



Klasické metódy lokalizácie mobilného robota v prostredí

Cieľom článku je opísať základné metódy lokalizácie mobilného robota v prostredí. Okrem metód typických pre mobilnú robotiku (napríklad dead reckoningu) sa pri lokalizácii robota v prostredí uplatňujú aj techniky z iných oblastí (napríklad triangulácia alebo štatistické prístupy). Významnou skupinou sú aj lokalizácie na základe extrakcie vlastností prostredia.

Úvod

Robotika prešla dlhú cestu a stala sa súčasťou nášho každodenného života. Jej uplatnenie v bežnom živote je podmienené technologickým rozvojom v mnohých oblastiach. Spomeňme len neustále výkonnejšie a menšie riadiace systémy, výkonnejšie pohybové systémy alebo stále komplexnejšie senzory. Mobilné roboty už nie sú len vo fantáziách autorov sci-fi, ale nachádzajú sa všade okolo nás. Okrem mnohých úloh, ktoré takýto mobilný robot musí riešiť, je základnou požiadavkou autonómnosť celého systému. To v mobilnej robotike znamená, že systém musí vykonávať všetky určené úlohy bez zásahu človeka. Pre autonómny mobilný robot to predovšetkým znamená schopnosť pohybovať a orientovať sa v neznámom prostredí. Robot teda musí byť schopný vykonávať v tomto prostredí bezkolíznú navigáciu.

1. Určenie polohy robota v prostredí

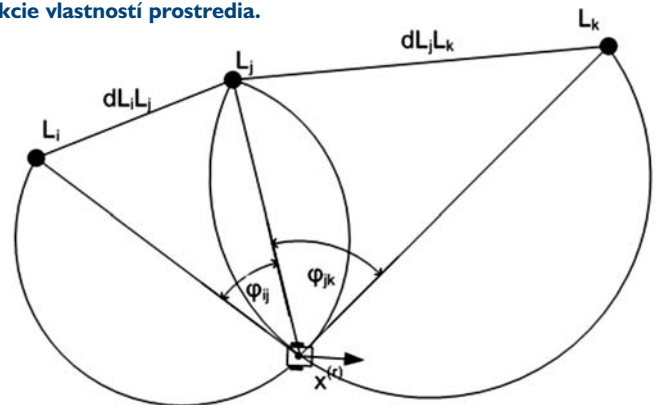
Lokalizácia je vo všeobecnosti súbor akcií alebo úloh, ktoré robotu dávajú odpoveď na otázku „kde som?“. Pri úlohách lokálnej navigácie to znamená určiť bunku v lokálnej metrickej mape prostredia, ktorá predstavuje pozíciu robota. Pri globálnej navigácii to predstavuje úlohu určiť takúto bunku v globálnej metrickej mape prostredia, častejšie však ide o určenie vrcholu topologickej mapy, v ktorom sa mobilný robot nachádza. Metódy lokalizácie môžeme rozdeliť na absolútne a relatívne. Kým absolútne metódy určujú absolútnu polohu robota v prostredí bez akejkoľvek inej znalosti, relatívne metódy potrebujú na určenie polohy znalosť predchádzajúcej polohy robota v prostredí. Lokalizácie môžeme rozdeliť aj na lokalizácie so známou mapou prostredia a lokalizácie bez mapy prostredia. Kým prvá skupina úloh sa zaoberá určením polohy robota vzhľadom na vopred známu mapu prostredia, druhá skupina úloh sa zaoberá spresnením polohy robota na základe aktuálnych vnemov zo snímačov.

