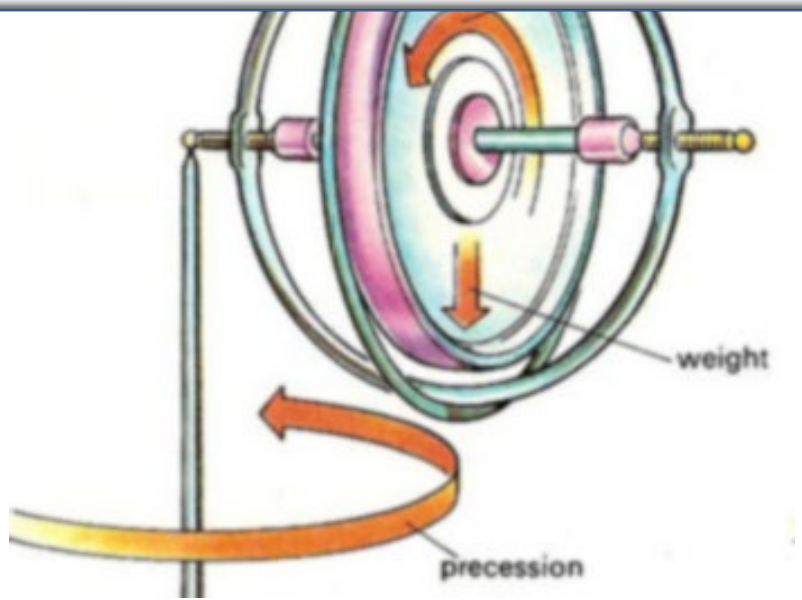
Riadenie mobilných robotov

Lokalizácia mobilných robotov (od snímačov po metódy)



Prednášateľ: prof. Ing. František Duchoň, PhD.

4.3.2024

Nasledujúca prednáška online

- Teams
- buď vo štvrtok (7.3) alebo piatok (8.3) popoludní alebo navečer

Snímače využiteľné na určenie otočenia robota

Gyroskop

- meria uhlový pohyb objektu vzhľadom na inerciálnu vzťažnú sústavu, t. j. napríklad otočenie robota okolo osi z
- je schopný merať absolútny pohyb bez externej infraštruktúry alebo referenčných signálov
- princípy gyroskopov podľa fyzikálneho princípu:
  - mechanické
  - optické

Výstup gyroskopu

- derivačné gyroskopy:

- integračné gyroskopy:

Výstup gyroskopu

- derivačné gyroskopy:
  - výstup: uhlová rýchlosť alebo rýchlosť otáčania sa objektu
  - pre určenie absolútnej orientácie robota je potrebné uhlovú rýchlosť integrovať
- integračné gyroskopy:
  - výstup: uhlová poloha alebo orientácia objektu
  - pre určenie absolútnej orientácie robota využíva internú dynamiku, t. j. určuje orientáciu priamo pomocou snímača

Drift gyroskopu

- **definícia**: vzrastajúca strata presnosti v čase kvôli akumulácii chýb
- potrebná neustála kalibrácia:
  - odstránenie odľahlých chýb
  - metóda kĺzavého priemeru
  - mierka na zmenu absolútnych uhlov
  - rekalibrácia vzorkovaním na strednú hodnotu
  - rekalibrácia vzorkovaním na minimálnu a maximálnu hodnotu

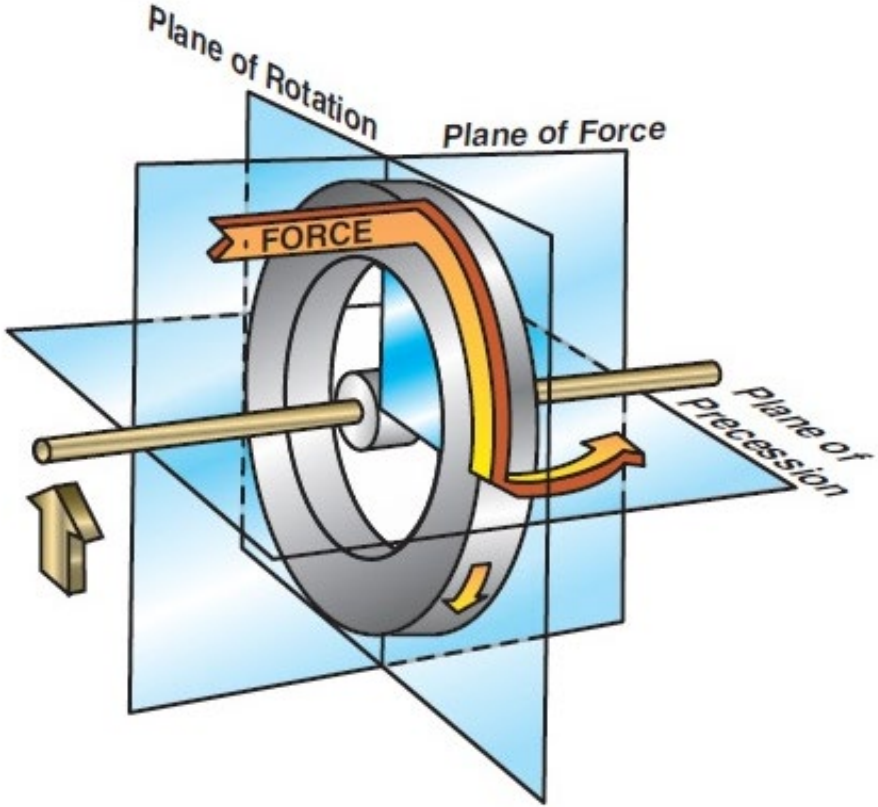
Mechanický gyroskop

- využíva otáčajúce sa alebo kmitajúce hmoty a pôsobiaci zákon zachovania hybnosti

Konvenčný mechanický gyroskop

- **konštrukcia**: zotrvačník upevnený na oboch osiach otáčania sa pomocou ložísk s nízky trením
- **princíp**: otočením v jednej osi začne pôsobiť gyroskopická precesia (t. j. otočenie okolo vertikálnej osi spôsobí otočenie v horizontálnej osi) → moment hybnosti spojený s otáčajúcim sa zotrvačníkom vytláča pôsobiace sily o 90° v smere otáčania sa

Gyroskopická precesia



Gyroskopická precesia

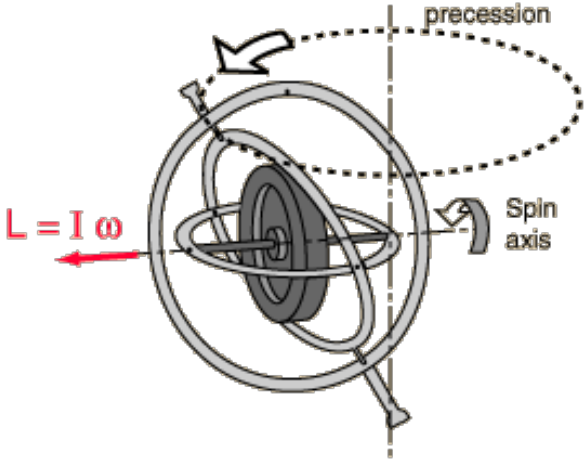
Veľkosť gyroskopickej precesie

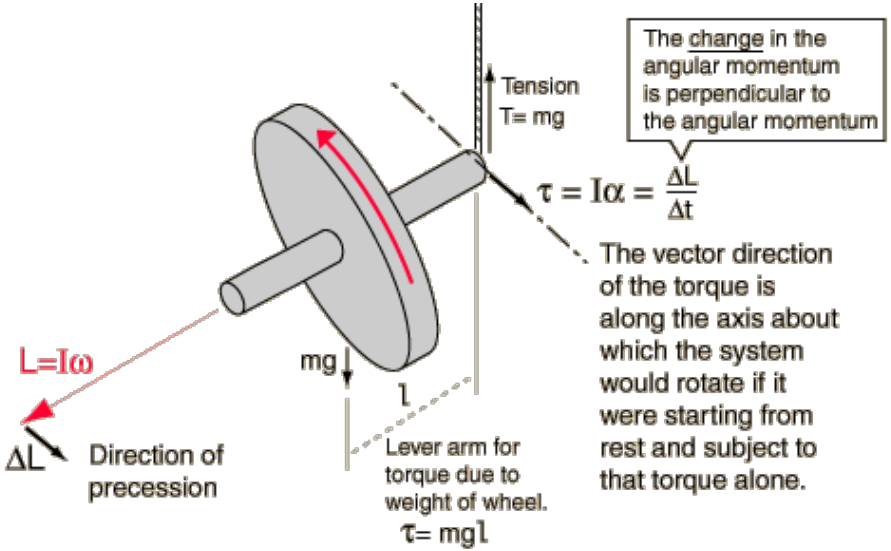
$$\Omega = \frac{\tau}{I.\omega}$$

τ – točivý moment

I – moment zotrvačnosti

ω – uhlová rýchlosť otáčajúceho sa objektu

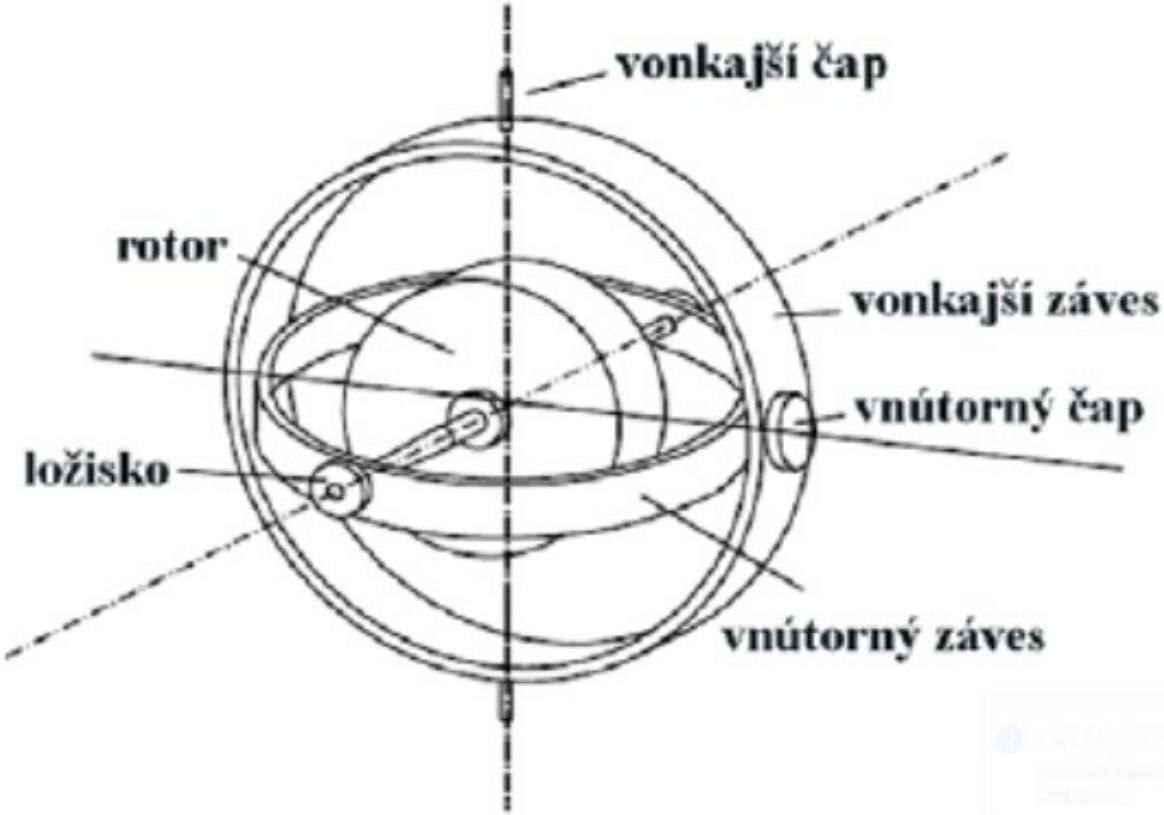




Dvojosový mechanický gyroskop

- **konštrukcia**: zotrvačník vytvorený z elektricky riadeného rotora upevneného párom precíznych ložísk s nízkym trením na oboch koncoch nápravy rotora; ložiská sú uložené v kardanovom kĺbe; vnútorný kruh je upevnený k vonkajšiemu kruhu ďalšími ložiskami
- horizontálna os (kolmá na os otáčania rotora) = otáčanie vnútorného kruhu
- vertikálna os = otáčanie vonkajšieho kruhu
- konfigurácia je priestorovo stabilná = upevnená vo vnútornom referenčnom rámci

Dvojosový mechanický gyroskop

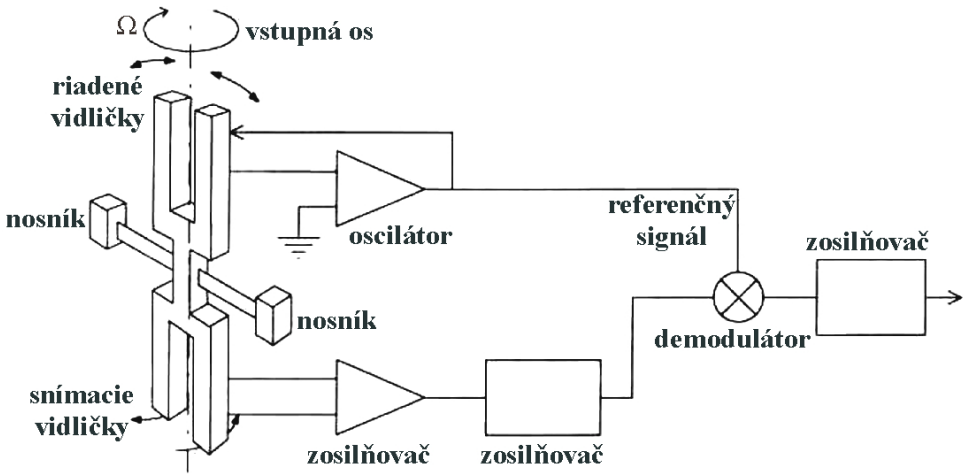


Dvojosový mechanický gyroskop – vlastnosti

- malé krútiace momenty:
  - vplyv otáčania Zeme
  - zvyškové trenie v ložiskách
  - vonkajšie vplyvy
  - malé nerovnováhy v konštrukcii zotrvačníka
- dlhotrvajúca stabilita → odchýlka 0,1° za 6 hodín prevádzky
- kovové časti → tepelný drift (teplotná rozťažnosť)

Derivačný mechanický gyroskop

- **konštrukcia**: mechanická ladička
- **princíp**: navzájom kolmé oscilujúce hmoty; rotácia vyvolá pôsobenie Coriolisových síl, pričom amplitúda výchylky je priamo úmerná rýchlosti otáčania



Princíp derivačného mechanického gyroskopu

- hmoty sú vystavené Coriolisovej sile:

$$F = 2.m.\Omega.\omega_r$$

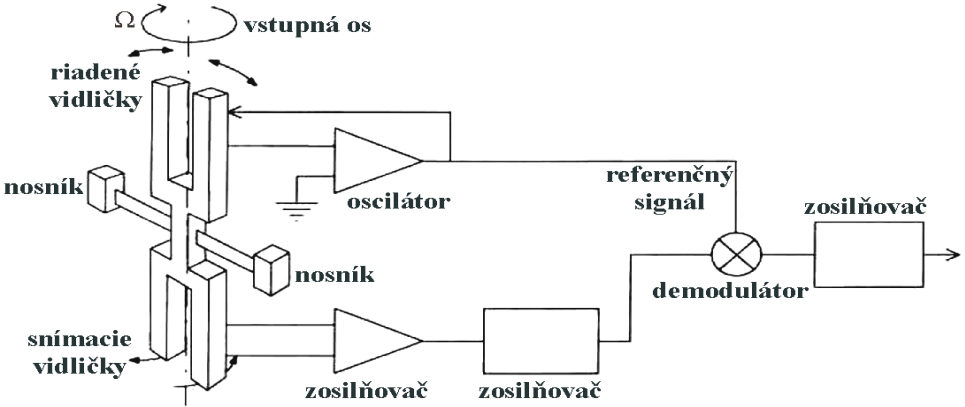
m – hmotnosť vidličky

Ω – vstupná rýchlosť otáčania

ω_r – okamžitá uhlová rýchlosť vidličky

Princíp derivačného mechanického gyroskopu

- posun hmôt od osi ladičky (citlivá os gyroskopu) vyvoláva krútiaci moment (vplyv Coriolisových síl), ktorý je priamo úmerný vstupnej uhlovej rýchlosti
- spodné (snímacie) hmoty reagujú na krútiaci moment → signál vo fáze s uhlovou rýchlosťou riadených hmôt



MEMS

- Micro Electro-Mechanical System
- sofistikované elektronické, najmä mikro-mechanické, prvky, ktoré sú umiestnené na kremíkovú bázu pomocou moderných výrobných metód

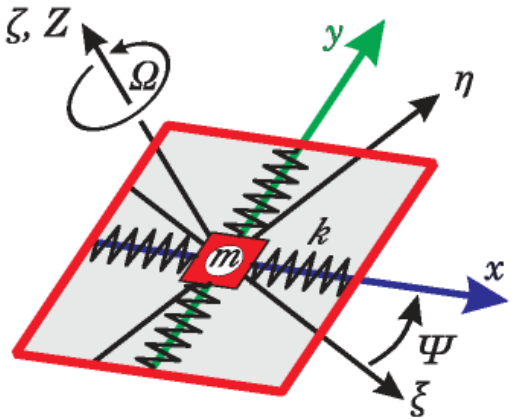
MEMS gyroskop

$S = (\xi, \eta, \zeta)$ inerciálna vzťažná sústava

$O = (x, y, z)$ neinerciálna vzťažná sústava pohybujúca sa:

$\overline{a}_O = (a_{Ox}, a_{Oy}, a_{Oz})$ lineárnym zrýchlením

$\overline{\omega}_O = (\omega_{Ox}, \omega_{Oy}, \omega_{Oz})$ uhlovou rýchlosťou



MEMS gyroskop

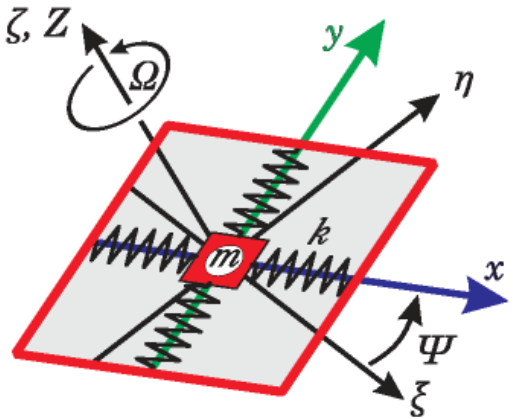
- súradnice pohybujúcej sa hmoty v jednotlivých sústavách:

$$\overline{\rho} = (\xi, \eta, \zeta)$$

$$\overline{r} = (x, y, z)$$

- Newton druhý pohybový zákon:

$$\rho'' = a_{abs} = \frac{F}{m}$$

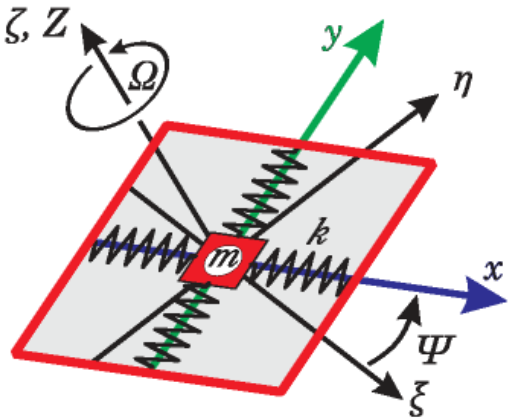


MEMS gyroskop

- podľa pravidiel derivovania v pohybujúcej sa sústave platí:

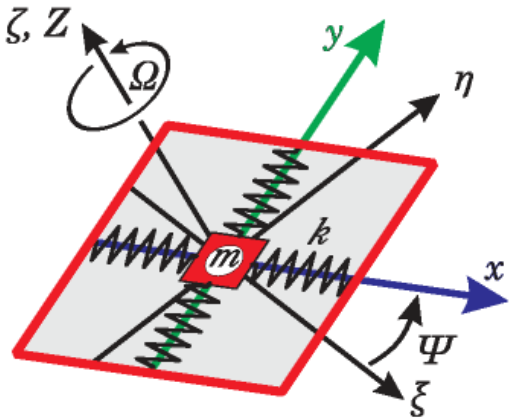
$$r'' = a_{rel} = \frac{F}{m} - 2.(\omega_O \times r') - (A_O + [\omega_O \times (\omega_O \times r)] + (\omega'_O \times r))$$

- $\omega_0 x\ r$ riadi prepojenie a výmenu energie medzi osami *x*,*y* a *z* → umožňuje meranie uhlovej rýchlosti na základe merania vibrácií hmoty



Teoretický model MEMS gyroskopu

- pohyb hmoty je obmedzený na rovinu *xy*
- lineárne pole pôsobiacich pružných síl $F_s = (k_x.x, k_y.y)$
- projekcia gravitačného poľa do roviny *xy*, dynamika osi *z* a zrýchlenie počiatku vzťažnej sústavy je zanedbané



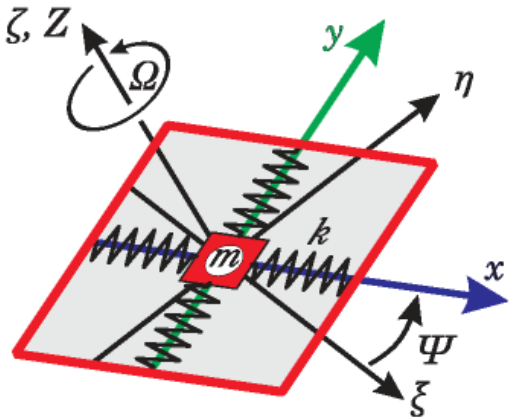
Teoretický model MEMS gyroskopu

- po linearizácii vzhľadom na prvky vektora $\omega_0 = (0,0,\omega_{Oz})$:

$$x'' + x.\Omega_x^2 - y.\omega'_{Oz} - 2.\omega_{Oz}.y' = F_x$$

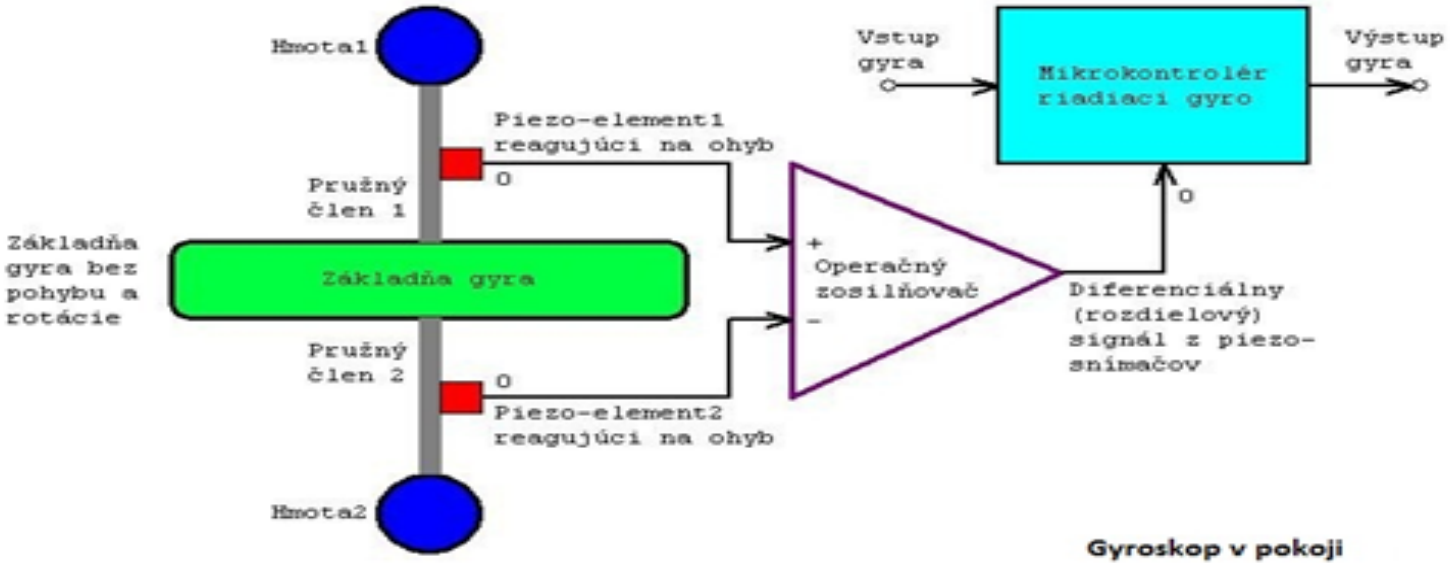
$$y'' + y.\Omega_y^2 + x.\omega'_{Oz} + 2.\omega_{Oz}.x' = F_y$$

