

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 420

ISSN 1213-418X

Jiří Krejsa

**ROBUSTNÍ LOKALIZACE
MOBILNÍHO ROBOTU
PRO DYNAMICKÁ VNITŘNÍ PROSTŘEDÍ**

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

**Robustní lokalizace mobilního robotu pro dynamická
vnitřní prostředí**

Robust localization of mobile robot in dynamic indoor environment

Teze habilitační práce
v oboru Aplikovaná mechanika



Brno 2012

Klíčová slova

Mobilní robot, lokalizace, aktivní orientační body, Kalmanův filtr

Keywords

Mobile robot, localization, active landmarks, Kalman filter

Místo uložení práce

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2

© Jiří Krejsa, 2012

ISBN 978-80-214-4459-1

ISSN 1213-418X

Obsah

Představení autora	4
1 Úvod, motivace a cíle práce	5
2 Lokalizace mobilních robotů	7
2.1 Úloha lokalizace	7
2.2 Volba koncepce lokalizace	7
3 Kalmanův filtr a jeho nelineární varianty	10
3.1 Rozšířený Kalmanův filtr	11
3.2 Unscented Kalmanův filtr	12
4 Aplikace Kalmanova filtru na úlohu lokalizace	14
4.1 Predikce	14
4.2 Korekce	15
5 Simulace	18
6 Realizace - aplikace na reálném robotu	19
6.1 Majáky a scanner majáků	19
6.2 Implementace a testovací robot Leela	21
6.3 Ověření lokalizačního systému	22
7 Aplikace v běžném prostředí	24
7.1 Operační nasazení	24
7.2 Zhodnocení	26
8 Závěr	27
8.1 Aktuálnost řešené problematiky	27
8.2 Shrnutí obsahu a splnění cílů habilitační práce	27
8.3 Přínos práce	28
8.4 Náměty a možnosti dalšího využití	29
9 Literatura	30

Představení autora

Jiří Krejsa se narodil v roce 1971 v Boskovicích. Vysokoškolské vzdělání získal v oboru Aplikovaná mechanika na Fakultě strojní Vysokého učení technického v Brně v roce 1994 složením státní závěrečné zkoušky a obhajobou diplomové práce “Řešení inverzního problému rovinné úlohy pružnosti”.



V letech 1994-2000 absolvoval pod vedením školitele doc. RNDr. Ing. Tomáše Březiny, CSc. doktorské studium, které ukončil v roce 2000 obhajobou disertační práce „Simulační modelování technických objektů pomocí neuronových sítí“. Během studia absolvoval dvě měsíční stáže ve Spojených státech, konkrétně na Drexel University a University of Alabama, kde se věnoval řešení inverzních úloh vedení tepla pomocí netradičních metod.

Po ukončení doktorandského studia působil rok na pozici postdoktoranda na Univesity of Southern California v Los Angeles, kde vytvořil novou generaci přístroje DIMSCAN na určování počtu rakovinných buněk zpracováním obrazu fluorescenčního mikroskopu.

Od roku 2004 zaměřil svoji pozornost na oblast mobilní robotiky, které se věnuje dodnes. Odborné zájmy zahrnují především problematiku spjatou s tímto oborem, konkrétně plánování cesty, lokalizace, rozhraní člověk-stroj a zpracování obrazu.

Autor pracoval na projektech Grantové agentury ČR (GA101/93/0297 "Netradiční přístupy k modelování elektromechanických pohonných soustav", GA101/00/1471 "Stabilita a řízení rotorů na magnetických ložiskách", GA101/08/0282 "Mechatronické pohonové soustavy s nelineárními vazbami"), výzkumných záměrech (MSM 261100009 "Netradiční metody studia komplexních a neurčitých systémů", MSM 262100024 "Výzkum a vývoj mechatronických soustav", MSM 0021630518 "Simulační modelování mechatronických soustav") i interních projektech Akademie věd ČR (IT CAS CZ 920042 "Inteligentní loketní ortéza").

V pedagogické oblasti vytvořil a garantuje předměty „Mechanika 1“, „Mechanika 2“, „Seminář z Matlabu“ a „Základy zpracování signálu“, které spolu s předmětem „Kinematika“ vyučuje na Fakultě strojního inženýrství. Vedl 15 bakalářských a 11 diplomových prací, které byly úspěšně obhájeny.

Je autorem nebo spoluautorem 21 článků v časopisech, z toho 4 impaktovaných. Dále je autorem nebo spoluautorem více než 100 článků na vědeckých konferencích, kapitolách v knihách, a dalších publikací. Počet citací dle Web of Science je aktuálně 31, H-index 3, dle databáze Scopus 46 citací.

1 Úvod, motivace a cíle práce

Mobilní roboty existují již řadu desetiletí a jejich rozvoj je spjat především se specifickým využitím ve vojenství a průzkumu vesmíru. V posledních deseti letech můžeme nicméně pozorovat nárůst aplikací i v civilní oblasti. Požadavky civilního sektoru a tedy i vývoj jednoznačně směřují od robotů ovládaných dálkově k robotům autonomním. V úlohách navigace autonomních mobilních robotů je řešen problém bezpečného pohybu za účelem splnění zadaného úkolu, a klíčovou roli zde hrají dvě oblasti: lokalizace robotu, která dává odpověď na otázku „Kde jsem?“ a plánování trajektorie, která odpovídá na otázku „kudy mám jet?“. Nutnou podmínkou pro korektní plánování trajektorie je úspěšně stanovená poloha robotu, tedy vyřešení úlohy lokalizace. V lokalizačních úlohách (a obecně v úlohách navigace) je nutné překonat řadu dílčích problémů, především:

- Fúze dat různých senzorů. Různé snímače poskytují robotu různé informace o okolí. Tyto je nutné nějakým způsobem zkombinovat do smysluplného obrazu okolního prostředí.
- Chyby a nejistota. Měření všech senzorů jsou zatížena šumem a chybami, polohu robotu není možné určit přesně, a proto se využívá pravděpodobnostního přístupu, který bere v úvahu nepřesnosti měření, poloha robotu je reprezentována pomocí rozdělení pravděpodobnosti a jako odhad polohy se využívá některých charakteristik daného rozdělení, například střední hodnoty.
- Rozpoznávání objektů. Aby byl robot schopen vykonat zadaný úkol, musí rozpoznat různé struktury, jako jsou objekty nebo orientační body (landmarks). Rozpoznávání je řádově jednodušší, pokud jsou hledané objekty předem známy, nicméně i v tomto případě je nutné ho provést, například u aktivních orientačních bodů je vhodné doplnit vysílaný signál (ať již je v jakékoliv podobě) o identifikaci daného bodu.
- Výpočetní náročnost. Některé z metod používaných při lokalizaci jsou natolik výpočetně náročné, že dosud nejsou realizovatelné v reálném čase. Jedná se především o některé metody zpracování obrazu a metody sesazování skenů dat získaných pomocí laserových dálkoměrů. Výpočetní náročnost ovlivňuje i cenu a energetickou náročnost řešení.
- Reálné prostředí. Většina metod pro lokalizaci nebo plánování cesty je velmi dobře odladěna v simulacích nebo v laboratorních podmínkách. V běžném prostředí ovšem působí řada obtížně predikovatelných faktorů, z nichž jako nejdůležitější se ukazuje přítomnost dynamických překážek – lidí. Dynamické překážky jsou problematické ze dvou různých hledisek: chybné údaje ze snímačů a obtížné plánování pohybu.

V úloze navigace zaujímá lokalizace prioritní postavení. Pokud není korektně stanovena poloha robotu, jsou další kroky (plánování trajektorie pohybu) z principu chybné. Na lokalizační systém je kladena řada často protichůdných požadavků. Ačkoliv je úloha lokalizace pokládána za teoreticky zvládnutou, mimo laboratoře prozatím neexistuje mnoho funkčních systémů nasazených v reálných podmínkách. Snaha o změnu tohoto stavu je základní motivací předložené habilitační práce.

V současné době existuje řada lokalizačních metod, využívajících různých druhů snímačů, metod fúze dat získaných těmito snímači a reprezentací odhadu polohy robotu. Problematika lokalizace je široká, a není možné navrhnout metodu zcela univerzální. Je nutné specifikovat alespoň rámcově oblast použití metody a z toho plynoucí požadavky na ni kladené. S ohledem na předpokládanou vyšší komerční využitelnost autonomních mobilních robotů v nejbližších letech bude lokalizace zaměřena na vnitřní prostředí. Dále budeme předpokládat pohyb robotu po podlaze, a lokalizace bude tedy omezena na rovinnou úlohu, kdy informace o poloze robotu je dána jeho souřadnicemi a úhlem natočení v této rovině.

Základní cíl práce lze tedy formulovat takto: vyvinout a implementovat lokalizační metodu pro rovinnou úlohu (2D) do vnitřního prostředí a dopracovat tuto metodu do formy použitelné v reálném prostředí a to jak z hlediska přesnosti lokalizace, spolehlivosti, robustnosti vůči chybám snímačů, tak z hlediska finanční náročnosti celého řešení, jeho přenositelnosti na různé typy robotů, atd. Podrobnější specifikace a následně také postup řešení lze formulovat pomocí dílčích cílů:

