

# Průběžná lokalizace a tvorba map pomocí smykem řízeného robotu

Tomáš Neužil, František Burian

## Abstrakt

V článku je uveden princip algoritmu pro lokalizaci a tvorbu map pomocí mobilního robotu. Jedná se o algoritmus, který pro lokalizaci využívá odhad polohy orientačních bodů a měření získaná pomocí laserového proximitního snímače. Tato data jsou zpracovávána pomocí rozšířeného Kalmanova filtru.

**Klíčová slova** robot řízený smykem, rozšířený Kalmanův filtr, průběžná lokalizace a tvorba mapy, SLAM

## Úvod

V oblasti mobilní robotiky je v současné době kladen vysoký důraz na schopnost autonomního provozu mobilního robotu. Autonomie mobilního robotu je definována jako schopnost robotu vykonávat činnost bez nutnosti zásahu lidské obsluhy v nestrukturovaném prostředí. Pro to, aby mobilní robot bylo možno označit za autonomní, musí mít následující vlastnosti [1,2,3]:

- schopnost dlouhodobé samostatné činnosti bez nutnosti lidského zásahu,
- schopnost samostatně se pohybovat pracovním prostředím,
- schopnost vyhnout se situacím, které by mohly vést ke zranění lidské obsluhy nebo zničení robotu,
- schopnost získávat informace o pracovním prostředí.

Základním předpokladem pro splnění výše uvedených podmínek je, aby robot znal v každém okamžiku svoji polohu. Polohu robotu lze získat mnoha způsoby. Mezi nejznámější patří například lokalizace pomocí odometrie, inerciálního navigačního systému nebo navigace podle orientačních bodů (do této skupiny patří například navigační systém GPS). V článku je uvedena metoda lokalizace mobilního robotu pomocí orientačních bodů v prostoru, které jsou získávány pomocí laserového proximitního snímače, který je umístěn na robotu s podvozkem řízeným smykem (skid steer).

Lokalizační algoritmus pracuje na principu rozšířeného Kalmanova filtru, jehož pomocí je zpracováván odhad polohy mobilního robotu získaný z matematického modelu a polohy orientačních bodů získaných zpracováním měření z laserového snímače.

## Lokalizace pomocí rozšířeného Kalmanova filtru

Pro určení polohy mobilního robotu jsou využívána měření ze snímačů. Tato data jsou současně využívána i pro vytváření mapy, ve které se robot lokalizuje, což činí mobilní robot autonomním (ve smyslu schopnosti samostatného pohybu prostorem). [1,2,4]

Výhodou tohoto přístupu k lokalizaci a tvorbě map je skutečnost, že mobilní robot je schopen pohybu i v předem neznámém prostředí. Pro orientaci v prostředí nepotřebuje zásah člověka a vytvoření umělých orientačních bodů. Princip lokalizačního algoritmu založeného na rozšířeném Kalmanově filtru je uveden na Obr. 1.

Pro predikci polohy mobilního robotu a predikci polohy orientačních bodů je využito matematických modelů robotu a snímače, které jsou definovány v následujících kapitolách. Pomocí stavového popisu lze robot popsat jako:

$$\begin{aligned}x_{(k+1)} &= f[x_{(k)}, u_{(k)}, v_{(k)}] \\ y_{(k)} &= h[x_{(k)}, w_{(k)}]\end{aligned}\quad (1)$$

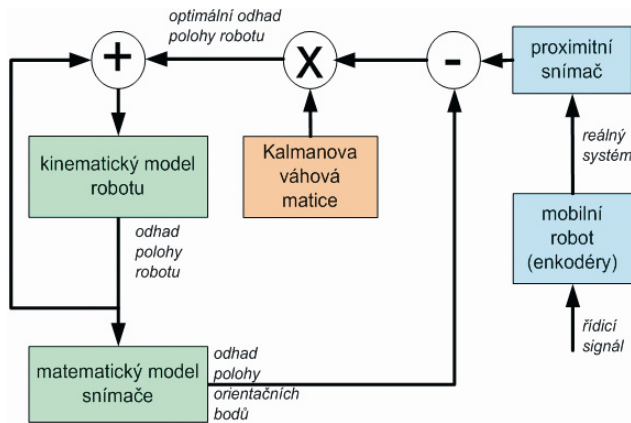
Kde funkce  $f$  popisuje nelineární matematický model mobilního robotu,  $\mathcal{G}$  je šumový signál, který v sobě zahrnuje nepřesnosti a zjednodušení provedená při vytváření matematického modelu. Tento šumový signál má nulovou střední hodnotu a kovarianci  $\mathcal{Q}$ .