Ω_x, Ω_y – vlastné uhlové frekvencie v osi *x* a *y*



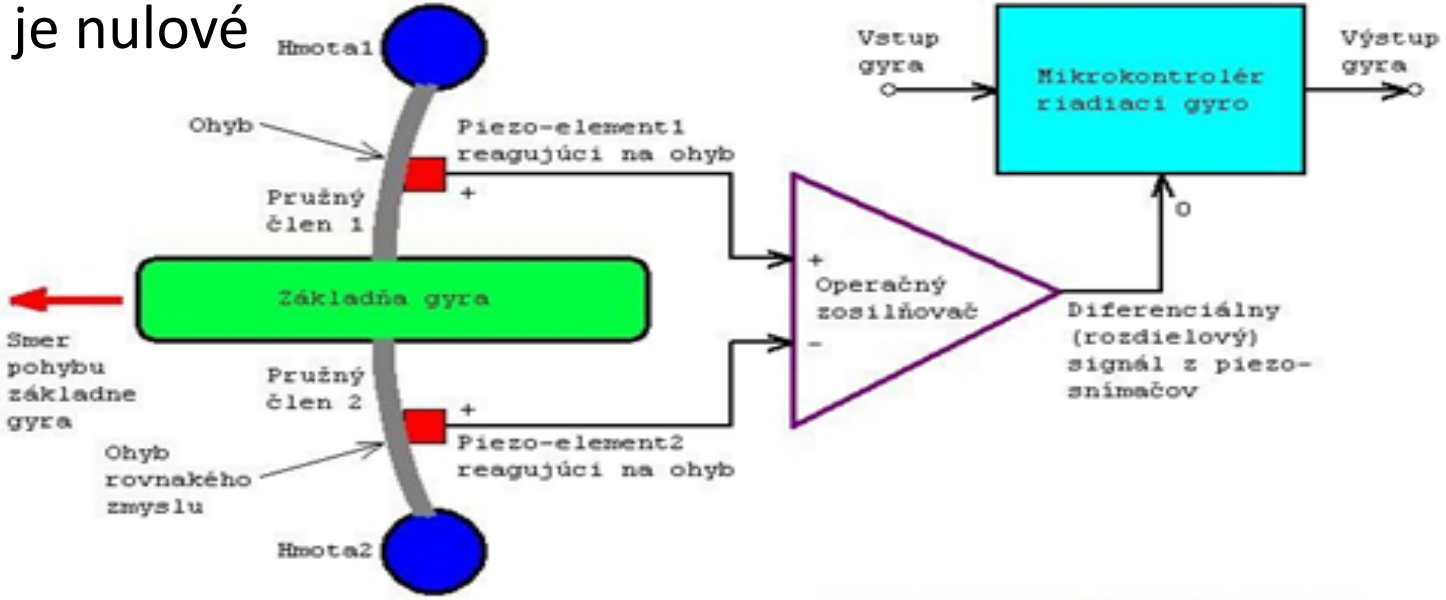
MEMS gyroskop – princíp

1. Gyroskop je v pokoji = piezoelementy negenerujú napätie



MEMS gyroskop – princíp

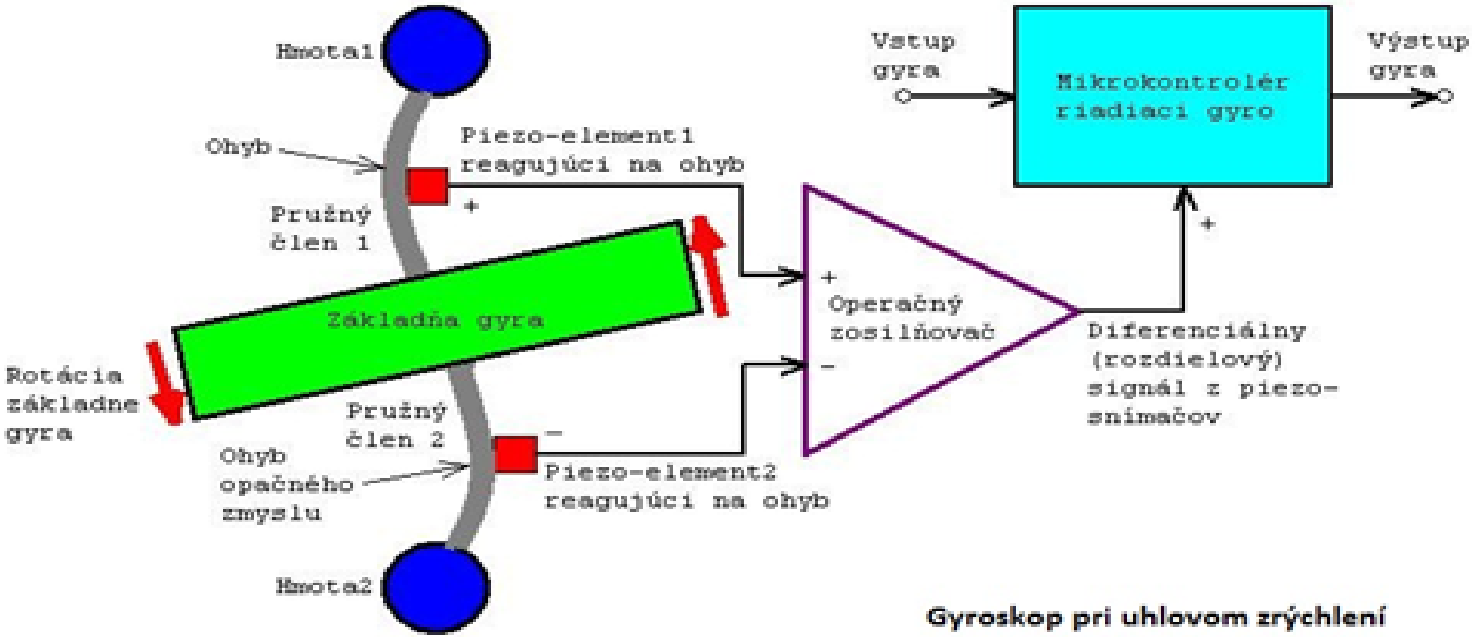
2. Gyroskop je v priamočiarom pohybe, na ktorý „nemá“ reagovať = napätia majú rovnakú veľkosť aj polaritu = napätie OZ je nulové



Gyroskop pri priamočiarom zrýchlení

MEMS gyroskop – princíp

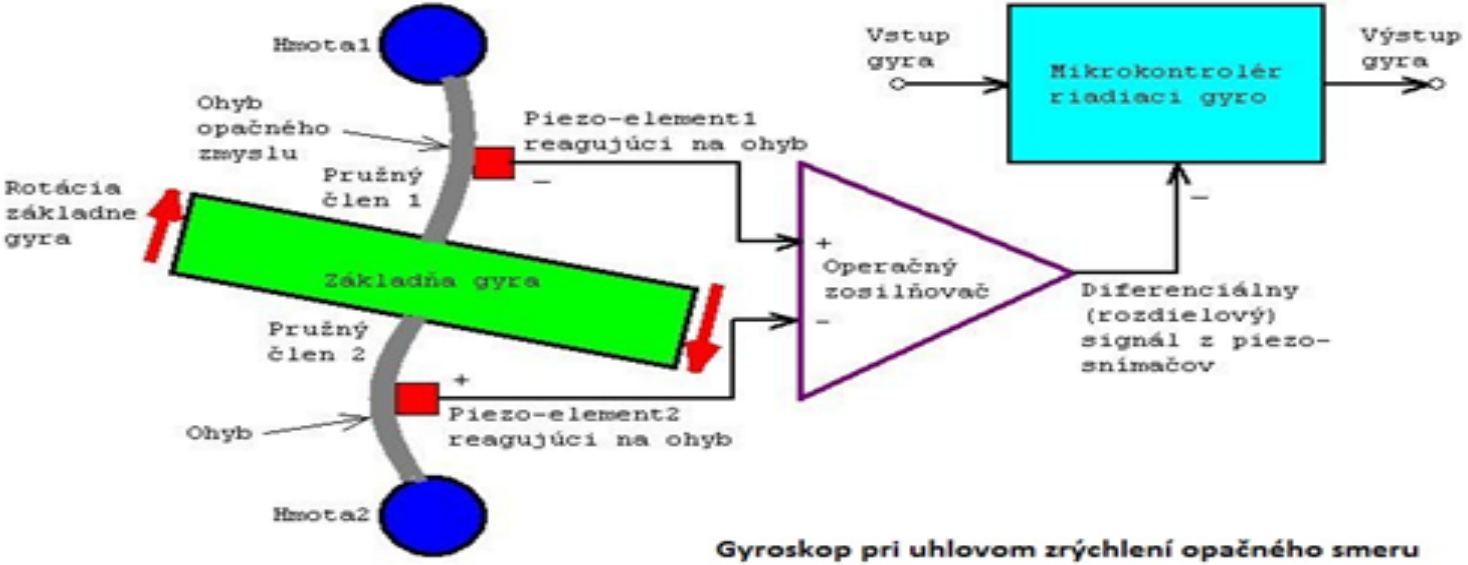
3. Gyroskop je v rotačnom pohybe = pružné členy sa ohnú opačným smerom = rovnaké napätia opačnej polarity



Gyroskop pri uhlovom zrýchlení

MEMS gyroskop – princíp

4. Gyroskop je v rotačnom pohybe = pružné členy sa ohnú opačným smerom = rovnaké napätia opačnej polarity

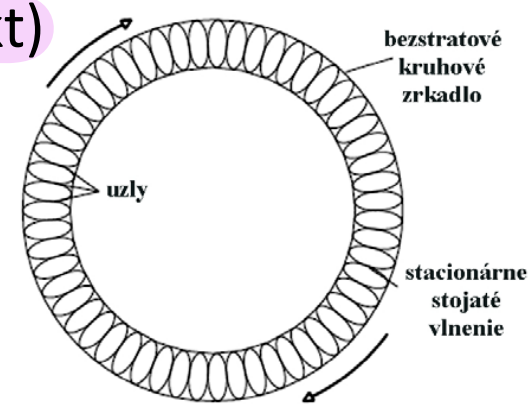


Gyroskop pri uhlovom zrýchlení opačného smeru

Optické gyroskopy

- **konštrukcia**: uzavretá dráha so zdrojom monochromatického svetla
- **princíp**: dva lúče sú vyslané do dráhy (jeden v smere a druhý v protismere hodinových ručičiek), čím vytvoria stojaté vlnenie s kmitňami a uzlami; otočením gyroskopu sa jednému lúču predĺži a druhému skráti dráha (Sagnacov efekt)

- citlivé, kde je tam rýchlosť svetla



Sagnacov efekt

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

rozdiel dĺžky dráhy lúčov

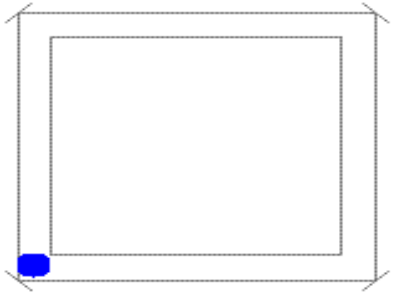
r – polomer kruhovej dráhy lúča

Ω – rýchlosť otáčania sa gyroskopu

c – rýchlosť svetla

- rýchlosť otáčania → zmena dĺžky dráhy lúča

  → dráha musí byť určená ako celočíselný počet vlnových dĺžok rezonančnej frekvencie



Princíp merania optického gyroskopu

- rozdiel medzi frekvenciami lúčov:

$$\Delta f = \frac{2.f.r.\Omega}{c} = \frac{2.r.\Omega}{\lambda}$$

λ – vlnová dĺžka vyslaných lúčov

- približná geometria kruhovej dráhy:

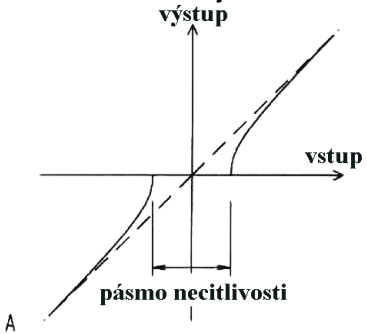
$$\Delta f = \frac{4.A.\Omega}{P.\lambda}$$

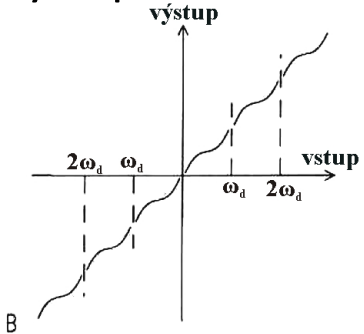
A – plocha uzavretej kruhovej dráhy

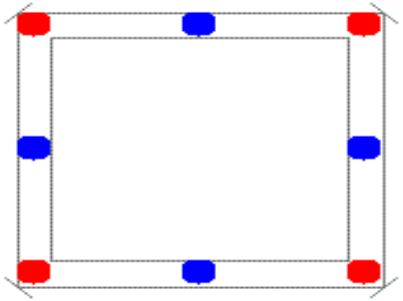
P – obvod dráhy lúča

Jav uzamknutia frekvencie

- pri nízkych rýchlostiach otáčania sa → frekvencie lúčov sa líšia len minimálne → nie je možné detegovať otočenie
- pásmo necitlivosti (aj pri harmonických frekvenciách)
- potlačenie:
  - externý svetelný zdroj
  - zvýšenie kvality odrazivých prvkov vo vnútri dráhy (napr. zrkadlá)







Gyroskop v mobilnej robotike

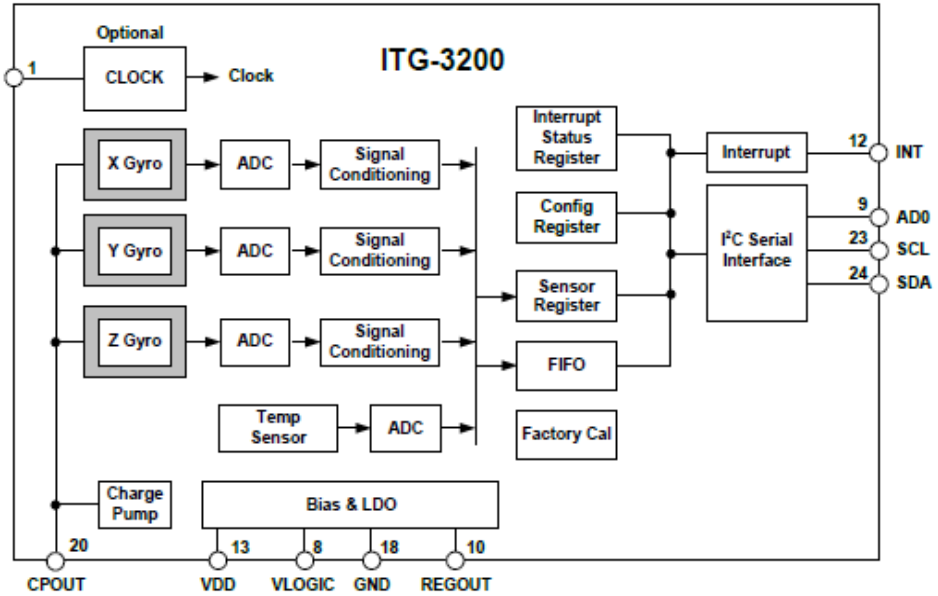
- otočenie okolo osi *z*
- obvykle použite v kombinácii s odometriou = gyroodometria (potlačenie chyby odometrie pri určení otočenia robota a neschopnosť gyroskopu určiť súradnice v osiach *x* a *y*)
- INS v kombinácii s akcelerometrami

dôležité !!

→ kto musíme potlačať gravitačné zrýchlenie ⇒ akcelerometer potlačí tiež parazitné zrýchlenia

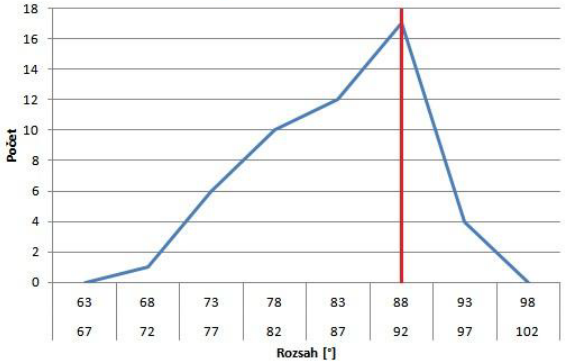
MEMS gyroskop ITG-3200

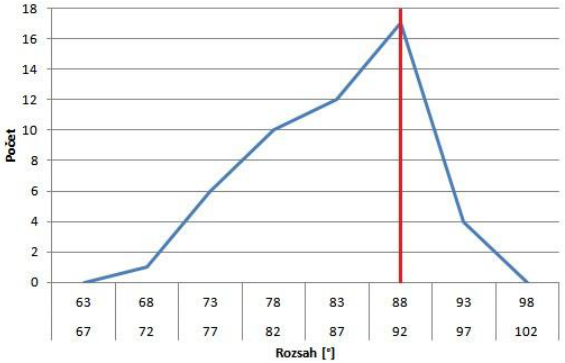
- meranie otočenia iRobot Create (90° a 180°)



Výsledky meraní

- priemerné hodnoty:
  - doľava 84,56° (smer. odchýlka 5,72°)
  - doprava 84,86° (smer. odchýlka 6,34°)

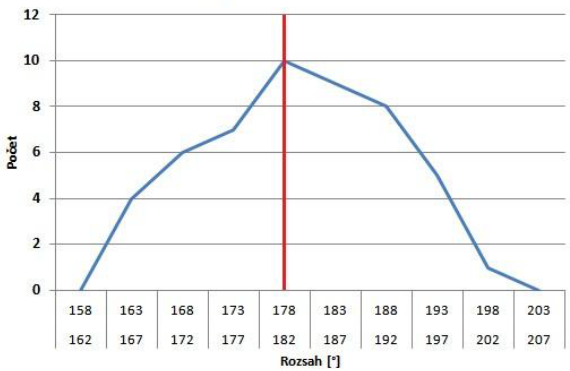


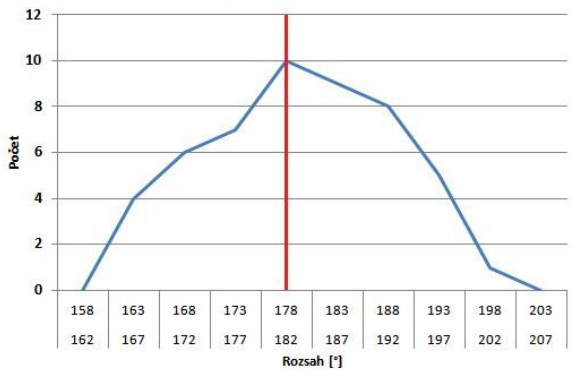


Výsledky meraní

- priemerné hodnoty:
  - doľava 181,06° (smer. odchýlka 9,27°)
  - doprava 180,72° (smer. odchýlka 9,43°)

veľké odchýlky!





Zhodnotenie

- vplyv chýb:
  - charakter otáčania sa robota
  - nepresné umiestnenie gyroskopu
  - konštrukcia kolies (vibrácie pri otáčaní)

ak chceme merať otáčanie okolo z osi, tak by mal byť umiestnený v stredu

  - **potrebné použiť filtračné metódy** → napr. komplementárny filter (kombinácia signálov z rôznych snímačov)

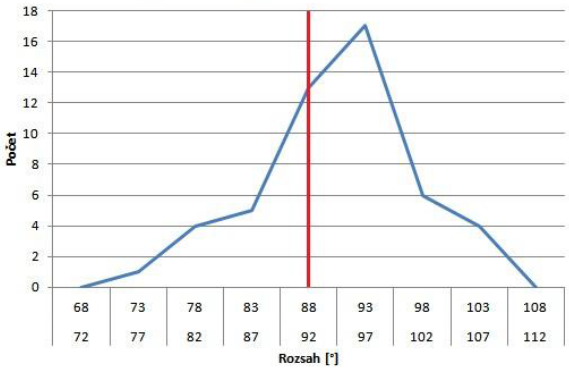
Gyroodometria s MEMS gyroskop ITG-3200

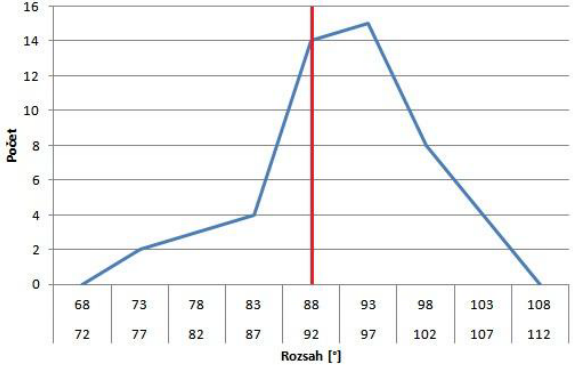
- meranie otočenia iRobot Create (90° a 180°)
- komplementárny filter
  - pri meraní rovnakej veličiny
  - kombinuje signál z viacerých snímačov tak, že pripisuje váhy jednotlivým signálom
  - súčet signálov musí byť 1!
  - konkrétne 50% gyroskop, 50% odometria

↳ ak rovnomerný filter ⇒ aký percentuálny pomer

Výsledky meraní

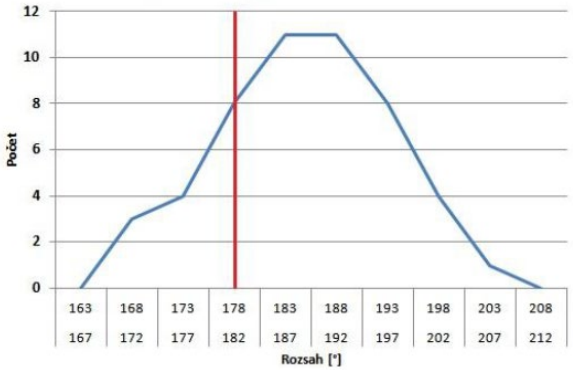
- priemerné hodnoty:
  - doľava 92,64° (smer. odchýlka 6,38°)
  - doprava 92,84° (smer. odchýlka 6,83°)

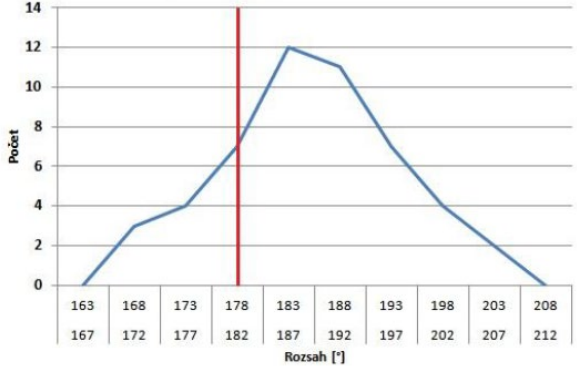




Výsledky meraní

- priemerné hodnoty:
  - doľava 186,84° (smer. odchýlka 8,52°)
  - doprava 186,86° (smer. odchýlka 8,66°)



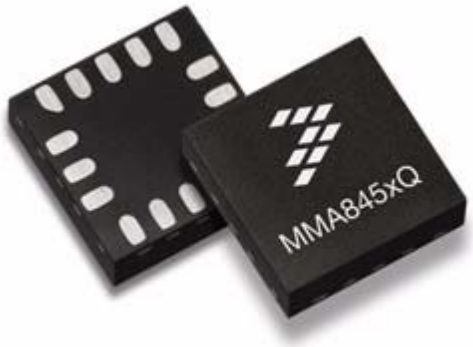


Zhodnotenie

- napriek menej kvalitnému gyroskopu dochádza k spresneniu lokalizácie
- skutočná priemerná hodnota otočenia je bližšie k žiadanej hodnote

Akcelerometer

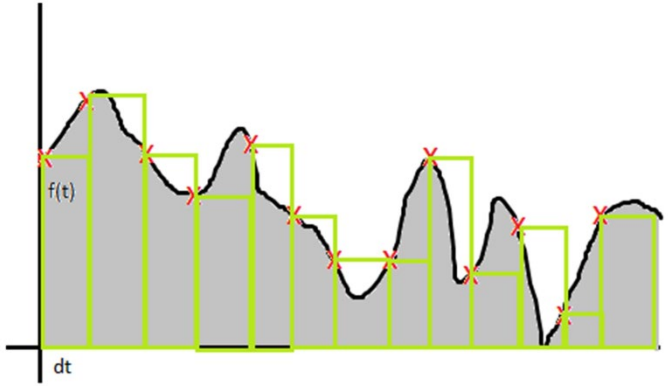
- meria vlastné zrýchlenie (akceleráciu) objektu v jednej osi
- zrýchlenie = derivácia rýchlosti → objekt akceleruje ak nastane zmena vo veľkosti alebo smere vektora rýchlosti
- vektor rýchlostí sa mení len pôsobením sily



Akcelerometer – lokalizácia

⇒ nie je to vhodné !

- pre lokalizáciu je potrebné integrovať zložky v osiach *x* a *y* (integrovanie chýb a šumov)
- výstup akcelerometria: diskrétne hodnoty zrýchlenia v čase → numerická integrácia = len približná aproximácia priebehu funkcie zrýchlenia → integrované aj chyby



	A	B	C	D
1	t(sec)	a(m/s^2)	v(m/s)	s(m)
2	0	1	=B2*1	=C2*1
3	1	1	=B3*1+C2	=C3*1+D2
4	2	5	=B4*1+C3	=C4*1+D3
5	3	1	=B5*1+C4	=C5*1+D4

Vlastnosti akcelerometrov

- vplyv gravitačného zrýchlenia a parazitných zrýchlení → uvádza sa pomer citlivosti v nežiaducich smeroch k požadovanému smeru
- citlivé na vibrácie od mechanických častí robota

Typy akcelerometrov

- podľa charakteru pôsobiacich síl:
  - mechanické
  - piezoelektrické
  - peizorezistívne
  - tepelné
  - elektroemechanické

„Zákony“ mechanického akcelerometra

- **Newtonov druhý zákon**: ak na teleso pôsobí sila, teleso sa pohybuje zrýchlením, ktoré je priamo úmerné sile a nepriamo úmerné hmotnosti telesa

$$a = \frac{F}{m}$$

zákony dáme do pomeru

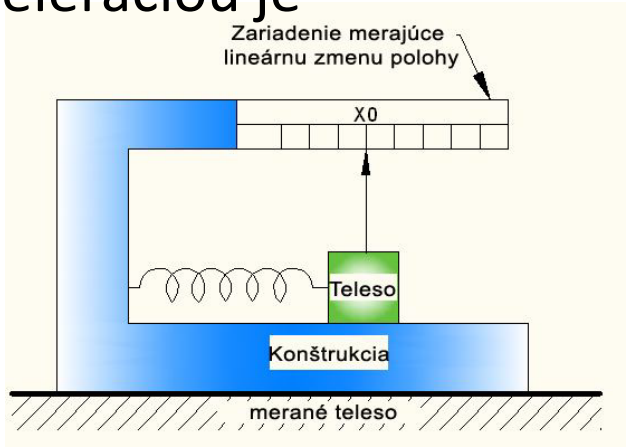
- **Hookov zákon**: vzťah medzi deformáciou pevného telesa vyvolanou pôsobením napätia a veľkosťou napätia

$$F = k.\Delta x$$

F – sila deformujúca teleso; *k* – tuhosť telesa; *Δx* – zmena dĺžky telesa

Mechanický akcelerometer

- **konštrukcia**: teleso schopné voľného pohybu spojené s pružinou upevnenou na konštrukcii snímača, obvody schopné vyhodnocovať lineárny pohyb
- **princíp**: ak sa akcelerometer pohne jedným smerom, teleso sa pohne opačným smerom; sila vyvolaná akceleráciou je brzdená silou naťahujúcej sa pružiny



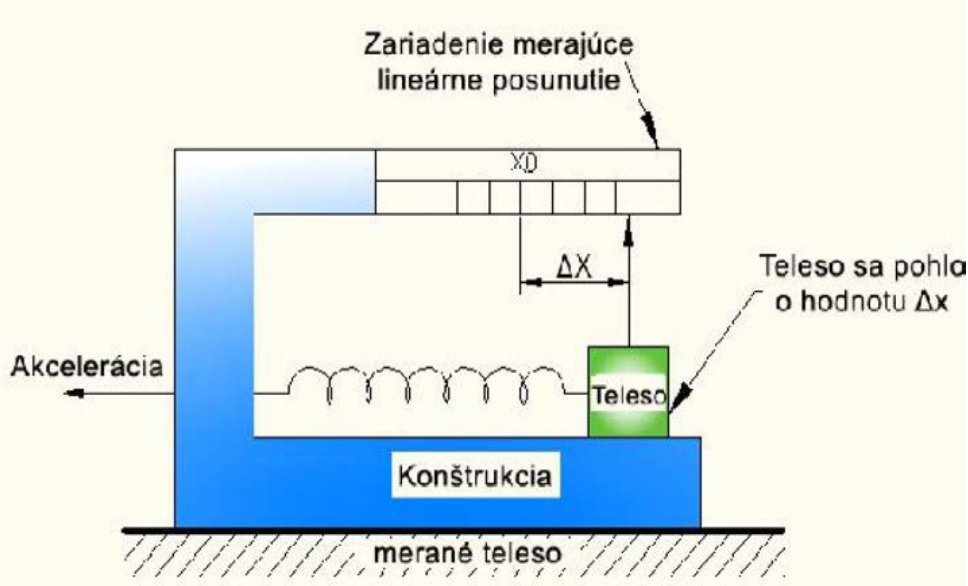
Mechanický akcelerometer – meranie

- konštatné zrýchlenie = sily v rovnováhe:

$$m.a = k.\Delta x$$

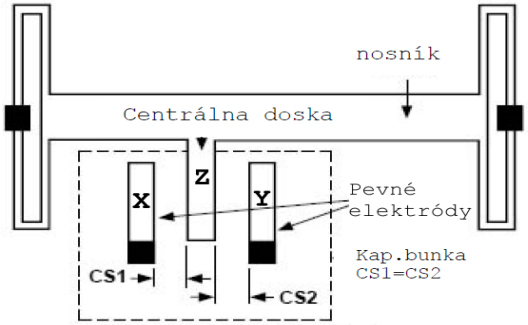
- zrýchlenie robota:

$$a = \frac{k.\Delta x}{m}$$

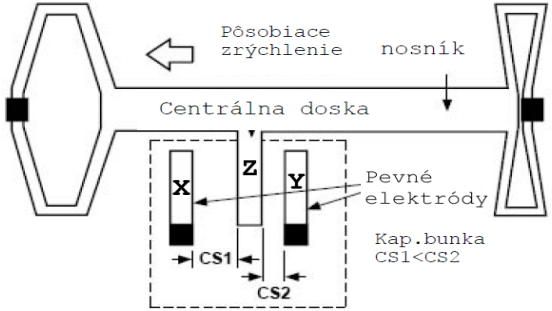


Elektromechanický akcelerometer

- **konštrukcia**: pevne ukotvená časť a pohyblivá časť prichytená pružinkami
- **princíp**: pôsobením zrýchlenia pohyblivý časť mení polohu vzhľadom na pevnú → zmena elektrickej veličiny (napr. kapacita)



a)



b)

MEMS akcelerometer

- **konštrukcia**: dve pevné elektródy a pohyblivá základná doska s elektródou; na koncoch dosky sú pružinky vytvárajúce moment pôsobiaci proti zrýchleniu
- **princíp**: MEMS elektromechanický akcelerometer → diferenciálny kapacitný delič → dva kondeznátory zapojené do série

MEMS akcelerometer

- **rovnováha**: signály na elektródach sa vynulujú a výstupné napätie je nulové
- **pôsobenie zrýchlenia**: proti vychýleniu pôsobí sila:

$$F = k.\Delta x$$

k – tuhosť pohyblivej dosky

Δx – zmena polohy pohyblivej elektródy

MEMS akcelerometer

- na hmotu pohyblivej elektródy pôsobí sila závislá od veľkosti zrýchlenia:

$$F = m.a$$

- lineárna závislosť zmeny polohy pohyblivej elektródy od zrýchlenia:

$$\Delta x = \frac{m.a}{k}$$

ako určíme Δx pomocou kapacity ↓?