- **Výběr vhodné koncepce.** I s omezením na rovinnou úlohu ve vnitřním prostředí existuje velké množství koncepcí lokalizace, lišící se především typem použitých snímačů. Proto je nutným předpokladem úspěšného řešení kritické zhodnocení různých koncepcí s ohledem na požadované vlastnosti lokalizace a výběr takové koncepce, která má nejlepší předpoklady pro jejich splnění. Výběr koncepce musí obsahovat také ideový nástin druhu použitých snímačů.
- **Návrh a implementace lokalizační metody.** Metoda lokalizace již ve fázi návrhu musí splňovat nezbytné předpoklady pro nasazení v reálném robotu v běžném prostředí:
 - **Robustnost vůči dynamickým překážkám.** V běžném prostředí lze předpokládat přítomnost lidí, a protože jsou mobilní roboty doposud poměrně výjimečnými zařízeními, je nutné počítat i s možností, že je robot lidmi prakticky obklopen. Metoda musí být schopna pracovat s dostatečnou přesností i v takovém případě.
 - **Robustnost vůči výpadku senzoru.** Spolehlivost metody by neměla být zásadním způsobem snížena při výpadku některého ze senzorů. V krajním případě musí být metoda alespoň schopna identifikovat ztrátu polohy.
 - **Nízké nároky na snímače.** Snímače mohou tvořit podstatnou část celkové ceny robotu. Již během návrhu metody musí být proto uváženo, zda je možné splnit lokalizační úlohu i v případě snímačů jednoduchých a finančně nenáročných.
 - **Nízké nároky na výpočetní výkon.** Se zvyšující se výpočetní náročností roste i náročnost energetická a snižuje se maximální doba provozu. Nízké výpočetní nároky jsou proto důležitým parametrem při návrhu metody. V ideálním případě by mělo být možné metodu implementovat i pro procesory používanými např. v mikrokontrolérech. Celý lokalizační systém by pak získal podobu jednoúčelového zařízení, které je možno instalovat i do stávajících mobilních strojů nezávisle na jejich koncepci.
 - **Nezávislost na typu podvozku.** Metoda by měla být nezávislá na způsobu lokomoce robotu, s případnou snadnou modifikovatelností, pokud je možno známého způsobu pohybu robotu využít pro zpřesnění / zrychlení lokalizace.
 - **Nízké nároky na osvětlení prostředí.** Použití lokalizační metody je směřováno na servisní roboty. Ty se obecně pohybují ve vnitřním prostředí v různou denní i noční dobu a metoda by tedy neměla být závislá na stabilním osvětlení daného prostředí.
- **Simulační ověření.** Implementovaná metoda musí být před nasazením v reálném ověření dostatečně ověřena pomocí simulací. Simulace musí zahrnovat nepřesnosti senzorů i nepřesnosti pohybu robotu.
- **Ověření na reálném robotu.** Po simulačním ověření a případné modifikaci metody musí být lokalizační systém otestován na reálném robotu, případně několika robotech s různými typy podvozku. V této počáteční ověřovací fázi jsou předpokládány ideální laboratorní podmínky, případně jednoúčelové testy např. s vysazením některého ze snímačů apod.
- **Nasazení v reálném prostředí.** Závěrečná fáze ověření lokalizačního systému proběhne na reálném robotu v prostředí běžném. Nejprve pod dohledem kvalifikované osoby, posledním testem pak bude použití s dohledem pouze zběžně vyškolené osoby.

2 Lokalizace mobilních robotů

2.1 Úloha lokalizace

Řešením úlohy lokalizace mobilních robotů je informace o poloze robotu vzhledem k prostředí, ve kterém se robot pohybuje. V rovinné úloze se jedná o x-ovou a y-ovou souřadnici a úhel natočení vůči globálnímu souřadnému systému, a to vždy v daném časovém kroku. Souřadnice robotu označme indexem R a časový krok indexem k . Vektor polohy robotu je potom:

$$\mathbf{x}_k = [x_k^R, y_k^R, \varphi_k^R]^T \quad (2.1)$$

Lokalizační úlohu lze rozdělit podle obtížnosti odvíjející se od informací, které jsou apriorně k dispozici, od sledování polohy, kdy je známa počáteční poloha, přes globální lokalizaci ve které známa není až po simultánní lokalizaci a mapování, kdy nejsou známé apriorní informace o prostředí a model prostředí se vytváří průběžně.

Konkrétní koncepce lokalizace robotu je závislá především na tom, jaké informace má robot k dispozici. Podle jejich zdroje se jedná o apriorní informace (časově nezávislé, počáteční poloha robotu, popis prostředí), informace z řídicího systému (např. zobecněná translační a rotační rychlost) a informace ze snímačů, které jsou pro lokalizační úlohu klíčové. Jedná se buď o měření relativní (vztahované k předchozí poloze robotu) a měření absolutní (závislé pouze na prostředí). U relativních měření se využívá především odometrie, inerciálních měření, případně vizuální odometrie, nicméně u všech relativních měření dochází ke kumulaci chyb a samostatně nejsou pro řešení lokalizační úlohy dostačující. Naproti tomu měření absolutní polohy je nezávislé na předchozí poloze robotu nebo jejím odhadu. Poloha robotu je tedy určena z jediného pozorování, nikoliv integrací sekvence pozorování, čímž je odstraněna hlavní nevýhoda relativních měření – kumulace chyby. Měření absolutní polohy může poskytovat kompletní vektor \mathbf{x}_k nebo pouze některé prvky, např. úhel natočení robotu. Obecně můžeme rozdělit měření absolutní polohy na dvě techniky. První je založena na měření vzdálenosti od překážek pomocí proximálních senzorů, využití měření k tvorbě lokálního modelu prostředí a následného srovnání těchto lokálních modelů s globálním modelem poskytnutým a priori v mapě. Tento přístup se označuje jako srovnávací metoda (model/scan matching). Druhá technika je založena na využití orientačních bodů (landmarks), a to buď aktivních (majáky) nebo pasivních, které mohou být umělé nebo přirozené. Termín orientační bod je použit ve smyslu strukturovaného objektu využitého k lokalizaci, nikoliv ve smyslu geometrického bodu.

2.2 Volba koncepce lokalizace

Při volbě koncepce lokalizace hrají zásadní roli požadavky na metodu kladené. Prakticky ve všech koncepcích se nějakým způsobem fúzí apriorní informace, informace řídicí a informace ze snímačů pro měření relativní a absolutní polohy. Zatímco míra využití apriorních a řídicích informací a dat z relativních senzorů může být různá (i nulová), použité snímače měření absolutní polohy koncepci zásadně ovlivňují. Rozhodnutí o koncepci je tedy v zásadě rozhodnutím o tom jaké typy senzorů se budou používat a jak se budou naměřené informace rámcově zpracovávat. V Tabulce 2.1 jsou proto shrnuty některé vlastnosti základních čtyř koncepcí, úzce souvisejících s použitými snímači. Při pohledu na tabulku je zřejmé, že neexistuje ideální koncepce splňující všechny požadavky kladené na lokalizační metodu dle výše uvedených specifikací. Požadavek na nezávislost na osvětlení prakticky vylučuje použití kamer a tedy pasivních orientačních bodů. Srovnávací techniky nevyžadují instalaci v prostředí při aplikaci, nicméně cena snímačů je vysoká a metoda je paměťově

náročná s nevysokou odolností vůči výpadkům senzorů a dynamickým překážkám. Při použití majáků je nutná instalace v prostředí a servis majáků, ostatní parametry jsou poměrně příznivé.

Tabulka 2.1 Klíčové vlastnosti lokalizačních koncepcí

Koncepce Vlastnost	Srovnávací techniky	Přirozené pasivní orientační body	Umělé pasivní orientační body	Aktivní orientační body
základní typ snímače	laserový dálkoměr	kamera	kamera	majáky a odpovídající přijímače
nutnost instalace v prostředí	ne	ne	ano	ano
robustnost vůči výpadkům senzorů	nízká	nízká	střední	střední až vysoká
robustnost vůči dynamickým překážkám	nízká až střední	nízká	střední	střední až vysoká
citlivost na osvětlení	nulová	vysoká	vysoká	nulová až nízká
výpočetní náročnost	střední až vysoká	vysoká	vysoká	nízká
paměťová náročnost	vysoká	střední až vysoká	střední	nízká
vyžaduje mapu prostředí	ano (geometrická)	ano (různé)	pouze body	pouze body
cena snímačů	vysoká	střední	střední	nízká až střední
náročnost údržby	nulová	nulová	nízká	střední až vysoká

Na základě uvedeného rozboru byly vybrány pro další zkoumání dvě základní koncepce, jednak použití srovnávací techniky s využitím laserových dálkoměrů a dále použití aktivních orientačních bodů.

2.2.1 Koncepce srovnávacích technik

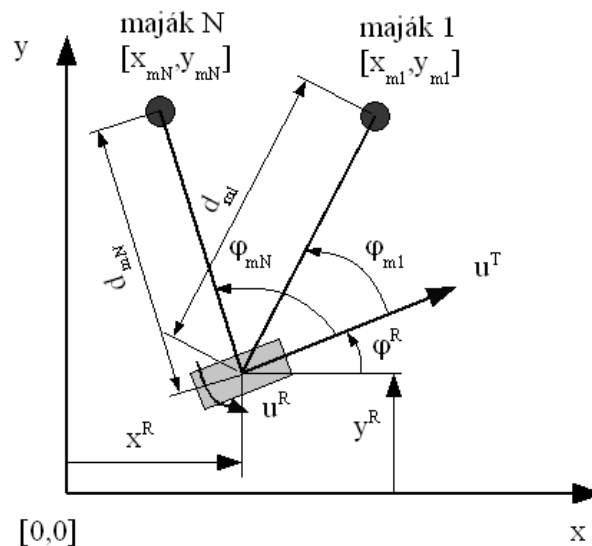
Koncepce srovnávacích technik byla rozpracována pro dvě úlohy: globální lokalizaci a simultánní lokalizaci a mapování. Podrobně jsou uvedeny v plné verzi habilitační práce a obě byly dovedeny do stádia testování na reálném robotu a prokázaly dostatečné kvality pro nasazení v reálném prostředí. Nespornou výhodou srovnávacích technik je skutečnost, že není třeba instalovat v prostředí umělé orientační body. Výpočetní náročnost metod je vysoká, nicméně tento problém je možné částečně vyřešit paralelizací některých výpočtů a dosáhnout tak dostatečně rychlých odezev. Robustnost vůči dynamickým překážkám je dostatečná do cca 30-40% ovlivnění zorného pole dálkoměru.

Pro nasazení servisních robotů v běžném prostředí je ovšem jedním z určujících parametrů cena. Koncepce srovnávacích technik využívá laserové dálkoměry, jejichž cena je stále vysoká a náklady na výrobu robotu tak snadno přesáhnou přijatelné hodnoty. Proto byla pozornost dále zaměřena na použití aktivních orientačních bodů.

2.2.2 Koncepte aktivních orientačních bodů

Použití aktivních orientačních bodů (majáků) má zásadní nevýhodu v nutnosti instalovat do prostředí statická zařízení, která je navíc nutné udržovat. Kromě této skutečnosti ovšem dále převažují již jen pozitiva. Majáky lze snadno detekovat a identifikovat, výpočetní nároky jsou obecně nízké, stejně jako cena snímačů. Apriorní informace nutné pro lokalizaci jsou paměťově velmi nenáročné (poloha a identita jednotlivých majáků). Při použití vhodného fyzikálního principu vysílání majáků je metoda zcela nezávislá na osvětlení scény. V případě, že je servisní robot nasazen v daném prostředí delší dobu, lze tedy koncepci aktivních orientačních bodů považovat za neuvěřitelně výhodnější.

