeftinih inkrementalnih enkodera kotača.
- Međutim, odometrija se također temelji na činjenici da rotacija kotača može biti translaticirana u linijske pomake relativne u odnosu na ravnu površinu po kojoj se mobilni robot kreće.
- Ova pretpostavka je ograničene validnosti.

## Pogreške odometrije

- Jedan ekstreman primjer jest klizanje kotača: ako jedan kotač kliže, recimo po prolivenom ulju, tada će pridruženi mu enkoder registrirati rotaciju kotača čak i kada ove rotacije ne odgovaraju linearnim pomacima kotača.
- Zajedno sa ekstremnim slučajem totalnog klizanja, postoji nekoliko važnih razloga za netačnost u translaciji čitanja enkodera kotača u linijsko kretanje. Izvori svih ovih pogrešaka mogu se grupirati u dvije kategorije: **sistemske** i **nesistemske pogreške**.





## Pogreške odometrije

- Sistemske pogreške proizlaze iz sljedećih činjenica:
  - **nejednaki polumjeri kotača,**
  - **srednja vrijednost polumjera kotača se razlikuje od nominalnog polumjera kotača,**
  - **stvarna baza na koju su pričvršćeni kotači razlikuje se od nominalne baze,**
  - **nepodešenost kotača,**
  - **konačna rezolucija enkodera,**
  - **konačan iznos intervala uzorkovanja enkodera.**



# Pogreške odometrije

- Nesistemske pogreške se javljaju u slučajevima:
  - **prelaska preko neravnog terena,**
  - **prelaska preko neočekivanih objekata na podlozi,**
  - **klizanje kotača zbog:**
    - ✓ klizave podloge,
    - ✓ prevelikog ubrzanja,
    - ✓ brzog skretanja (zanošenje),
    - ✓ vanjskih sila (interakcija sa vanjskim objektima),
    - ✓ unutarnje sile (kastor, odnosno pomoćni kotači),
    - ✓ nepostojanja tačke dodira između kotača i podloge.



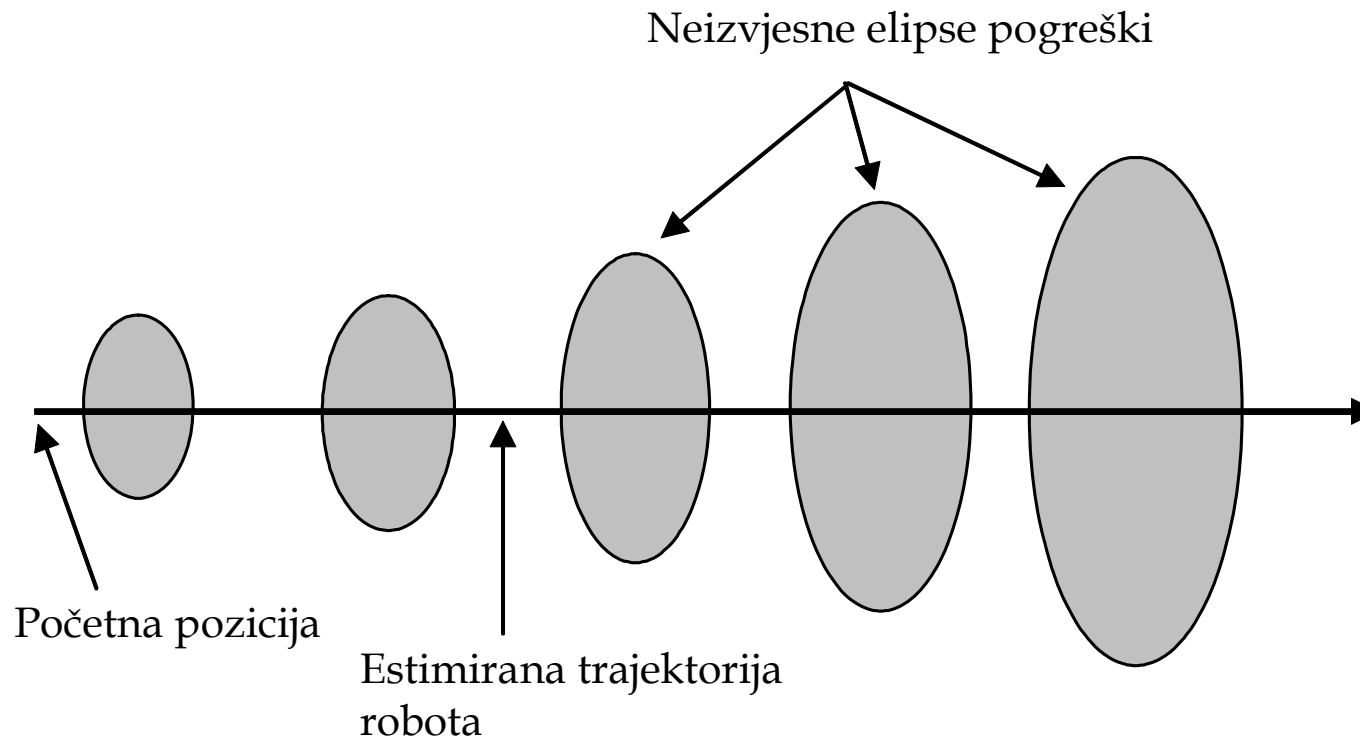
# Pogreške odometrije

- **Uočavanje jasne razlike između sistemskih i nesistemskih pogrešaka je od velike važnosti za efikasno smanjenje pogrešaka odometrije.**
- Sistemske pogreške su posebno izražene jer se **konstantno akumuliraju**. Na najravnijim unutarnjim površinama sistematske pogreške imaju mnogo veći doprinos ukupnoj odometrijskoj pogrešci.
- Međutim, na **neravnim površinama sa izvjesnim neregularnostima**, nesistemske pogreške su dominantne.
- Problem sa nesistemskim pogreškama je da se one mogu pojaviti **neočekivano** (naprimjer, robot nailazi na neočekivani objekat na površini) i mogu prouzročiti velike pogreške pozicije.



# Pogreške odometrije

- Kod mnogih algoritama koji estimiraju nesigurnosti pogreške usljed odometrijskih mjerenja, svaka izračunata pozicije robota je okružena karakterističnom **elipsom pogreške** koja pokazuju region nesigurnosti oko stvarne pozicije robota.