Funkce  $h$  definuje matematický model snímače, který v úloze lokalizace a tvorby map představuje transformaci mezi lokální a globální mapou. Také v popisu snímače vystupuje šumový signál, který má obdobné vlastnosti, jako signál vystupující v modelu robotu a kovarianční matici  $\mathcal{R}$ .

- lokální mapa – souřadný systém mapy je spojen se souřadným systémem mobilního robotu (počátek souřadného systému je ve středu laserového snímače,
- globální mapa – počátek souřadného systému je umístěn v bodě se souřadnicemi  $x_0, y_0, \varphi_0$ .

Mapa obsahuje polohu orientačních bodů, které slouží k určení polohy mobilního robotu. V popisovaném případě jsou orientační body tvořeny rohy prostoru, ve kterých se robot pohybuje.

Algoritmus založený na rozšířeném Kalmanově filtru (EKF) umožňuje určení nejlepšího odhadu polohy (stavu) robotu.



Obr. 1 Algoritmus Kalmanova filtru

Fig. 1 Kalman filter algorithm

Odhad stavového vektoru a kovariance odhadu je definována jako:

$$\hat{x}_{(k+1|k)} = f[x_{(k)}, u_{(k)}, 0] \quad (2)$$

$$P_{(k+1|k)} = \nabla f_x P_{(k|k)} \nabla f_x^T + \nabla f_v Q_{(k)} f_v^T$$

Hodnota stavového vektoru po provedení měření kroce  $k + 1$  je určena pomocí váhové matice  $W$  a inovačního vektoru.

$$\hat{x}_{(k+1|k+1)} = \hat{x}_{(k+1|k)} + W_{(k+1)} v_{(k+1)} \quad (3)$$

$$P_{(k+1|k+1)} = P_{(k+1|k)} - W_{(k+1)} S_{vv}^{-1} W_{(k+1)}^T$$

kde

$$v_{(k+1)} = y_{(k+1)} - h[x_{(k)}, 0] \quad (4)$$

je inovační vektor, jehož kovarianční matice je určena podle:

$$S_{vv} = \nabla h_x P_{(k|k)} \nabla h_x^T + \nabla h_w R_{(k+1)} f_w^T \quad (5)$$

Kalmanovu váhovou matici lze pak určit podle:

$$W_{(k+1)} = P_{(k+1|k)} \nabla h_x^T S_{vv}^{-1} \quad (6)$$

Tato matice umožňuje nastavit, zda algoritmus dává větší váhu výstupu z modelu robotu (snímače) nebo reálnému měření ze snímačů umístěných na robotu.

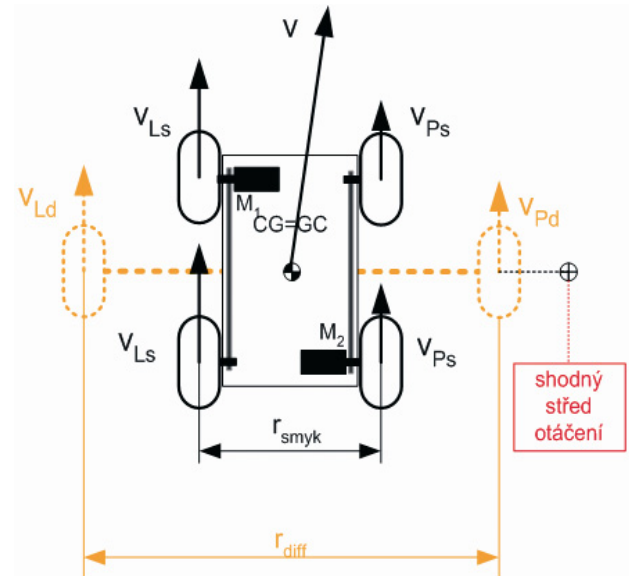
Matematické modely mobilního robotu a laserového snímače jsou uvedeny v následujících kapitolách.