Aktivní orientační body poskytují data o relativní poloze těchto bodů vůči robotu. Relativní poloha může být určena plně (úhel φ_m a vzdálenost d_m jednotlivých majáků), nebo částečně (pouze vzdálenost, pouze úhel). Poloha majáků v globálním souřadném systému je známá (souřadnice x_m, y_m) a je tak možné dopočítat polohu robotu. Schematicky jsou jednotlivé proměnné zobrazeny na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 Aktivní orientační body (majáky) fixní vůči globálnímu souřadnému systému.

Nicméně měření relativní polohy majáků je vždy zatíženo chybou. Pro vyjádření polohy robotu se proto používá pravděpodobnostního přístupu, a pak hovoříme o odhadu polohy. Kromě využití měření absolutní polohy se využívá i relativního měření, ať z inerciálního měřicího systému, odometrie či informací řídicího systému. Je tedy nutné fúzovat tato data s měřeními z přijímače majáků. Matematický aparát, který takovou fúzi a současně pravděpodobnostní přístup umožňuje, je založen na Baysovských filtrech a tvoří základ většiny lokalizačních systémů používaných v současné době. Poloha robotu již není reprezentována třemi souřadnicemi, ale rozdělením pravděpodobnosti. V případě, že je použito unimodální Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti, je odhad polohy reprezentován střední hodnotou a přesnost/nepřesnost odhadu kovarianční maticí. Tento typ Baysovského filtru se označuje jako Kalmanův filtr a představuje základní nástroj pro fúzi dat.

3 Kalmanův filtr a jeho nelineární varianty

Mobilní robot při pohybu mění svoji polohu v závislosti na pokynech řídicího systému. Robot považujeme za dynamický systém a k popisu jeho pohybu využijeme teorii dynamických systémů. Pro účely lokalizace je výhodné používat stavový model, tedy model obsahující vstupní, výstupní a stavové proměnné a jejich vzájemný vztah. Stavem rozumíme množinu signálů, které plně zachycují vliv minulých vstupů na chování systému. Následující stav systému lze určit pomocí aktuálního stavu a aktuálního vstupu. Na rozdíl od výstupu nelze stav změřit, je nutné ho odhadnout, ale protože výstup je na stavu závislý, můžeme jej k odhadu stavu využít. Příkladem je právě úloha lokalizace. Polohu robotu (stav) v prostředí nemůžeme změřit přímo, měřit můžeme pouze některé veličiny, které jsou na poloze závislé (výstup). Korektním odhadem stavu na základě měření získáme polohu robotu.

Stavový model uvažující procesní šum a šum měření je určen:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \end{aligned} \quad (3.1)$$

kde \mathbf{x}_k je vektor stavů o n prvcích, \mathbf{u}_k je vektor vstupů o m prvcích a \mathbf{y}_k je vektor výstupů o p prvcích. Matice \mathbf{A}_k je tedy rozměru $n \times n$, matice \mathbf{B}_k rozměru $n \times m$, matice \mathbf{H}_k rozměru $p \times n$. Vektor \mathbf{v}_k je procesní šum, který zahrnuje poruchy, které ovlivňují dynamiku systému, ale nejsou modelovány (proklouznutí kola u kolového robotu, ...), a \mathbf{w}_k je šum (porucha) měření. Vektor \mathbf{v}_k má stejný počet prvků jako vektor stavu \mathbf{x}_k , vektor \mathbf{w}_k má stejný počet prvků jako výstupní vektor \mathbf{y}_k .

Cílem je určit co nejlepší odhad stavu určeným střední hodnotou $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$ a kovarianční maticí \mathbf{P}_{k+1} v daném časovém kroku, přičemž k dispozici je odhad stavu minulého, vstup \mathbf{u}_k a změřený výstup \mathbf{y}_k . K tomu je nutné překonat dva problémy. Tím prvním je fakt, že stav nelze určit z výstupu přímo, neboť matice \mathbf{H}_k nemusí být invertovatelná. Odhad stavu je nutné určit z časové historie známých vstupů a výstupů. Aparát, který tento odhad provádí, se označuje jako pozorovatel (observer). Druhým problémem jsou poruchy (šum) \mathbf{v}_k a \mathbf{w}_k , které nejsou známy, nelze je přímo měřit a je nutné je odfiltrovat. Pro odhad stavu je tedy vyžadován pozorovatel a filtr současně. Tyto funkce v sobě spojuje Kalmanův filtr, jehož všeobecně známé vztahy jsou:

$$\begin{aligned} \text{Predikce} \quad \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} &= \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k \\ \mathbf{P}_{k+1|k} &= \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{V}_k \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Korekce} \quad \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} &= \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} \tilde{\mathbf{y}}_{k+1} \\ \mathbf{P}_{k+1|k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Kde} \quad \tilde{\mathbf{y}}_{k+1} &= \mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \\ \mathbf{S}_{k+1} &= \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{W}_{k+1} \\ \mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \end{aligned}$$

3.1 Rozšířený Kalmanův filtr

Podstatným omezením KF je předpoklad, že modelovaná soustava je lineární, respektive že následující stav je lineární funkcí stavu předchozího a že pozorování (měření) jsou lineární funkcí stavu (viz rovnice 3.1). Pokud však budeme Kalmanův filtr uvažovat pro lokalizační úlohu, stavem bude poloha robotu a vstupem například rychlost robotu, není závislost stavu a vstupu lineární, a vztahy pro Kalmanův filtr tedy nelze přímo použít. Ještě důležitější vliv nelinearity se projeví po transformaci Gaussovského rozložení přes nelineární funkci, kdy výsledná náhodná proměnná již nemá Gaussovské rozložení.

Tento problém řeší rozšířený Kalmanův filtr (Extended Kalman filter, EKF). Původní lineární transformace (3.1) jsou nahrazeny nelineárními funkcemi f a h :

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1} &= f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, k) + \mathbf{v}_k \\ \mathbf{y}_k &= h(\mathbf{x}_k, k) + \mathbf{w}_k\end{aligned}\quad (3.4)$$

kde \mathbf{x}_k , \mathbf{u}_k , \mathbf{y}_k , \mathbf{v}_k a \mathbf{w}_k mají stejný význam jako u Kalmanova filtru. Funkce f tak nahrazuje matice \mathbf{A} a \mathbf{B} , funkce h nahrazuje matici \mathbf{H} . Použitím nelineární transformace je na jednu stranu dosaženo zobecnění Kalmanova filtru, na druhou stranu pro obecné nelineární funkce f a h již nebude mít odhad stavu ani měření Gaussovské rozložení. Rozšířený Kalmanův filtr řeší tento problém tak, že počítá aproximaci skutečného rozložení, a to aproximaci Gaussovskou. Z Kalmanova filtru EKF dědí reprezentaci stavu i měření, ale odhady jsou pouze aproximovány. Cílem EKF je tedy aproximovat střední hodnoty a kovariance Gaussovských rozložení nahrazujících rozložení vzniklých nelineární transformací. Toho je dosaženo linearizací - nahrazením nelineárních funkcí f a h lineárními funkcemi. EKF používá Taylorův rozvoj prvního řádu, tedy lineární aproximaci funkce určujeme z její hodnoty a tečny v bodě, ve kterém linearizaci provádíme. Tečnu (sklon) získáme derivací, pro náhodný vektor (více proměnných) potom parciální derivací podle jednotlivých prvků vektoru. Jakmile jsou funkce f a h linearizovány, není již rozdíl mezi klasickým a rozšířeným Kalmanovým filtrem.

Odhad střední hodnoty predikovaného stavu je určen rovnicí (3.4), tedy

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \mathbf{u}_k, k)\quad (3.5)$$

Pro výpočet kovarianční matice není k dispozici matice \mathbf{A}_k , a je nutné použít linearizaci: parciální derivací funkce f podle stavu (tedy podle $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$):

$$\mathbf{F}_k = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k|k}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k|k}}\quad (3.6)$$

Vztah pro predikci kovarianční matice bude odpovídat vztahu pro Kalmanův filtr, pouze matice \mathbf{A}_k je nahrazena maticí \mathbf{F}_k , tedy

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{V}_k\quad (3.7)$$

V korekčním kroku je nutné linearizovat funkci h (3.4), tedy vypočítat matici \mathbf{H}_k jako parciální derivaci funkce h podle aktuálního odhadu stavu, což je predikovaný stav získaný v rovnici (4.49). Tedy

$$\mathbf{H}_{k+1} = \left. \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_n}{\partial x_1} & \frac{\partial h_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}} \quad (3.8)$$

Pro výpočet vektoru korekční chyby $\tilde{\mathbf{y}}_{k+1}$ je použita funkce h (viz 3.4). Výsledné vztahy pro korekční krok rozšířeného Kalmanova filtru jsou potom:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} &= \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} \tilde{\mathbf{y}}_{k+1} \\ \mathbf{P}_{k+1|k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \end{aligned} \quad (3.9)$$

kde

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{y}}_{k+1} &= \mathbf{y}_{k+1} - h(\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, k+1) \\ \mathbf{S}_{k+1} &= \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{W}_{k+1} \\ \mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \end{aligned} \quad (3.10)$$

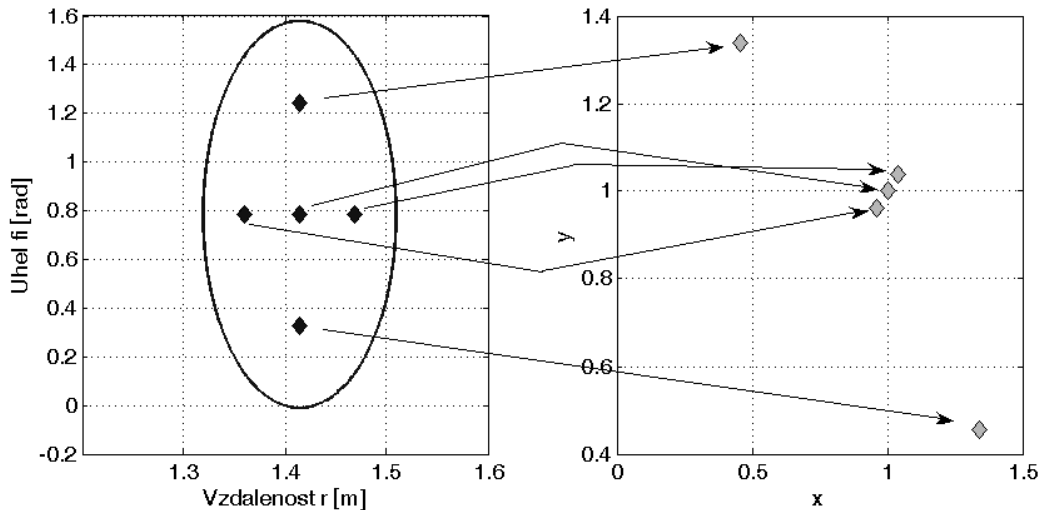
3.2 Unscented Kalmanův filtr

Linearizace je u rozšířeného Kalmanova filtru v některých případech zatížena výraznou aproximační chybou. Možným řešením, které navíc nevyžaduje derivace nelineárních funkcí, je unscented Kalmanův filtr (UKF) který vychází z myšlenky vybrat některé ze stavů, a po nelineární transformaci z nich dopočítat parametry popisující Gaussovo rozdělení. Na tomto principu je založena takzvaná unscented transformace (Julier 1997), která je dále aplikována v unscented Kalmanově filtru. Stavů jsou vybírány deterministicky, nikoliv náhodně, což je principiální rozdíl vůči např. particle filtru. Unscented transformace deterministicky určuje z náhodného vektoru s Gaussovým rozdělením takzvané *sigma body* \mathbf{X} , které slouží jako vstupy nelineární funkce f . Sigma body jsou umístěny jednak ve střední hodnotě, a dále symetricky podle hlavních os kovariance. Obecně je pro náhodný vektor \mathbf{x} o n prvních nutné vygenerovat $2n+1$ sigma bodů \mathbf{X} :