## Pogreške odometrije

- Tipično, ove elipse **rastu sa pređenom udaljenošću**, dok mjerenje apsolutne pozicije smanjuje rastuću nesigurnost i resetira veličinu elipsi pogreški.
- Ove tehnike estimacije pogreški temelje se na parametarskoj estimaciji pogreške izvedenoj iz obzervacija odometrijskih performansi mobilne platforme.
- **Ovi parametri se uzimaju u obzir samo u slučaju sistemskih pogrešaka, zbog toga što je amplituda nesistemskih pogrešaka nepredvidiva.**



## 7.4. Mjerenje odometrijskih pogrešaka

- Jedan od najvećih problema u mobilnoj robotici jest ***kvantitativno*** mjerenje odometrijskih pogrešaka.
- Standardne, dobro definirane, procedure za kvantitativno mjerenje odometrijskih pogrešaka rezultiraju slabom kalibracijom mobilne platforme i neuporedljivim izvještajima na odometrijsku tačnost u znanstvenim komunikacijama.
- Da bi se to prevazišlo, Borenstein & Feng su razvili metode za kvantitativno mjerenje sistemskih pogreški, kao i nesistemskih pogrešaka do određenog, ograničenog stupnja.





## Mjerenje odometrijskih pogrešaka

- Ove metode se zasnivaju na pojednostavljenom modelu pogreške u kome se razmatraju dvije sistemske pogreške kao dominantne. Ove pogreške su:
- **Pogreška usljed nejednakih promjera kotača, definirana kao:**

$$E_d = \frac{D_R}{D_L}$$

gdje su  $D_R$  i  $D_L$  stvarni dijametri desnog i lijevog kotača, respektivno.



## Mjerenje odometrijskih pogrešaka

- **Pogreška uzrokovana nesigurnošću zbog zakreta mobilne platforme:**

$$E_b = \frac{b_{\text{stvarno}}}{b_{\text{nominalno}}} \quad (*)$$

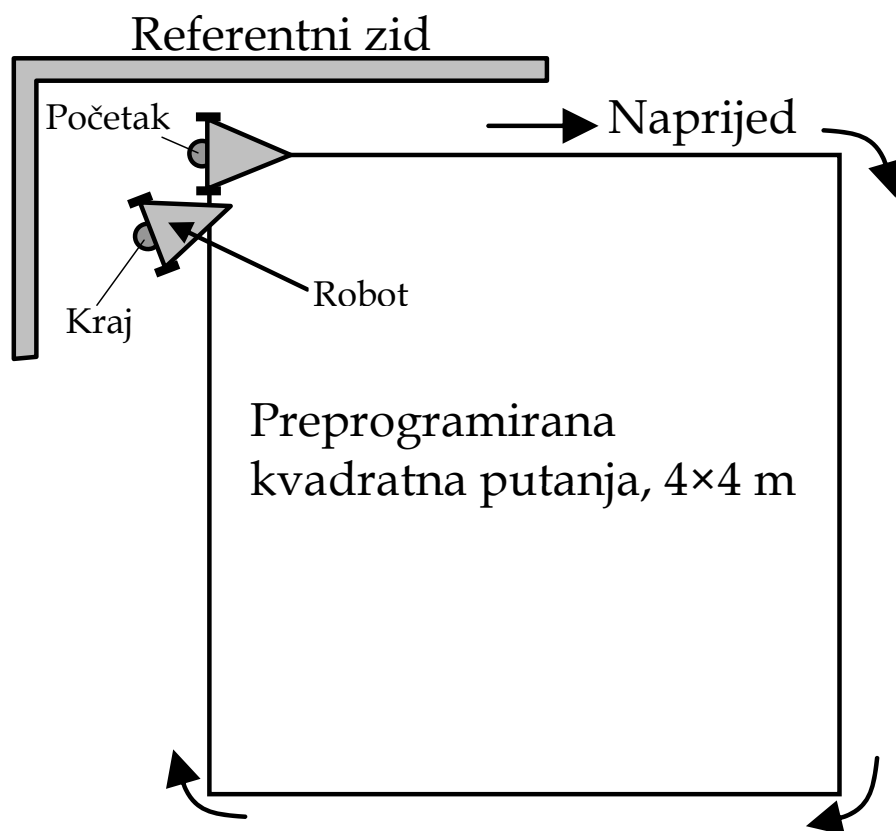
gdje je  $b$  duljina mobilne platforme.





## 7.4.1. Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Razmatraju se dvije metode:
  - **Jednosmjerni test kvadratne putanje.**
  - **Dvosmjerni test kvadratne putanje.**
- **Nominalna putanja jednosmjernog testa**



- Početna tačka -  $(x_0, y_0, \theta_0)$ .
- Dimenzije kvadratne putanje  $4 \times 4 \text{ m}^2$ .
- Mjerenjem udaljenosti između jedne tačke na robotu i dviju tačaka na zidovima može se tačno odrediti pozicija i orijentacija robota.

## Mjerenje sistemskih pogrešaka

- **Da bi se test mogao obaviti, robot mora biti preprogramiran da pređe četiri kraka, odnosno, zavoja kvadratne putanje.**
- Kada robot pređe definiranu putanju postoji mogućnost, zbog pogreški odometrije i regulatora, da se ne vrati u početnu lokaciju iz koje je započeo kretanje.
- Budući da test ima za cilj određivanje odometrijskih pogrešaka, a ne pogreški regulatora, od robota se ne zahtijeva da precizno stigne u početnu poziciju.
- Dovoljno je da robot stigne blizu početne pozicije.



## Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Nakon što se kompletira kvadratna putanja, ponovo je potrebno izmjeriti apsolutni položaj mobilnog robota korištenjem odabranih tačaka na nepomičnom zidu.
- Ova mjerenja apsolutnih pozicija i orijentacija se zatim uspoređuju sa pozicijom i orijentacijom robota izračunatim na temelju odometrijskih podataka.
- Rezultat usporedbe je skup ***povratnih pogreški položaja*** uzrokovanih odometrijom.





## Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Ove pogreške su označene sa  $e_x$ ,  $e_y$  i  $e_\theta$ , a računaju se na sljedeći način:

$$\begin{aligned} e_x &= x_{abs} - x_{izr} \\ e_y &= y_{abs} - y_{izr} \\ e_\theta &= \theta_{abs} - \theta_{izr} \end{aligned} \quad (**)$$

gdje su sa *abs* i *izr* respektivno označene apsolutne i izračunate vrijednosti.