## Mobilní robot

Pro úlohu mapování a lokalizace je využíván robot UTAR, který je vyvíjen na Ústavu automatizace a měřicí techniky od roku 1999. Jedná se o čtyřkolový mobilní robot, který je poháněn dvěma stejnosměrnými motory. Kola na každé straně robotu jsou spojena řetězem, robot nemá otočnou nápravu, proto při otáčení robotu dochází ke smyku. Hlavní výhodou této konstrukce mobilního podvozku je jeho jednoduchá mechanická konstrukce a velká robustnost, což umožňuje pohyb nejen ve vnitřních prostorách, ale i ve vnějším prostředí. [3,5]

Pro účely lokalizačně mapovacího algoritmu byl vytvořen jednoduchý matematický model umožňující stanovení stavových veličin popisujících polohu robotu. Matematický model je založený na kinematickém popisu pohybu

mobilního robotu. Pro stanovení průběhu rychlosti pohybu těžiště robotu jsou použity pouze rychlosti jednotlivých kol. Matematický model robotu nezohledňuje síly, které na robot při pohybu působí. V případě robotu UTAR se jedná zvláště o smykové síly, které působí na kola robotu při zatáčení. Idea náhrady jednotlivých druhů podvozků je zobrazena na Obr. 2.



Obr. 2 Náhrada smykem řízeného robotu typu differential drive

Fig. 2 Skid steer mobile platform replacement with differential drive

Pro popis modelu robotu pomocí stavových veličin platí:

$$\begin{aligned} x_{(k+1)} &= x_{(k)} + \Delta v_{(k)} \cos \varphi_{(k+1)} \\ f = y_{(k+1)} &= y_{(k)} + \Delta v_{(k)} \sin \varphi_{(k+1)} \\ \varphi_{(k+1)} &= \varphi_{(k)} + \Delta \omega_{(k)} \end{aligned} \quad (6)$$

Změnu rychlosti pohybu mobilního robotu lze vyjádřit jako:

$$\begin{aligned} \Delta v_{(k)} &= \frac{v_{Ld(k)} + v_{Pd(k)}}{2} + \mathcal{G}_v \\ \Delta \omega_{(k)} &= \frac{v_{Ld(k)} - v_{Pd(k)}}{r_{diff}} + \mathcal{G}_\varphi \end{aligned} \quad (7)$$

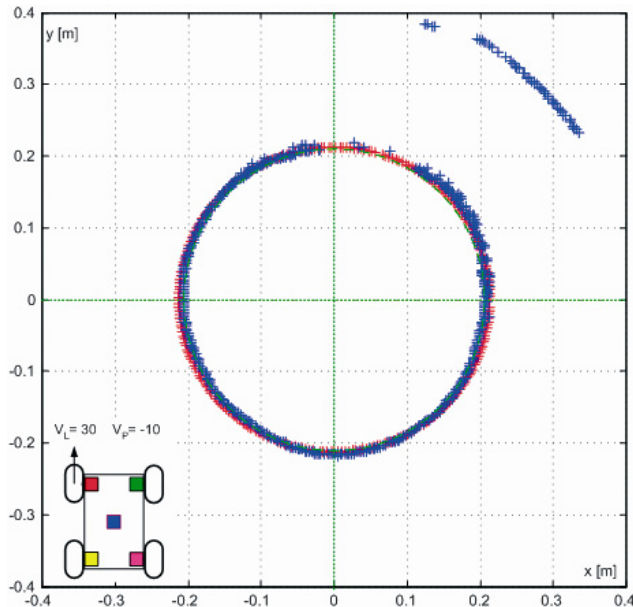
Prvky  $\mathcal{G}_v$  a  $\mathcal{G}_\varphi$  jsou složky šumového vektoru. Tento vektor reprezentuje šum, který je do matematického modelu vnášen nedokonalostí matematického modelu.