1.1 Triangulácia a trilaterácia [1] [2]

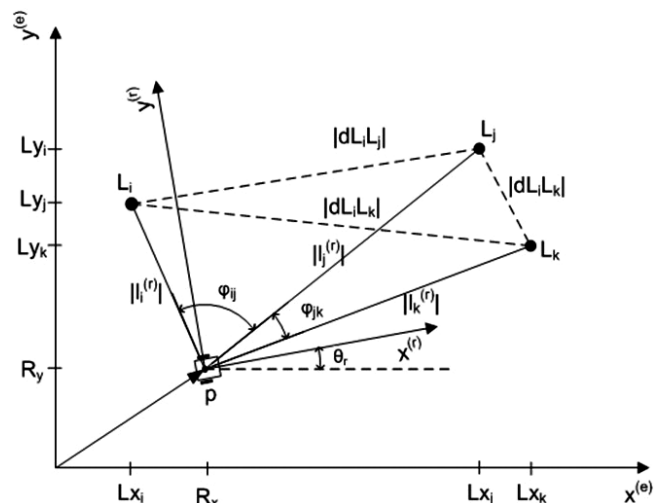
Problém lokalizácie robota v prostredí možno riešiť použitím globálneho pozíčného systému. Vo vonkajšom prostredí to môže byť systém GPS, vo vnútornom prostredí senzorová sieť, umelé alebo prirodzené značky prostredia.

Na určenie polohy mobilného robota v dvojzmernej reprezentácii prostredia pomocou triangulácie treba poznať minimálne dva body v prostredí. Častejšie sa však na jednoznačné určenie polohy robota využíva trojbodová triangulácia (znalosť uhlov viditeľnosti k bodom) alebo trilaterácia (znalosť vzdialeností k bodom) a jednoznačné určenie polohy robota – p . Ak máme tri body L_i , L_j a L_k (obr. 1), poloha robota sa určí prienikom kružníc opísanými značkami L_i , L_j a L_k . Ak sa tieto body nachádzajú na jednej kružnici, poloha robota nie je jednoznačne určená.

Priesečník týchto dvoch kružníc možno určiť analytickým opisom kružníc alebo aplikáciou kosínusovej vety. Aplikácia kosínusovej vety pre značky L_i a L_j :



Obr.1 Triangulácia polohy robota pomocou troch bodov



Obr.2 Triangulácia polohy robota pomocou troch bodov – definícia súradníc

$$|dL_iL_j|^2 = |l_i^{(r)}|^2 + |l_j^{(r)}|^2 - 2|l_i^{(r)}||l_j^{(r)}|\cos\varphi_{ij} \quad (1)$$

Predpísaním podobných rovníc pre každú dvojicu bodov získame sústavu rovníc, v ktorých treba určiť vzdialenosť jednotlivých bodov od robota, teda $|l_i^{(r)}|$, $|l_j^{(r)}|$ a $|l_k^{(r)}|$. Vypočítané vzdialenosti možno aplikovať na euklidovskú vzdialenosť medzi dvoma bodmi. Tak vznikne sústava dvoch rovníc, kde neznáme sú súradnice robota – R_x a R_y (obr. 2):

$$\begin{aligned} |l_i^{(r)}|^2 - |l_j^{(r)}|^2 &= Lx_i^2 - Lx_j^2 + 2R_x(x_j - x_i) + y_i^2 - y_j^2 + 2R_y(y_j - y_i) \\ |l_i^{(r)}|^2 - |l_k^{(r)}|^2 &= Lx_i^2 - Lx_k^2 + 2R_x(x_k - x_i) + y_i^2 - y_k^2 + 2R_y(y_k - y_i) \end{aligned} \quad (2)$$

1.2 Dead reckoning [3] [1]

Metóda dead reckoning je jednoduchá matematická procedúra na určenie terajšej polohy robota odvodená od predchádzajúcich



poloh. Požiadavkou je poznať smer, rýchlosť a čas minulého pohybu robota. Najjednoduchšou implementáciou dead reckoningu je odometria. Typická odometria zahŕňa optické kodéry priamo pripojené na rotor motora alebo na os kolesa. Z počtu impulzov kodéra na jednu otáčku, polomeru kolesa a celkového počtu otáčok možno odvodiť polohu robota v prostredí. Inkrementálny posun pozdĺž trajektórie je rozložený do zložiek x a y a je zároveň funkciou uplynutého času a prejdenej vzdialenosti [Everett 95]. Pri priamej a rovnej trajektórii môžeme povedať, že aktuálna pozícia robota sa rovná predchádzajúca pozícia plus zmena v tejto polohe:

$$\begin{aligned} R_{x_{n+1}} &= R_{x_n} + D \cdot \cos(\theta_r) \\ R_{y_{n+1}} &= R_{y_n} + D \cdot \sin(\theta_r) \end{aligned} \quad (3)$$