- Putanja sa prethodne slike uključuje **četiri pravolinijska segmenta** i **četiri rotacije oko centralne tačke mobilnog robota** (težište ili središna tačka osovine kotača) **na vrhovima kvadrata**.
- Krajnja pozicija robota na putanji vizualizira odometrijsku pogrešku.

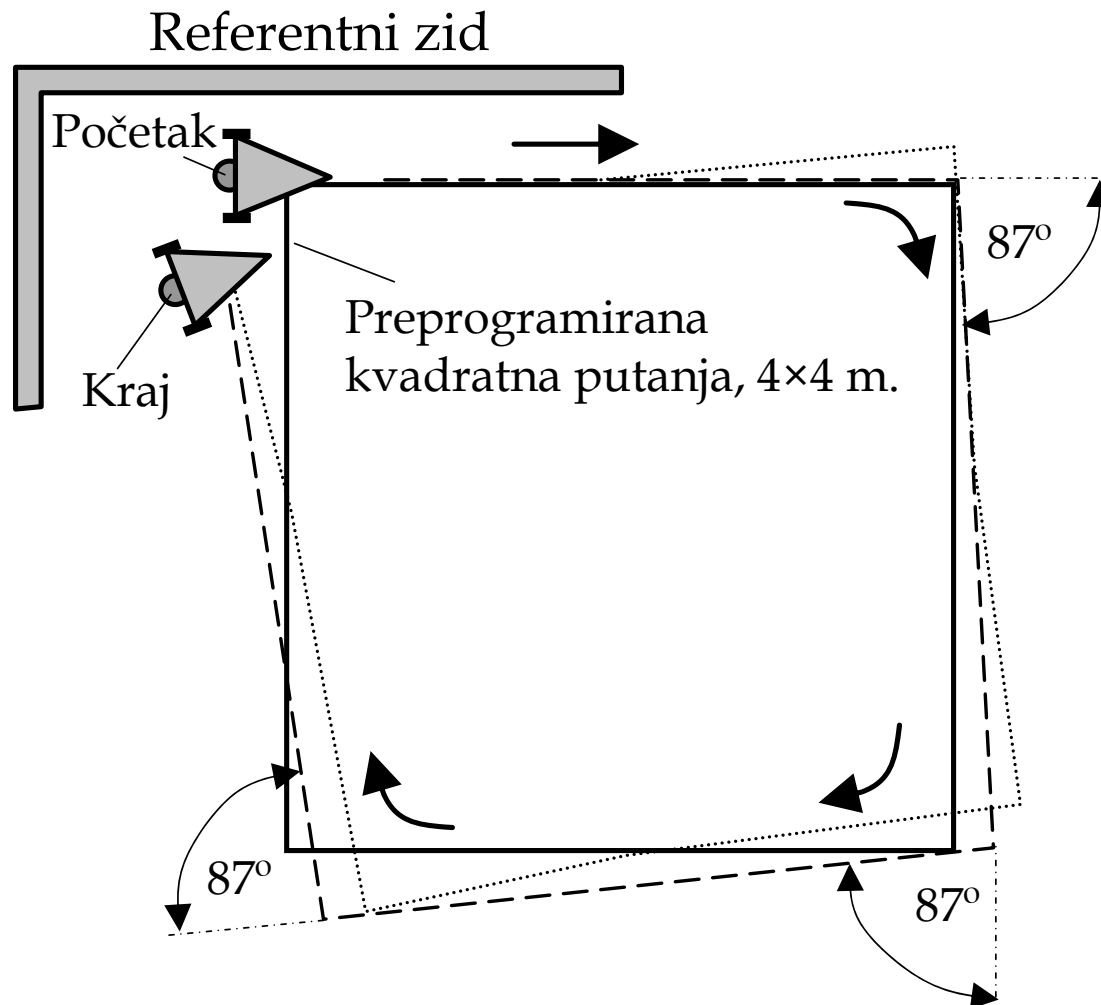
## Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Provođenje eksperimenta može rezultirati dvjema dominantnim odometrijskim pogreškama.
- **Prva pogreška,  $E_d$** , uzrokovana je nejednakim polumjerom kotača, što je prikazano tačkastom putanjom na sljedećem slajdu.
- **Druga pogreška,  $E_b$** , je rezultat neisigurnosti u zakretu mobilne platforme.
- Ova pogreška uzrokuje rotaciju robota za  $87^\circ$ , umjesto  $90^\circ$ , stupnjeva.
- Putanja kojom se robot kreće usljed ove pogreške je prikazana na sljedećem slajdu isprekidanim linijama.
- Sa slike se također može uočiti da ove dvije pogreške mogu biti gotovo identične.



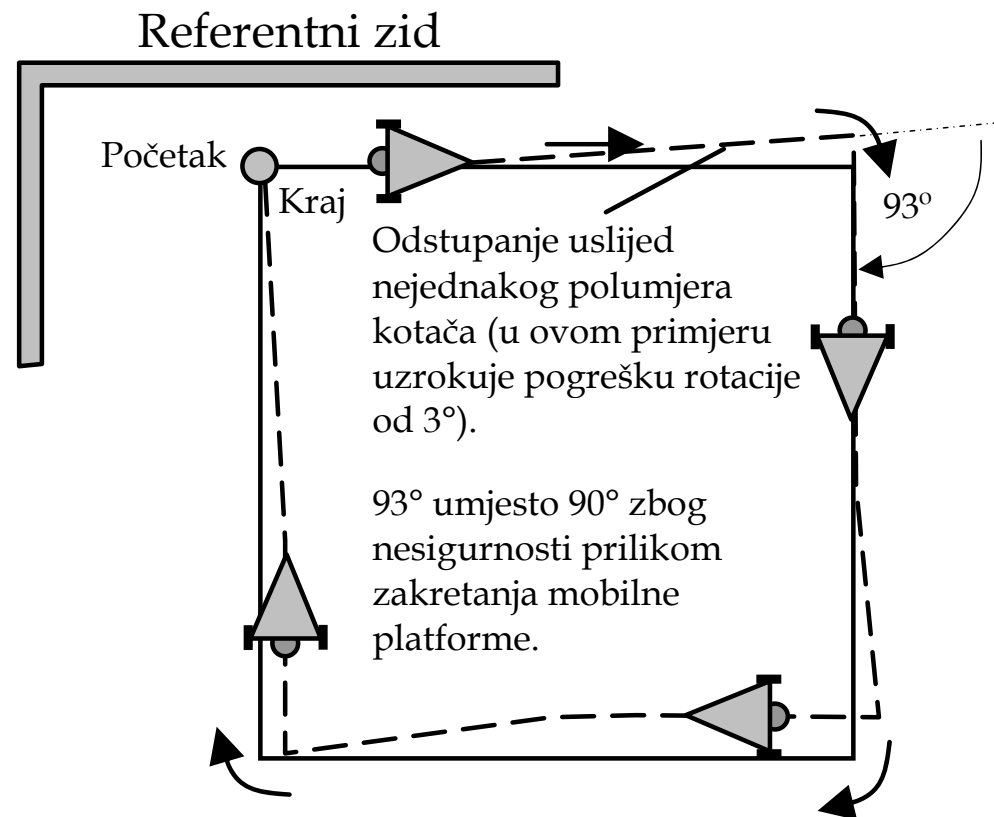
# Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Mogući rezultati jednosmjernog testa