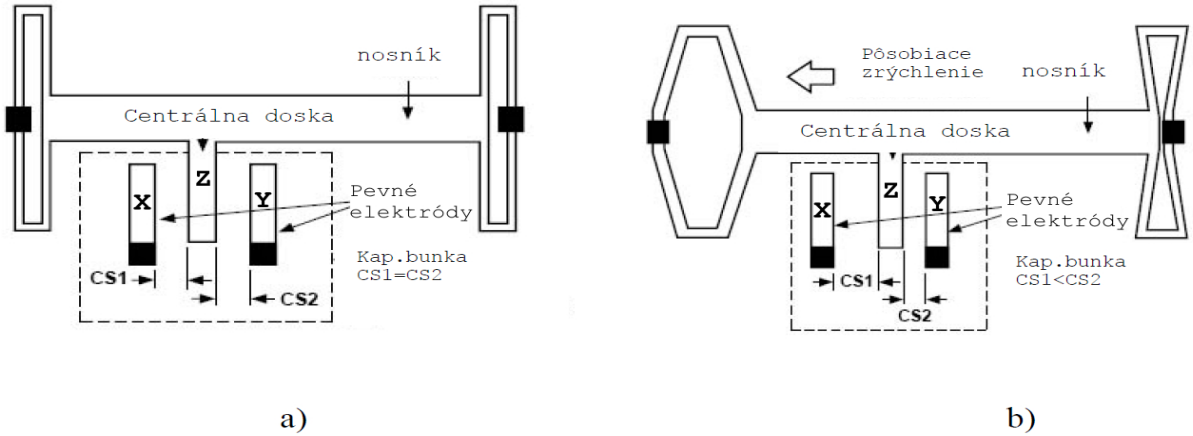
MEMS akcelerometer

- pre kapacity medzi elektródami platí:

$$C_{XY} = \frac{\varepsilon_0 . \varepsilon_r . S}{2.d}$$

$$C_{XZ} = CS1 = \frac{\varepsilon_0 . \varepsilon_r . S}{d + \Delta x}$$

$$C_{YZ} = CS2 = \frac{\varepsilon_0 . \varepsilon_r . S}{d - \Delta x}$$



ε_0 – permitivita vákua; ε_r – relatívna permitivita dielektrika medzi elektródami; S – plocha elektród; d – vzdialenosť medzi elektródami v stacionárnom stave

MEMS akcelerometer

- výstupné napätie náhradného obvodu:

$$U = -U_s + \frac{CS1}{CS1 + CS2}\left(U_s - \left(-U_s\right)\right) = \frac{CS1 - CS2}{CS1 + CS2}.U_s$$

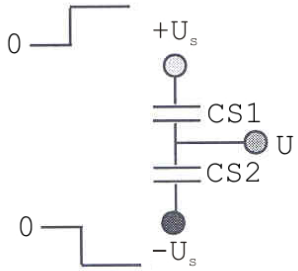
U_s – budiacie napätie

napäťová delička

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{CS_1}{CS_2} = \frac{U - \left(-U_s\right)}{U_s - U}$$

$$U(CS_2 + CS_1) = U_s(CS_1 - CS_2)$$

meraním výstupného napätia sa dokážeme ku Δx



MEMS akcelerometer

- dosadením rovníc:

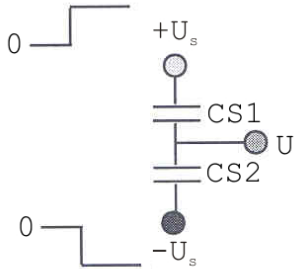
$$U = \frac{\dfrac{\varepsilon_0.\varepsilon_r.S}{d+\Delta x} - \dfrac{\varepsilon_0.\varepsilon_r.S}{d-\Delta x}}{\dfrac{\varepsilon_0.\varepsilon_r.S}{d+\Delta x} + \dfrac{\varepsilon_0.\varepsilon_r.S}{d-\Delta x}}.U_s = \frac{\varepsilon_0.\varepsilon_r.S.[d-\Delta x-(d+\Delta x)]}{\varepsilon_0.\varepsilon_r.S.[d-\Delta x+(d+\Delta x)]}.U_s = -\frac{\Delta x}{d}.U_s$$

deformáciu Δx vieme zmerať pomocou kvadratického U_s, rozdielnosti od elektród a výstupné napätie

$$U = -\frac{m.a}{d.k}.U_s$$

→ pomocou kondenzátorov vieme zmerať zrýchlenie!

- polarita rovnice je závislá od veľkosti kapacít CS1 a CS2, t. j. od smeru pôsobenia zrýchlenia



Zhodnotenie

hocijaký okraj

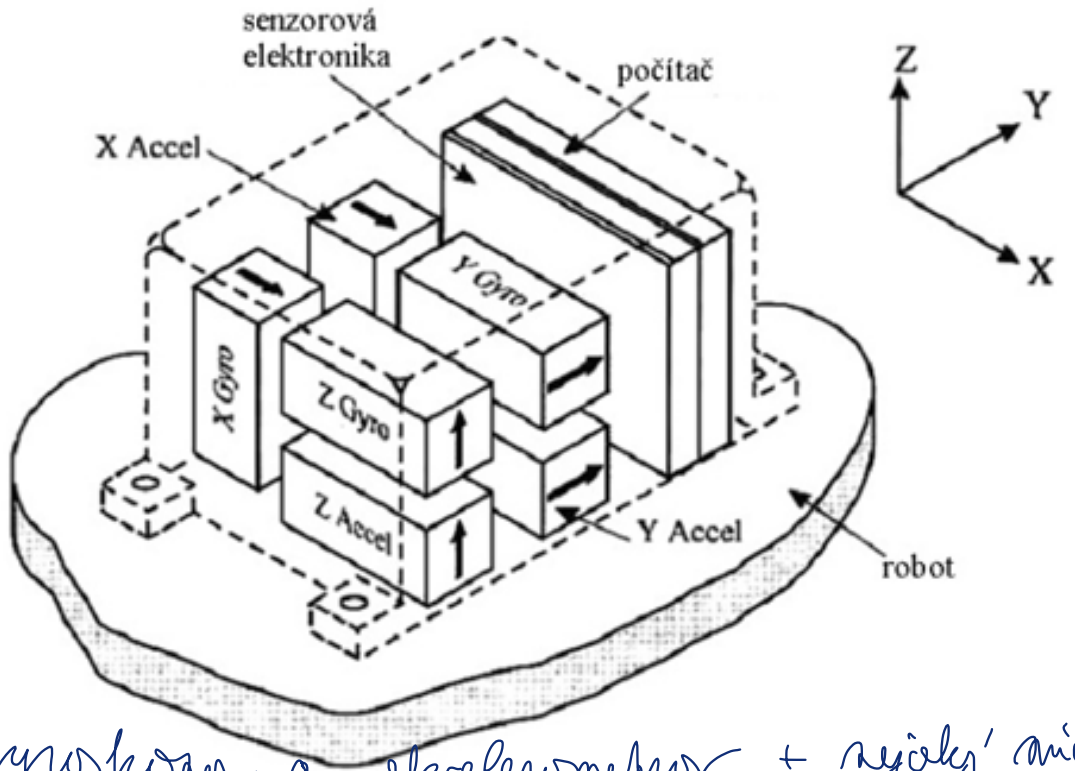
- možné použiť pri meraní prejdenej dráhy → **numerická integrácia a rušivé vplyvy** → nepresná lokalizácia

  ↳ môže zapríčiniť na meranie otočenia v osi z

- nemožné použiť pri meraní otočenia okolo osi z
- využitie:
  - odfiltrovanie rušivých signálov v INS
  - bezpečnostné snímače

! na toto to používame !

Inerciálna lokalizácia



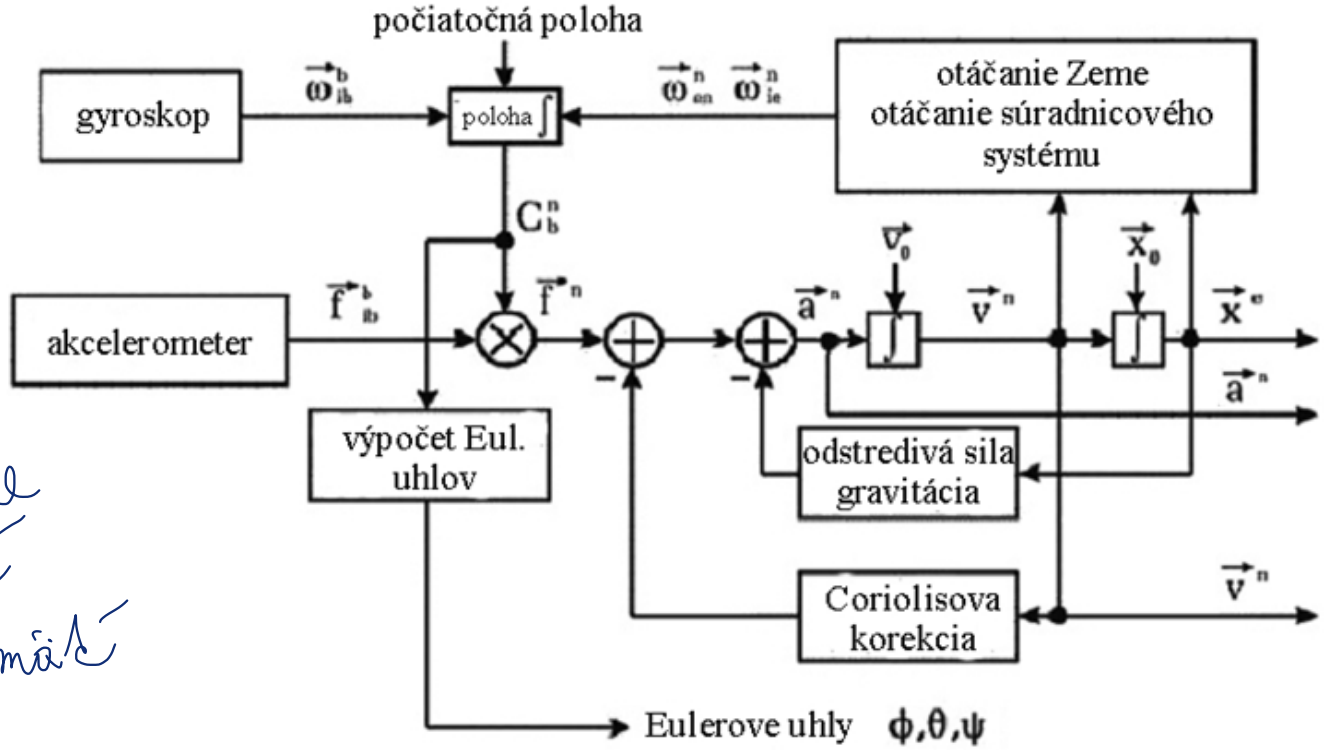
spojenie gyroskopov a akcelerometrov + rýchly micropočítač

Inerciálna lokalizácia – určenie polohy

- uhlové rýchlosti ω_x, ω_y a ω_z a lineárne zrýchlenia a_x, a_y a a_z
- Zem je považovaná za globálny súradnicový systém v podobe neakcelerovanej rovnej plochy, na ktorú pôsobí len gravitačná sila
- transformačná matica B_w obsahuje informácie o orientácii vzhľadom na globálny súradnicový systém vyjadrené pomocou troch uhlov:

$$| B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}$$

Inerciálna lokalizácia – principiálna schéma



nemusíme vedieť rozpamätať

Inerciálna lokalizácia – určenie polohy

- zmena v uhloch otočenia za časový interval – integrácia lichobežníkovou metódou z merania aktuálnej a predchádzajúcej uhlovej rýchlosti:

$$\overline{\sigma}_b^k = t^k.\left(\overline{\omega}_b^k + \overline{\omega}_b^{k-1}\right)/2$$

- transformácia do globálneho súradnicového systému:

$$\overline{\sigma}_w^k = B_w^k.\overline{\sigma}_b^k$$

len uhlové rýchlosti

Transformačná matica

- aktualizácia transformačnej matice: len jedno pohybol

$$B_w^{k+1} = T_{\overline{\sigma}_k, |\overline{\sigma}_k|} . B_w^k$$

- matica transformujúca lokálny súradnicový systém do globálneho súradnicového systému je obyčajne samotná reprezentácia orientácie (matica B_w):

$$B_w = D.W_w$$

$$W_w = I$$

$$B_w = D$$

D – pôvodne neznáma transf. matica

W_w – matica reprezentujúca natočenie globálneho súradnicového systému vzhľadom na systém samotný

Transformačná matica – Eulerove uhly

- matica *D* vyjadrená pomocou Eulerových uhlov a reprezentuje otočenie inerciálneho lokalizačného systému o uhly ϕ , θ a ψ okolo osí svetového súradnicového systému *x*, *y* a *z* (rotácie v poradí *z*, *y* a *x*)*:*

$$D = \begin{pmatrix} \cos\psi.\cos\theta & -\sin\psi.\cos\phi + \cos\psi.\sin\phi & \sin\psi.\cos\phi + \cos\psi.\sin\theta.\sin\phi \\ \sin\psi.\cos\theta & \cos\psi.\cos\phi + \sin\psi.\sin\theta.\sin\phi & -\cos\psi.\sin\phi + \sin\psi.\sin\theta.\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta.\sin\phi & \cos\theta.\cos\phi \end{pmatrix}$$

len v skratke

Transformačná matica – Eulerove uhly

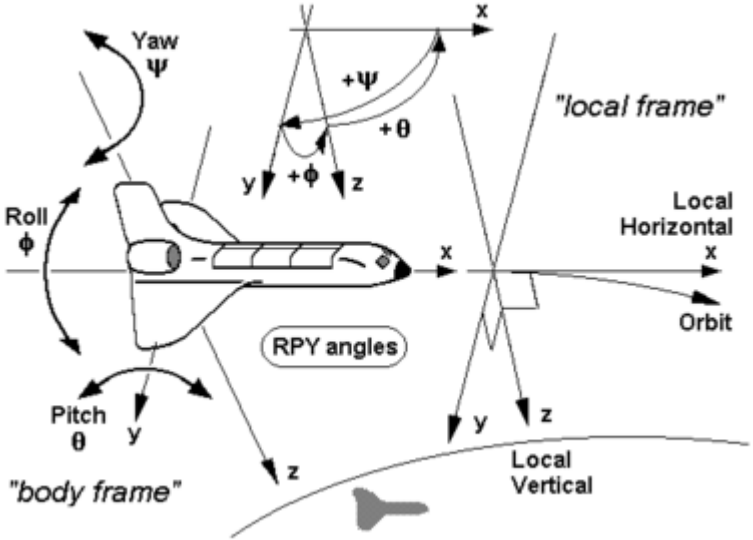
kto vieme stanoviť

- uhly je možné stanoviť:

$$\phi = arctan\left(\frac{b_{32}}{b_{33}}\right)$$

$$\theta = arcsin(-b_{31})$$

$$\psi = arctan\left(\frac{b_{21}}{b_{11}}\right)$$



INS – kompenzácia gravitačného zrýchlenia

- gravitačné zrýchlenie:

len v zhrabe

$$\bar{g}_w = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 9{,}80665 m.s^{-2} \end{pmatrix}$$

- zrýchlenie inerciálneho lokalizačného systému v svetovom súradnicovom systéme:

$$\bar{a}_w = B_w.\bar{a}_b - \bar{g}_w$$

INS – kompenzácia gravitačného zrýchlenia

- rýchlosť inerciálneho lokalizačného systému v svetovom súradnicovom systéme:

$$\overline{v}_w^k = \overline{v}_w^{k-1} + t^k.\left(\overline{a}_w^k + \overline{a}_w^{k+1}\right)/2$$

len zjednodušená metoda

- poloha inerciálneho lokalizačného systému v svetovom súradnicovom systéme:

$$\overline{p}_w^k = \overline{p}_w^{k-1} + t^k.\left(\overline{v}_w^k + \overline{v}_w^{k+1}\right)/2$$

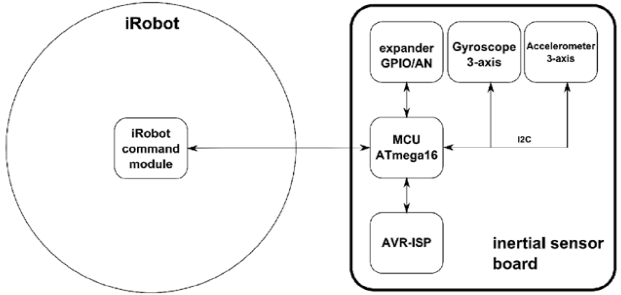
Lokalizácia pomocou INS

toto zapamätať

- len pri pohyboch bez kritických otrasov
- odhad polohy robota s chybou do 0,1% z prejdenej vzdialenosti
- väčšinou nevhodná pre pozemné mobilné roboty (cena, plynulé pohyby, veľké rozmery INS)
- montážne chyby, elektrické chyby, senzorové chyby

INS v iRobot Create

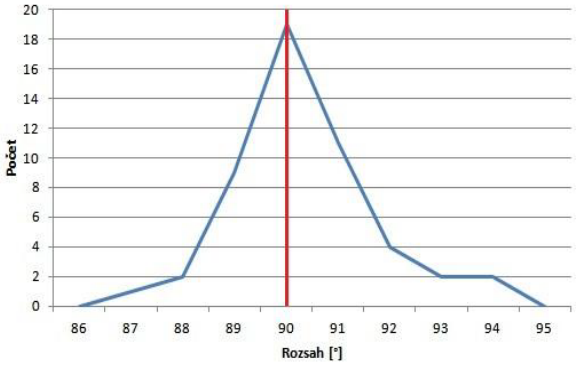
- MEMS gyroskop ITG-3200
- MEMS akcelerometer MMA845xQ
- filtrovacie metódy – Kalmanov a komplementárny filter

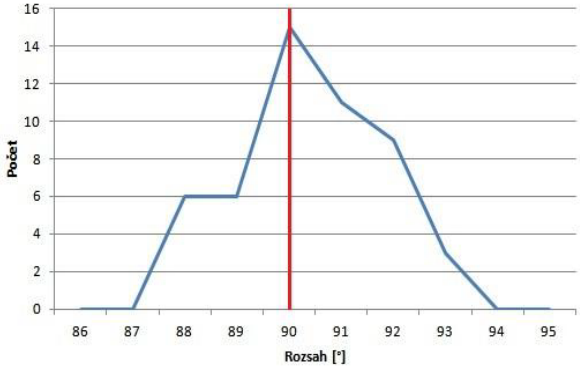


Výsledky meraní – komplementárny filter

- priemerné hodnoty:
  - 90,34° doľava (smerodajná odchýlka 1,39°)
  - 90,40° doprava (smerodajná odchýlka 1,39°)

dobré výsledky

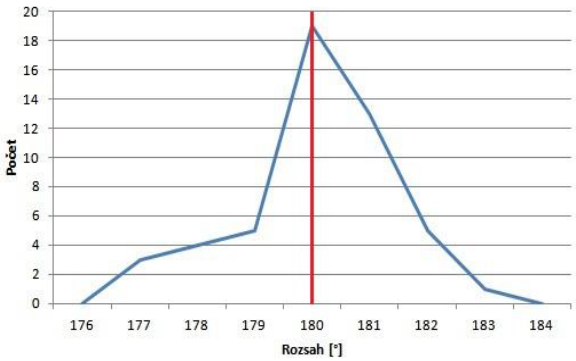


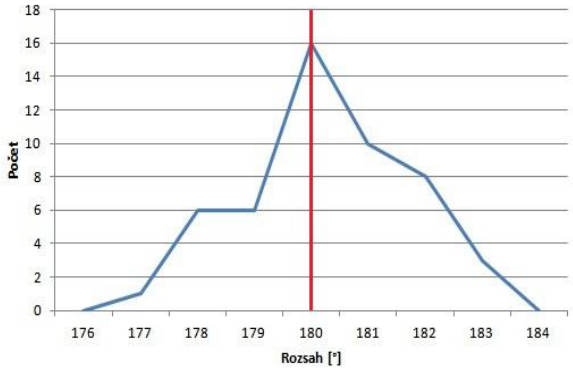


Výsledky meraní – komplementárny filter

- priemerné hodnoty:
  - 180,08° doľava (smerodajná odchýlka 1,34°)
  - 180,28° doprava (smerodajná odchýlka 1,44°)

dobré výsledky

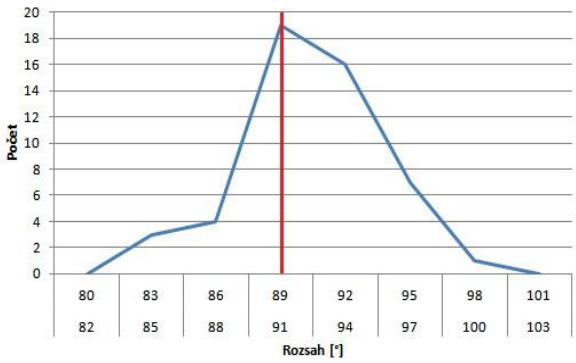


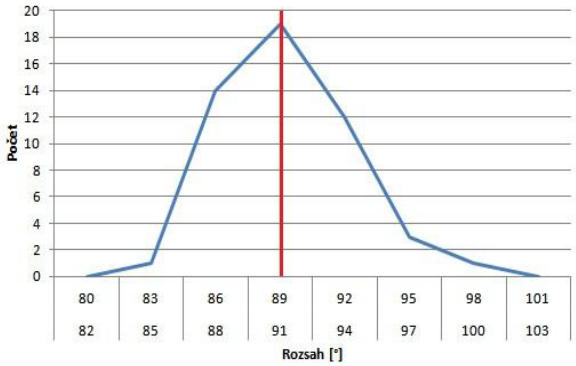


Výsledky meraní – Kalmanov filter

- priemerné hodnoty:
  - 91,64° doľava (smerodajná odchýlka 3,14°)
  - 90,36° doprava (smerodajná odchýlka 2,96°)

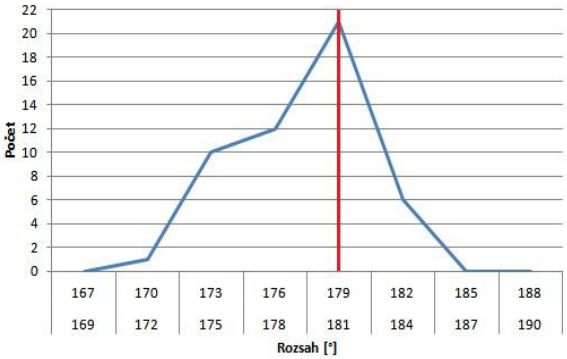
↳ nebol dobre navrhnutý
iznak z 0 mal
lepšie výsledky





Výsledky meraní – Kalmanov filter

- priemerné hodnoty:
  - 178,22° doľava (smerodajná odchýlka 3,04°)
  - 180,14° doprava (smerodajná odchýlka 3,33°)



Zhodnotenie INS iRobot Create

- podobné hodnoty pre oba smery otáčania
- tolerancia merania pre akcelerometer 2,5°, pre gyroskop 6° → výsledná tolerancia je stále do 3° (len 2% meraní sú mimo tolerancie)

Magnetické kompasy

- magnetometre – prístroje merajúce magnetické polia
- v mobilnej robotike určenie absolútnej orientácie vzhľadom na postavenie voči magnetickému poľu Zeme
- typy:
  - mechanické magnetické kompasy
  - kompasy s magnetickou indukčnou sondou
  - magnetoinduktívne kompasy
  - kompasy na báze Hallovho efektu
  - magnetorezistívne kompasy
  - magnetoelastické kompasy

↳ dobre použiť na začiatku pohybu robota na získanie absolútnej polohy

↳ na začiatku na KALIBRÁCIU

Kompas s magnetickou indukčnou sondou – vlastnosti

- nízka energetická spotreba
- neobsahuje pohyblivé časti
- odolný voči otrasom a vibráciám
- rýchle spustenie do chodu
- nízka cena

NEVÝHODA

- vplyv okolitých magnetických anomálií

Nula dáva pozor na objekty okolo

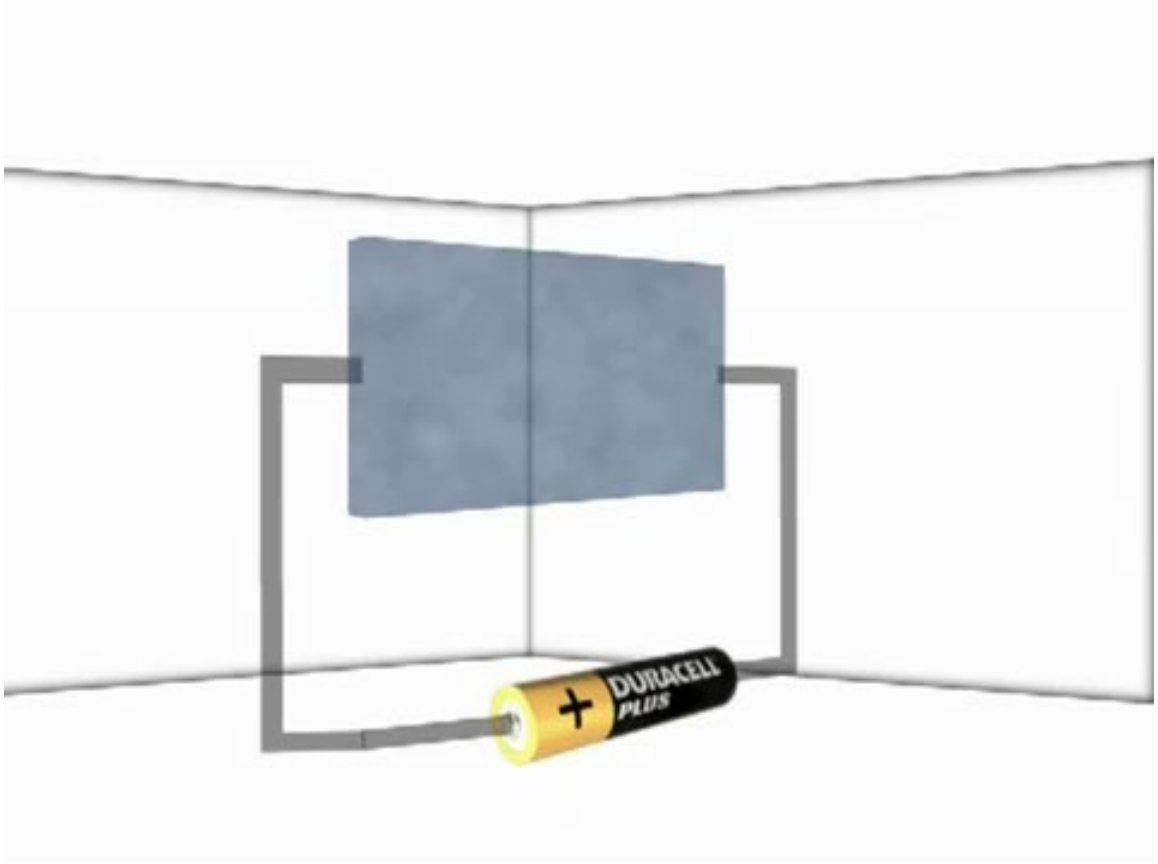
Kompas na báze Hallovho efektu

len rýchlo prebehol princíp

- **konštrukcia**: vodič alebo polovodič po celej dĺžke napajáný konštantným prúdom

- **princíp**: elektrické pole vytvorené okolo vodiča, na ktoré vplýva vonkajšie magnetické poľa; magnetický tok = smer elektrického potenciálu identifikuje smer magnetického poľa v jednom rozmere

Hallov efekt



Kompas na báze Hallovho efektu

- v mobilnej robotike dva vodiče:

$$\theta = arctan \frac{B_x}{B_y}$$

θ – uhol medzi magnetickým poľom a snímačom

B_x, B_y – zložky hustoty magnetického toku namerané Hallovými snímačmi

Robot s magnetickým kompasom

Na čo je vhodný kompas v mobilnej robotike?