D je posun pozdĺž trajektórie a θ_r natočenie robota. Určenie D závisí od kinematickej schémy mobilného robota. Odometriu môžeme definovať aj presnejšie. Predpokladajme, že poznáme priebeh lineárnej rýchlosti $V_r(t)$ a uhlovej rýchlosti $\omega_r(t)$ robota. Pri známej počiatkovej polohe (R_{x0}, R_{y0}) a orientácii θ_{r0} môžeme o priebehu polohy a orientácie robota v čase t napísať:

$$\begin{aligned} R_x(t) &= R_{x0} + \int_0^t V_r(t) \cdot \cos \theta_r(t) dt \\ R_y(t) &= R_{y0} + \int_0^t V_r(t) \cdot \sin \theta_r(t) dt \\ \theta_r(t) &= \theta_{r0} + \int_0^t \omega(t) \cdot dt \end{aligned} \quad (4)$$

Nevýhodou odometrie je akumulácia chýb vyplývajúca z chyby senzorov, pretáčania kolies alebo pri zmene terénu. Ďalším podstatným zdrojom chýb je asymetria robota. Vzhľadom na integráciu informácie zo snímačov sa akumuluje aj vplyv spomínaných chýb. Jednou z možných ciest ako odstrániť tieto zdroje chýb v odhade polohy robota je použitie prídavných snímačov (napr. gyroskopu – [Borenstein and Feng 1996] – gyrodometry). Inou cestou je použitie pravdepodobnostného odhadu polohy mobilného robota.

1.3 Štatistické prístupy

Na lokalizáciu robota v prostredí možno použiť aj klasické štatistické metódy. Na použitie týchto metód však treba poznať mapu prostredia a robot sa v tejto mape lokalizuje pomocou viacerých meraní jeho polohy. Počet potrebných meraní závisí od jednotlivých metód, požadovanej presnosti a použitých snímačov merajúcich polohu robota.

1.3.1 Lokalizácia Monte Carlo [4] [5] [6]

Jednu zo štatistických metód používaných na lokalizáciu mobilného robota v prostredí je metóda Monte Carlo. Táto metóda vo všeobecnosti hľadá hodnotu veličiny (napríklad poloha robota p) súvisiacu s istým náhodným procesom. Proces odhadu veličiny (\hat{p}) sa odhaduje s určitou presnosťou vzhľadom na hľadanú veličinu (p).

Ak je poloha robota určená množinou dvojíc (x,y) , potom zo systému určenia polohy robota dostaneme náhodné realizácie $(x_1,y_1) \dots (x_n,y_n)$ z rovnomerného rozdelenia na $(0,1) \times (0,1)$. Zavedme náhodnú veličinu γ_i tak, že platí $\gamma_i = 1$ ak $(x_i,y_i) \in A$, inak $\gamma_i = 0$. Množina A predstavuje hľadanú množinu bodov, kde odhad polohy robota predstavuje stredná hodnota tejto množiny A . Náhodné veličiny $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ majú teda alternatívne rozdelenie so strednou hodnotou $E(\gamma_i) = c$ a rozptylom $D(\gamma_i) = c(1 - c)$. Zavedme náhodnú veličinu

$$m = \sum_{i=1}^n \gamma_i$$

ktorá má binomické rozdelenie s parametrami n a c , so strednou hodnotou $E(m) = nc$ a rozptylom $D(m) = nc(1 - c)$. Odhad plochy množiny A sa potom približne rovná m/n .