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_0 &= E(\mathbf{x}) \\ \mathbf{X}_i &= E(\mathbf{x}) + \left(\sqrt{(n+\kappa) \mathbf{P}_x} \right), \\ \mathbf{X}_{n+i} &= E(\mathbf{x}) - \left(\sqrt{(n+\kappa) \mathbf{P}_x} \right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

kde $E(\mathbf{x})$ je střední hodnota náhodného vektoru \mathbf{x} , \mathbf{P}_x je kovarianční matice vektoru \mathbf{x} , κ je parametr metody a $(\sqrt{(n+\kappa)\mathbf{P}_x})$ je i -tý řádek z matice tvořené maticovou odmocninou z $(n+\kappa)\mathbf{P}_x$ (střední hodnota je vektor, takže k němu můžeme přičíst zase jen vektor).

V unscented transformaci jsou jednotlivé sigma body transformovány nelineární funkcí f , čímž získáme množinu transformovaných bodů, ze kterých vypočteme parametry rozdělení. Transformace je ilustrována na obrázku 3.1 pro náhodný vektor o dvou proměnných.



Obr.3.1 Unscented transformace náhodného vektoru. Vlevo sigma body před transformací společně s konfidenční elipsou Gaussovského rozložení původního náhodného vektoru, vpravo sigma body po transformaci.

Po stanovení sigma bodů je uplatněna transformace nelineární funkcí:

$$\mathbf{Y}_i = f(\mathbf{X}_i) \quad (3.12)$$

Z transformovaných bodů je následně určena výsledná střední hodnota a kovarianční matice. K tomu musí být pro každý ze sigma bodů určena jeho váha. Ta je odlišná pro střední hodnotu (\mathbf{X}_0) a pro všechny ostatní body. Konkrétně jsou váhy stanoveny takto:

$$\begin{aligned} W_0 &= \kappa / (n + \kappa) \\ W_i &= 1 / 2(n + \kappa), i = 1 \dots 2n \end{aligned} \quad (3.13)$$

Střední hodnota je potom určena jako vážený průměr transformovaných bodů

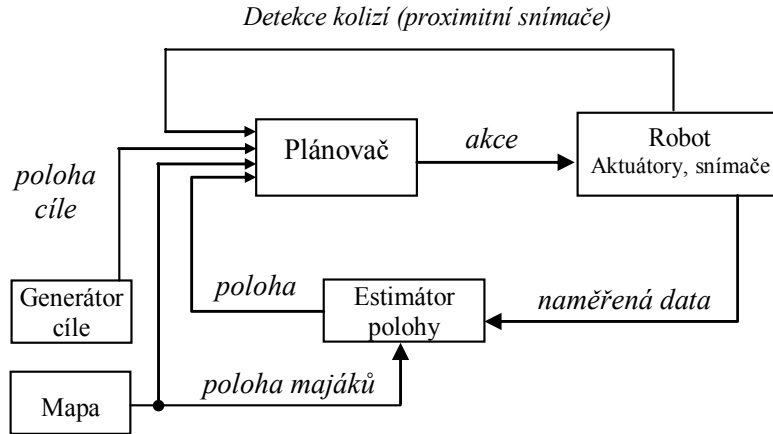
$$E(\mathbf{Y}) = \sum_{i=0}^{2n} W_i \mathbf{Y}_i \quad (3.14)$$

a kovarianční matice \mathbf{P}_y jako

$$\mathbf{P}_y = \sum_{i=0}^{2n} W_i (\mathbf{Y}_i - E(\mathbf{Y}))(\mathbf{Y}_i - E(\mathbf{Y}))^T \quad (3.15)$$

4 Aplikace Kalmanova filtru na úlohu lokalizace

Pro použití Kalmanova filtru v lokalizační úloze je nutné stanovit vstupy a výstupy modelovaného systému, tedy určit akce a měření. Vycházíme z celkového navigačního schématu, v obecné podobě je uvedeno na obrázku 4.1.



Obr.4.1 Obecné schéma navigace s lokalizací využívající aktivních orientačních bodů

Akce robotu jsou dány plánovačem, do kterého vstupuje odhad polohy z estimátoru, poloha cíle a výstup detektoru kolizí pro potřeby lokálního plánování. Robot realizuje akce a poskytuje sensorická data, vstupující do estimátoru. Akcemi jsou příkazy řídicího systému aktuátorů. Měření využívaná estimátorem závisí na principu snímání majáků a jedná se o relativní vzdálenosti majáku od robotu a úhly mezi majákem a směřováním robotu, případně pouze vzdálenosti nebo pouze úhly. Dalším vstupem estimátoru je poloha majáků.

4.1 Predikce

Vstupy, které ovlivňují pohyb robotu, závisí na konkrétní realizaci podvozku robotu. Aby bylo možné lokalizační metodu navrhnout obecně, je výhodné tyto vstupy generalizovat. Pro pohyb v rovině jsou takovými zobecněnými vstupy translační a rotační rychlost robotu u^t a u^r . Vstup \mathbf{u}_k v kroku k je tedy

$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} u_k^t & u_k^r \end{bmatrix}^T \quad (4.1)$$

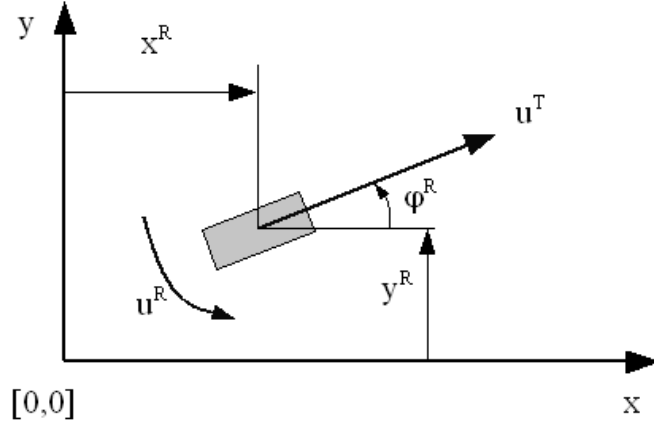
Stavem robotu (obr. 4.2) je vektor jeho polohy, tedy souřadnice x^R , y^R a úhel natočení φ^R a to v globálním souřadném systému. Stav robotu \mathbf{x}_k v kroku k je tedy

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} x_k^R & y_k^R & \varphi_k^R \end{bmatrix}^T \quad (4.2)$$

Změna stavu v závislosti na vstupech (zobecněných rychlostech) je nelineární:

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} \cos \varphi_k^R u_k^t \Delta t + x_k^R \\ \sin \varphi_k^R u_k^t \Delta t + y_k^R \\ u_k^r \Delta t + \varphi_k^R \end{bmatrix} + \mathbf{v}_k, \quad (4.3)$$

kde Δt je časový krok a \mathbf{v}_k náhodný vektor s Gaussovským rozložením s nulovou střední hodnotou a kovarianční maticí \mathbf{V}_k . Jelikož je časový krok konstantní, položíme ho pro jednoduchost v dalších výpočtech roven 1.



Obr. 4.2 Stav robotu a vstupy

Připomeňme si nyní predikční vztahy rozšířeného Kalmanova filtru (3.5 a 3.7) pro odhad střední hodnoty stavu $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ a příslušné kovarianční matice $\mathbf{P}_{k+1|k}$:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} &= f(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \mathbf{u}_k, k) \\ \mathbf{P}_{k+1|k} &= \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{V}_k\end{aligned}\quad (4.4)$$

Pro linearizaci v predikčním kroku je nutné určit matici \mathbf{F}_k , tedy odvodit Jakobián funkce f . Určeme tedy parciální derivace této funkce podle stavu:

$$\mathbf{F}_k = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k|k}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial (\cos \hat{\varphi}_{k|k}^R u_k^i + \hat{x}_{k|k}^R)}{\partial \hat{x}_{k|k}^R} & \frac{\partial (\cos \hat{\varphi}_{k|k}^R u_k^i + \hat{x}_{k|k}^R)}{\partial \hat{y}_{k|k}^R} & \frac{\partial (\cos \hat{\varphi}_{k|k}^R u_k^i + \hat{x}_{k|k}^R)}{\partial \hat{\varphi}_{k|k}^R} \\ \frac{\partial (\sin \hat{\varphi}_{k|k}^R u_k^i + \hat{y}_{k|k}^R)}{\partial \hat{x}_{k|k}^R} & \frac{\partial (\sin \hat{\varphi}_{k|k}^R u_k^i + \hat{y}_{k|k}^R)}{\partial \hat{y}_{k|k}^R} & \frac{\partial (\sin \hat{\varphi}_{k|k}^R u_k^i + \hat{y}_{k|k}^R)}{\partial \hat{\varphi}_{k|k}^R} \\ \frac{\partial (u_k^r + \hat{\varphi}_{k|k}^R)}{\partial \hat{x}_{k|k}^R} & \frac{\partial (u_k^r + \hat{\varphi}_{k|k}^R)}{\partial \hat{y}_{k|k}^R} & \frac{\partial (u_k^r + \hat{\varphi}_{k|k}^R)}{\partial \hat{\varphi}_{k|k}^R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \hat{\varphi}_{k|k}^R u_k^i \\ 0 & 1 & \cos \hat{\varphi}_{k|k}^R u_k^i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Odvozením matice \mathbf{F}_k je k dispozici vše potřebné pro provedení predikčního kroku. Počáteční hodnota odhadu stavu je zadaná, stejně jako kovarianční matice procesního šumu \mathbf{V}_k .