- veľká nelinearita
- nepresný
- vplyv okolitých magnetických anomálií

- počiatočné určenie natočenia robota (kalibrácia) !

na čo sa používa ?

Toto môže byť už otázka skúšky!

Metódy lokalizácie využívajúce význačné vlastnosti prostredia

Význačné vlastnosti prostredia pre účely lokalizácie

použijeme na lokalizáciu

- podmienka: presné snímače schopné zachytiť charakteristické vlastnosti prostredia využiteľné pri lokalizácii

- charakteristické vlastnosti prostredia: **značky prostredia**, orientácia objektov v prostredí, relatívne vzťahy objektov v prostredí, **uhlový histogram**...

1)

Uhlový histogram

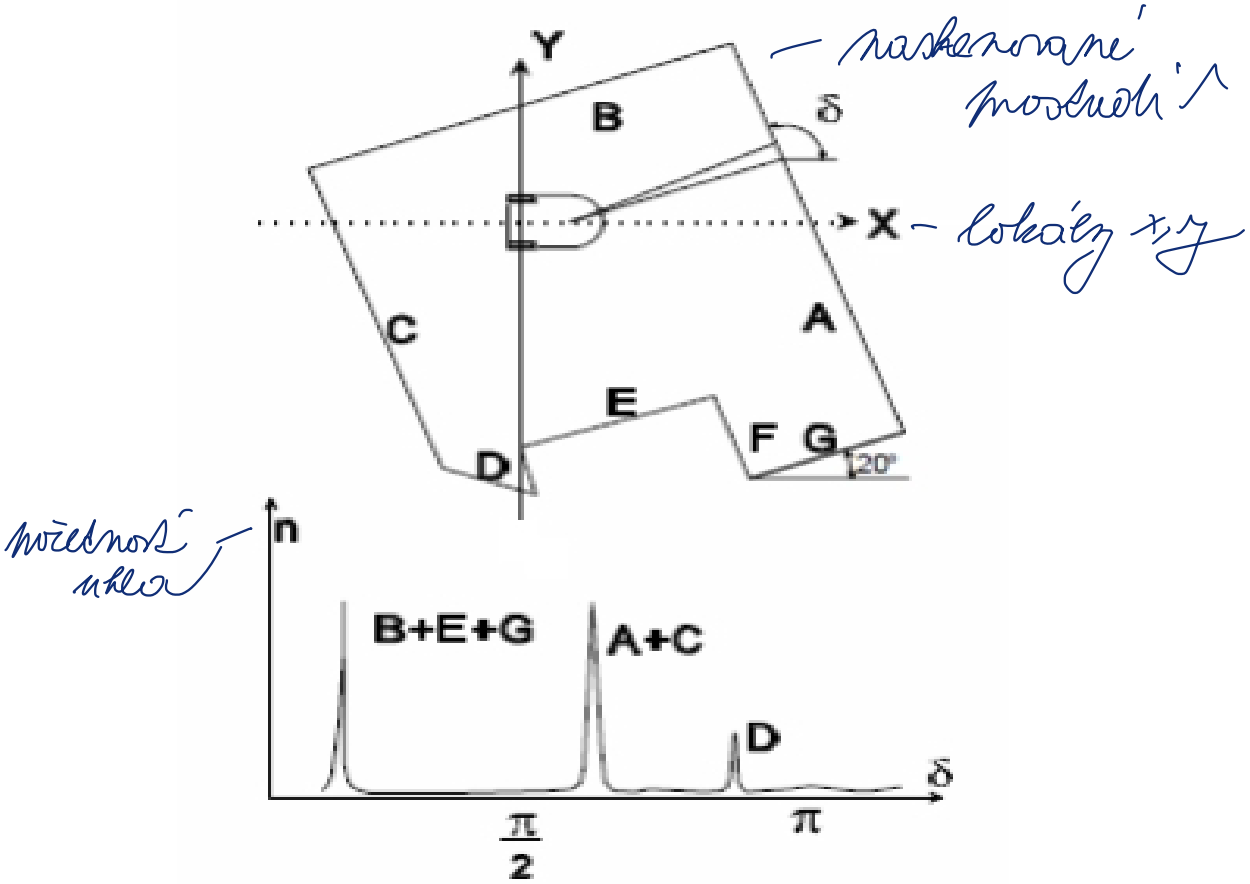
- princíp: nájdenie oblastí v prostredí, ktorých charakter sa nemení

- lokalizácia: porovnaním dvoch časovo po sebe nasledujúcich údajových štruktúr zo snímačov sa určí rotačná a translačná odchýlka robota = relatívna lokalizácia

Tvorba uhlového histogramu

- k nameraným bodom sa vytvoria vektory
- koncové body vektorov sú pospájané = objekty v prostredí
- body jednej plochy vytvoria súvislú líniu, tá sa skladá z menších čiar s rovnakou orientáciou
- uhly medzi čiarami a osou x odpovedajú orientácii plochy vzhľadom na robot
- početnosť týchto uhlov v grafe = uhlový histogram

Tvorba uhlového histogramu



Zmena orientácie z uhlového histogramu

- medzi dvoma po sebe nasledujúcimi histogramami vznikne fázový posun, ak pohyb robota bol dostatočné malý tak, že rozloženie maxím v histograme zostáva zachované
- potom pre určenie zmeny otočenia robota je možné použiť vzájomnú koreláciu histogramov:

Robot len tak
ýchlo nerotuje

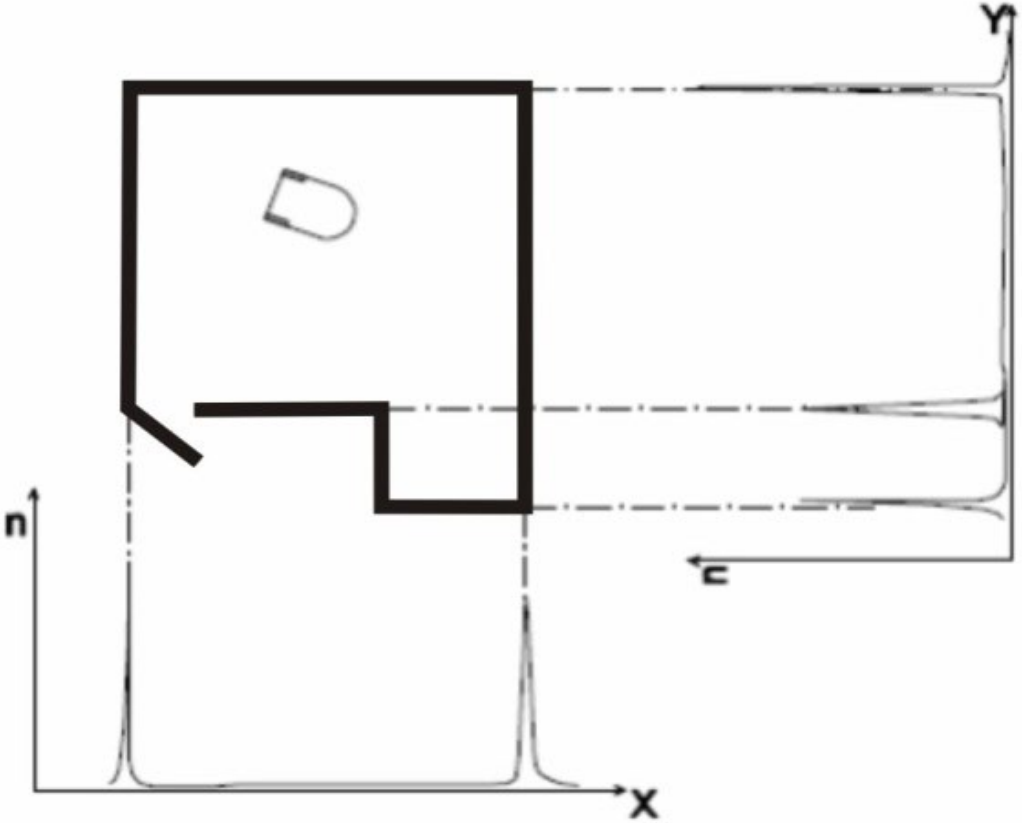
$$c(\varphi) = \lim_{\alpha \to \infty} \frac{1}{2.x} \int_{-\alpha}^{\alpha} f(\alpha).g(\alpha + \varphi) d\alpha$$

korelácia má maximum v bode ϕ, ak *f(α)* má maximum v *α* a zároveň *g(α+ϕ)* má maximum v *α+ϕ*

Zmena pozície z uhlového histogramu

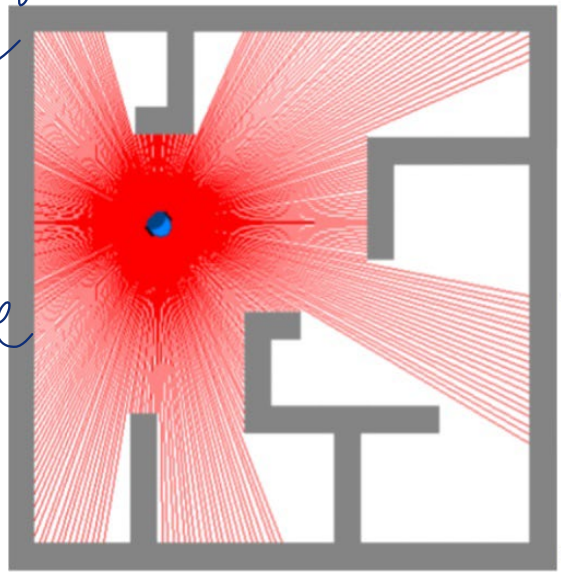
- dva histogramy normalizované na globálny súradnicový systém (na základe maxima v uhlovom histograme)
- početnosť rovnakých vzdialenosti od osí x a y
- aplikácia korelácie pri podmienke kolmých stien v prostredí
- odolné voči šumu, pohyblivé prekážky neovplyvňujú výsledok
- potreba 360° údajov (nemožné z konštrukčného hľadiska alebo merací rozsah snímačov) → projekčné filtre

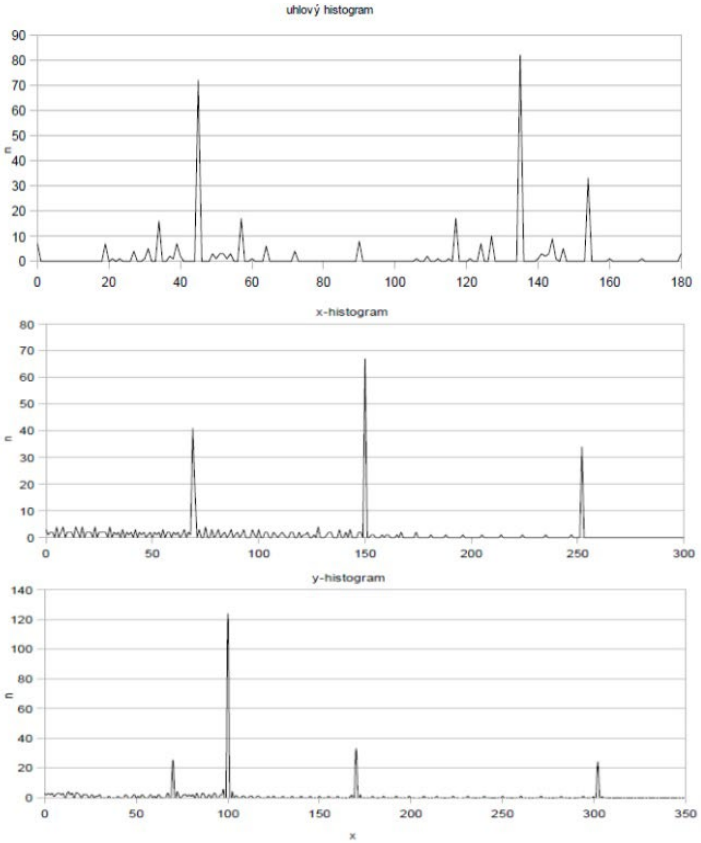
XY histogram



Simulácia histogramov

→ na základe dvojice snímok tak vieme vypočítať ako sa robot v osi x, y a o aký uhol





početnosť osi x

početnosť osi y

Simulácia histogramov

- Ukážka

Značky prostredia

2. možnosť

- definícia (všeobecná): geografická vlastnosť využívaná na nájdenie cesty pri spätnom prechode neznámym prostredím
- definícia (robotická): vlastnosť prostredia, ktorú je robot schopný rozlíšiť z údajov získaných zo senzorického systému

- prirodzené značky prostredia: rohy miestností, rohy objektov, hrany objektov, a pod.
- umelé značky prostredia: obdĺžniky, čiary, kružnice, prídavné kódy, a pod.

Ako nájsť značky prostredia? heuristika

- filtrácia údajov zo snímača
  - hrubý filter
  - vyhladzovací filter
- segmentácia údajov
- klasifikácia značiek

Hrubý filter

- odstraňuje chybné a neplatné údaje → zvyšuje konzistenciu údajov
- aproximácia údajov na základe určenia predchádzajúceho koeficientu zmeny hodnôt
- pripočítavanie *k*-násobku koeficienta od posledného platného údaja

Hrubý filter

nemusíme vedieť

- príklad údajov:

$$[800, 803, 805, 0, 0, 0, 815, 819, 823, \ldots]$$

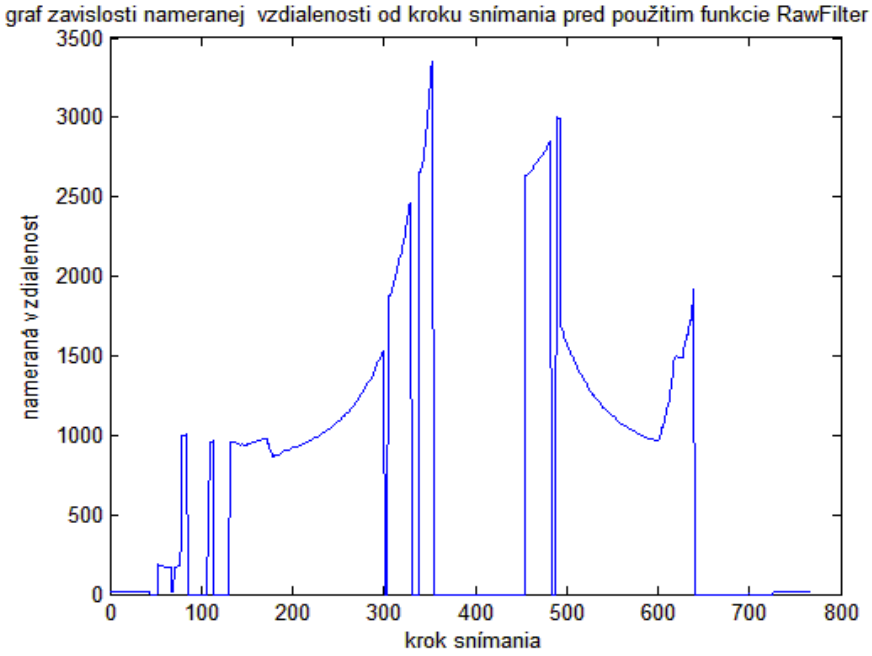
- koeficient:

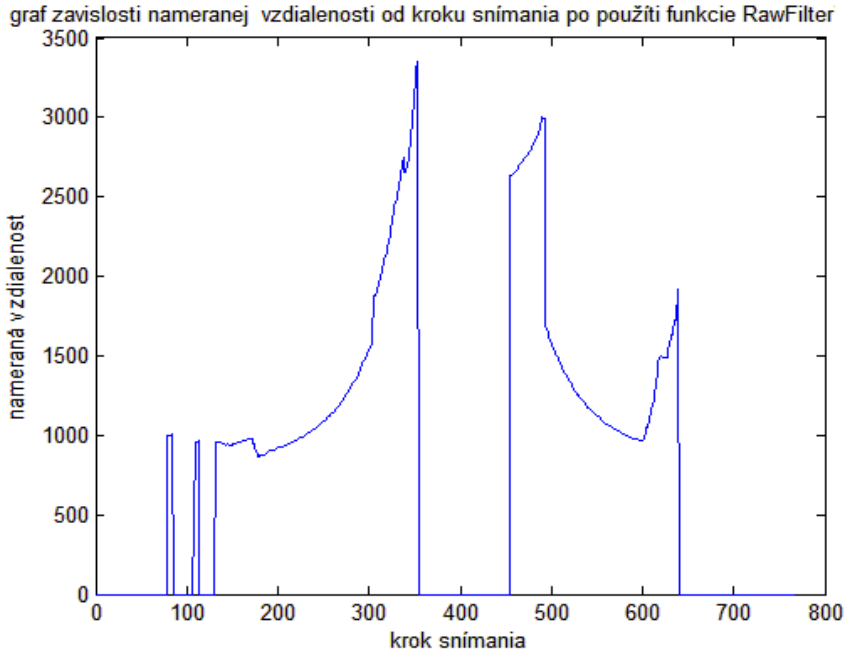
$$\left(\frac{(805-803)+(803-800)}{2}\right) \cong 3$$

- upravené údaje:

$$[800, 803, 805, 808, 811, 814, 815, 819, 823, \ldots]$$

Príklad filtrácie údajov



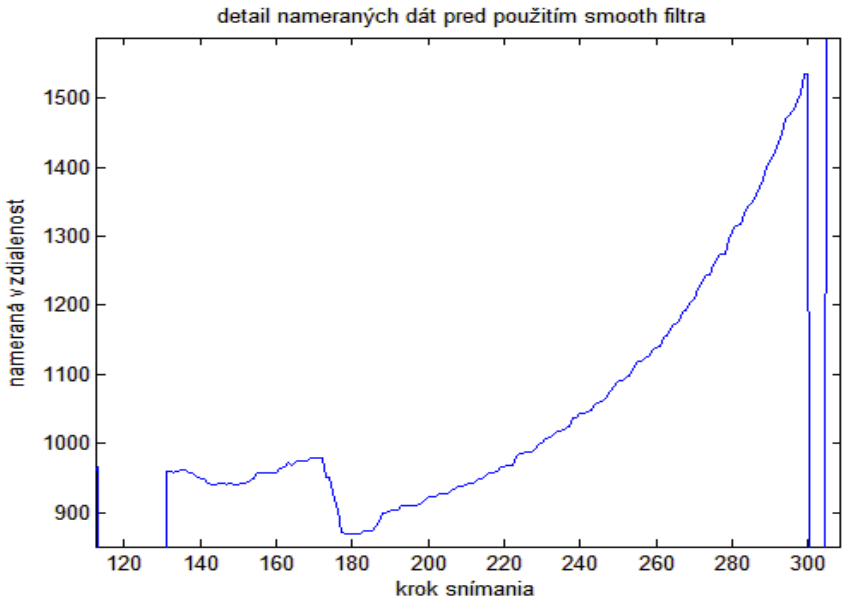


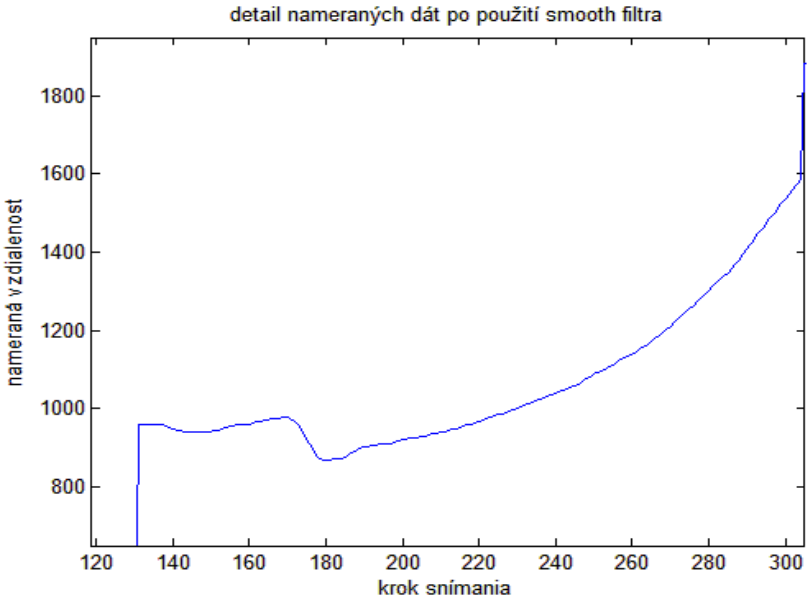
Vyhladzovací filter

- vyhladí priebeh nameraných údajov
- funkcia smooth z Matlab

↳ bude aplikovať ďalší filter

Príklad filtrácie údajov





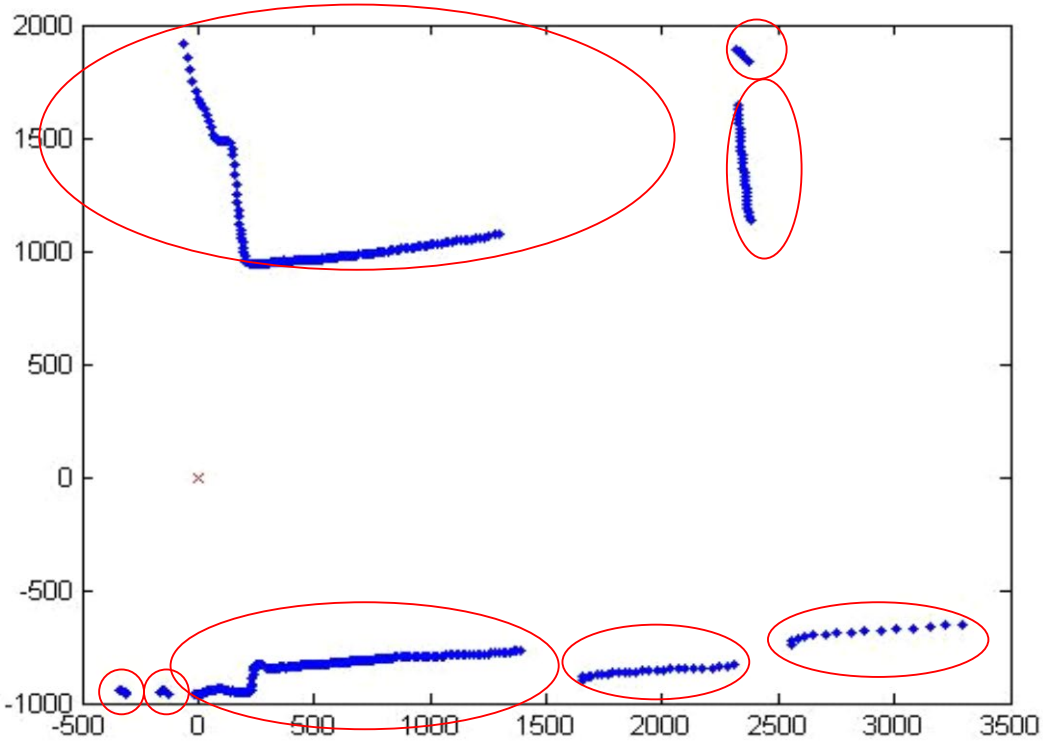
Ako sa dá s
údajmi pracovať

Segment

- <u>definícia</u>: spojitá postupnosť údajov rôznych od nuly, ktoré spolu logicky súvisia, t. j. tvoria jeden objekt
- údaje segmentované na základe empiricky zvolenej hodnoty
- každý segment má počiatočný a koncový bod

- značky prostredia sú určené na základe **lokálnych maxím a miním (extrémov)** v jednotlivých segmentoch