# Mjerenje sistemskih pogrešaka

- **Kod jednosmjernog testa može doći do poništavanja utjecaja dominantnih odometrijskih pogrešaka  $E_d$  i  $E_b$ , što uzrokuje poklapanje početne i krajnje pozicije testa.**
- Prema tome, može se u slučaju pogreške orijentacije zbog nejednakog polumjera kotača, mijenjati parametar  $b$  u izrazu (\*) i na taj način kompenzirati nastala pogreška.



# Mjerenje sistemskih pogrešaka

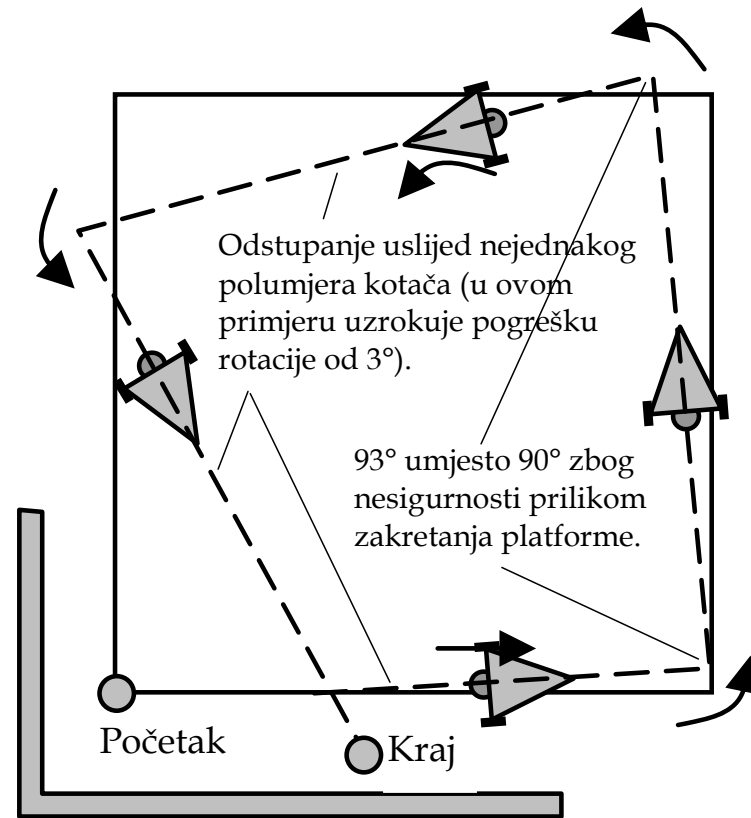
- **Dvosmjerni test kvadratne putanje**
- Rezultati jednosmjernog eksperimenta kvadratne putanje pokazuju da je on **neprikladan za testiranje odometrijskih performansi mobilnih robota sa diferencijalnim pogonom zbog postojanja dvije (skrivenne) međusobno kompenzirajuće odometrijske pogreške.**
- Da bi se prevazišao ovaj problem Borenstein i Feng (1995) su uveli **dvosmjerni eksperiment kvadratne putanje**, nazvan **UMBmark** (*University of Michigan Benchmark*).
- Ovaj eksperiment (test) zahtijeva **prelaženje nominalne putanje u oba smjera, smjeru kretanja kazaljke na satu i suprotnom smjeru od kretanja kazaljke na satu.**





# Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Sljedeća slika pokazuje da skrivena dualna pogreška (sa prethodne slike) postaje vidljivija kada se kvadratna putanja prelazi u suprotnom smjeru.
- To je zbog toga što se dvije dominantne sistemske pogreške, koje se mogu kompenzirati kada se kretanje obavlja samo u jednom smjeru, **dodaju jedna drugoj i povećava ukupnu pogrešku kada se kretanje odvija u suprotnom smjeru.**