4.2 Korekce

Robot se pohybuje v prostředí s aktivními orientačními body - majáky. Počet majáků označme N_m . Poloha jednotlivých majáků $\mathbf{x}_{mi} = [x_{mi}, y_{mi}]$, $i = 1, 2, \dots, N_m$ v prostředí (globálním souřadném systému) je známá. Pro jednoduchost nejprve předpokládejme, že měření poskytují všechny majáky, tedy že množina měření obsahuje N_m prvků. Každé měření má dvě složky: vzdálenost d_{mi} a úhel φ_{mi} pro i -tý maják, viz obrázek 4.3.

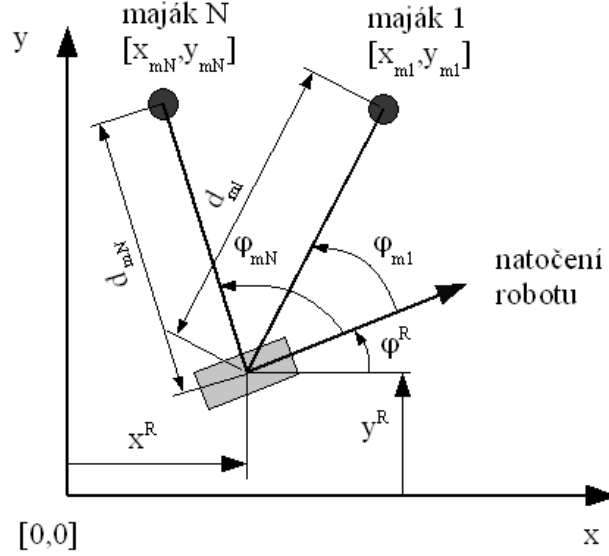
Pro potřeby Kalmanova filtru je nutné stanovit výstupní rovnici soustavy. Pro jediný maják bude tato rovnice mít tvar:

$$\mathbf{y}_{1k} = [h_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{m1})] + [\mathbf{w}_{1k}], \quad (4.5)$$

kde

$$h_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{m1}) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_k^R - x_{m1})^2 + (y_k^R - y_{m1})^2} \\ \text{atan2}(y_k^R - y_{m1}, x_k^R - x_{m1}) - \varphi_k^R \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

a $\mathbf{w}_{1,k}$ je náhodný vektor s Gaussovským rozložením s nulovou střední hodnotou a kovarianční maticí \mathbf{W}_{1k} .



Obr. 4.3 Poloha prvního majáku $\mathbf{x}_{m1} = [x_{m1}, y_{m1}]$ je známa, měření představuje vzdálenost majáku od robotu d_{m1} a relativní úhel majáku vůči ose robotu φ_{m1} ; obdobně pro další majáky. Jelikož měření obsahuje data všech majáků, bude výstup soustavy pro N_m majáků:

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{m1}) \\ h_2(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{m2}) \\ \vdots \\ h_{N_m}(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{mN_m}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{1k} \\ \mathbf{w}_{2k} \\ \vdots \\ \mathbf{w}_{N_mk} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Funkce h je nelineární, je tedy nutné využít vztahů pro EKF (3.8) a provést linearizaci. Pro linearizaci v korekčním kroku musíme určit matici \mathbf{H}_{k+1} , tedy odvodit Jakobián funkce h . Parciální derivace funkce h podle stavu provedeme pro jeden (první) maják. Další prvky matice \mathbf{H}_{k+1} budou další řádky, pouze index 1 se bude zvyšovat až do N_m):

$$\mathbf{H}_{k+1} = \frac{\partial h_1}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{11}}{\partial x_1} & \frac{\partial h_{11}}{\partial x_2} & \frac{\partial h_{11}}{\partial x_3} \\ \frac{\partial h_{12}}{\partial x_1} & \frac{\partial h_{12}}{\partial x_2} & \frac{\partial h_{12}}{\partial x_3} \end{bmatrix} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{11}}{\partial \hat{x}_{k+1|k}^R} & \frac{\partial h_{11}}{\partial \hat{y}_{k+1|k}^R} & \frac{\partial h_{11}}{\partial \hat{\varphi}_{k+1|k}^R} \\ \frac{\partial h_{12}}{\partial \hat{x}_{k+1|k}^R} & \frac{\partial h_{12}}{\partial \hat{y}_{k+1|k}^R} & \frac{\partial h_{12}}{\partial \hat{\varphi}_{k+1|k}^R} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

kde $h_{11} = \sqrt{(x_{m1} - \hat{x}_{k+1|k}^R)^2 + (y_{m1} - \hat{y}_{k+1|k}^R)^2}$ a $h_{12} = \text{atan2}(y_{m1} - \hat{y}_{k+1|k}^R, x_{m1} - \hat{x}_{k+1|k}^R) - \hat{\varphi}_{k+1|k}^R$.

Pro provedení parciálních derivací dostaneme:

$$\mathbf{H}_{k+1,1} = \begin{bmatrix} \frac{\hat{x}_{k+1|k}^R - x_{m1}}{\sqrt{(x_{m1} - \hat{x}_{k+1|k}^R)^2 + (y_{m1} - \hat{y}_{k+1|k}^R)^2}} & \frac{\hat{y}_{k+1|k}^R - y_{m1}}{\sqrt{(x_{m1} - \hat{x}_{k+1|k}^R)^2 + (y_{m1} - \hat{y}_{k+1|k}^R)^2}} & 0 \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{y_{m1} - \hat{y}_{k+1|k}^R}{x_{m1} - \hat{x}_{k+1|k}^R}\right)^2} \frac{y_{m1} - \hat{y}_{k+1|k}^R}{(x_{m1} - \hat{x}_{k+1|k}^R)^2} & -\frac{1}{1 + \left(\frac{y_{m1} - \hat{y}_{k+1|k}^R}{x_{m1} - \hat{x}_{k+1|k}^R}\right)^2} \frac{1}{x_{m1} - \hat{x}_{k+1|k}^R} & -1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Tím je odvozen tvar matice \mathbf{H}_{k+1} pro jeden maják. Celková matice \mathbf{H}_{k+1} je složena z matic pro jednotlivé majáky $\mathbf{H}_{k+1,i}$, kde i je index majáku:

$$\mathbf{H}_{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{k+1,1} \\ \vdots \\ \mathbf{H}_{k+1,N_m} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

V případě, že nejsou dostupná měření všech majáků se změní rozměr matice výstupu \mathbf{y}_k a matice \mathbf{H}_{k+1} . Tedy pokud jsou k dispozici například celkově 4 majáky a data získáme pouze z prvního a třetího majáku, budou v matici výstupu \mathbf{y}_k pouze údaje těchto majáků a obdobně tomu bude v matici \mathbf{H}_{k+1} . Tedy

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{m1}) \\ h_3(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{m3}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{1k} \\ \mathbf{w}_{3k} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{k+1,1} \\ \mathbf{H}_{k+1,3} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Matice \mathbf{y}_k má tedy jeden sloupec a čtyři řádky (dva majáky, každý poskytuje dva údaje), matice \mathbf{H}_{k+1} má tři sloupce (stavový vektor má tři prvky) a čtyři řádky.

V případě, že nejsou měření majáků v daném kroku dostupná vůbec (robot nevidí ani jeden maják) korekční krok se neprovádí a odhad stavu je roven výstupu predikčního kroku, tedy $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$.

V případě aktivních orientačních bodů není většinou nutné řešit problém přiřazení (data association problem), což je určení toho, které měření odpovídá kterému majáku, neboť u majáků není principiálně složité do vysílaného signálu vložit informaci o identifikaci daného majáku.

V případě že konkrétní realizace majáků poskytuje pouze některý z údajů o své relativní poloze (pouze vzdálenost d_{mi} nebo pouze úhel φ_{mi} pro i -tý maják), mění se pouze korekční fáze. V obou případech se redukuje rozměr výstupu \mathbf{y}_k na polovinu (počet prvků je nyní rovno počtu majáků, neboť co maják, to jediný údaj). Obdobně se redukuje matice \mathbf{H}_{k+1} , která má stejný počet řádků, jako majáků.

Výše uvedená aplikace Kalmanova filtru na lokalizační úlohu předpokládá jako vstupy řídicí signály ve formě zobecněných rychlostí u^l a u^r . Tento přístup je výhodný z hlediska obecnosti - není třeba uvažovat konkrétní geometrii podvozku a není použito relativní měření polohy robotu (odometrie). Pokud odometrických dat využíváme, je možné je přepočíst do formátu zobecněných rychlostí a lokalizační modul pak zůstává nezměněn. Konkrétní přepočty pro diferenciální a Ackermanův podvozek jsou uvedeny v plné verzi habilitační práce.

5 Simulace

Funkčnost lokalizačního systému a vliv parametrů na kvalitu lokalizace byly nejprve ověřeny simulačně. V prostředí Matlab bylo vytvořeno komplexní simulační prostředí, obsahující řadu funkčních celků, jako je vnější prostředí, model robotu, modul lokalizace, plánovač, vizualizační modul a další. Vlastní implementace EKF a UKF lokalizace je vzhledem k podpoře maticových operací v Matlabu poměrně triviální. Pro zrychlení běhu jsou jednotlivé metody implementovány odděleně pro určité skupiny parametrů (EKF/UKF, majáky poskytující úhel i vzdálenost / pouze úhel / pouze vzdálenost, zobecněné rychlosti / relativní změna polohy, atd.) a volba příslušné funkce je provedena uvnitř hlavní smyčky simulace v závislosti na nastavení parametrů.

Pomocí simulačního prostředí byla provedena řada simulací s různým nastavením parametrů simulace a parametrů lokalizační metody. Vzhledem k tomu, že majáky skutečně použité v testovacích robotech poskytují pouze informaci o relativním úhlu mezi majákem a robotem, jsou výsledky simulací uvedené v plné verzi práce omezeny pouze na tento druh měření. Konkrétně byly vyhodnocovány především následující parametry:

- Počet a poloha majáků
- Vliv procesního šumu
- Vliv šumu měření
- Vliv systematických chyb
- Vliv skokové změny stavu

Dále byl diskutován optimální počet majáků z různých hledisek, možnosti využití odometrických dat a bylo provedeno srovnání EKF a UKF.