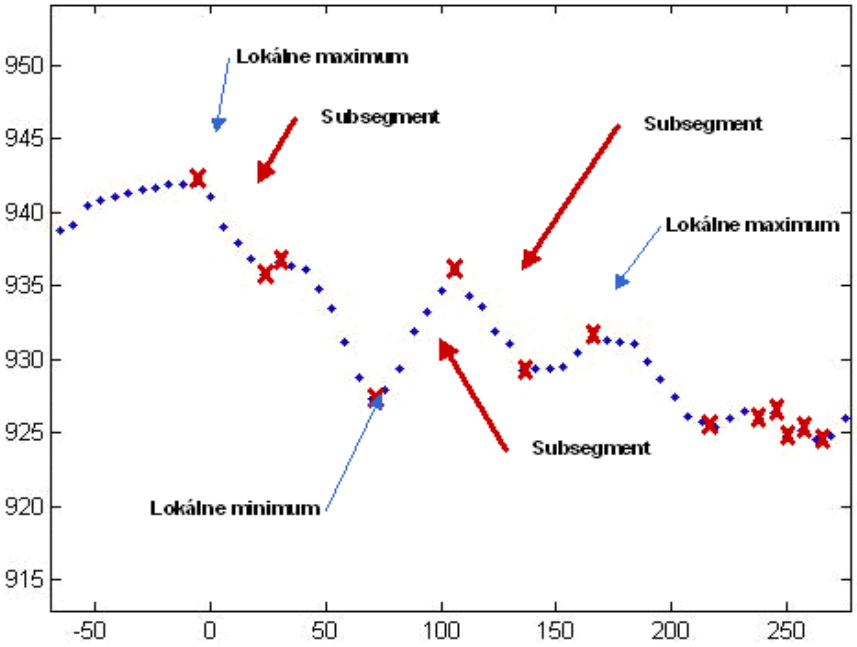
Segmentácia



Subsegmenty

- rozdelenie segmentov na základe lokálnych extrémov v segmente

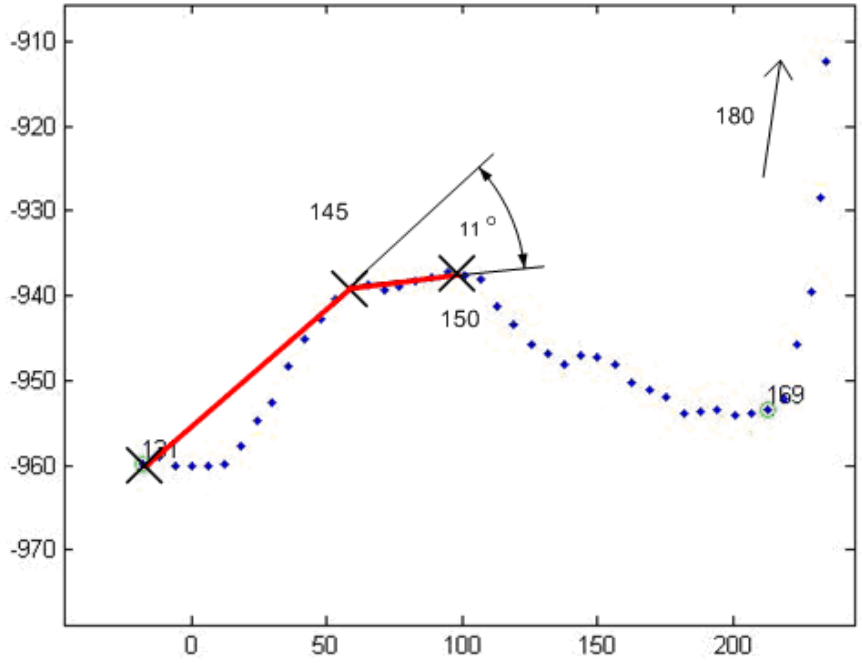
zaujímajú nás body

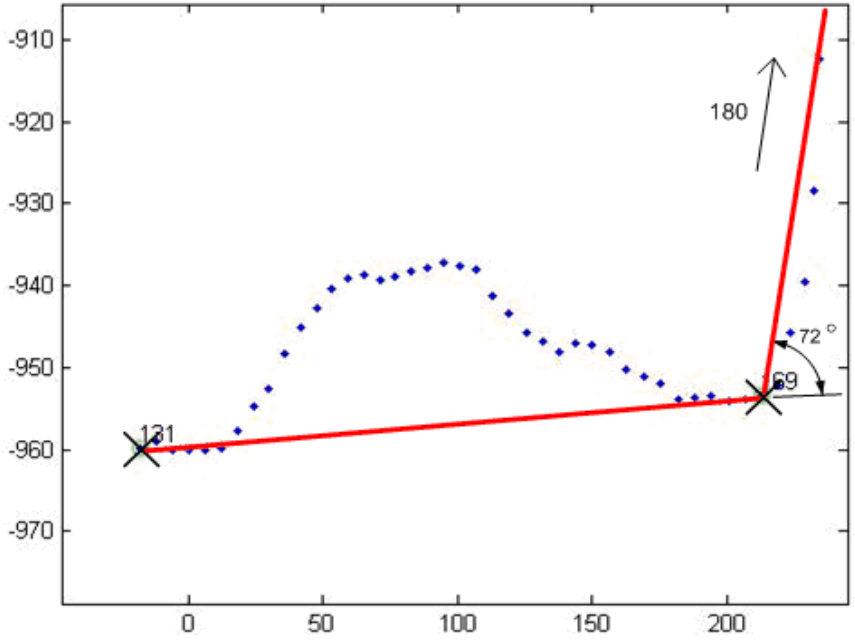


Kategorizácia extrémov (heuristická)

1. Z počiatočných a koncových bodov dvoch po sebe nasledujúcich subsegmentov sú vytvorené vektory.
2. Ak je vzájomný uhol týchto vektorov väčší ako 40° a menší ako 140°, t. j. empiricky zvolené okolie 90°, daný bod je považovaný za reálny extrém, t. j. značku prostredia.
3. Ak daný bod nie je reálny extrém, je odstránený zo zoznamu značiek prostredia.

Kategorizácia extrémov

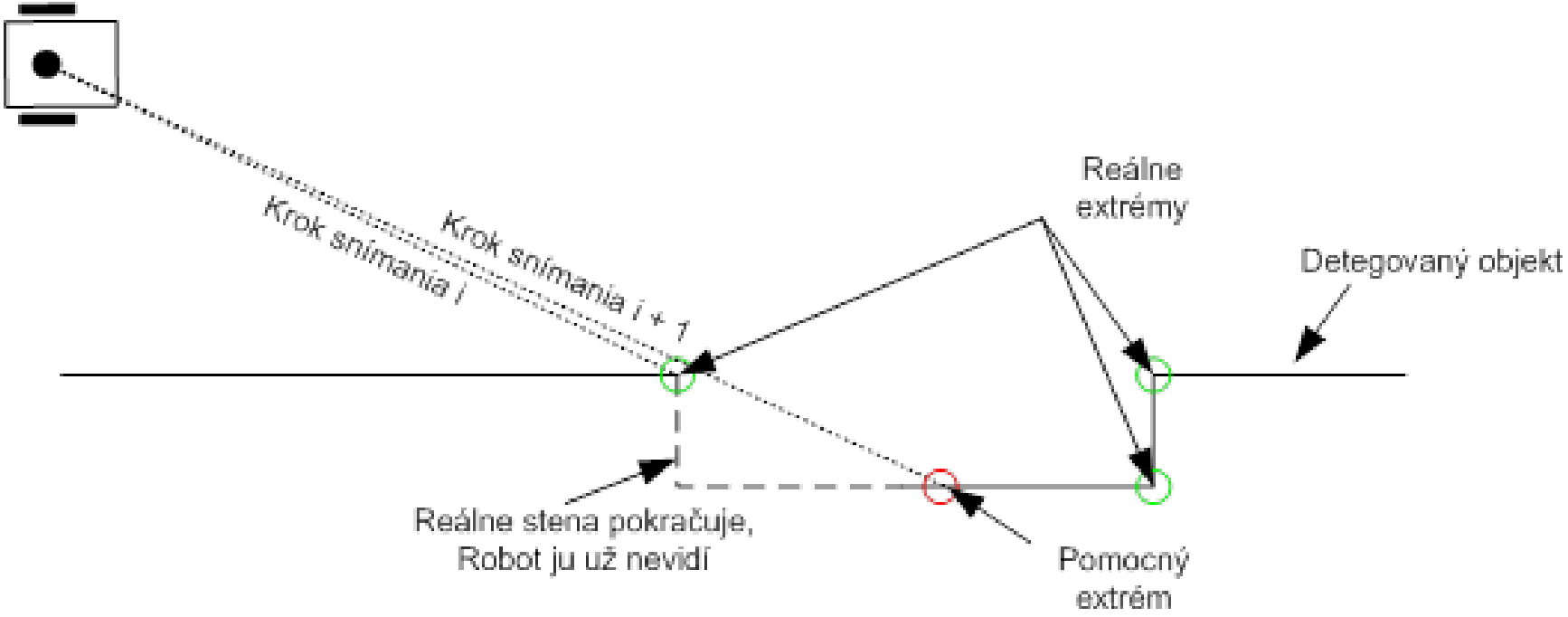




Pomocný extrém

- definícia: skok v hodnote vzdialenosti medzi dvoma po sebe nasledujúcimi údajmi, ktorý je väčší ako empiricky stanovená hodnota (reálny extrém je bod bližšie k robotu, susedný bod je pomocný extrém)
- naznačuje, že prekážka pravdepodobne pokračuje
- možno využiť pri navigácii, t. j. ich okolie je potrebné preskúmať

Kategorizácia extrémov



Kde využijem značky prostredia? Trigonometrické metódy pre lokalizáciu robotov

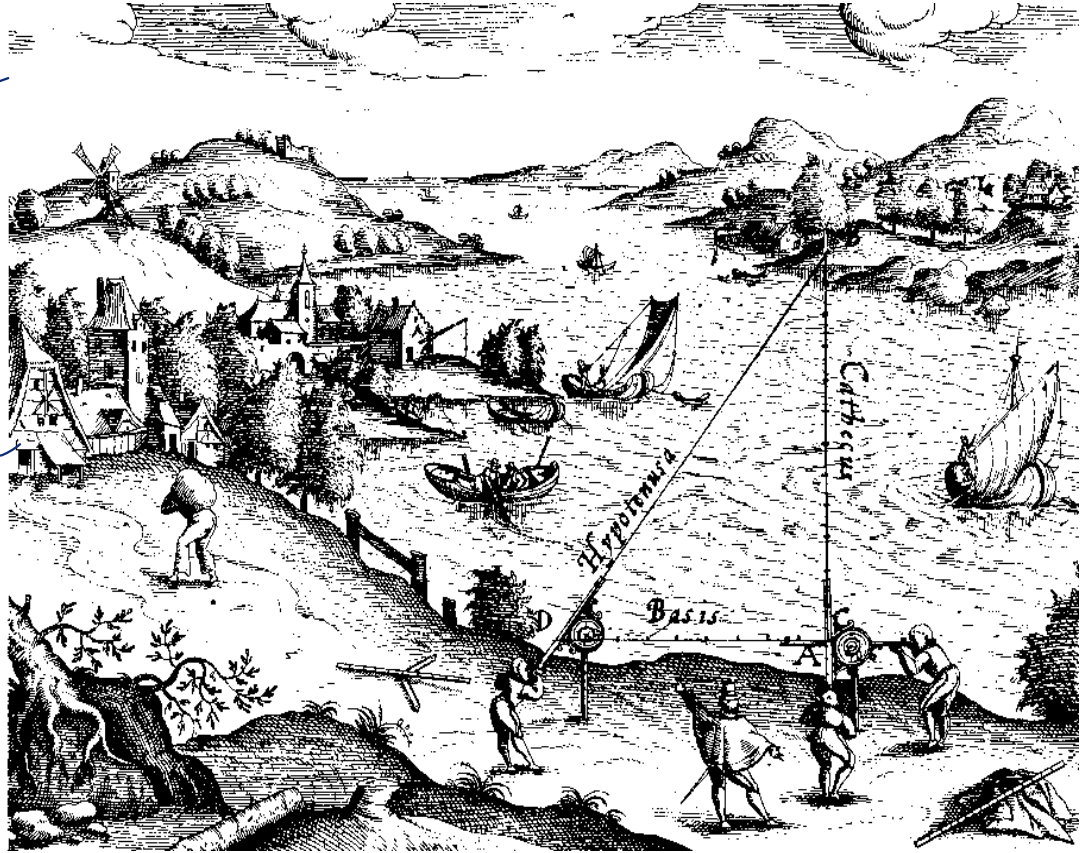
- triangulácia: proces určenia polohy na základe merania uhlov ku koncovým bodom pevnej základne
- trilaterácia: využíva meranie vzdialenosti k týmto bodom

- využívajú geometrické vzťahy medzi bodom, ktorého poloha je určovaná, a medzi bodmi, ktorých poloha je známa
- potrebná znalosť polohy význačných bodov prostredia

Triangulácia v histórii

meranie šírky rieky

alebo vzdialenosť lodí od pobrežia



Triangulácia v histórii

- šírka rieky (euklidovská geometria):

$$l = \frac{d}{tan\,\alpha} + \frac{d}{tan\,\beta}$$

$$d = \frac{l}{\frac{1}{tan\,\alpha} + \frac{1}{tan\,\beta}}$$

$$d = \frac{l.sin\,\alpha.sin\,\beta}{sin(\alpha + \beta)}$$

l – známa vzdialenosť bodov, z ktorých sú určované uhly α a β

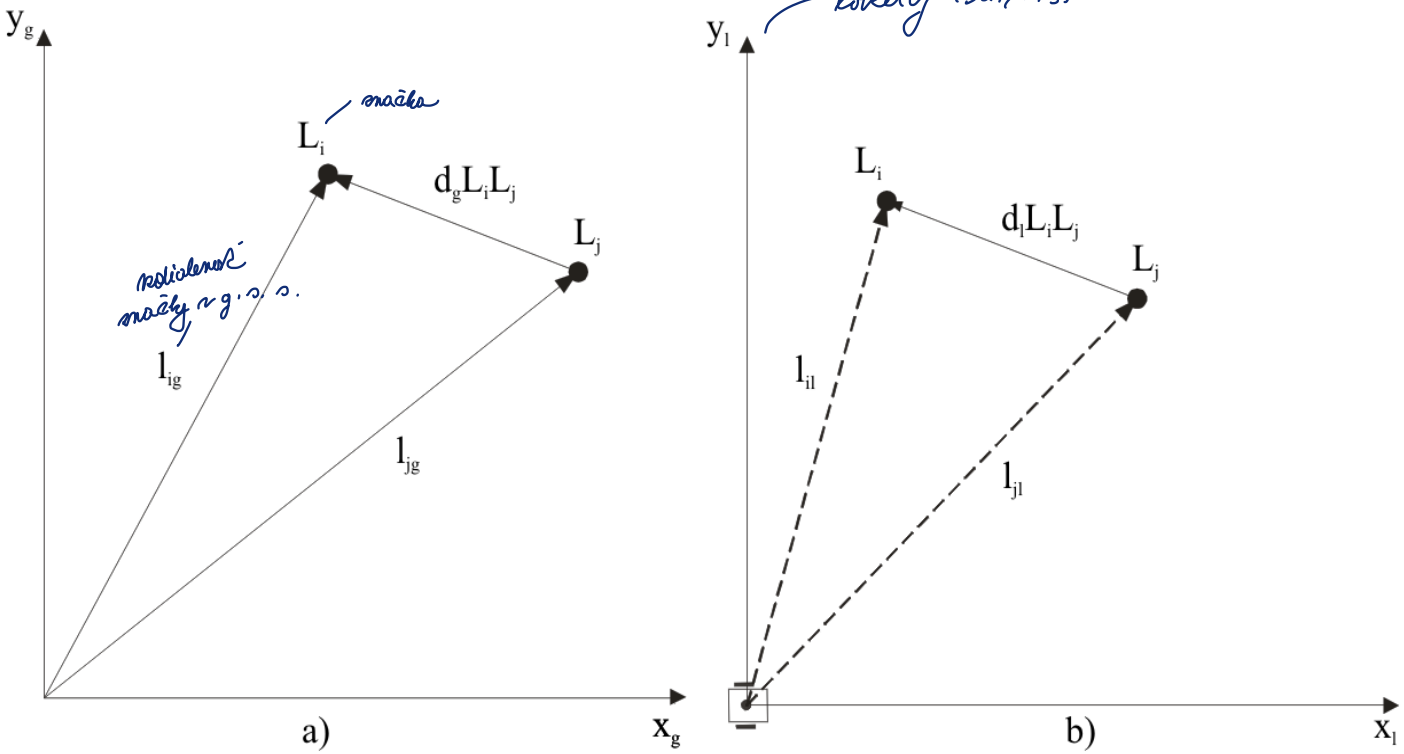
d – určovaná vzdialenosť

Značky prostredia v súradnicových systémoch

g – globálny súr. s

na začiatku sú rovnaké

lokálny súr. s.



Uhly k značkám prostredia

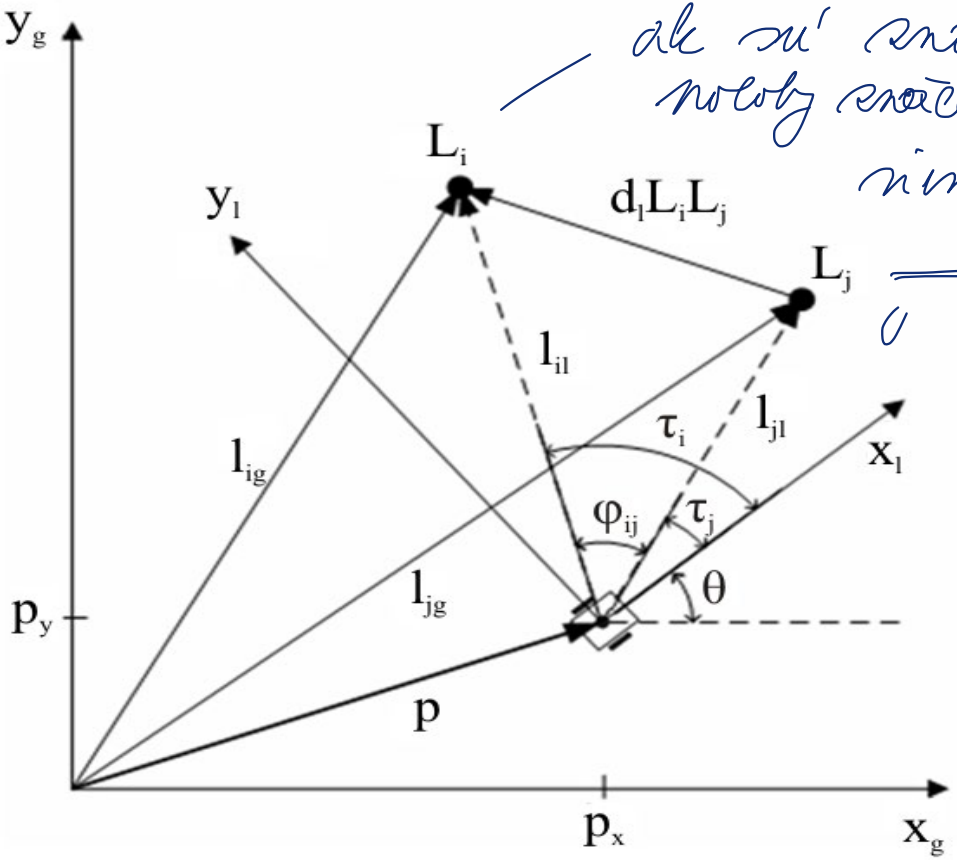
- uhol k značke v lokálnom súradnicovom systéme:

$$\tau_i = \angle(l_{il}, x_l)$$

- zorný uhol, t. j. relatívny uhol medzi dvoma značkami:

$$\varphi_{ij} = \tau_i - \tau_j$$

Polohové vektory k značkám



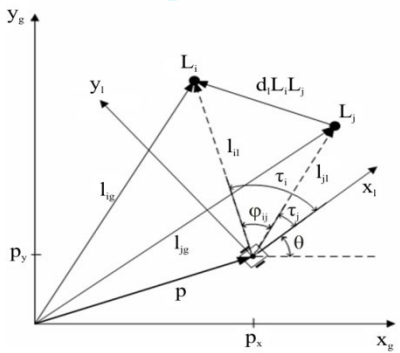
ale sú známe polohy značiek, tak nie určiť polohu robota

Uhly k značkám prostredia

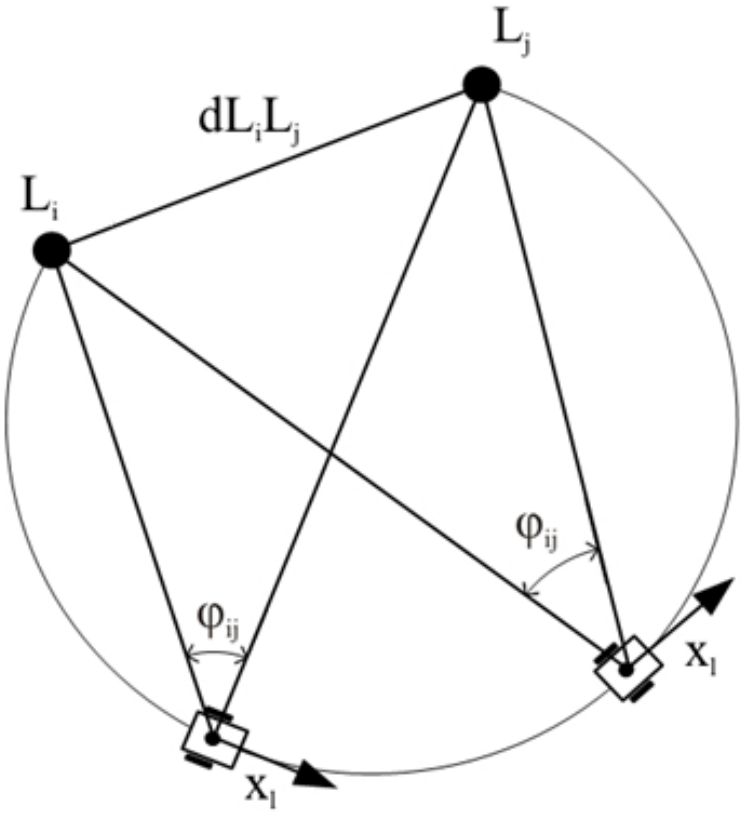
- ak je uhol θ=0:

$$d_l L_i L_j = \bar{l}_{il} - \bar{l}_{jl} = d_g L_i L_j = \bar{l}_{ig} - \bar{l}_{jg} = d L_i L_j$$

- **platí**: ak sú známe vektory k značkám a sú namerané príslušné uhly k značkám, potom je možné stanoviť polohu robota v globálnom súradnicovom systéme

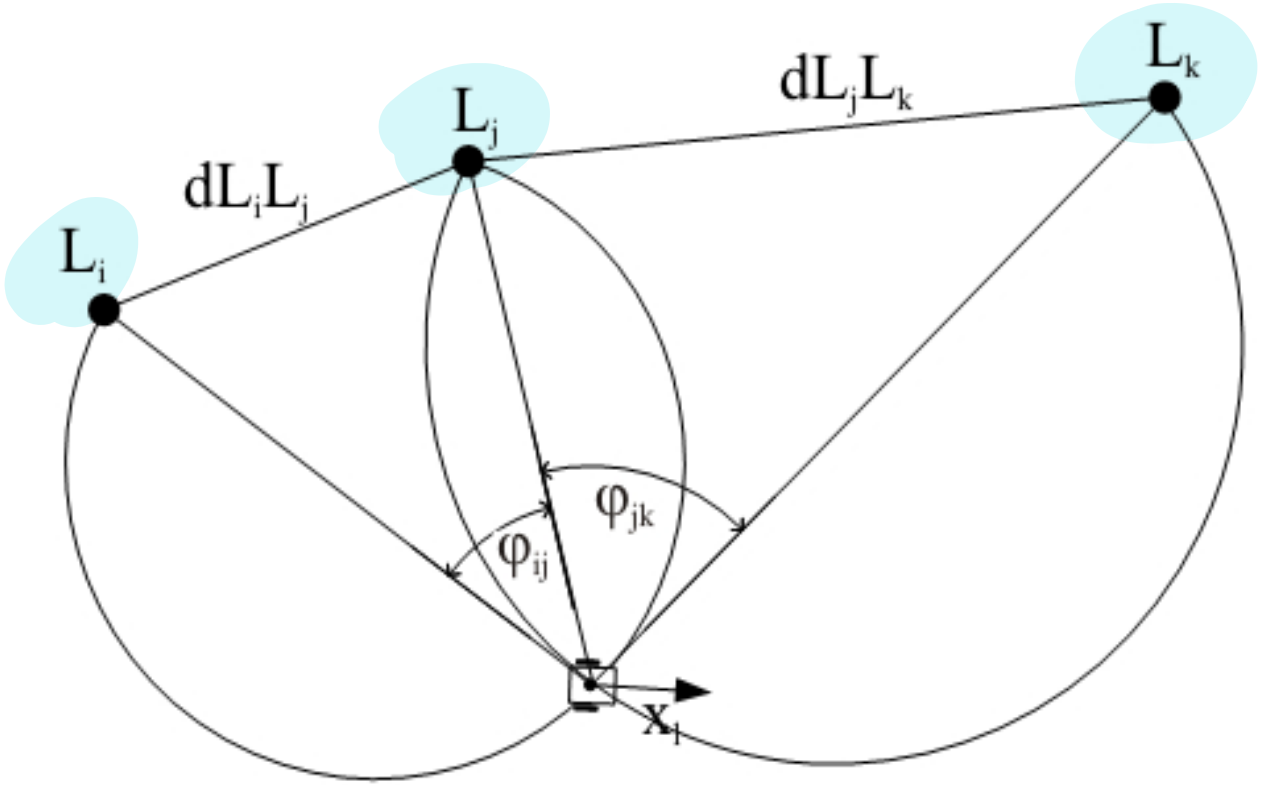


Určenie abs. pozície robota – 2 značky



tu máme nejednoznačnú polohu a preto musíme použiť 3 značky

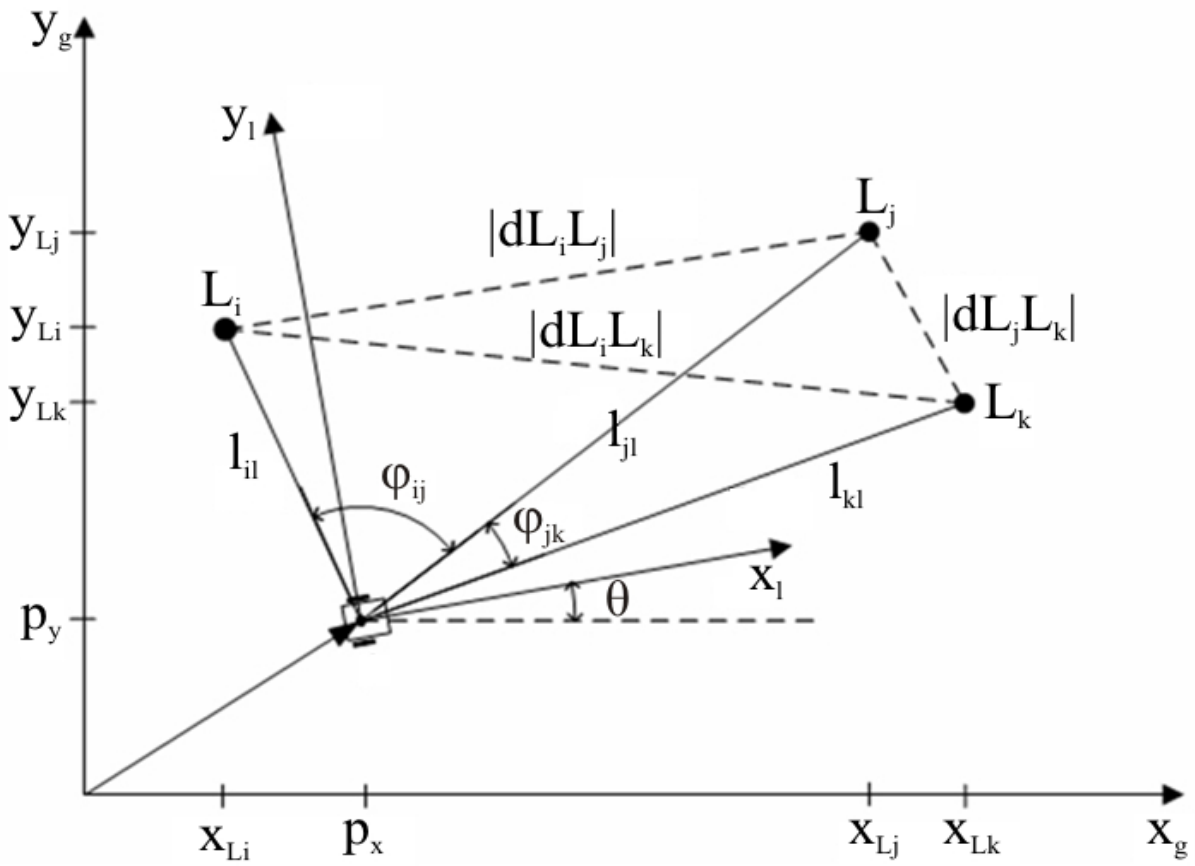
Určenie abs. pozície robota – 3 značky



Určenie abs. pozície robota – 3 značky

- obe kružnice je potrebné opísať analyticky:
  - kosínusová veta
  - stanovenie vzdialeností medzi značkami a robotom na základe vzájomných vzdialeností značiek a odpovedajúcich zorných uhlov