Ak máme hľadať nejakú neznámu hodnotu (napríklad polohu robota p), treba modelovať náhodnú veličinu γ tak, že stredná hodnota tejto náhodnej veličiny $E(\gamma) = p$. Úlohou je teda nájsť náhodnú veličinu γ . Ak

máme n nezávislých realizácií p_1, p_2, \dots, p_n náhodných veličín $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ s rovnakým rozdelením ako γ , potom polohu robota môžeme odhadnúť ako:

$$\hat{p} \approx \frac{1}{n} (\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n) \quad (5)$$

teda realizácia odhadu je:

$$\hat{p} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (6)$$

Odhad pozície je stanovený s istou presnosťou ε so spoľahlivosťou α , pričom platí:

$$|p - \hat{p}| < \varepsilon \quad \text{a} \quad P(|p - \hat{p}| < \varepsilon) = \alpha \quad (7)$$

Ak zvolíme presnosť $\varepsilon = 0,01$ a $\alpha = 0,95$, potom v 95 prípadoch zo 100 by sa odhad pozície robota nelíšil od skutočnej o viac než 0,01 zvolenej jednotky.

Podľa centrálnej limitnej vety má náhodná veličina \hat{p} asymptoticky (pre $N \rightarrow \infty$) normálne rozdelenie so strednou hodnotou $E(\hat{p}) = p$ a rozptylom $D(\hat{p}) = (\sigma^2)/N$. Pre dostatočne veľké platí:

$$P\left(\frac{|p - \hat{p}|}{\sigma} \sqrt{N} < t_{\alpha}\right) = \alpha \quad (8)$$

kde $t_{\alpha} = (1 - \alpha)/2$ je kritická hodnota normálneho normovaného rozdelenia. Pre ε platí:

$$\varepsilon = t_{\alpha} \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}} \quad (9)$$

Potom N možno vyjadriť:

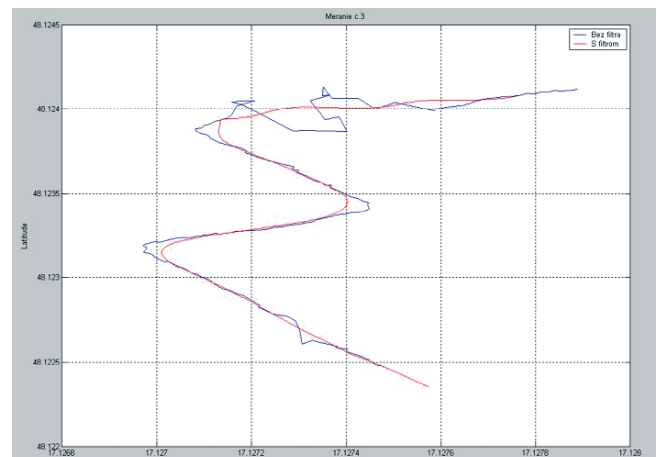
$$N = \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2} t_{\alpha}^2 \quad (10)$$

Takto možno určiť potrebný počet pokusov N na dosiahnutie presnosti ε na hladine významnosti α . Keďže často rozptyl nepoznáme, nahrádza sa v výberovom rozptyle:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |p_i - \hat{p}|^2 \quad (11)$$

1.3.2 Metóda kľzavého priemeru [7]

Na odhad pozície robota v prostredí možno vďaka jednoduchosti a možnosti kombinovať jednotlivé kľzavé priemery použiť aj metódu kľzavého priemeru. Pri lokalizácii mobilného robota sa používa najmä kvôli vyhladeniu dát a identifikácii trendov. Teda je vhodná napríklad pri lokalizácii pomocou GPS. Treba však zdôrazniť, že lokalizácia pozície pomocou metódy kľzavého priemeru určuje hodnotu tejto pozície s oneskorením za skutočnou hodnotou. Medzi najčastejšie aplikované metódy kľzavého priemeru patria:



Obr.3 Príklad použitia metódy kľzavého priemeru na skutočné GPS dáta



1. Jednoduchý kľzavý priemer

$$SMA = \frac{p_1 + \dots + p_i}{n} \quad (12)$$

Jednoduchý kľzavý priemer sa vypočíta ako priemerná hodnota v priebehu špecifického množstva períod merania polohy robota.