Aby byl při simulacích co nejvíce omezen vliv průběhu trajektorie v jednotlivých testech, bylo použito předem definovaných akcí. Akce tedy nejsou v těchto simulacích získávány z plánovače (který jako vstup využívá odhad polohy), ale byly předem stanoveny. Kvalita lokalizace je definována rozdílem mezi odhadem polohy a skutečnou polohou robotu. Je vyhodnocována odděleně pro natočení robotu a vzdálenost, a to jednak jako průměrná chyba v jednom kroku simulace, a dále jsou zaznamenány chyby maximální, které mohou sloužit jako měřítko ztráty polohy (která může být v průběhu simulace opět nalezena).

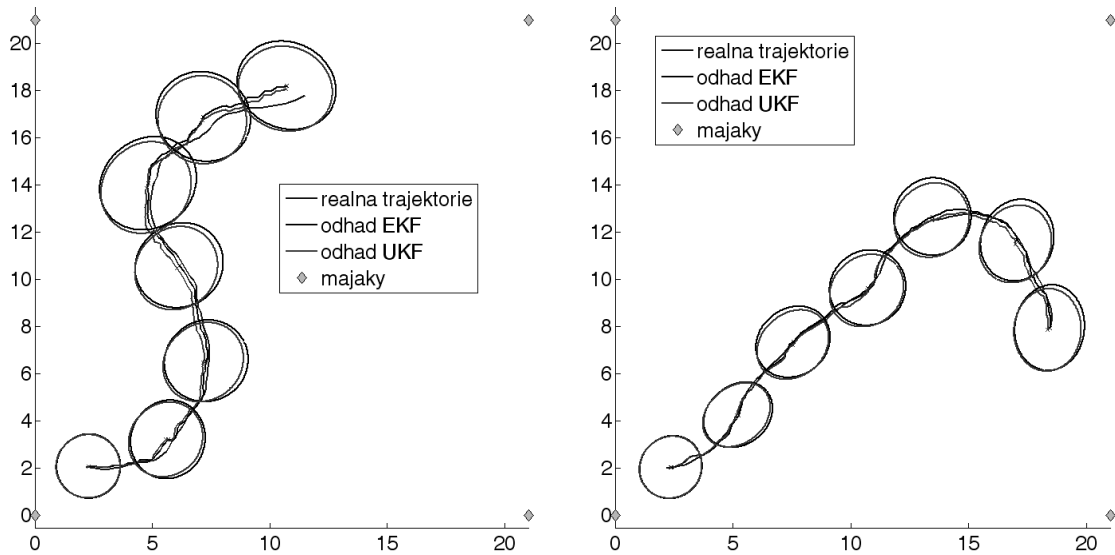
Vzhledem k rozsahu těchto tezí není možné uvést všechny výsledky. Podstatná jsou následující zjištění:

- Rozhodujícím parametrem je počet majáků a jejich umístění v prostoru. Pro reálné hodnoty procesního šumu a šumu měření je zapotřebí alespoň dvou korektně umístěných majáků.
- Vlivy odhadu procesního šumu a odhadu šumu měření na kvalitu lokalizace jsou patrné až při řádových změnách odhadů.
- Nenulové střední hodnoty procesního šumu jsou patrné až při hodnotách řádově převyšujících reálně dosažitelných hodnot. U šumu měření je kvalita lokalizace degradována pro střední hodnoty nad 3° , tedy hodnotu technologicky zvládnutelnou.
- Při využití odometrie je kvalita lokalizace výrazně degradována pro hodnoty nad 8%, tedy hodnoty výrazně převyšující reálné hodnoty chyb IRC snímačů.

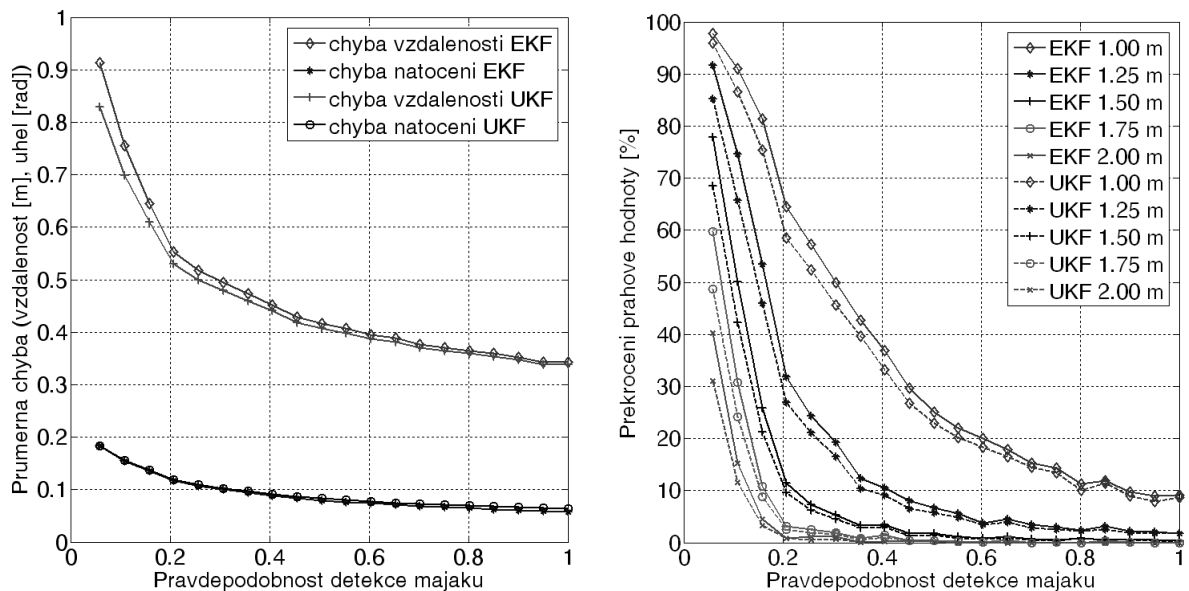
Pro ilustraci uveďme obrazově alespoň srovnání obou variant estimátoru a to jednak na konkrétní trajektorii (obr. 5.1) a dále vyhodnocení vlivu počtu majáků (obr. 5.2). Z výsledků je zřejmé, že UKF dosahuje při obdobném počtu majáků lepších hodnot u průměrné chyby v x-ové a y-ové souřadnici a horších hodnot u úhlu natočení. U překročení maximální hodnoty chyby v průběhu lokalizace dosahuje UKF lepších hodnot v celém pásmu pravděpodobností

detekce majáků, a to pro všechny prahové hodnoty. Rozdíl v kvalitě lokalizace je nicméně malý, a to za cenu výrazného nárůstu výpočetní náročnosti.

Vzhledem k minimálním rozdílům v kvalitě lokalizace a odolnosti vůči šumu, a především vyšší výpočetní náročnosti UKF byl pro implementace na reálné roboty vybrán pouze EKF. V následujících kapitolách jsou popsány praktické experimenty s lokalizačním systémem, který využívá navržený estimátor založený na EKF.



Obr.5.1. Srovnání EKF/UKF. Pravděpodobnost detekce majáku 0.5 (vlevo), 1 (vpravo).



Obr.5.2 Srovnání EKF/UKF, vliv počtu majáků.

6 Realizace - aplikace na reálném robotu

6.1 Majáky a scanner majáků

Po zvážení dostupných technologií použitelných ve vnitřním prostředí byla pro majáky a scanner zvolena kombinace infračervených diod a příslušných přijímačů pro detekci

relativního úhlu mezi robotem a majákem a dále jednosměrného radiového modulu pro identifikaci jednotlivých majáků. Autorem návrhu zapojení a desek plošných spojů je Ing. Stanislav Věchet, PhD., který také příslušné elektronické moduly vyrobil a oživil.

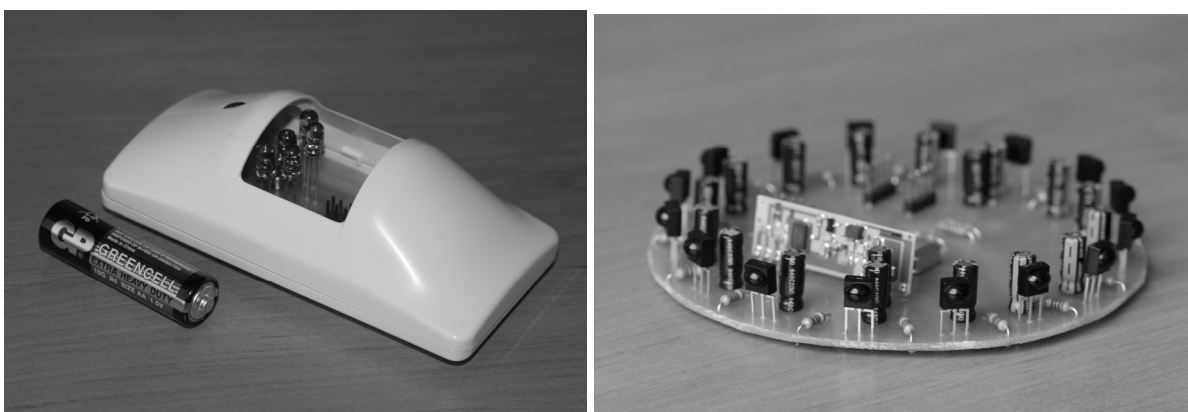
6.1.1 Realizace majáků a scanneru

Majáky využívají jako nosič signálu primárně infračerveného světla, ve formě IrDA (Infrared Data Association). Každý maják je vybaven vlastním zdrojem energie, a infračervené světlo je emitováno pomocí infračervených LED. Prototypové verze majáku (obr. 6.1) využívají 5 LED s celkovým vyzařovacím úhlem majáku přibližně 120°. Korektně využitelný dosah majáku je 10m.

Infračervený signál vysílaný majáky je detekován pomocí scanneru majáků (obr. 6.1). Jako detektor infračerveného signálu slouží integrovaný obvod z řady SFH511x. Tento obvod v sobě integruje jak vlastní detektor infračerveného světla, tak zesilovač, filtr a vyhodnocovací elektroniku. Výstupem je binární informace o detekci signálu. Hlavní řídicí obvod scanneru je mikrořadič ATmega128, který slouží k řízení komunikace mezi majáky.

Vzhledem k energetickým nárokům neprobíhá vysílání kontinuálně, ale světlo je z majáku emitováno pouze po obdržení požadavku od scanneru. Scanner a majáky komunikují pomocí kombinovaného radiového a infračerveného komunikačního protokolu. Ve směru od scanneru k majákům je použit běžně dostupný rádiový modul TX-SAW na frekvenci 433Mhz s nízkou spotřebou (proudový odběr 4mA). Tím je vybrán pro vysílání určitý maják a je tak vyřešen problém s identifikací majáku.