Určenie abs. pozície robota – 3 značky



Určenie abs. pozície robota – 3 značky

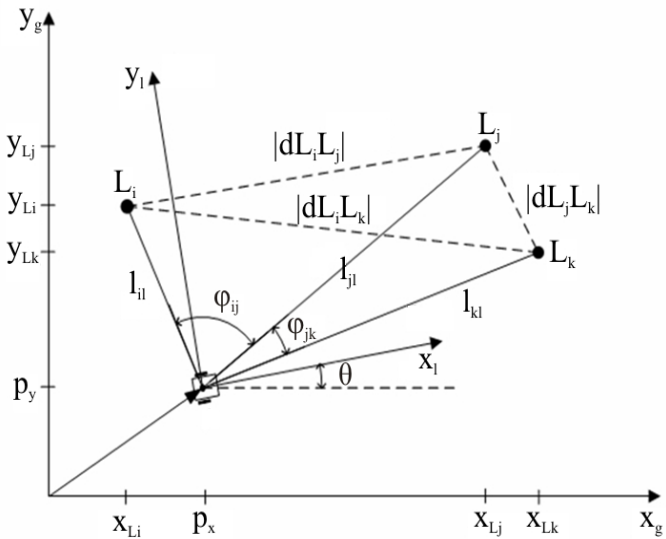
- aplikovaním kosínusovej vety na každú možnú dvojicu značiek:

$$\left|dL_iL_j\right|^2 = \left|l_{il}\right|^2 + \left|l_{jl}\right|^2 - 2.\left|l_{il}\right|.\left|l_{jl}\right|.\cos\varphi_{ij}$$

$$\left|dL_iL_k\right|^2 = \left|l_{il}\right|^2 + \left|l_{kl}\right|^2 - 2.\left|l_{il}\right|.\left|l_{kl}\right|.\cos\varphi_{ik}$$

$$\left|dL_jL_k\right|^2 = \left|l_{jl}\right|^2 + \left|l_{kl}\right|^2 - 2.\left|l_{jl}\right|.\left|l_{kl}\right|.\cos\varphi_{jk}$$

- riešením sú vzdialenosti značiek od robota, t. j. l_{il}, l_{jl} a l_{kl}



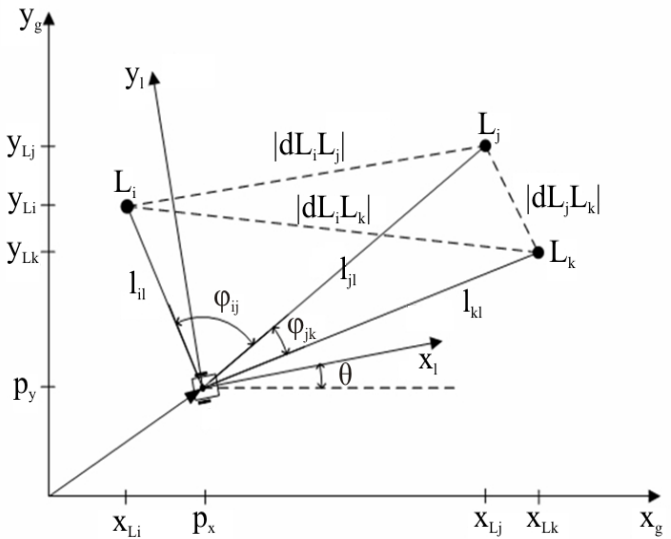
Určenie abs. pozície robota – 3 značky

- pre stanovenie súradníc robota, je potrebné riešiť sústavu:

$$|l_{il}|^2 = (x_{Li} - p_x)^2 + (y_{Li} - p_y)^2$$

$$|l_{jl}|^2 = (x_{Lj} - p_x)^2 + (y_{Lj} - p_y)^2$$

$$|l_{kl}|^2 = (x_{Lk} - p_x)^2 + (y_{Lk} - p_y)^2$$



Určenie abs. pozície robota – 3 značky

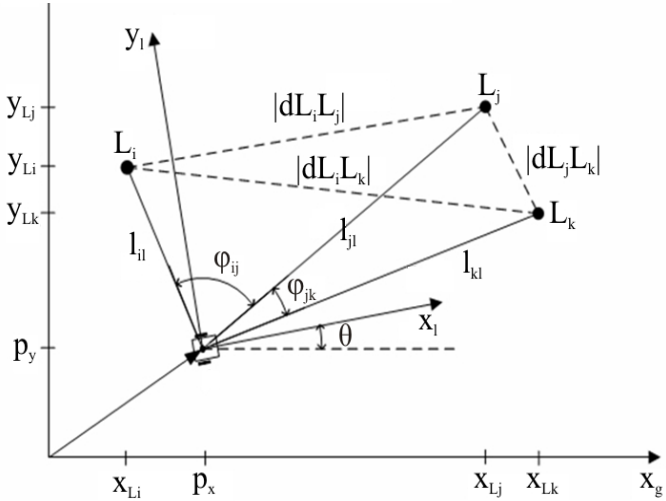
- odčítaním druhej a tretej rovnice od prvej:

$$|l_{il}|^2 - |l_{jl}|^2 = x_{Li}^{\ 2} + x_{Lj}^{\ 2} + 2.p_x.(x_{Lj} - x_{Li}) + y_{Li}^{\ 2} - y_{Lj}^{\ 2} + 2.p_y.(y_{Lj} - y_{Li})$$

$$|l_{il}|^2 - |l_{kl}|^2 = x_{Li}^{\ 2} + x_{Lk}^{\ 2} + 2.p_x.(x_{Lk} - x_{Li}) + y_{Li}^{\ 2} - y_{Lk}^{\ 2} + 2.p_y.(y_{Lk} - y_{Li})$$

- **neznámymi sú p_x a p_y**

↳ ak máme známu polohu 3 značiek, tak vieme určiť jednoznačnú polohu

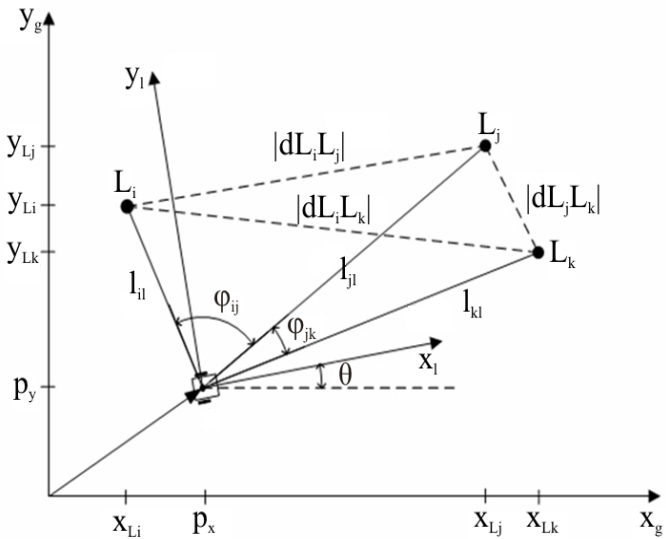


Určenie abs. pozície robota – 3 značky

- orientácia robota je určená:

$$\theta = \angle\left(\bar{l}_{il}, x_g\right) - \tau_i$$

$$\bar{l}_{il} = \bar{l}_{ig} - \bar{p}$$

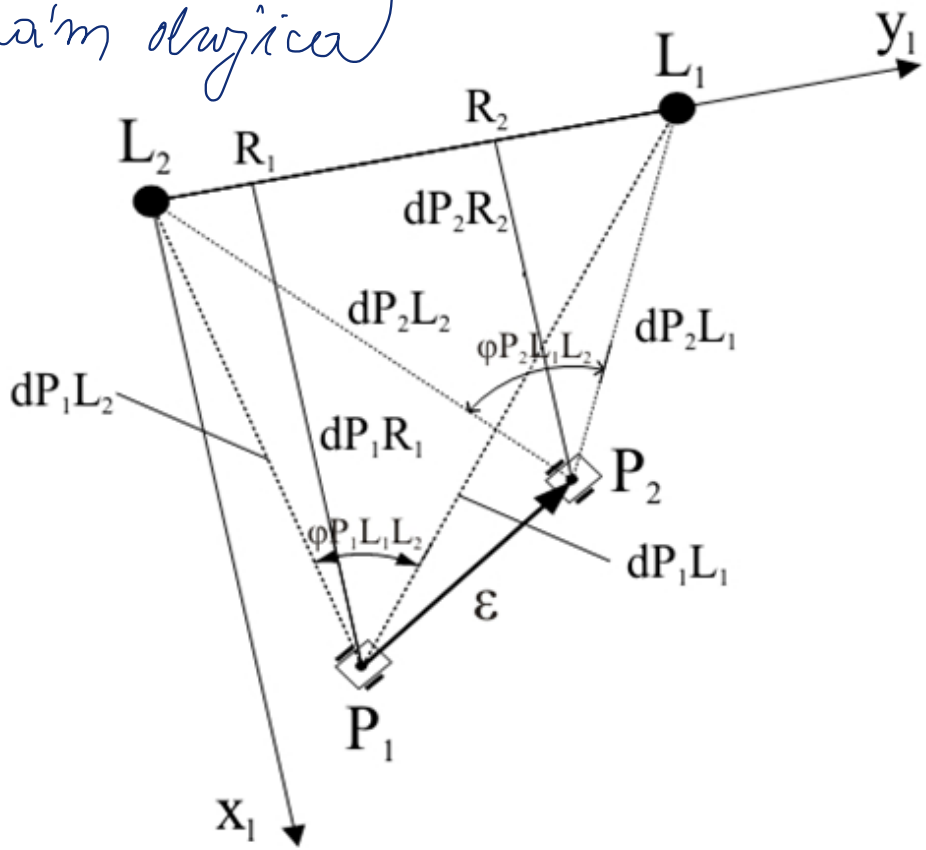


Určenie relatívnej polohy robota pomocou trigon. metód

- absolútna poloha značiek je neznáma
- využívajú sa merania snímačov z dvoch rôznych polôh k značkám a určuje sa zmena polohy medzi týmito dvoma polohami

Vzťahy medzi značkami a robotom

↳ stačí nám dvojica značiek na relatívnu polohu



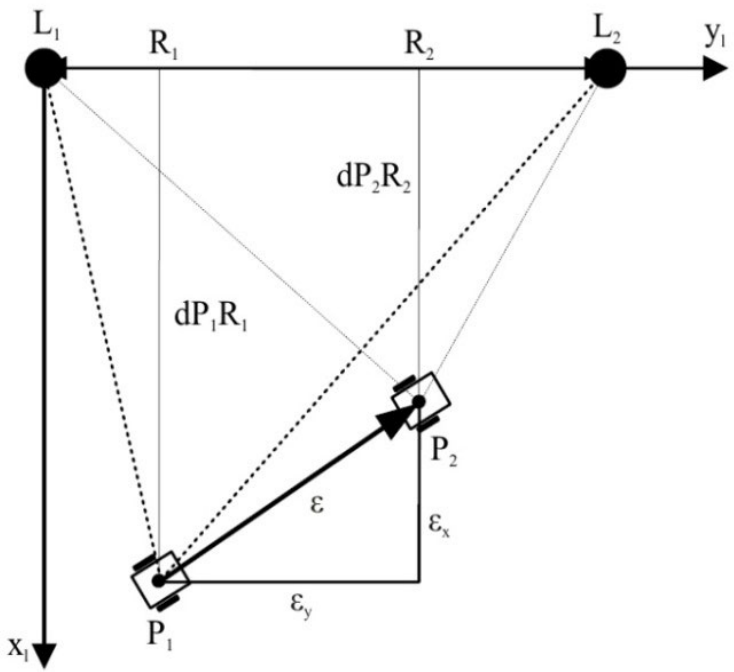
Určenie relatívnej polohy

- relatívna poloha:

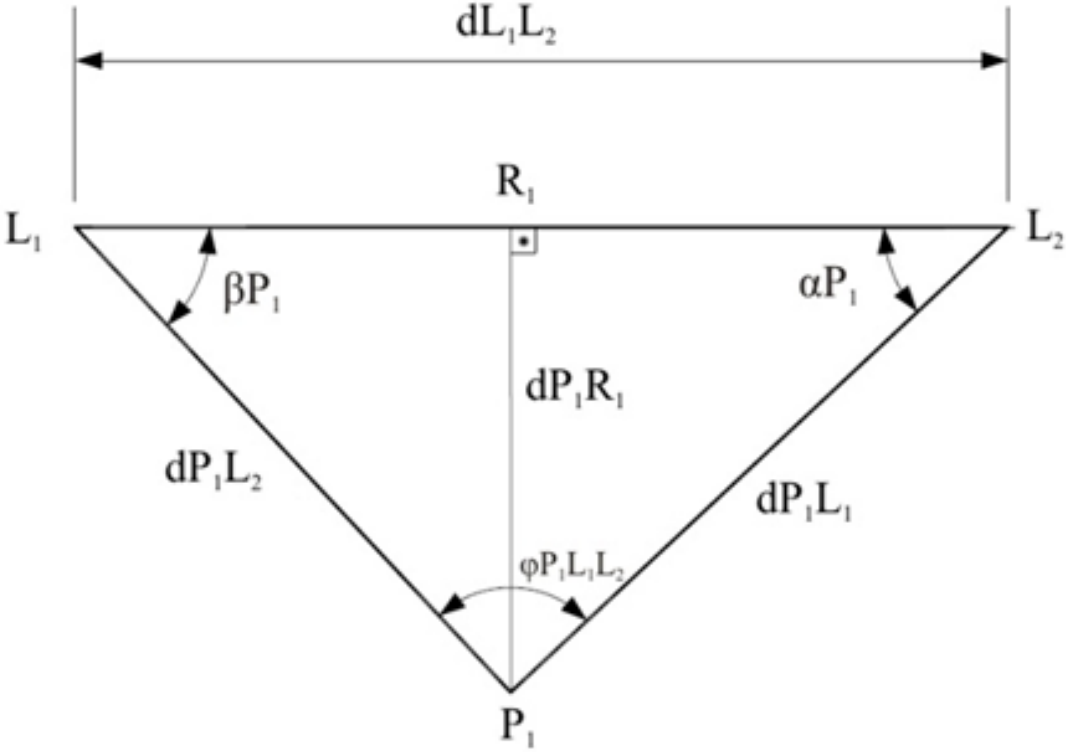
$$\varepsilon_x = dP_1R_1 - dP_2R_2$$

$$\varepsilon_y = L_1R_1 - L_1R_2$$

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2}$$



Sínusová veta pre polohu P_1



Určenie relatívnej polohy

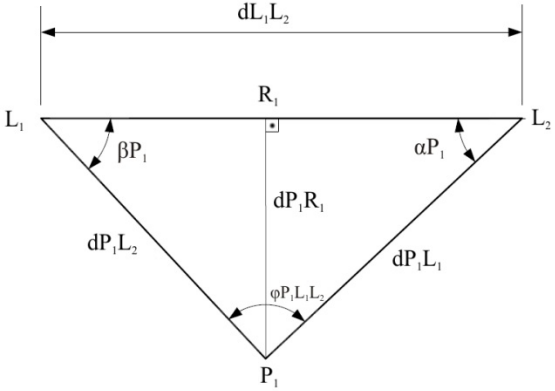
- sínusová a Pytagorova veta:

$$\alpha P_1 = \arcsin\left(\frac{dP_1L_2 . \sin\varphi P_1L_1L_2}{dL_1L_2}\right) \qquad \alpha P_2 = \arcsin\left(\frac{dP_2L_2 . \sin\varphi P_2L_1L_2}{dL_1L_2}\right)$$

$$\beta P_1 = \arcsin\left(\frac{dP_1L_1 . \sin\varphi P_1L_1L_2}{dL_1L_2}\right) \qquad \beta P_2 = \arcsin\left(\frac{dP_2L_1 . \sin\varphi P_2L_1L_2}{dL_1L_2}\right)$$

$$L_1R_1 = \sqrt{dP_1L_1^{\,2} - dP_1R_1^{\,2}} \qquad L_1R_2 = \sqrt{dP_2L_1^{\,2} - dP_2R_2^{\,2}}$$

$$L_2R_1 = \sqrt{dP_1L_2^{\,2} - dP_1R_1^{\,2}} \qquad L_2R_2 = \sqrt{dP_2L_2^{\,2} - dP_2R_2^{\,2}}$$

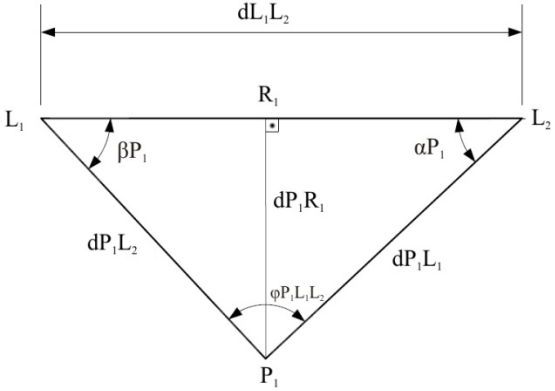


Nerce nemusíme rodiet rozpamäť

Určenie relatívnej polohy

- ďalej platí:

$$dP_1R_1 = \frac{dL_1L_2 . sin\,\alpha P_1 . sin\,\beta P_1}{sin\,\varphi P_1L_1L_2} \qquad dP_2R_2 = \frac{dL_1L_2 . sin\,\alpha P_2 . sin\,\beta P_2}{sin\,\varphi P_2L_1L_2}$$



Určenie relatívnej polohy

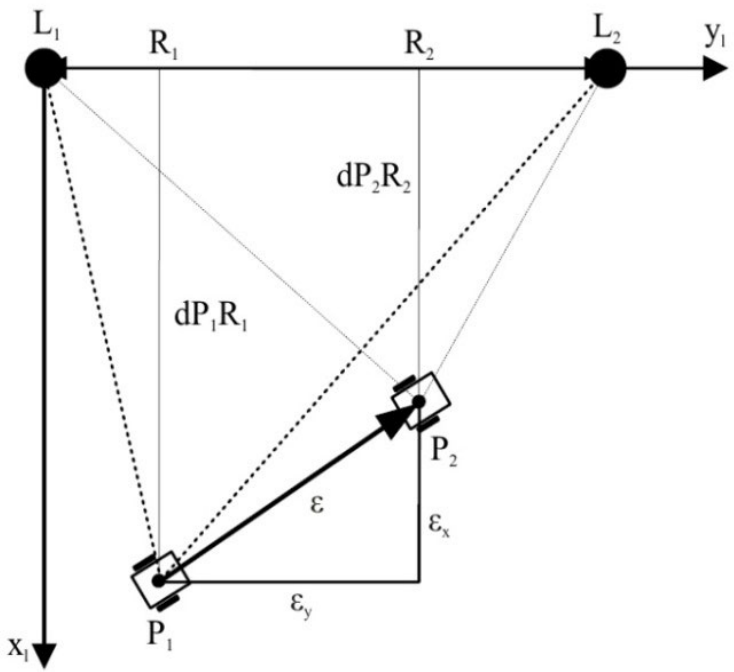
- relatívna poloha:

$$\varepsilon_x = dP_1R_1 - dP_2R_2$$

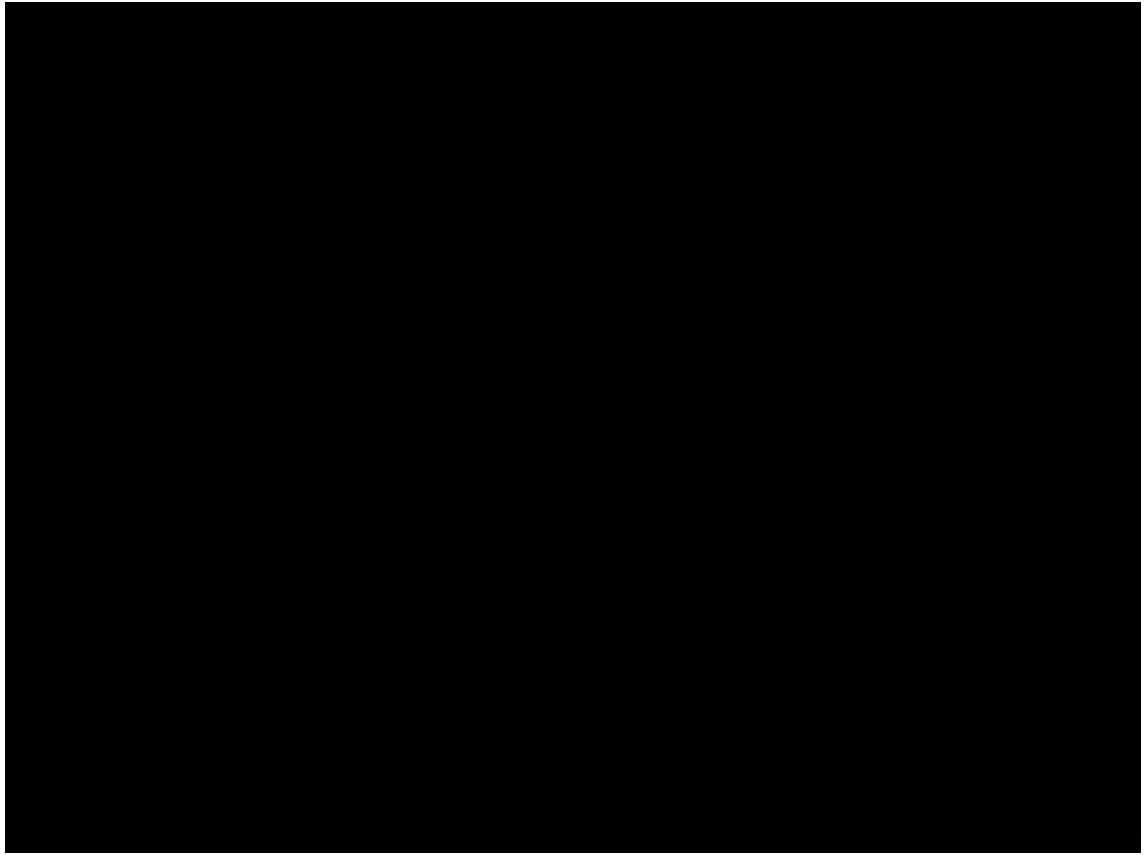
$$\varepsilon_y = L_1R_1 - L_1R_2$$

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2}$$

nemusíme riešiť



Lokalizácia pomocou trilaterácie

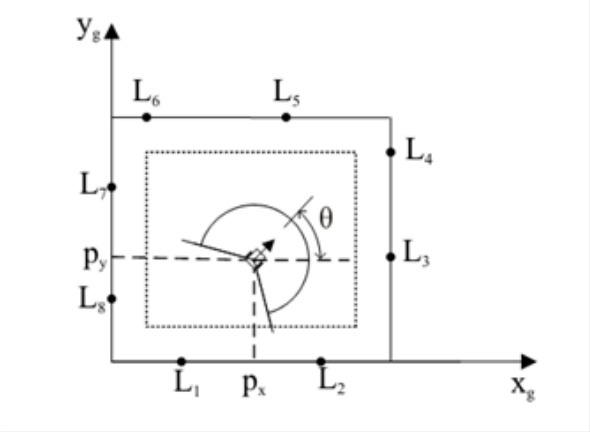


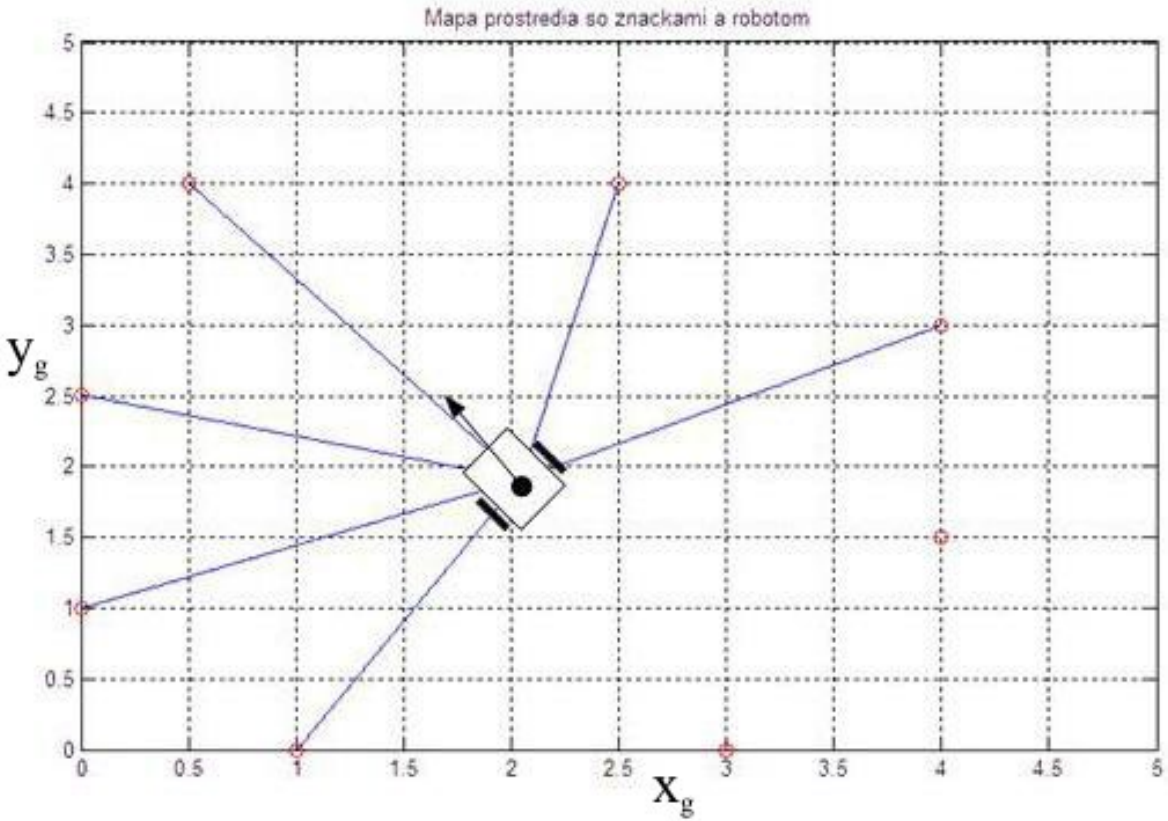
Simulácia abs. lokalizácie

- „dokonalé“ rozmiestnenie značiek tak, aby v každom okamihu pohybu robota bola zaručená viditeľnosť aspoň troch značiek
- značky prostredia sú úspešne detegované a identifikované na základe porovnania vzájomných vzťahov;
- robot sa pohybuje len v ohraničenom priestore
- robot využíva laserový diaľkomer s meracím rozsahom 240°, t. j. deteguje značky prostredia len v uhlovom rozsahu 240°
- poloha robota je zadaná užívateľom