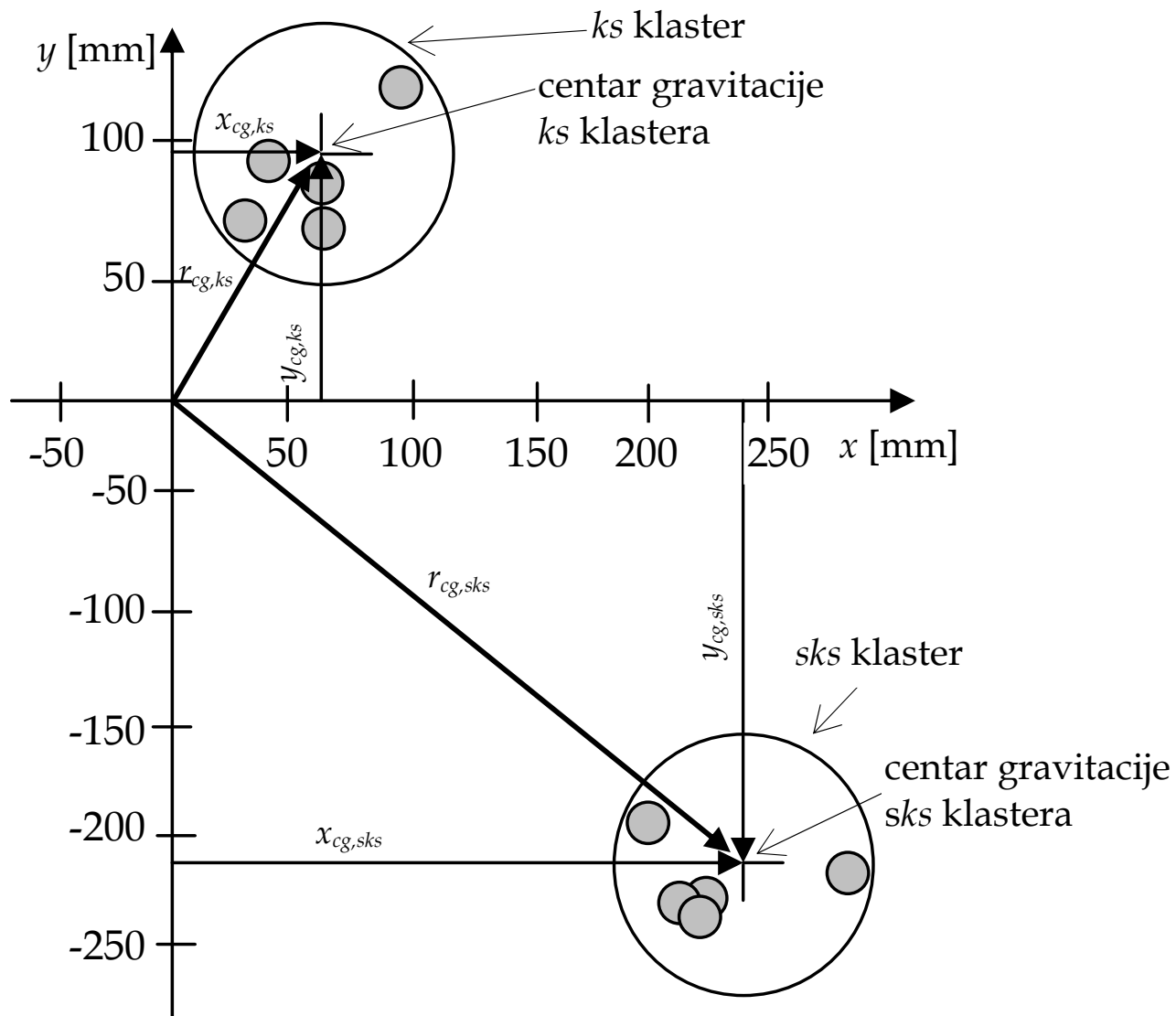
## Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Rezultat dvosmjernog eksperimenta po kvadratnoj putanji može izgledati slično onome prikazanom na sljedećem slajdu, koji prikazuje stvarne eksperimentalne rezultate sa TRC LabMate robotom, koji se kreće po glatkoj podlozi.
- U ovom eksperimentu robot je programiran da slijedi  $4 \times 4$  [m<sup>2</sup>] kvadratnu putanju, startajući iz tačke (0,0).
- Robot se zaustavlja nakon pet prijelaza po kvadratnoj putanji u smjeru kazaljke na satu (*ks*) i u smjeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu (*sks*).



# Mjerenje sistemskih pogrešaka

## Dvosmjernog UMBmark test (nekalibrirani robot)



## Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Rezultati sa prethodne slike mogu se interpretirati na sljedeći način:
  - Pozicije zaustavljanja nakon *ks* i *sks* prelaza su klasteri u dva odvojena područja.
  - Distribucija unutar *ks* i *sks* klastera su rezultat nesistemskih pogrešaka. Međutim, ova slika prikazuje da, u slučaju nekalibrirane mobilne platforme koja se kreće po glatkoj podlozi, doprinos **sistemskih pogrešaka ukupnoj pogrešci odometrije može biti značajno veći od doprinosa nesistemskih pogrešaka.**



## Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Nakon obavljanja UMBmark eksperimenta, prvo što se želi jest odrediti pojedinačne numeričke vrijednosti koje izražavaju tačnost odometrijske lokalizacije (s obzirom na sistemske pogreške) testirane mobilne platforme.
- Da bi se minimizirao utjecaj djelovanja nesistemskih pogreški, Komoriya i Feng (1994) su sugerirali **razmatranje centra gravitacije svakog klastera kao predstavnika za sistemske pogreške odometrije u oba smjera ( $k_s$  i  $s_k$ ).**



# Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Koordinate oba centra gravitacije se računaju iz rezultata jednačbe (\*\*):

$$x_{cg,ks/sks} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{x_{i,ks/sks}}$$
$$y_{cg,ks/sks} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{y_{i,ks/sks}}$$

gdje je  $n$  broj prijelaza u svakom smjeru.

- Udaljenosti centara gravitacije u odnosu na ishodište koordinatnog sistema označeni su sa  $r_{cg,sk}$  i  $r_{cg,sks}$  i opisani su sljedećim izrazima:

$$r_{cg,ks} = \sqrt{(x_{cg,ks})^2 + (y_{cg,ks})^2}$$
$$r_{cg,sks} = \sqrt{(x_{cg,sks})^2 + (y_{cg,sks})^2}$$



## Mjerenje sistemskih pogrešaka

- Veća vrijednost od  $r_{cg,sk}$  i  $r_{cg,sk_s}$  se definira kao ***mjera odometrijske tačnosti za sistemske pogreške*** i prikazuje izrazom:

$$E_{\max, sis} = \max(r_{cg,ks}, r_{cg,sk_s})$$

- Razlog za korištenje maksimalne vrijednosti je u činjenici da se u praktičnim aplikacijama najviše pažnje posvećuje, upravo, najvećoj mogućoj vrijednosti odometrijske pogreške.
- Također je važno naglasiti da se finalna pogreška orijentacije  $e_\theta$  ne razmatra eksplicitno u jednadžbi.
- Ovo je zbog toga što su sve sistemske pogreške u orijentaciji sadržane u finalnim pogreškama pozicije.



## 7.4.2. Mjerenje nesistemskih pogrešaka

- Borenstein (1994) je predložio jednostavan reproduktivni test koji omogućuje usporedbu osjetljivosti na nesistemske pogreške različitih mobilnih platformi.
- Ovaj test, nazvan **prošireni UMBmark**, koristi istu dvosmjernu kvadratnu stazu, ali kao dodatak uvodi **umjetna ispupčenja**.
- Umjetna ispupčenja su ostvarena pomoću standardnih kućanskih električkih kabela.
- Ovaj kabel ima promjer 9-10 milimetara, okruglog je oblika i zaštićen izvana plastičnim slojem.