2. Exponenciálny kľzavý priemer

$$EMA_n = (p * K) + [(1 - K)EMA_{n-1}] \quad (13)$$

kde $K = 2/(n + 1)$,

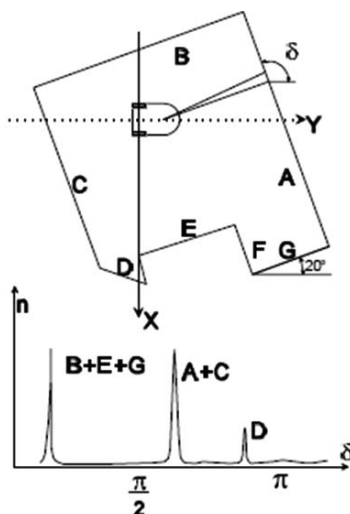
kde n predstavuje zvolenú časovú periódu na výpočet EMA . Exponenciálne kľzavé priemery teda možno používať pre rôzne periódy. Ak sú tieto periódy kratšie, výpočet je citlivý a môže byť nepresný. Naopak dlhšia perióda zabezpečuje spoľahlivosť výpočtu, nevýhodou je však jeho časové oneskorenie.

1.5 Lokalizácie na základe extrakcie vlastností prostredia [8], [9]

V prípade týchto metód ide o špecifické lokalizácie, ktoré vyžadujú dostatočne presné snímače, napr. laserové skenery. Jednou z takýchto metód je využitie triangulačných rovníc pre detegované prirodzené značky prostredia, ako sú rohy, dvere a pod. Ak sa tieto značky prostredia detegujú exaktne, možno tieto informácie použiť ako vstup triangulačnej metódy a určovať tak absolútnu pozíciu robota, častejšie však relatívny posun medzi jeho dvoma polohami.

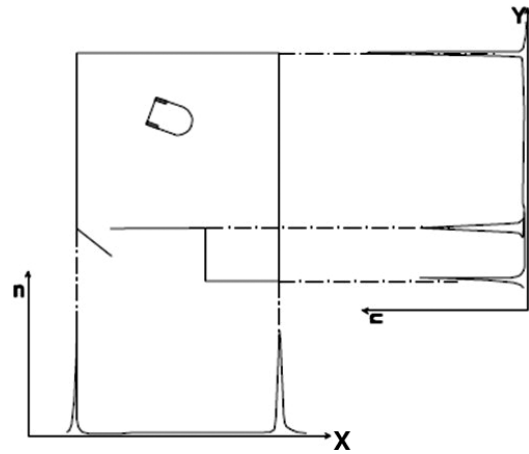
Inou špecifickou skupinou takýchto metód je použitie uhlového histogramu. Základnou myšlienkou týchto metód je nájsť v prostredí oblasti, ktorých charakteristické vlastnosti sa nemenia. Charakteristické vlastnosti prostredia možno vyextrahovať porovnaním jednotlivých údajov zo snímačov v diskretných časových okamihoch. Vzájomnou koreláciou týchto údajov potom možno určiť rotačné a translačné odchýlky.

K nameraným údajom z laserového skenera môžeme vytvoriť od stredu robota vektory. Pospájaním koncových bodov vektorov možno získať čiary, ktoré zodpovedajú objektom v prostredí. Všetky body, ktoré patria tej istej ploche, sa javia ako súvislá línia. Táto línia sa skladá z menších čiar, ktoré majú podobnú orientáciu. Malé výchylky medzi týmito čiarami sú spôsobené nepresnosťou merania. Uhly medzi týmito čiarami a osou x zodpovedajú orientácii plochy vzhľadom na robota. Ak orientáciu týchto čiar vynesieme do histogramu, dostaneme uhlový histogram (obr. 4).



Obr.4 Tvorba uhlového histogramu [8]

Z histogramu vidno, ako často sa v prostredí vyskytujú čiary s rovnakou orientáciou. Ak sa v prostredí nachádzajú dostatočne dlhé a rovné plochy, vznikajú v histograme maximá pre daný uhol. Ak sa nasledujúce údaje vytvoria z inej pozície, spôsobenej pootočením robota, vznikne medzi dvoma uhlovými histogramami fázový posun. Keďže rozloženie maxim v histograme zostáva rovnaké aj po otočení alebo posunutí,



Obr.5 Tvorba histogramu x a y [8]

na výpočet uhla otočenia možno využiť vzájomnú koreláciu dvoch po sebe nasledujúcich uhlových histogramov.