Pro usnadnění odhadu velikosti jednotlivých složek šumového vektoru byl proveden experiment, při němž byly na robot umístěny barevné štítky, jejichž poloha byla určována pomocí barevné kamery, která byla umístěna nad plochou, po které se robot pohyboval. Při tomto experimentu byla pro různé kombinace rychlostí otáčení kol robotu měřena poloha jednotlivých kol robotu a poloha těžiště. Při experimentu byla ukládána nejen poloha barevných štítků umístěných na robotu, ale také data vyčítaná z řídicí jednotky robotu. Tato data byla využita pro stanovení parametrů sloužících pro přepočítání řídicích signálů z řídicí jednotky (velikost signálu se pohybovala v rozmezí hodnot  $[-127 \div 127]$ ) na rychlost otáčení kol robotu.

Na Obr. 3 je zobrazen výsledek experimentu. V pravém horním rohu grafu jsou patrné body, které leží mimo

předpokládanou kružnici, po které se robot pohyboval. Tato skutečnost je způsobena nestejnými optickými vlastnostmi podkladu, po kterém se robot pohyboval. V těchto místech vyhodnocovací algoritmus provedl špatnou interpretaci barev štítků umístěných na robotu, z čehož vyplynulo špatné určení polohy barevného štítku.

Modrou barvou je v grafu zobrazen výsledek měření polohy těžiště smykem řízeného robotu. Barva červená odpovídá výstupu z matematického modelu robotu, který odpovídá diferenciálnímu podvozku.



**Obr. 3** Poloha těžiště robotu řízeného smykem získaná měřením a výstup z matematického modelu

**Fig. 3** Skid steer centre of gravity position with model simulation

Z tohoto grafu je patrné, že pohyb smykem řízeného robotu lze popsat pomocí matematického modelu diferenciálního podvozku. Použití tohoto modelu je omezeno na konkrétní druh vodorovného povrchu, pro nějž byla měřením získána konstanta pro určení poměru mezi rozchodem kol jednotlivých druhů mobilních podvozků.

## Model snímače

Pro získávání informací o pracovním prostředí mobilního robotu a tvorbu mapy prostředí je využíván planární laserový snímač SICK LMS 200. [6,7,8,9,10]

Prostředí, ve kterém se robot je popsáno geometrickými primitivami, která jsou hledána v obraze  $O(x, y)$  získaném pomocí laserového proximního snímače. Tyto geometrické prvky reprezentují zdi místností, ve kterých probíhá úloha lokalizace. Jako orientační body jsou využívány průsečíky přímk, které představují rohy místnosti. Poloha průsečíků přímk v obraze, je určována pomocí Radonovy transformace, která je definována jako:

$$Rf(r, \alpha) = \iint O(x, y) \delta(r - x \cos \alpha + y \sin \alpha) dx dy \quad (8)$$

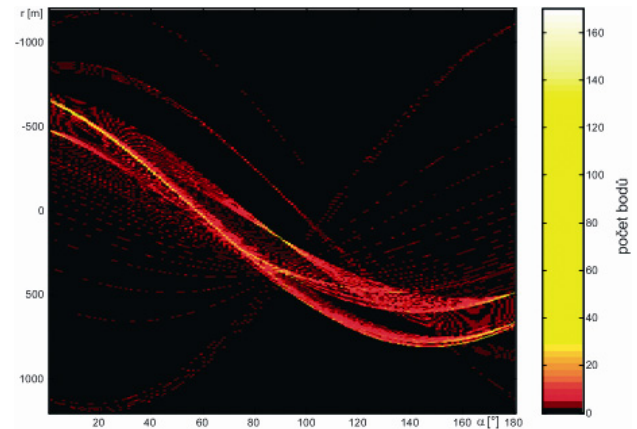
Obrazová funkce  $O(x, y)$ ,  $(x, y) \in R^2$  je transformována na funkci  $Rf(r, \alpha)$ ,  $r \in R$ ,  $\alpha \in (0, \pi)$ .

Binární obraz  $O(x, y)$  je v každém kroku algoritmu pootočen kolem svého středu a pro každý řádek pootočeného obrazu je určen počet bodů. Tato hodnota je

uložena do akumulátoru  $H(\alpha, r)$ . Každá buňka akumulátoru obsahuje počet bodů, které leží na přímce popsána v normálovém tvaru:

$$p = x \cos \alpha + y \sin \alpha \quad (9)$$

Jejíž parametry jsou definovány souřadnicemi buňky. Úloha hledání přímk v obraze tímto převedena na hledání lokálních maxim v akumulátoru  $H(\alpha, r)$ . Příklad akumulátoru je zobrazen na Obr. 4.