## Mjerenje nesistemskih pogrešaka

- U predloženom proširenom UMBmark testu kabel se postavlja 10 puta ispod jednog kotača u toku kretanja.
- Da bi se osigurala bolja ponovljivost testa i izbjeglo uzajamno kompenziranje pogrešaka, sugerirano je uvođenje deset ispupčenja na ravnu podlogu.
- **Ispupčenja se trebaju također uvesti u toku prelaženja prvog linijskog segmenta kvadratne putanje i to uvijek ispod kotača koji se nalazi sa unutrašnje strane linijskog segmenta.**



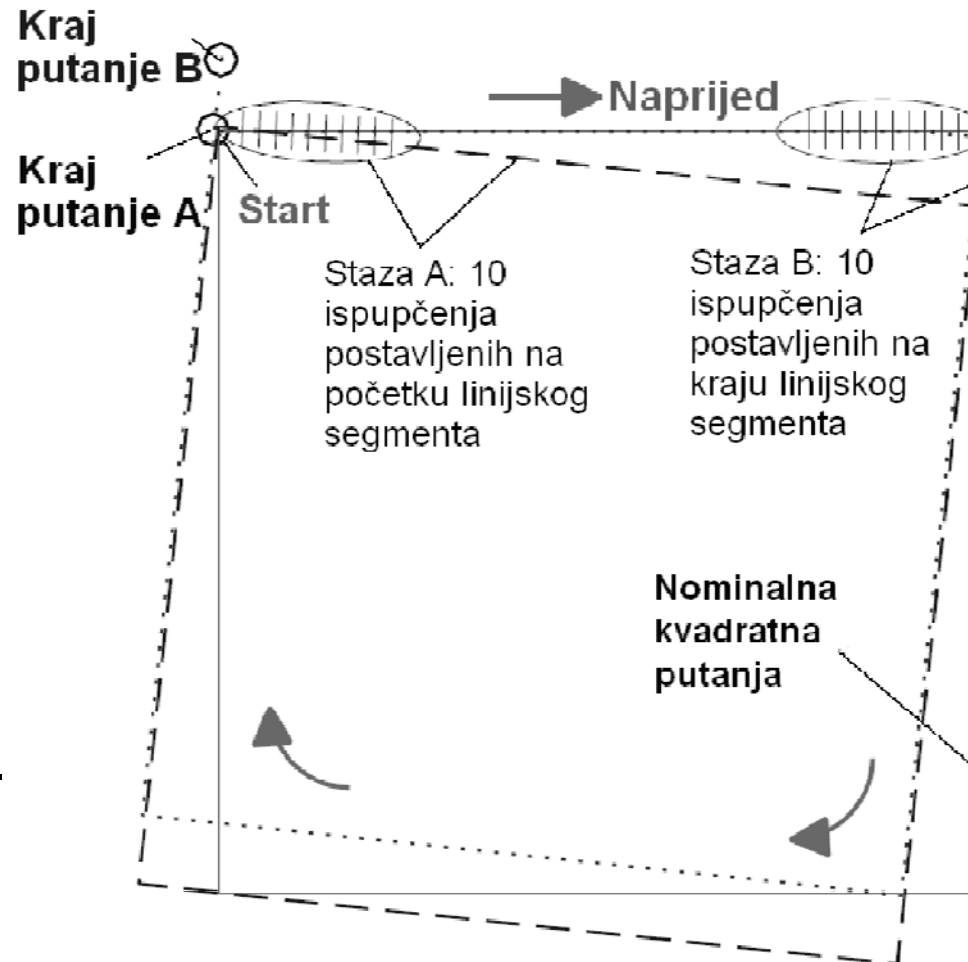
## Mjerenje nesistemskih pogrešaka

- **Može se pokazati da se efekt svakog ispupčenja iskazuje u fiksnoj pogrešci orijentacije u smjeru kotača koji nailazi na ispupčenje.**
- Kod TRC *LabMate* robota pogreška orijentacije koja nastaje zbog ispupčenja visine  $h = 10$  [mm] iznosi  $\Delta\theta = 0.44^\circ$ .
- Postavlja se pitanje: “**Koji mjerljivi parametar bi bio najkorisniji za izražavanje osjetljivosti mobilnog robota na nesistemske pogreške?**”
- Ako se promatraju staze *A* i *B* na sljedećoj slici, uz zahtjev upotrebe 10 ispupčenja za UMBmark test, pri čemu su oni koncentrirani na početku prvog zavoja (za stazu *A*) tada će pogreška povratka u početnu poziciju biti veoma mala.



# Mjerenje nesistemskih pogrešaka

- Suprotno, ako je 10 ispupčenja postavljeno na kraju prve linije (na zavoju iz prve u drugu liniju) tada će pogreška povratka robota u početnu poziciju biti veća.



Povratak mobilnog robota u početnu poziciju korištenjem proširenog UMBmark testa je osjetljiv na stvarne lokacije deset postavljenih ispupčenja, dok to nije slučaj sa orijentacijom.

## Mjerenje nesistemskih pogrešaka

- **Budući da osjetljivost pogreške povratka u početnu poziciju ovisi o lokaciji ispupčenja, to sugerira izbor ove pogreške kao indikatora osjetljivosti mobilne platforme na nesistemske pogreške.**
- **Umjesto ove pogreške može se za mjeru osjetljivosti koristiti pogreška orijentacije  $e_{\theta}$ .**
- Iako je mnogo teže mjeriti male uglove, mjerenje pogreške orijentacije  $e_{\theta}$  je mnogo konzistentniji kvantitativni indikator za usporedbu performansi različitih robota.



## Mjerenje nesistemskih pogrešaka

- Zbog toga se mjerenje i izražavanje osjetljivosti mobilne platforme na nesistemske pogreške u obliku **prosječne apsolutne pogreške orientacije** može definirati sa:

$$e_{\theta_{pros}^{nesist}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_{\theta_{i,ks}^{nesist}} - e_{\theta_{pros,ks}^{sist}}| + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_{\theta_{i,sks}^{nesist}} - e_{\theta_{pros,sks}^{sist}}| \quad (***)$$

gdje je  $n = 5$  broj eksperimenata u smjeru kazaljke na satu i u smjeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu.

- Oznake "sist" i "nesist" indiciraju da se radi o rezultatima dobivenim sa regularnim UMBmark testom (za sistemske pogreške) i sa proširenim UMBmark testom (za nesistemske pogreške).