Na výpočet posunutia robota v prostredí sa používajú dva histogramy normované na globálny súradnicový systém. Tieto dva histogramy reprezentujú vzdialenosti detegovaných bodov od osí x a y (obr. 5). V týchto histogramoch narastá počet rovnakých vzdialeností v miestach, kde sú plochy orientované kolmo na smer príslušnej osi. Na to treba nájsť v uhlovom histograme maximum, väčšina čiar je v prostredí orientovaná pod týmto uhlom a plochy tvorené týmito čiarami budú rovnobežné s osou x (normovanie na globálny súradnicový systém). Všetky body predstavujúce túto plochu budú mať rovnakú súradnicu y . Pri zadávaní súradníc y do histogramu vzniká maximum práve v tomto mieste. Aplikovaním korelácie na dva po sebe idúce histogramy pre jednotlivé osy možno získať posunutie v jednotlivých osiach. Nutnou podmienkou aplikácie takejto lokalizácie je však prostredie, kde sú steny na seba kolmé.

Táto metóda je vysoko odolná proti šumu, dokonca ani pohyblivé prekážky neovplyvňujú výsledok (kým netvorí majoritu prekážok v prostredí). Nevýhodou je nutnosť mať k dispozícii údaje o prostredí v celom rozsahu 360° . Existujú však rozširujúce metódy, ktoré dokážu tento princíp aplikovať na menšom rozsahu s využitím projekčného filtra. Na aplikáciu týchto metód však treba poznať aspoň približný posun a pootočenie medzi dvoma po sebe nasledujúcimi setmi údajov z laserového skenera. Na základe týchto informácií sa odstraňujú údaje, ktoré neboli zaznamenané oboma setmi údajov.

Záver

Už od začiatku vývoja mobilnej robotiky si mnoho vedcov kladlo otázku ako vyriešiť tzv. problém „kde som?“. Riešenie tejto otázky sa pre mobilnú robotiku stalo kľúčovým. Bez funkčnej lokalizácie mobilného robota nemožno riešiť iné úlohy mobilnej robotiky, ako je napríklad navigácia, učenie sa, plánovanie a pod.

Podakovanie

Tento článok vznikol pri riešení projektu VEGA 1/0690/09 a KEGA 3/7307/09.

Literatúra

[1] BEKEY, G. A.: Autonomous Robots (From Biological Inspiration to Implementation and Control). Massachusetts Institute of Technology, 2005. ISBN 0-262-02578-7.

[2] BETKE, M., GURVITS, L.: Mobile Robot Localization Using Landmarks. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation, roč. 13, 1997, č. 2, s. 251 – 263.

[3] BRÄUNL, T.: Embedded Robotics (Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. ISBN-10 3-540-34318-0.



- [4] NIEMULLER, T., WIDYADHARMA, S.: Artificial Intelligence – An Introduction to Robotics. In: proseminar Artificial Intelligence, 2003.
- [5] DŘÍMAL, J., TRUNEC, D.: Úvod do metody Monte-Carlo. Brno, rektorát UJEP, 1989.
- [6] FABIAN, F, KLUIBER, Z.: Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění. Praha: Prospektrum 1998.
- [7] LASTOMÍRSKA, I.: Technická analýza konkrétnej funkcie. Proceedings of National and regional Economics VII, Educational Centre of TU in Herľany, Slovak Republic, October 1. – 3., 2008, s. 510 – 515.
- [8] BORENSTEIN, J., EVERETT, H. R., FENG, L.: Where am I? (Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning). The University of Michigan, 1996.
- [9] KAMENIAR, D., VITKO, A.: Intelligent navigation of mobile robot in unknown environment. In: Strojné inžinierstvo 2006. Mechanical Engineering 2006: Zborník abstraktov a príspevkov. s. 96 – 100. Bratislava 23. 11. 2006. Bratislava: STU v Bratislave 2006. ISBN 80-227-2513-7.

prof. Ing. Ladislav Jurišica, PhD.

Ing. František Duchoň

Slovenská technická univerzita
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
e-mail: ladislav.juristica@stuba.sk
frantisek.duchon@stuba.sk