**Obr. 4** Akumulátor Radonovy transformace

**Fig. 4** Radon transform accumulator

Mezi hlavní výhody Radonovy transformace patří skutečnost, že není citlivá na rostoucí vzdálenost mezi jednotlivými body obrazu (viz Obr. 5). Další výhodou je, že chybějící body v obrazové funkci  $O$  nevedou ke špatné interpretaci nalezených přímk. Radonovu transformaci lze použít nejen k hledání přímk v obraze, ale také k hledání parametrů libovolně zvolených křivek.

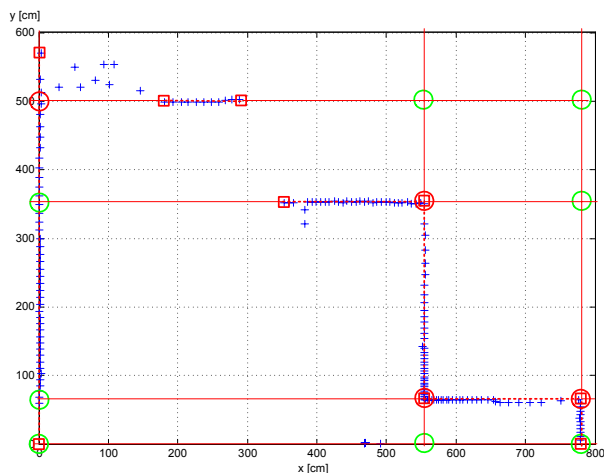
Algoritmus Radonovy transformace je však poměrně výpočetně náročný a jeho výsledkem jsou rovnice přímk, nikoliv úsečky, které by přímo odpovídaly zdem ohraničujícím prostor.

Radonova transformace velmi úzce souvisí s transformací Houghovou, kterou je také možné využít pro určení parametrů hledaných přímk.

- Radonova transformace - pro každý prvek z prostoru parametrů přímk  $H(\alpha, r)$  je hledán počet bodů binárního obrazu  $O(x, y)$ , který vyhovuje zvolenému popisu (rovnice přímky),
- Houghova transformace - pro každý bod z binárního obrazu  $O(x, y)$  jsou hledány prvky z prostoru parametrů  $H(\alpha, r)$ , které vyhovují zvolenému popisu (rovnice přímky).

Jestliže se průsečík přímk nachází v blízkém okolí naměřených bodů naměřených snímačem (euklidovská vzdálenost), je označen jako roh místnosti. V opačném případě se jedno průsečík, který neodpovídá reálnému orientačnímu bodu.

Příklad lokální geometrické mapy s přímkami, které byly určeny za použití Radonovy transformace je uveden na Obr. 5. Modrou barvou jsou zobrazeny body, které byly získány měřením pomocí laserového snímače, barvou červenou jsou reprezentovány přímky nalezené pomocí Radonovy transformace a orientační body odpovídající rohům místnosti. Barvou zelenou jsou označeny body odpovídající průsečíkům přímk, které neodpovídají reálným orientačním bodům.



Obr. 5 Lokální sensorická mapa s nalezenými přímkami a orientačními body

Fig. 5 Local sensoric map with lines and landmarks

Pro model (transformační matici) proximního snímače lze psát:

$$h = \begin{pmatrix} r_i \\ \varphi_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(x_R - x_{Li})^2 - (y_R - y_{Li})^2} \\ \operatorname{tg}\left(\frac{y_R - y_i}{x_R - x_{Li}}\right) - \varphi_R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_r \\ w_\varphi \end{pmatrix} \quad (10)$$

Kde  $r_i, \varphi_i$  je poloha orientačního bodu  $i$  definovaná v polárních souřadnicích.  $x_R, y_R, \varphi_R$  jsou prvky stavového vektoru popisující polohu mobilního robotu. Souřadnice orientačního bodu  $i$  v lokální mapě jsou označeny  $x_{Li}, y_{Li}$ .