## Mjerenje nesistemskih pogrešaka

- Također je važno napomenuti da prethodna jednadžba poboljšava tačnost u identifikaciji nesistemskih pogrešaka uklanjanjem sistemskog pomaka (bias) mobilne platforme, što je izraženo na sljedeći način:

$$e_{\theta_{pros,ks}^{sist}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{\theta_{i,ks}^{nesist}}$$

i

$$e_{\theta_{pros,sk}^{sist}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{\theta_{i,sk}^{nesist}}$$

## Mjerenje nesistemskih pogrešaka

- Argumenti unutar apsolutne vrijednosti u jednadžbi (\*\*\*) su apsolutne vrijednosti povratnih orijentacijskih pogreški koje ne uključuju pomak.
- Ovo je zbog toga što se želi izbjeći slučaj u kome dvije povratne orijentacijske pogreške suprotnih predznaka poništavaju jedna drugu.
- Naprimjer, ako je u jednom prijelazu kvadratne staze  $e_{\theta} = 1^{\circ}$ , a u drugom prijelazu  $e_{\theta} = -1^{\circ}$ , tada se ne može zaključiti da je:

$$e_{\theta_{pros}}^{nesist} = 0$$

## Mjerenje nesistemskih pogrešaka

- Korištenjem prosječne (srednje) vrijednosti apsolutne povratne pogreške izračunate prema izrazu (\*\*\*) će korektno izračunati pogrešku:

$$e_{\theta_{pros}^{nesist}} = 1$$

- Suprotno tome, u zadnje dvije jednadžbe stvarna aritmetička vrijednost je izračunata da bi se identificirao fiksni pomak.



## 7.5. Redukcija odometrijskih pogrešaka

- Mnogi senzori imaju u sebi ugrađene kalibracijske mehanizme za korekciju sistemskih pogrešaka.
- **Važno je napomenuti da kalibracija ne ovisi samo o mehanizmu robota, već i o okolini.**
- Za razliku od sistemskih pogrešaka, **nesistemske pogreške se ne mogu kalibrirati**, budući da proizilaze iz nepoznate, ili neopažene, interakcije robota i okoline.
- **Da bi se primijenila neka od metoda kalibracije potrebno je na prikladan način opisati pogrešku.**
- U nastavku se obrađuje postupak kalibracije za redukciju sistemskih pogrešaka.



## Redukcija odometrijskih pogrešaka

- **Sistemska kalibracija** poboljšava tačnost odometrijske lokalizacije bez korištenja dodatnog sklopovlja ili senzora.
- Kako je ranije navedeno, sistemske pogreške su inherentno svojstvo svakog pojedinačnog robota.
- One se mijenjaju veoma sporo kao rezultat habanja ili različitih distribucija tereta.
- Tako **ove pogreške ostaju gotovo konstantne tokom cijelog vremena kretanja robota.**
- Jedan od načina reduciranja ovih pogreški je kalibracija koja ovisi o vrsti mobilne platforme.



## Redukcija odometrijskih pogrešaka

- **Međutim, kalibraciju ju teško sprovesti zbog toga što se geometrijska odstupanja mobilnog robota ili njegovih pojedinačnih dijelova mijenjaju u vremenu.**
- Promjena promjera kotača, zbog različite distribucije tereta, može prouzročiti značajne odometrijske pogreške.
- Borenstein i Feng (1996) su razvili sistemsku proceduru za mjerenje i korekciju odometrijskih pogreški.
- Ovaj postupak zahtijeva da se UMBmark procedura može obaviti najmanje po pet puta u smjeru kretanja kazaljke na satu (*ks*) i smjeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu (*sks*).