nemusíme riešiť

Simulácia abs. lokalizácie





Simulácia abs. lokalizácie

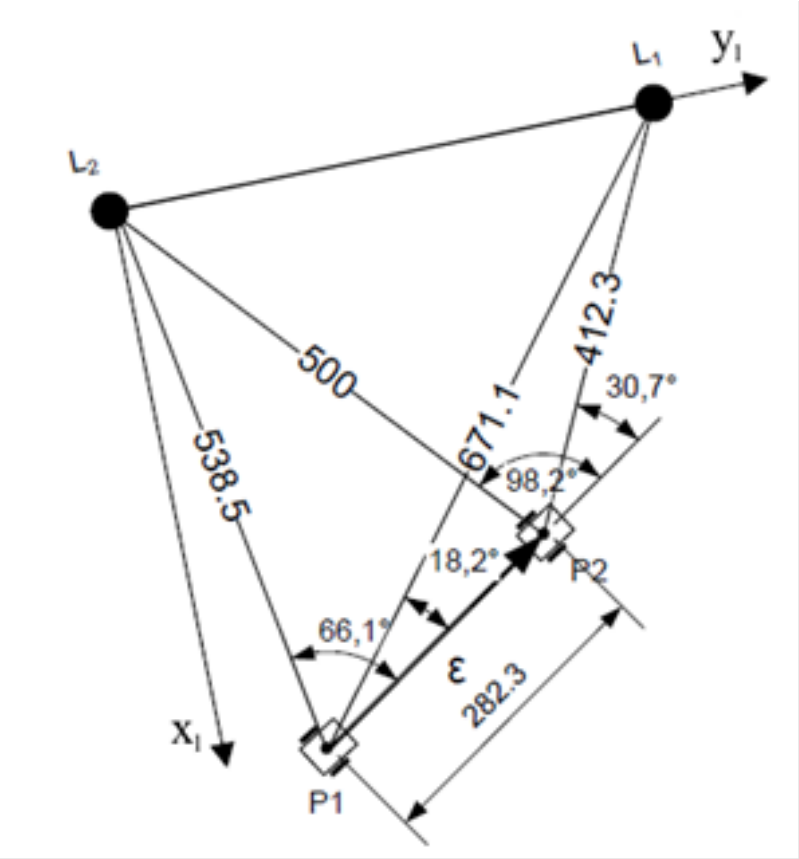
- zadaná poloha: $p_x = 2{,}05\ m$, $p_y = 1{,}915\ m$ a $\theta = 130{,}9°$
- vzdialenosti značiek zaťažené chybou merania v rozsahu ±5%
- výpočet ako rôzna kombinácia troch viditeľných značiek → priemer čiastkových výpočtov
- výsledok: $p_x = 2{,}0768\ m$, $p_y = 1{,}9506\ m$ a $\theta = 131{,}31°$

Simulácia rel. lokalizácie

- prostredie je neznáme, t. j. neznáme sú vzťahy medzi značkami a ich poloha v prostredí
- dve rovnaké značky sú detegované v oboch polohách robota (problém párovania značiek)

Relatívna lokalizácia

Simulácia rel. lokalizácie



Párovanie značiek

dôležité je ako porovnať tie značky

- vzdialenosť a zorný uhol medzi značkami je nemenný
- heuristické prehľadávanie, tzv. porovnávacia tabuľka (dĺžka vekotorov a uhol medzi vektormi)

Porovnávacia tabuľka

index počiatočného bodu reálneho extrému prvého vektora

index koncového bodu reálneho extrému druhého vektora

dĺžka prvého vektora

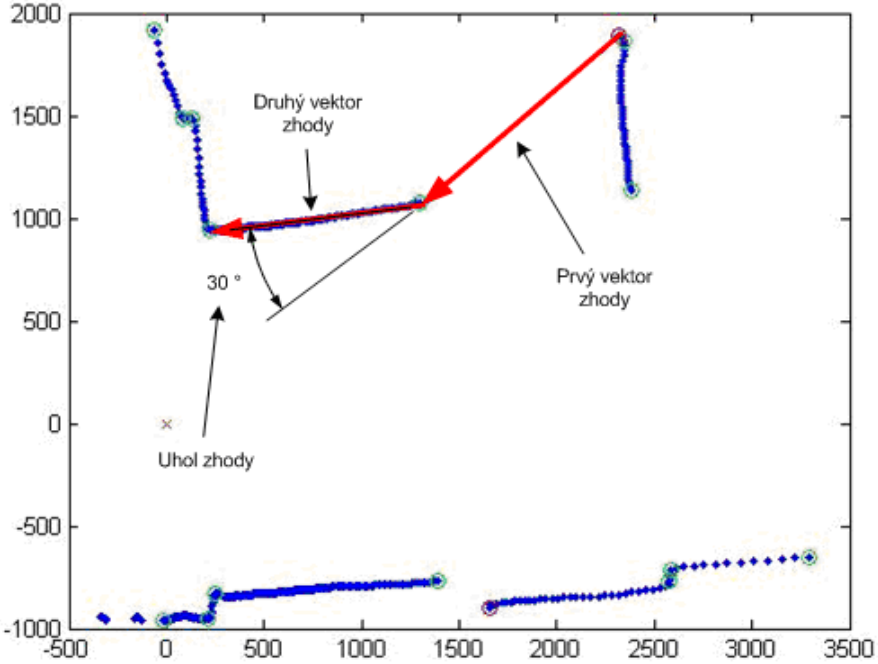
dĺžka druhého vektora

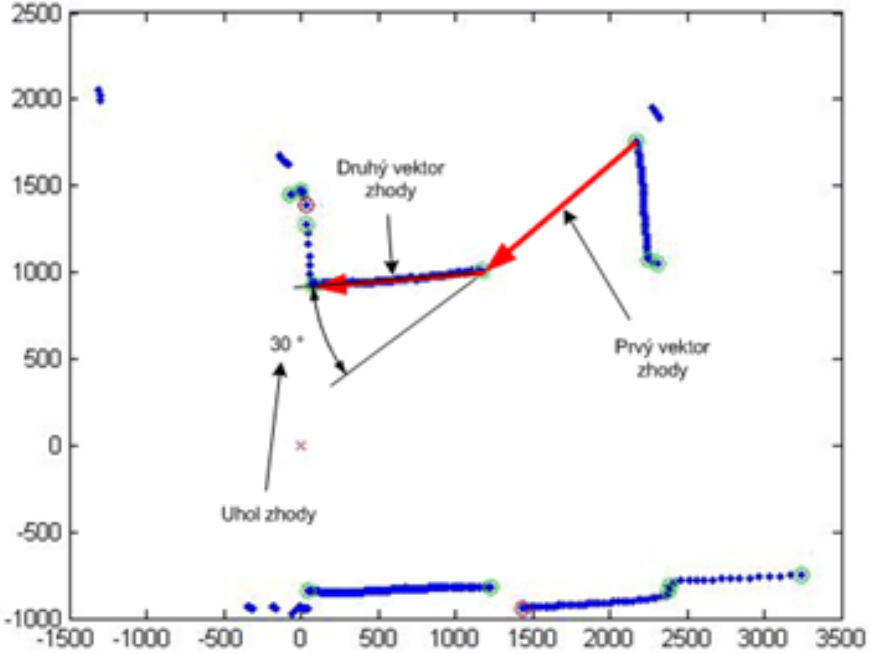
vectorPairsOfRealExtremes <12x6 double>

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	131	169	180	231.3079	125.3716	72.4253			
2	169	180	304	125.3716	1.1451e+03	70.5754			
3	180	304	338	1.1451e+03	1.1896e+03	3.5566			
4	304	338	341	1.1896e+03	51.2945	83.0836			
5	338	341	353	51.2945	709.0602	77.5453			
6	341	353	455	709.0602	2.0072e+03	111.5822			
7	353	455	491	2.0072e+03	728.9646	24.1563			
8	455	491	494	728.9646	1.3117e+03	124.2982			
9	491	494	598	1.3117e+03	1.0901e+03	30.2795			
10	494	598	620	1.0901e+03	546.8379	87.7440			
11	598	620	625	546.8379	46.9471	81.6397			
12	620	625	639	46.9471	459.7014	72.4376			

index koncového bodu reálneho extrému prvého vektora a začiatočného bodu reálneho extrému druhého vektora

uhol medzi vektormi





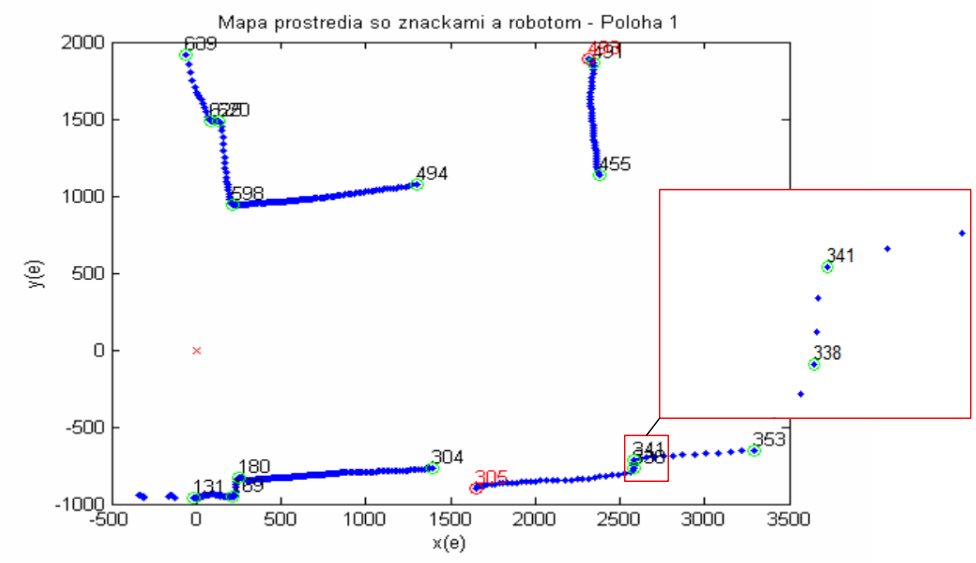
Pár vektorov zhody

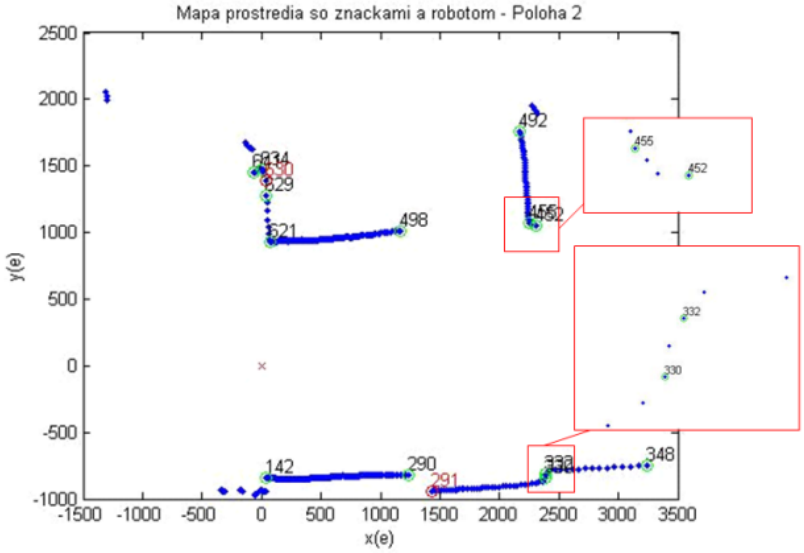
prvá poloha robota vľavo

druhá poloha robota vpravo

Overenie (1) experimenty (nemusíme robiť)

- reálny posun 17 cm, odmeraný: 16,31 cm

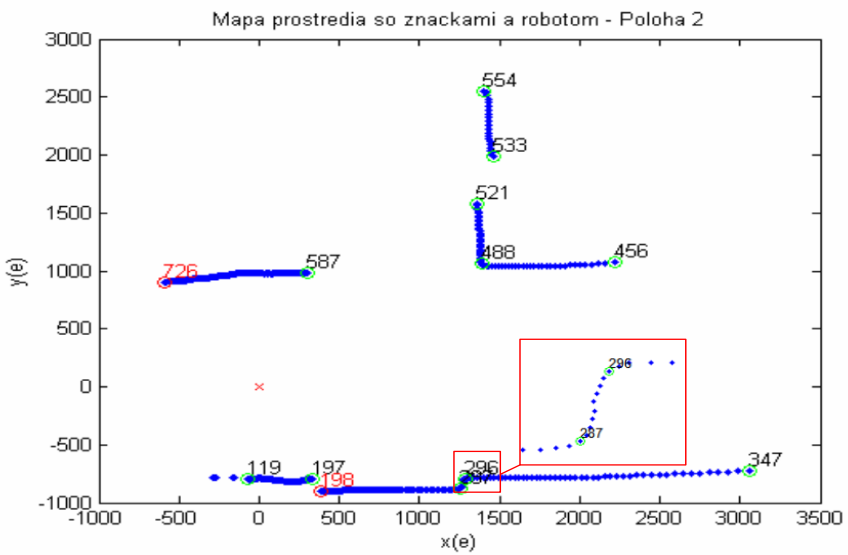


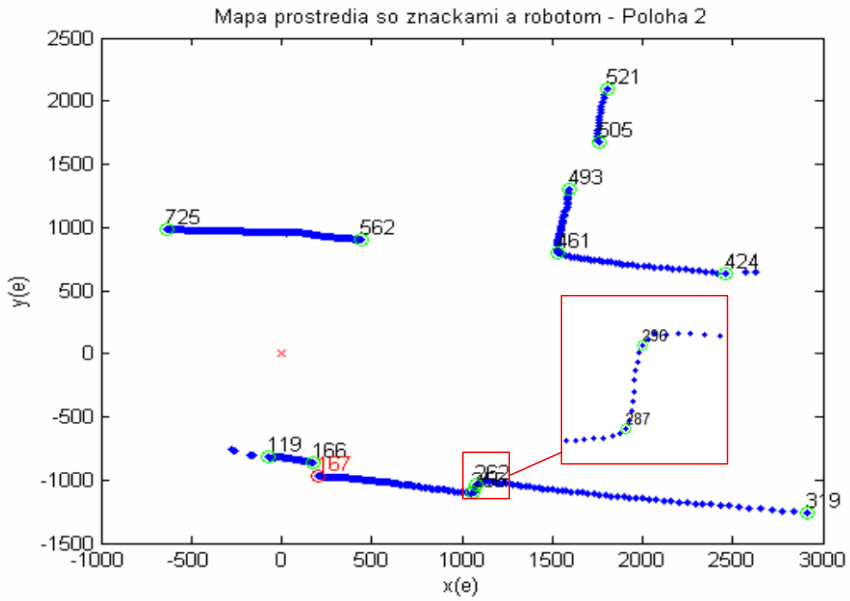


Overenie (2)

nie z vykročných vlastností robota sa lokalizovať

- reálny otočenie 10°, odmerané: 10,98°





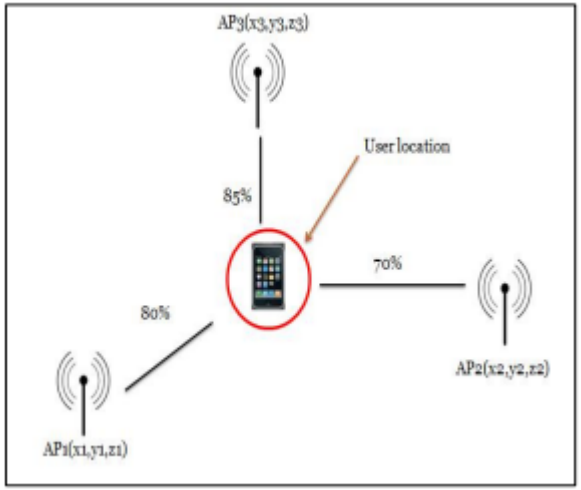
Trilaterácia pomocou WiFi

- využitie intenzity signálov jednotlivých routrov
  - aspoň 3 aktívne prvky v dosahu
  - výpočet vzdialenosti z intenzity:

$$r_i = p.(1 - m_i)$$

p – maximálny dosah routra

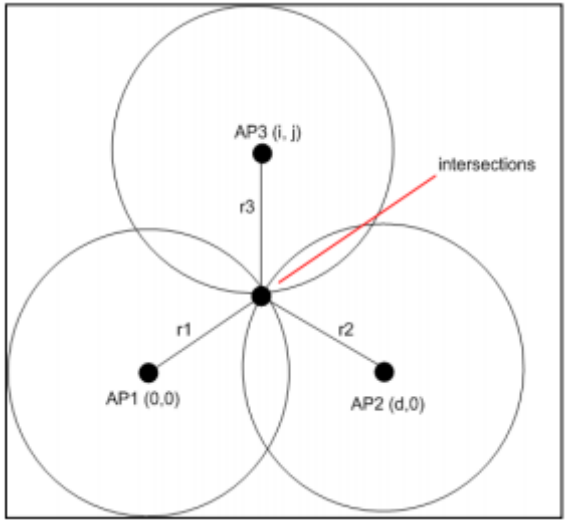
m – percentuálna intenzita signálu



Trilaterácia pomocou WiFi

- využitie intenzity signálov jednotlivých routrov
  - aspoň 3 aktívne prvky v dosahu
  - priesečník troch kružníc:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = r_i^2$$



Príklad

- tri prístupové body:
  - AP1 [4;4] – intenzita 80%
  - AP2 [26;10] – intenzita 70%
  - AP3 [16;26] – intenzita 85%
- maximálny dosah 30 m

- určite neznámu pozíciu robota

Riešenie

$$r_1 = 30.(1-0{,}8) = 6\ m$$
$$r_2 = 30.(1-0{,}7) = 9\ m$$
$$r_3 = 30.(1-0{,}85) = 4{,}5\ m$$

$$PB_1 : (x-4)^2 + (y-4)^2 = 6^2$$
$$PB_2 : (x-26)^2 + (y-10)^2 = 9^2$$
$$PB_3 : (x-16)^2 + (y-26)^2 = 4{,}5^2$$

$$\boxed{[x; y] = [11{,}97; 14{,}31]}$$

↳ toto sa požiada

Bonusové body

- Aplikácia:
  - zadám tri súradnice s intenzitou signálu a maximálny dosah → získam polohu robota (1 bod)
  - zadám ľubovoľné množstvo bodov (3 body)

Vizuálna odometria

- využíva vizuálny systém a značky prostredia vo forme význačných vlastností prostredia z vizuálneho systému (napr. algoritmy SURF, SIFT, ORB, ...)
- štandardné vizuálne systémy snímajú 3D prostredie do 2D mriežky → pre lokalizáciu robota je potrebné rekonštruovať tretí rozmer = z dvoch po sebe nasledujúcich obrázkov s význačnými vlastnosťami, ktoré sú spárované (napr. algoritmus RANSAC) → **vektor pohybu robota**

Princíp vizuálnej odometrie

- ak je pohyb robota opísaný translačným vektorom *T* a rotačným vektorom *R* a vektor L^a_i opisuje význačné body z prvého obrazu a vektor L^b_i z druhého obrazu:

$$L_i^b = R.L_i^a + T + e_i$$

e_i – chyba v odhade polohy

Chyba v odhade polohy

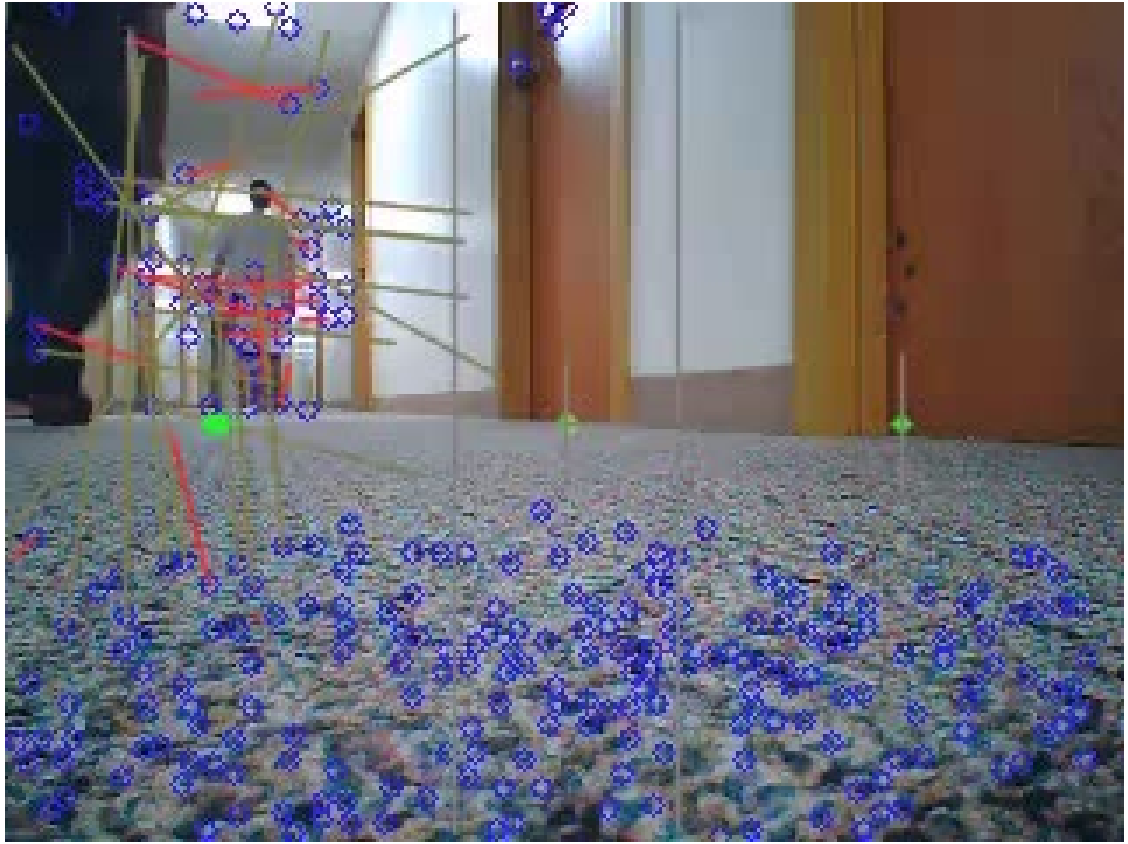
- pre zodpovedajúce páry význačných bodov v obrazoch by mala byť minimálna:

$$e^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\| L_i^b - \left(R.L_i^a + T\right)\right\|$$

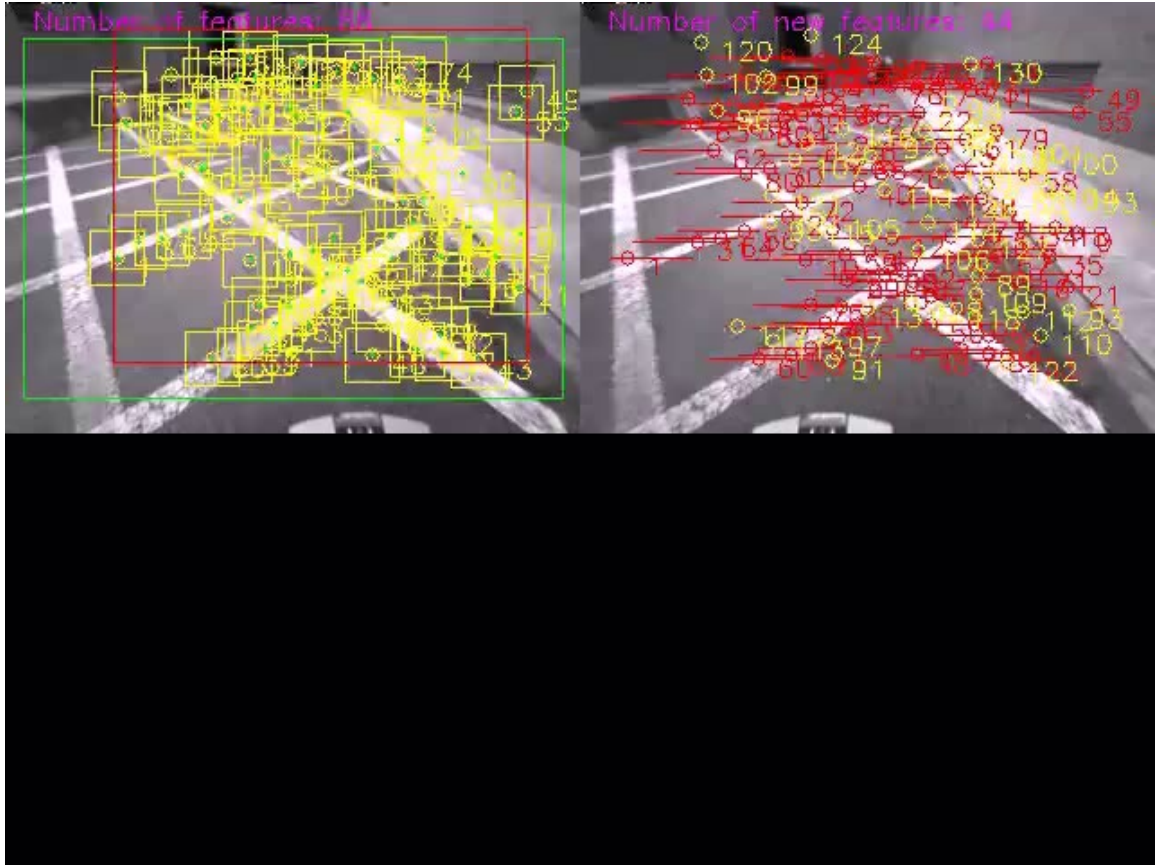
Zdroje chýb pri vizuálnej odometrii

- dynamické objekty
  - potrebné rozhodnúť, či pohyb význačných bodov bol spôsobený pohybom robota alebo objekotv
  - využitie štandardnej odometrie na predikciu pohybu