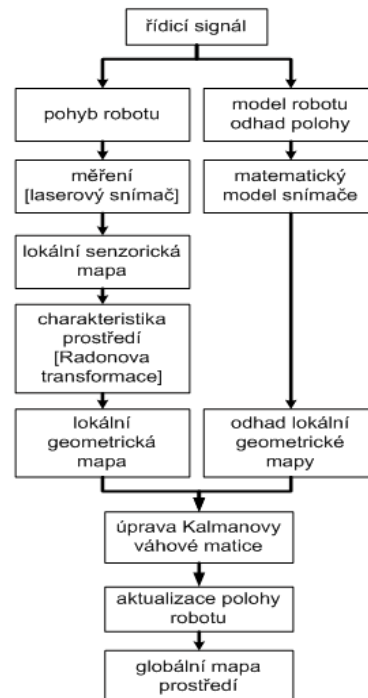
Šumový signál, jehož složky  $w_r, w_\varphi$  odpovídají přesnosti měřené vzdálenosti překážky a přesnosti nastavení úhlu měřicího paprsku.

### SLAM – průběžná lokalizace a mapování

Na základě algoritmu EKF, popsaného v první kapitole byl navržen algoritmus pro průběžnou lokalizaci a tvorbu mapy. Princip tohoto algoritmu je zobrazen na Obr.6.

Pro odhad polohy mobilního robotu a polohy orientačních bodů jsou využity modely robotu a snímače definované v předchozích kapitolách.

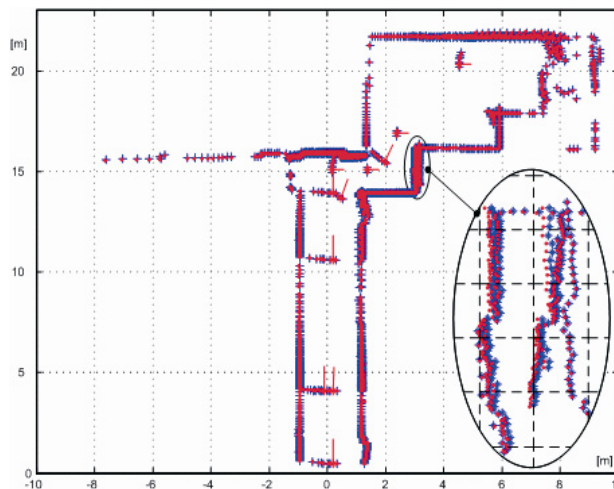
Tento algoritmus byl otestován na reálných datech získaných měřeními ve vnitřních prostorách VUT v Brně. Výsledek je uveden na Obr. 7.



Obr. 6 SLAM algoritmus založený na EKF

Fig. 6 EKF SLAM algorithm

Pomocí algoritmu NEES (normalizovaný kvadrát odchylek odhadu) byla vyhodnocena kvalita získané mapy. [11,12]. Pomocí rovnice 11 lze vypočítat kvadratickou odchylku mezi odhadem polohy získaným pomocí navrženého algoritmu a skutečnou polohou mobilního robotu získanou přesným měřením.



Tato hodnota umožňuje stanovit, nakolik je odhad polohy posunutý oproti skutečné poloze robotu.

$$\varepsilon = (\mathbf{x}_R - \hat{\mathbf{x}}_R) P_{(k|k)}^{-1} (\mathbf{x}_R - \hat{\mathbf{x}}_R)^T \quad (11)$$

$\mathbf{x}_R, \hat{\mathbf{x}}_R$  označují stavový vektor (polohu robotu) a jeho odhad. Pro  $N$  kroků SLAM algoritmu lze normalizovanou kvadratickou odchylku určit jako:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \quad (12)$$

Pro provedený pokus byla hodnota  $\bar{\varepsilon}$  stanovena na 3,76, což odpovídá 92. percentilu. Z tohoto výsledku plyne skutečnost, že hodnota  $E(\mathbf{x}_R - \hat{\mathbf{x}}_R) \neq 0$  a odhad stavového vektoru je posunutý.



Posun mezi odhadem stavového vektoru a reálnou pozicí může v případě mapování rozlehlých prostor vést k nedostatečné přesnosti odhadu polohy robotu.