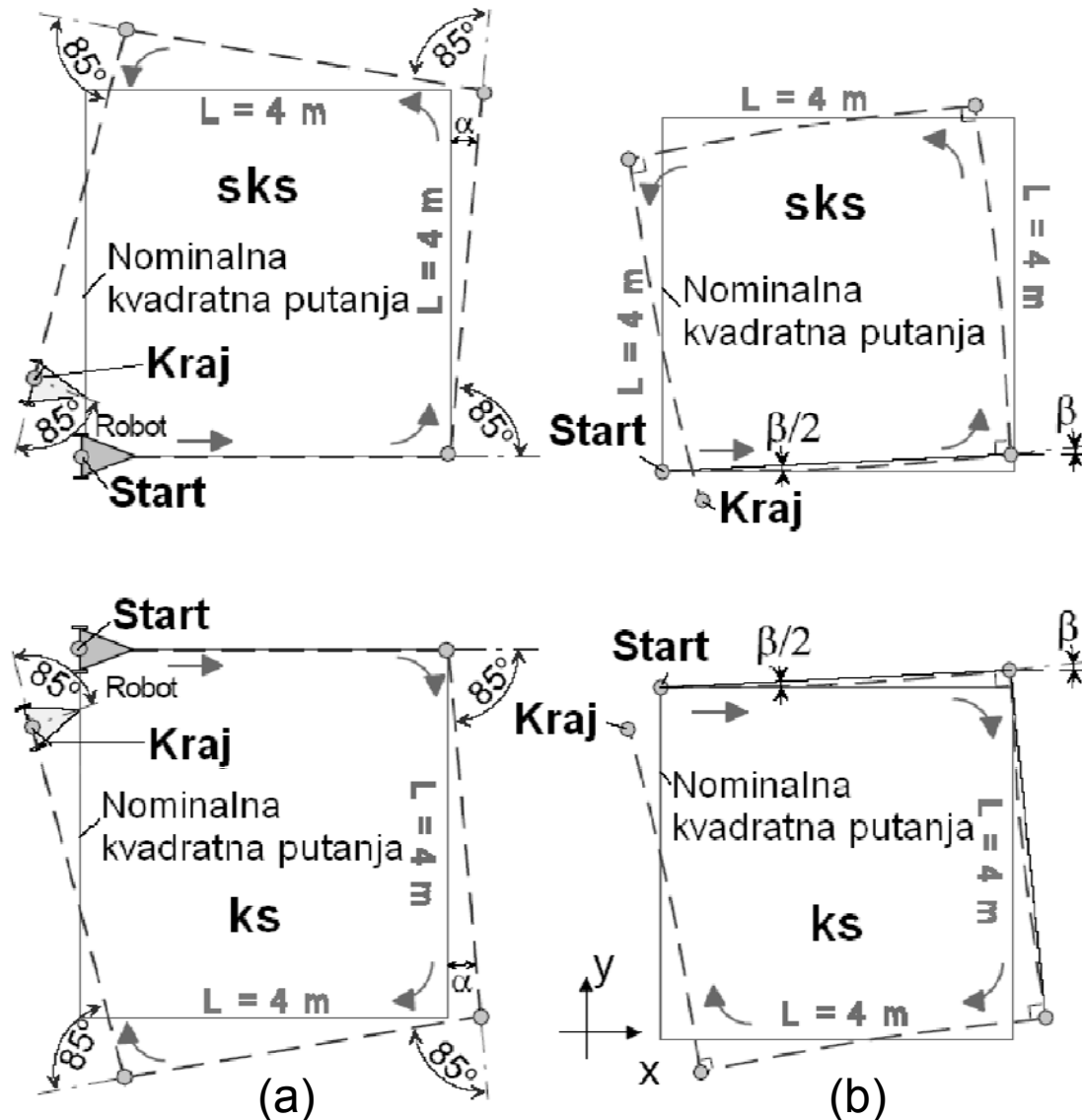
# Redukcija odometrijskih pogrešaka

- Oni su definirali dvije nove karakteristike pogreški koje su značajne samo u kontekstu UMBmark testa.
- Ove karakteristike, nazvane **tip A i tip B**, predstavljaju odometrijske pogreške orijentacije.
- **Tip A definira pogrešku orijentacije koja smanjuje (ili povećava) ukupnu rotaciju robota tokom eksperimenta sa kvadratnom putanjom u oba navedena smjera.**
- Nasuprot ovom tipu pogreške, **tip B definira pogrešku orijentacije koja smanjuje (ili povećava) ukupnu rotaciju robota tokom provođenja eksperimenta sa kvadratnom putanjom u samo jednom smjeru**, ali istovremeno povećava (ili smanjuje) ukupnu rotaciju kada se kreće u suprotnom smjeru.



# Redukcija odometrijskih pogrešaka

- Primjeri pogrešaka tipova A i B prikazani su na slici.



## Redukcija odometrijskih pogrešaka

- Slika (a) prikazuje slučaj kada se robot četiri puta zakrene pri slijeđenju nominalne kvadrata putanje.
- Međutim, zbog većeg, stvarnog, razmaka između kotača u odnosu na nominalni, mobilni robot se zakreće za po  $85^\circ$  u svakom vrhu kvadratne putanje (umjesto za  $90^\circ$ ).
- U ovom primjeru se robot zakrene za ukupno  $\theta_{uk} = 4 \times 85^\circ = 340^\circ$ , umjesto za nominalnih  $\theta_{nom} = 360^\circ$ .
- Prema tome, može se zaključiti da **robot u oba smjera kretanja,  $ks$  i  $sks$ , završi zakretanje prije nego li je to slučaj sa nominalnim slučajem, to jest:**

$$\left| \theta_{uk,ks} \right| < \left| \theta_{nom} \right| \text{ i } \left| \theta_{uk,sks} \right| < \left| \theta_{nom} \right| \quad (*****)$$



## Redukcija odometrijskih pogrešaka

- Iz izraza (\*\*\*\*\*) slijedi da se radi o pogrešci tipa A.
- Na slici (b) prikazana je trajektorija kretanja robota sa nejednakim promjerima pogonskih kotača.
- **Ova pogreška se dodaje ukupnoj pogrešci orijentacije pri kretanju u *sks* smjeru, ali smanjuje ukupnu rotaciju u suprotnom, odnosno *ks* smjeru.**
- Ovo se izražava na sljedeći način:

$$\left| \theta_{uk,sk} \right| > \left| \theta_{nom} \right| \text{ ali } \left| \theta_{uk,ks} \right| < \left| \theta_{nom} \right|$$

Pogreška tipa B.

## Redukcija odometrijskih pogrešaka

- U stvarnom kretanju pogreške tipova  $A$  i  $B$  se pojavljuju zajedno.
- **Problem je kako razlikovati ove pogreške i kako izračunati korekcijske faktore za ove pogreške na temelju izmjenjenih pogreški finalnih pozicija robota u UMBmark testu.**
- Što se tiče pogreške tipa  $A$ , koja je uglavnom uzrokovana pogreškom  $E_b$ , iznos pogreške orijentacije u svakom  $90^\circ$  nominalnom zakretu je označen sa  $\alpha$  [rad] na slici (a).
- U slučaju pogreške tipa  $B$  ( $E_d$ ), odstupanje stvarne od nominalne orijentacije je označeno sa  $\beta$  na slici (b).



## Redukcija odometrijskih pogrešaka

- Navedena odstupanja se računaju na sljedeći način (izraženi u [°]):

$$\alpha = \frac{x_{cg,ks} + x_{cg,sks}}{-4L} \frac{180^\circ}{\pi}$$

$$\beta = \frac{x_{cg,ks} - x_{cg,sks}}{-4L} \frac{180^\circ}{\pi}$$

- Koordinate centra gravitacije mobilne platforme dane su na slajdu broj 38.



## Redukcija odometrijskih pogrešaka

- Korištenjem jednostavnih geometrijskih relacija, polumjer zakrivljenosti  $R$  putanje na slici (b) može se izračunati kao:

$$R = \frac{\frac{L}{2}}{\sin(\beta / 2)}$$

- Kada se izračuna  $R$  tada se jednostavno može odrediti omjer promjera  $D_R$  i  $D_L$  koji uzrokuju da se robot kreće po krivoj, umjesto po pravoj liniji. Ovaj omjer je:

$$E_d = \frac{D_R}{D_L} = \frac{R + \frac{b}{2}}{R - \frac{b}{2}}$$



## Redukcija odometrijskih pogrešaka

- Na sličan način se može izračunati i pogreška  $E_b$ .
- Budući da je  $b$  direktno proporcionalan stvarnom iznosu rotacije tada se može koristiti sljedeća proporcija:

$$\frac{b_{\text{stvarni}}}{90^\circ} = \frac{b_{\text{nominalni}}}{90^\circ - \alpha}$$

tako da je:

$$b_{\text{stvarni}} = \frac{90^\circ}{90^\circ - \alpha} b_{\text{nominalni}}$$



# Redukcija odometrijskih pogrešaka

- U skladu sa (\*) dobiva se:

$$E_b = \frac{90^\circ}{90^\circ - \alpha}$$

- **Kada se jedanput izračunaju pogreške  $E_b$  i  $E_d$  tada se njihove vrijednosti koriste kao kompenzirajući faktori u softveru regulatora.**
- Rezultati procesa kalibracije prikazani su na sljedećem slajdu, pri čemu su  $D_R$  i  $D_L$  efektivni promjeri kotača i  $b$  je efektivna duljina mobilne platforme.
- Potrebno je dva sata za provođenje procesa kalibracije i mjerenje pojedinačnih pogrešaka.

# Redukcija odometrijskih pogrešaka

Pogreške pozicije nakon kompletiranja dvosmjernog eksperimenta.