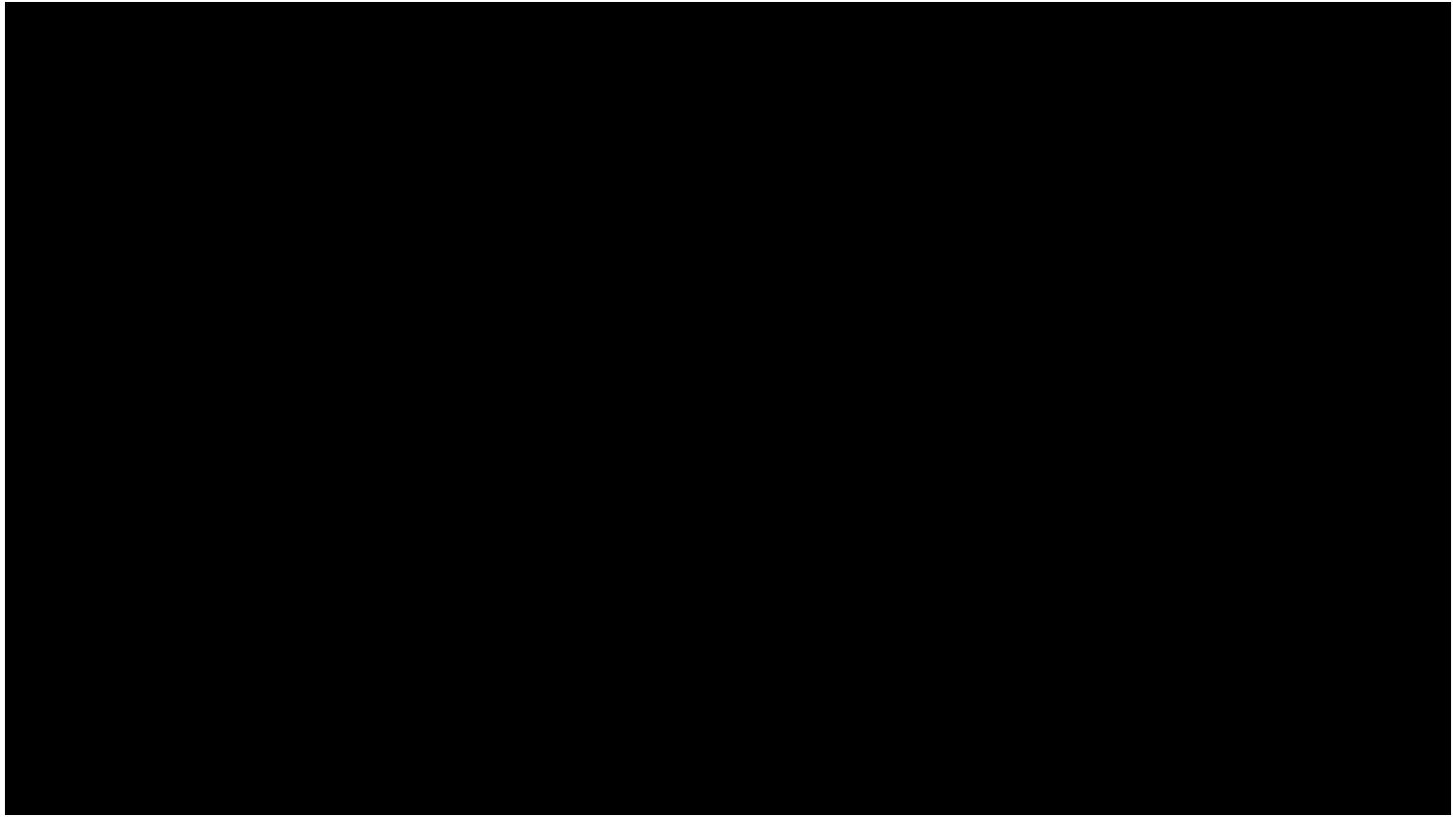
Vizuálna odometria



Vizuálna odometria



Curiosity používa viz. odometriu



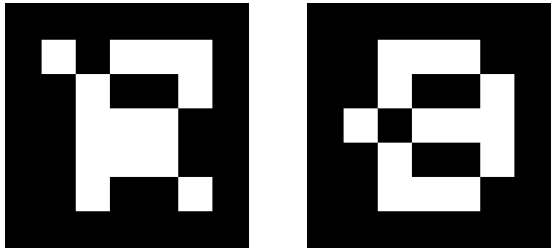
Lokalizácia s umelými značkami prostredia

- vzory na značkách predpísané tak, aby sa značky od seba líšili
- obvykle rovinné vzory (čiarové kódy, iné kódy)
- rozmiestnenie v prostredí tak, aby bola zaručená spoľahlivá lokalizácia
- využitie len vo vnútornom a značne štruktúrovanom prostredí

Name	Shape	Color	Encoding	Marker
AprilTag [50, 69]	Square	Monochrome	Topological	
ARTag [24, 25]	Square	Monochrome	Topological	
ARToolKit [40]	Square	Monochrome	Topological	
ArUco [29]	Square	Monochrome	Topological	
BinaryID [26]	Square	Monochrome	Topological	
BullsEye [41]	Circle	Monochrome	Topological	
CALTag [3]	Square	Monochrome	Topological	
CCC [30]	Circle	Monochrome	Not Supported	
CCTag [12]	Circle	Monochrome	Topological	
ChromaTag [21]	Square	Multicolor	Topological	
FourierTag [58, 71]	Circle	Grayscale	Frequency Spectrum	
InterSense [49]	Circle	Monochrome	Topological	
Multi-ring [18]	Circle	Multicolor	Not Supported	
Pi-Tag [8]	Square	Monochrome	Topological	
RuneTag [6, 7]	Circle	Monochrome	Topological	
SIFT [61]	Square	Grayscale	Gradient	
STag [5]	Square	Monochrome	Topological	
Topotag [72]	Square	Monochrome	Topological	
TRIP [19]	Circle	Monochrome	Topological	
VisualCode [55]	Square	Monochrome	Topological	
WhyCode [47]	Circle	Monochrome	Topological	

Systém ArUco

- každá značka je pole 7x7 štvorcových plôch (tmavá alebo svetlá) → užitočná info je 5x5
- vonkajšie dva riadky sú čierna
- kódovanie vybrané tak, aby žiadna značka nemohla vzniknúť rotáciou inej



Kódovanie ArUco

- päť slov po päť bitov
- modifikácia Hammingovho kódu (prvý bit je prevrátený)
- z piatich bitov pre slovo nesú užitočnú informáciu len 2 bity; ostatné detekcia chýb
- unikátny počet značiek = 1024

Výstup systému ArUco

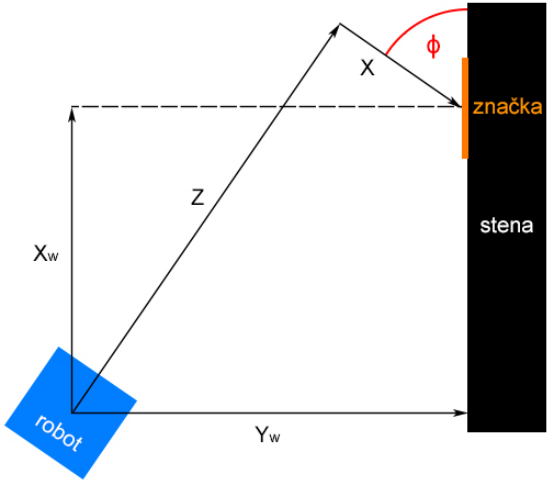
- transformačná matica alebo kvaternión o jednotlivých značkách
- prepočet otočenia značky okolo osi z kvaterniónov:

$$\theta = a\,tan\left[2.(X.Y - W.Z), W^2 - X^2 - Y^2 + Z^2\right]$$

Určenie polohy značky

- relatívna poloha značky voči robotu:

$$x_w = x.cos(\theta) - z.sin(\theta)$$
$$y_w = z.cos(\theta) - x.sin(\theta)$$
$$\theta_w = \theta$$

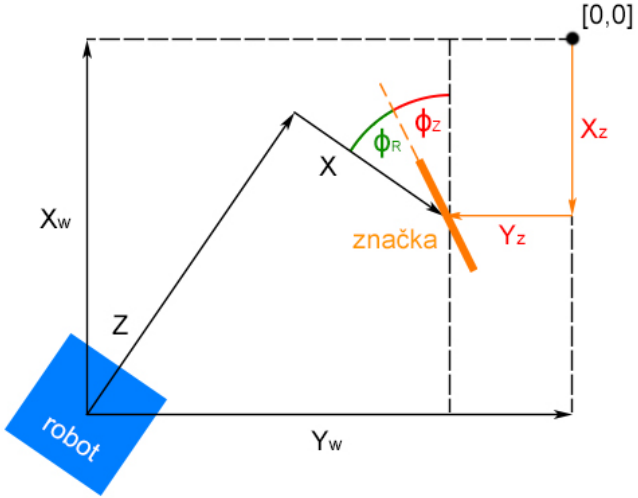


→ keď vieme polohu značky, tak vieme určiť polohu robota

Určenie polohy značky

- absolútna poloha značky voči počiatku súradnicovej sústavy:

$$x_w = x.cos(\theta_R + \theta_Z) - z.sin(\theta_R + \theta_Z) + x_z$$
$$y_w = z.cos(\theta_R + \theta_Z) - x.sin(\theta_R + \theta_Z) + y_z$$
$$\theta_w = \theta_R + \theta_Z$$

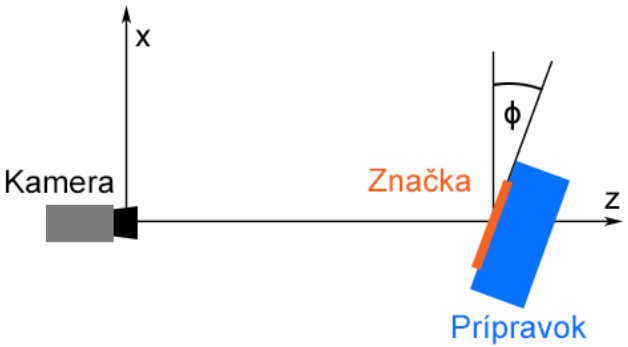


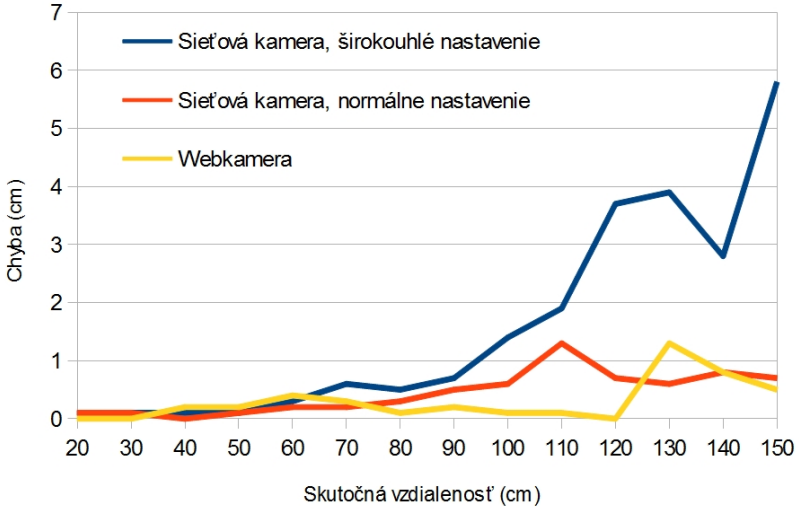
Detekcia viacerých značiek

- ak nájde viac značiek, spriemeruje hodnoty pri výpočte polohy robota
- ak nájde značku, o ktorej nemá informácie → nezahrnie do výpočtov

Overenie funkčnosti

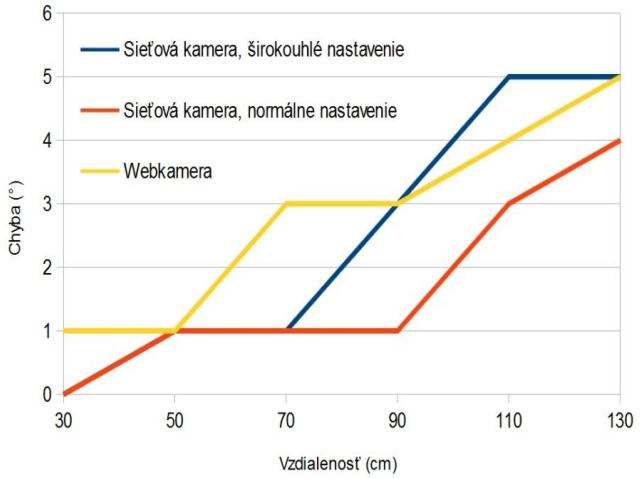
- **test presnosti určenia polohy s jednou značkou**
  - veľkosť značky 101 mm
  - dve kamery (štandardná webkamera a HDR kamera UI-5120SE-M)

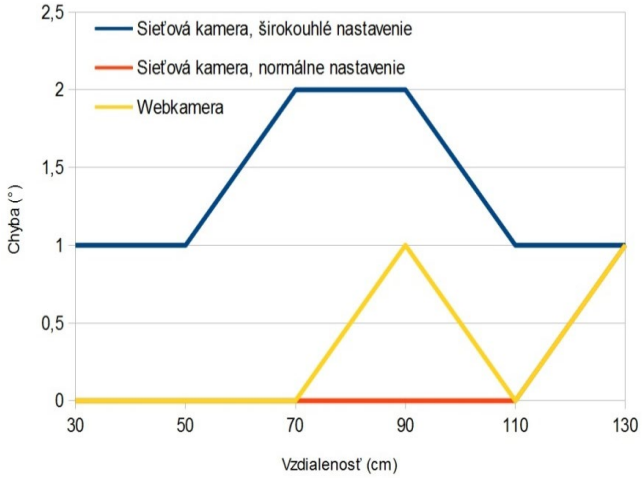




Overenie funkčnosti

- **test presnosti určenia polohy s jednou značkou (zorný uhol 0° a 40°)**



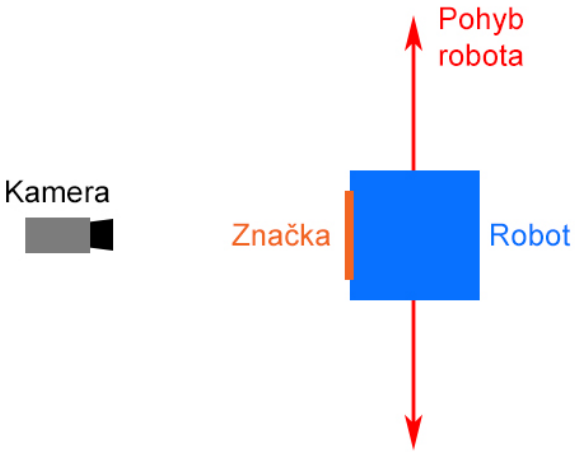


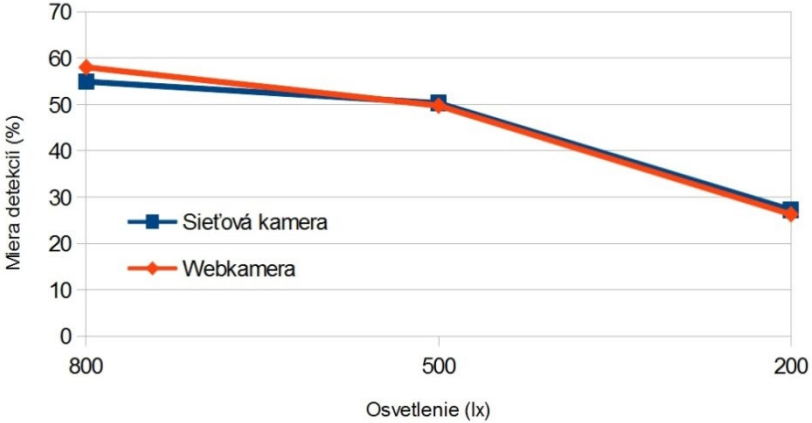
Overenie funkčnosti

- **test presnosti určenia polohy s jednou značkou**
  - použitím širokouhlého záberu sú značky vo väčšej vzdialenosti menšie → väčšia chyba
  - vyššie rozlíšenie kamery = lepšie výsledky
  - šikmý pohľad spôsobuje menšiu chybu v určení otočenia → princíp algoritmu (hranové detektory – výraznejšie zmeny)

Overenie funkčnosti

- **test detekcie značky pri rôznych svetelných podmienkach**
  - tri úrovne osvetlenia - 200, 500 a 800 lx



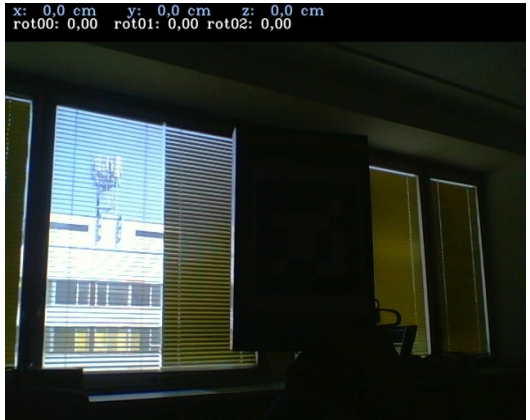


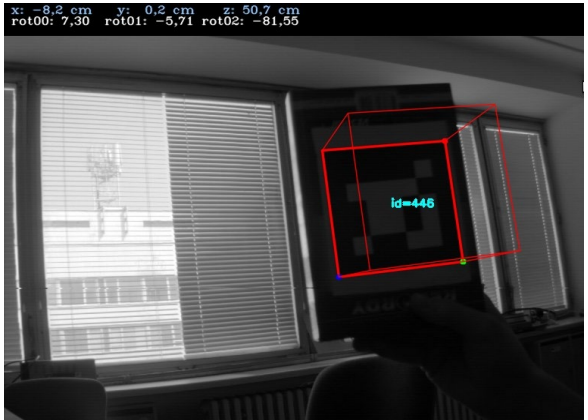
Overenie funkčnosti

- **test detekcie značky pri rôznych svetelných podmienkach**
  - miera úspešnosti detekcie značky klesá s klesajúcim osvetlením → použiteľné len v dobre osvetlených priestoroch
  - málo osvetlenia = predĺžená doba uzávierky + pohyb robota = rozmazané značky
  - šum v obraze tak isto spôsobuje nespoľahlivú detekciu značky

Overenie funkčnosti

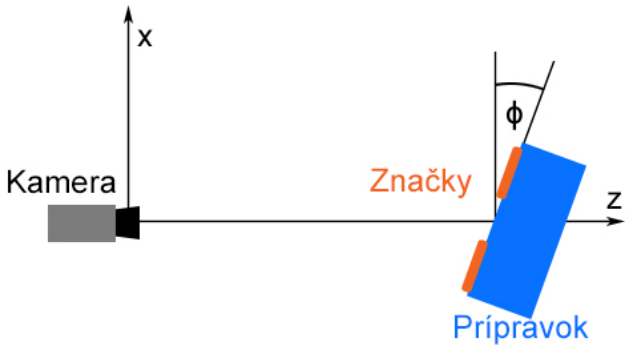
- **test detekcie značky s protisvetlom**
  - bude vysvetlené pri vizuálnych systémoch
  - protisvetlo = bežné denné svetlo
  - štandardná webkamera zlyháva
  - HDR (High Definition Range) si poradí





Overenie funkčnosti

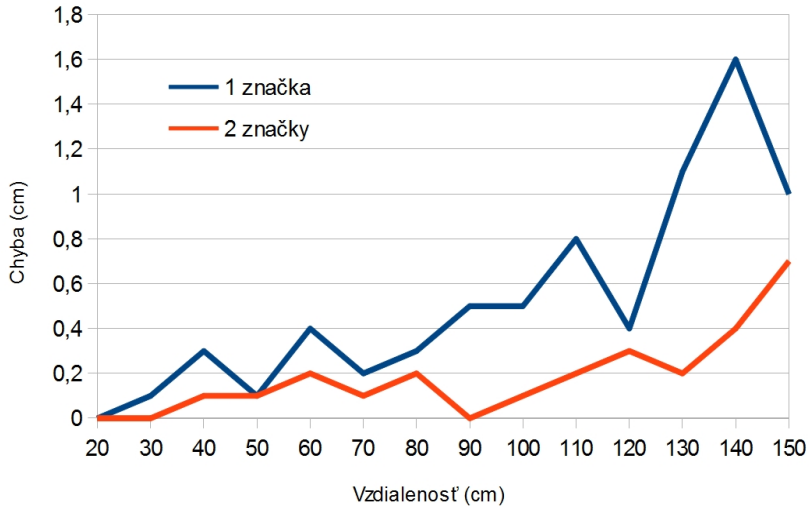
- **test vplyvu počtu značiek na presnosť určenia polohy**
  - jedna značka vs. dve značky
  - veľkosť značky 6 cm
  - vzdialenosť medzi značkami 20 cm

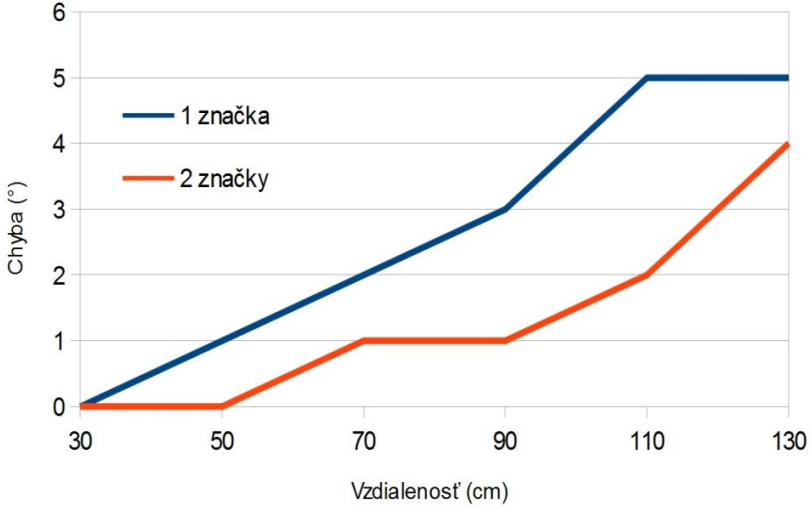


Overenie funkčnosti

- **test vplyvu počtu značiek na presnosť určenia polohy**
  - lepšie použiť viac značiek, avšak obmedzenie na 1024 (nevýhoda do veľkých priestorov)

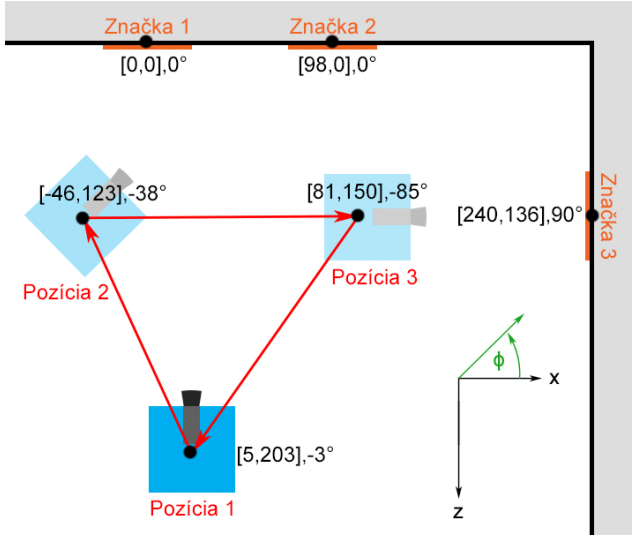
čím viac značiek, tým lepšia presnosť





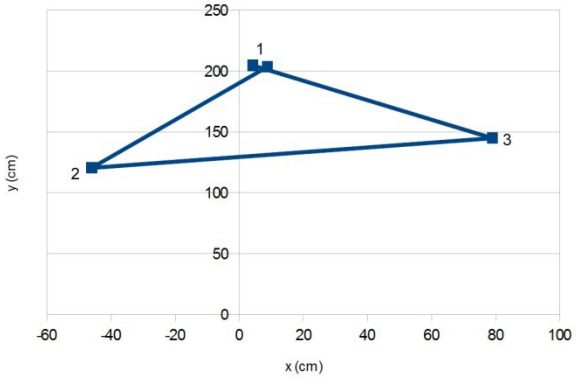
Overenie funkčnosti

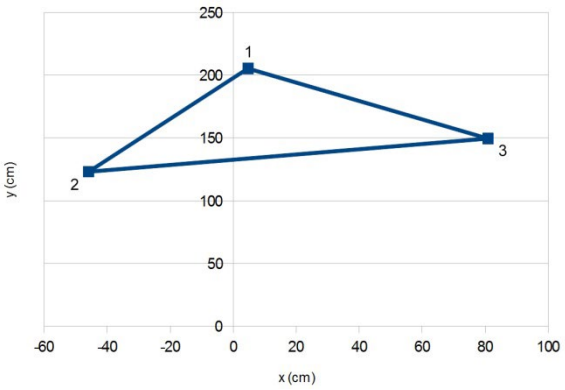
- **test opakovateľnosti**
  - dva typy značiek (10 cm a 16 cm)



Overenie funkčnosti

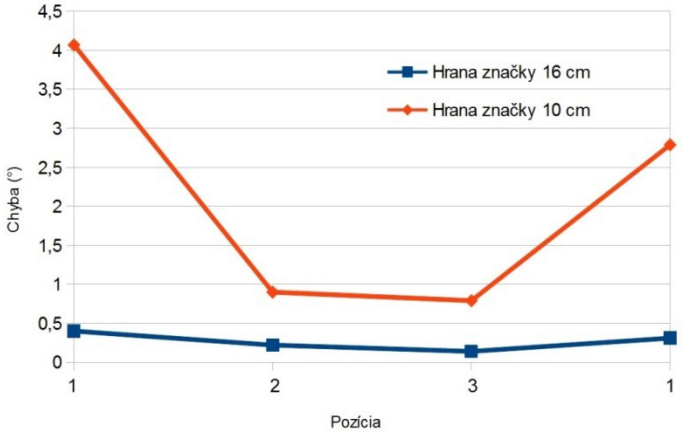
- **test opakovateľnosti**
  - dva typy značiek (10 cm a 16 cm)

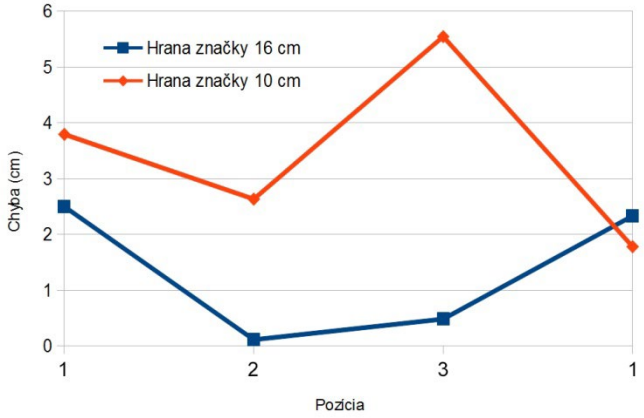




Overenie funkčnosti

- **test opakovateľnosti**
  - lepšia miera opakovateľnosti pri použití väčších značiek





Koniec

Ďakujem za pozornosť