Maják zahajuje vysílání, jakmile je k tomu vyzván scannerem s frekvencí 3Hz. Přenos od majáku ke scanneru je založen na infračervených LED z řady SFH485-x s vlnovou délkou 880nm, nosným kmitočtem 38kHz a vyzařovacím úhlem 20°. Signál je detekován jednotlivými přijímači scanneru a následně zpracován s výstupem relativního úhlu mezi směrem scanneru (a tedy i robotu) a majáku. Aby bylo dosaženo energetické úspory, je požadavek na vysílání zaslán pouze majákům v předpokládaném dosahu vzhledem k jejich poloze a odhadnuté poloze robotu. U prototypového majáku se tak podařilo dosáhnout celkové doby chodu na jedno nabití akumulátoru přibližně 14 dní.



Obr. 6.1 Prototypy majáku (vlevo) a scanneru majáků (vpravo)

6.1.2 Zpracování surových dat

Měření je zprostředkováno scannerem majáků, skládajícího se z množiny M přijímačů, kde každý přijímač vrací booleovskou hodnotu D_i , indikující, zda daný maják byl nebo nebyl detekován. Takto získaná množina booleovských hodnot je použita pro výpočet naměřeného relativního úhlu φ_{rel} následujícím způsobem. Úhly mezi směrem orientace robotu a polohou

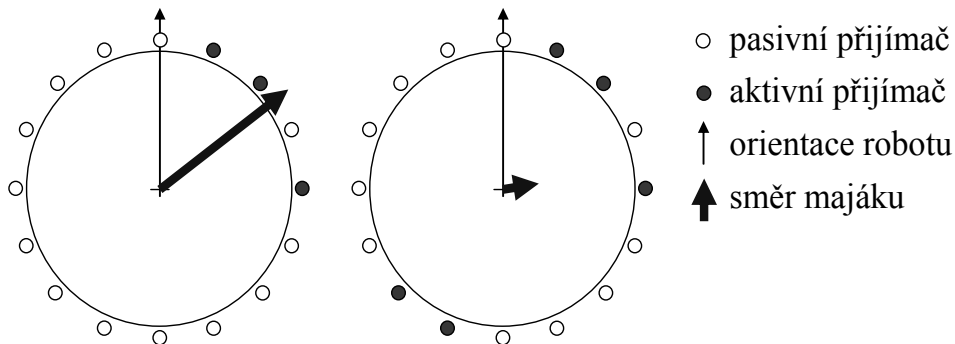
i-tého přijímače na kružnici scanneru φ_i^P jsou transformovány do kartézských souřadnic, pro každou osu zvlášť je vypočten aritmetický průměr (6.1) a výsledný úhel φ_{rel} je vypočítán zpětně z takto získaných hodnot (6.2). Validita měření je vypočtena jako délka výsledného úhlového vektoru (6.3), což je ilustrováno na obrázku 6.2.

$$c = \sum_{i=1}^M D_i \cos \varphi_i^P, s = \sum_{i=1}^M D_i \sin \varphi_i^P \quad (6.1)$$

$$\varphi_{rel} = \text{atan2}(s, c) \quad (6.2)$$

$$val = \sqrt{s^2 + c^2} \quad (6.3)$$

Odhad šumu měření, vyžadovaný estimátorem, může být nastaven pomocí takto získaného koeficientu validity měření příslušným normováním.



Obr. 6.2 Určení relativního úhlu detekovaného majáku. Velikost výsledného vektoru určuje validitu měření. Validní měření (vlevo), případ s odrazy signálu (vpravo)

Přijímače jsou ve scanneru rozmístěny s úhlovými odstupy $\pi/8$. Počtem přijímačů je tak dán minimální rozptyl měření relativního úhlu. Byla provedena řada měření pro určení skutečných rozptylů, včetně simulací výpadku některých přijímačů, uměle vyvolanými odrazy apod. Výsledky jsou uvedeny v plné verzi habilitační práce, obecně lze konstatovat že střední hodnoty jsou v řádu stupňů, což odpovídá chybě při manuálním umístění scanneru, směrodatné odchylky jsou cca $\pm 10^\circ$.

6.2 Implementace a testovací robot Leela

Estimátor byl implementován v jazyce ANSI C a všechny kód běží na 8-bitovém procesoru třídy AVR, konkrétně ATmega128. Jedná se o nízkonákladový 8-bitový procesor s 128kB programovatelné flash paměti a dvěma sériovými komunikačními rozhraními. Procesor pracuje jako hlavní kontrolní jednotka robotu Leela a běží na něm jak lokalizační algoritmus, tak plánovač trajektorie.

Mobilní robot Leela (obr 6.3) byl vyvinut na VUT FSI v roce 2009 za přispění Ing. Stanislava Věcheta PhD. a Bc. Jakuba Vodrážky. Jedná se o mobilní robot s diferenciálním podvozkem, kola o průměru 95mm jsou poháněna pohonem EMG30 s DC motorem a převodovkou 30:1, palubní napájení zajišťuje tříčlánkový akumulátor LiPol o kapacitě 2000mAh. Robot má vnější rozměry 300 x 320 x 560 mm (šířka x délka x výška).

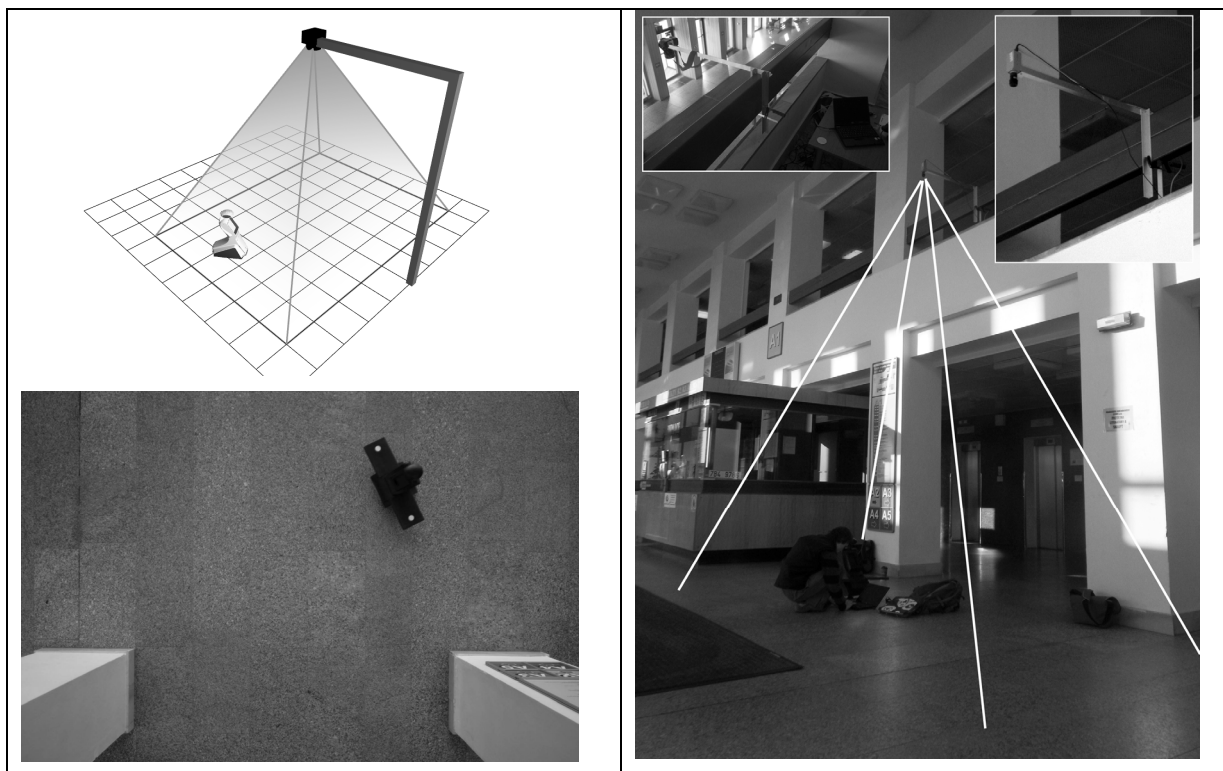


Obr. 6.3 Testovací robot Leela a detail umístění scanneru majáků.

Senzoricky je robot osazen infračervenými proximitními senzory Sharp GP2Y0A21YK sloužícími jako informační zdroj pro plánovač trajektorie. Dosah senzorů je 800 mm. V horní části pláště robotu (pomyslném krku) je umístěn scanner majáků, jednotlivé přijímače jsou detailně zobrazeny na obrázku 6.3 vpravo. Scanner je umístěn ve výšce 470mm nad podlahou. Plánovač byl použit jednoduchý reaktivní s přímým využitím proximitních senzorů a stanoveného cíle, který byl po dosažení přegenerován v daném operačním prostoru.

6.3 Ověření lokalizačního systému

Pro ověření kvality lokalizačního systému je třeba srovnat odhadovanou polohu se skutečnou. Pro její určení byla navržena a zrealizována metoda založená na zpracování obrazů robotu snímaných během pohybu. Obrazy jsou získány pomocí CCD snímače umístěného staticky v dostatečné výšce nad povrchem, na kterém se robot pohybuje, viz. obr. 6.4.