Nárůstu kvadratické chyby odhadu lze zabránit zvýšením počtu orientačních bodů. Jako orientační body pro lokalizaci lze využít například geometrická primitiva popisující zkoumaný prostor, statistický popis zkoumaného prostoru (velikost, symetrie, vhodně zvolené matematické momenty obrazové funkce  $O(x, y)$ ), apod.

## Závěr

V článku je popsán algoritmus pro průběžnou lokalizaci a mapování (SLAM) vnitřních prostor využívající rozšířený Kalmanův estimátor stavů. Jsou zde uvedeny jednotlivé prvky nutné pro správnou funkci algoritmu (matematické modely mobilního robotu a snímače). V druhé části článku je uvedena metoda pro hledání orientačních bodů ve zkoumaném prostoru, která je založena na Radonově transformaci. V závěru je uvedena mapa zkoumaného prostoru získaná pomocí navrženého algoritmu a provedeno zhodnocení dosažených výsledků.

Navržený algoritmus je vhodný pro použití ve vnitřních prostorách budov. Této skutečnosti odpovídá navržený matematický model robotu a metoda pro hledání orientačních bodů. V případě využití ve vnějším prostředí, by bylo nutné systém doplnit o možnost měření nerovnosti povrchu. Také algoritmus pro hledání orientačních bodů by musel být nahrazen (doplněn) metodou vhodnou pro vnější prostředí, např. Orientační body definované pomocí GPS souřadnic.

## Poděkování

Tento článek vznikl za podpory projektu MSM0021630529 – Inteligentní systémy v automatizaci a projektu MŠMT ČR - 1M0567.

## Literatura

- [1] THRUN, S., BURGARD, W., FOX, D., *Probabilistic robotics*, The MIT Press, 2005, ISBN 0-262-20162-3
- [2] THRUN, S., *Robotic Mapping: A Survey, Exploring artificial intelligence in the new millenium*, Morgan Kaufman Publishers Inc., 2003, ISBN: 1-55860-811-7
- [3] SIEGWART, R., NOURBAKSH, I., R., *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, A Bradford Book, MIT Press, 2004, ISBN 0-262-19502-X

[4] CSORBA, M., *Simultaneous Localisation and Mapping*, Ph.D. thesis, Oxford, 1997

[5] NEUŽIL, T., *Simultaneous Mapping and Navigation for Skid Steered Mobile Robot*, WSEAS Press, 2008, ISBN 978-960-6766-442

[6] NEUŽIL, T., JEŽ, O., *Data processing for mapping in mobile robotics*, IETA 2007

[7] <www.sick.cz> [cit. 14. 9. 2007]

[8] NGUYE, V. MARTINELLI, A., TOMATIS, N., SIEGWART, R., *A Comparison of Line Extraction Algorithms using 2D Laser Rangefinder for Indoor Mobile Robotics*, IROS'2005, ISBN 0-7803-891-3, 2005

[9] NIETO, J., *Detailed Environment Representation for the SLAM Problem*, Ph.D. Thesis, University of Sydney, 2005

[10] GINKEL, M., HENDRIKS, L., VLIET, L. J., *A Short Introduction to the Radon and Hough transforms and how they relate to each other*, Delft University of Technology, <www.ph.tn.tudelft.nl/~michael/> [cit. 25. 2. 2008]

[11] CASTELLANOS, J., A., NEIRA, J., TARDÓS, J., D., *Limits to the Consistency of EKF Based SLAM*, IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, 2004, <webdiis.unizar.es/~jdtardos> [cit. 10. 1. 2008]

[12] BAILEY, T., NIETO, J., GUIVANT, J., STEVENS, M., NEBOT, E., *Consistency of the EKF-SLAM Algorithm*, <www-personal.acfr.usyd.edu.au/tbailey> [cit. 10. 1. 2008]

## Abstract

The paper presents extended Kalman filter based algorithm for simultaneous localisation and mapping. This algorithm was designed for use with skid steer mobile robot platform. Models of skid steering mobile robot and laser proximity sensor are presented. Quality of the proposed SLAM algorithm is evaluated at the end of the article.

## Ing. Tomáš Neužil

Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav automatizace a měřicí techniky  
Kolejní 4, Brno 612 00  
Email: neuzil@feec.vutbr.cz