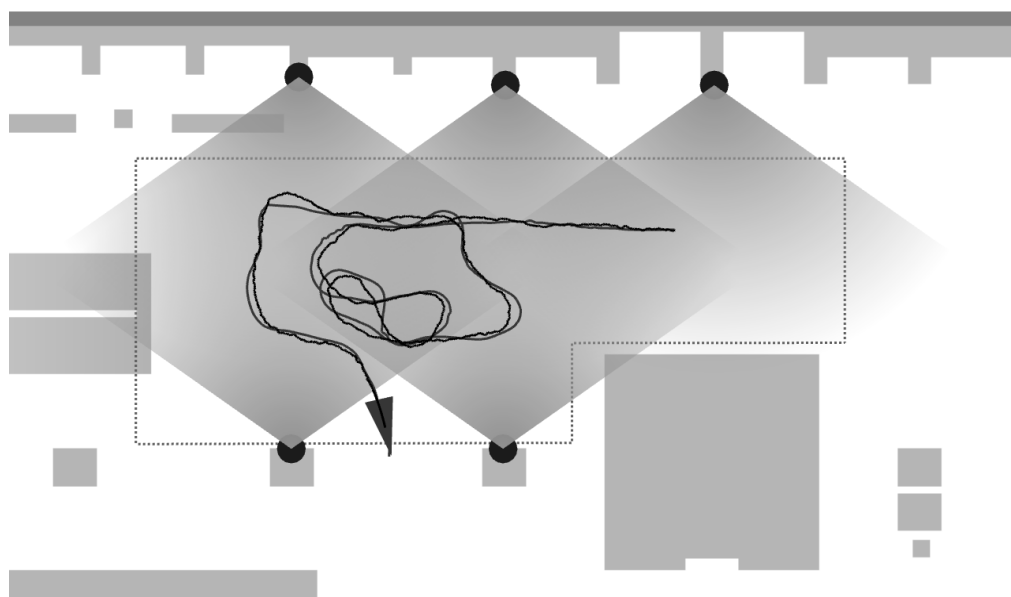
Obr. 6.4 Schéma snímání polohy robotu, umístění snímacích zařízení, pracovní prostor

Obrazy jsou ukládány v průběhu pohybu a následně zpracovány offline. Výstupy z estimátoru (informace o odhadované poloze) jsou v průběhu pohybu robotu přenášeny

pomocí bezdrátového modulu do PC, kde jsou logovány a poté srovnány se skutečnou polohou robotu. Jako snímacího zařízení bylo použito fotoaparátu Canon 350D a kamery Pixelink PL - B762. Pracovní prostor závislý na optice zařízení byl 4.7 x 3.3 m pro fotoaparát Canon a 10.1 x 6.5 m pro kameru Pixelink, což odpovídá zhruba hodnotám 1.4 mm/pixel a 13 mm/pixel. Metoda zpracování má dvě fáze: detekci polohy robotu v obrazovém prostoru na základě detekce značek umístěných na robotu a transformaci takto detekované polohy do pracovního prostoru s korekcí zkreslení způsobených optickou soustavou, odchylkami kolmosti optické osy od pracovní roviny, atd.

Experimenty ověřující kvalitu funkce lokalizačního systému byly provedeny jak v dálkově řízeném (zajištění požadovaného průběhu trajektorie) tak autonomním režimu (s jednoduchým reaktivním plánovačem). Pro různý počet instalovaných majáků byla počáteční poloha robotu volena náhodně. Pro nastavení estimátoru byly použity hodnoty vyhodnocené jako optimální během simulačních experimentů.

Příklad porovnání skutečné a odhadované trajektorie je na obrázku 6.5. Bylo použito 5 majáků a robot byl řízen dálkově. Experiment probíhal za běžného provozu budovy s přítomností dynamických překážek (studentů FSI). Průměrný počet detekovaných majáků v průběhu pohybu byl v tomto případě 3.38 ± 0.89 , průměrná chyba odhadu polohy byla 384 ± 96 mm, průměrná chyba odhadu úhlu natočení 0.089 ± 0.013 ($5.14^\circ \pm 0.79^\circ$).



Obr.6.5 Příklad průběhu skutečné (detekované - světlá křivka) a odhadované (tmavá křivka) polohy

Kompletní výsledky jsou uvedeny v plné verzi habilitační práce. Průměrné chyby lokalizace u shodných nastavení lokalizačního filtru a rozptylů procesního šumu a šumu měření odpovídají výsledkům simulací. Mírně vyšší hodnoty chyby u experimentů, ve kterých je pro detekci skutečné polohy robotu použita kamera Pixelink, jsou dány větším množstvím dynamických překážek, neboť vzdálenosti robotu od majáků jsou větší a dochází tak častěji k omezení viditelnosti majáku dynamickou překážkou, čemuž odpovídají i nižší hodnoty počtu detekovaných majáků. Vyšší hodnoty rozptylů jsou způsobeny především vyššími hodnotami rozptylu v detekční fázi (což je dáno výrazně nižším rozlišením pixel/mm operačního prostoru). Dle očekávání nepodstatné jsou rozdíly mezi experimenty s manuálním řízením a autonomním pohybem.

7 Aplikace v běžném prostředí

Testovací robot Leela sloužil k ověření navrženého lokalizačního systému především s ohledem na funkci majáků a scanneru majáků. Reálnou aplikací je nasazení systému v prezentačním robotu Advee, vyvinutém firmou Bender Robotics s.r.o. ve spolupráci s VUT v Brně, pro který byl lokalizační systém primárně vyvíjen. Jedná se o 1600 mm vysoký a 80 kg vážící kolový robot s Ackermanovým podvozkem, který je vybaven dvěma počítači, první odpovědný za pohyb robotu představuje nízkou a střední vrstvu řízení, druhý za komunikaci s uživatelem. Software je tak rozdělen do tří vrstev, kdy nejnižší vrstva zajišťuje interakci s hardwarovými zařízeními, střední vrstva navigaci a nejvyšší vrstva interakci s uživatelem.

Spodní a střední vrstva jsou umístěny na počítači s operačním systémem Linux, který byl zvolen pro svoji vysokou modularitu a nízkou latenci. Jednotlivé funkcionality těchto vrstev jsou rozděleny do modulů, nezávislých procesů, které komunikují s ostatními moduly. Jako mechanismus intermodulární komunikace byl zvolen systém LCM (Lighthweight Communications and Marshalling). Střední vrstva, která je zodpovědná za navigaci, obsahuje implementaci plánovače trajektorie a estimátoru polohy. Výstupem plánovače jsou přímo zobecněné rychlosti $\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} u_k^t & u_k^r \end{bmatrix}^T$ předávané příslušným řídicím jednotkám aktuátorů. Plánovač je založen na Mealyho konečném stavovém automatu a využívá hodnot proximálních senzorů, odhadu polohy z estimátoru, mapu prostředí a polohu cíle. Speciálním vstupem plánovače jsou příkazy z horní vrstvy řízení, která za pomoci zpracování obrazu a dalších technik určuje přítomnost uživatele a rozhoduje o případném zahájení komunikace.

Estimátor polohy je založen na EKF a využívá informaci z odometrie. Při implementaci bylo využito části zdrojových kódů v ANSI C, které byly vyvinuty pro použití v testovacím robotu Leela. Klíčové metody odhadování stavu a plánování trasy jsou umístěny v knihovně LibNaviTools, která přímo využívá knihovnu pro maticové operace i základní funkce estimátoru. Vzhledem k modularitě softwarových vrstev a jejich intermodulární komunikaci pomocí LCM je ovšem odlišná implementace hlavní smyčky estimátoru. Přepočítání odometrických dat na akce stejně jako měření relativního úhlu pomocí scanneru majáků se provádí přímo v příslušném driveru. Jak zobecněné rychlosti, tak měření relativních úhlů jsou obsažena v LCM zprávách, které přijímá a zpracovává modul estimátoru v příslušných handlerech. Data ze zpráv jsou uchována v odpovídajících proměnných modulu a následně zpracována samostatným vláknem, jehož běh je sledován globálním watchdogem celé spodní a střední softwarové vrstvy. Vlákno při zpracování publikuje LCM zprávu s informacemi o změně odhadu stavu. Tato zpráva je zpracována všemi moduly, které odhadu stavu využívají.

Robot Advee byl nejprve důkladně otestován v laboratorních podmínkách. Rozptyly měření relativního úhlu mezi natočením robotu a majáky odpovídají datům, získaným měřeními na robotu Leela. Vliv většího průměru kružnice, po jejímž obvodu jsou přijímače umístěny, nebyl pozorován. Chyby odometrie se v závislosti na povrchu pohybovaly pod hranicí dvou procent, což je vzhledem k simulacím velmi příznivá hodnota.

7.1 Operační nasazení

V reálných podmínkách byl robot Advee poprvé použit 25.11.2010 na soutěži POPAI Central Europe v Praze v prostorách hotelu Clarion. Od začátku roku 2011 byl robot Advee nasazen na více než 30 akcích v nejrůznějším prostředí. Přitom byl kombinován autonomní pohyb i pohyb řízený dálkově v případech, kdy nebyla možná instalace majáků. Činnost lokalizačního systému v reálném nasazení byla ověřována především při dlouhodobém

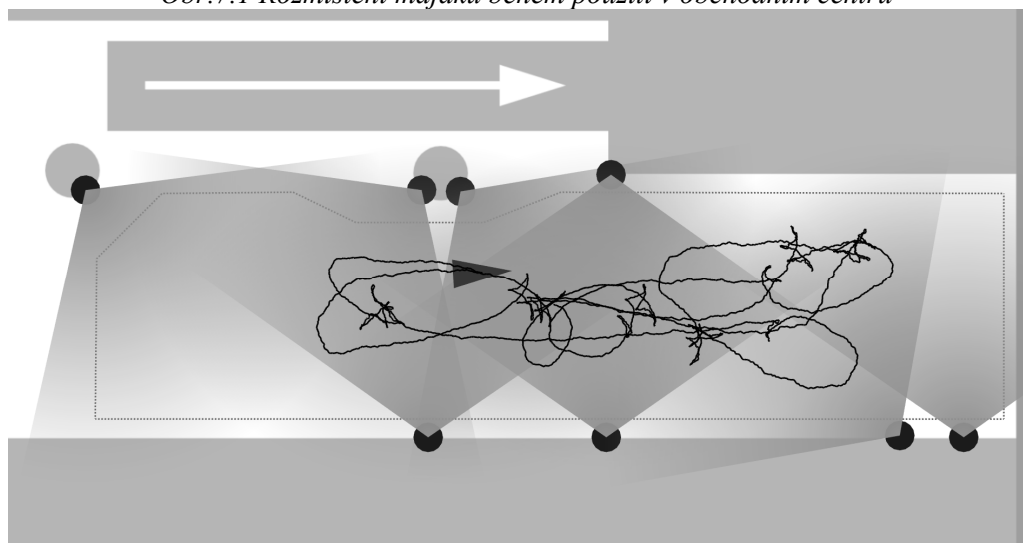
nasazení v omezeném prostoru a s velkým počtem dynamických překážek - lidí. Typické příklady jsou obchodní centra nebo prostředí pavilonu veletržního areálu.

7.1.1 Obchodní centrum

Příkladem operačního nasazení v podmínkách vysoké koncentrace lidí netechnického zaměření je prostředí obchodního centra. Prostory neumožňují pravidelné rozmístění majáků, a některé části operačního prostoru tak zůstávají pokryty pouze částečně. Na obrázku 7.1 jsou fotografie z provozu s barevně označeným umístěním majáků, které ilustrují, že přestože je v okolí robotu značné množství osob, umístění scanneru majáků v horní části robotu a instalace majáků ve výšce cca 220 cm umožňují kvalitní příjem i v takových případech. Během provozu robotu v obchodním centru nedošlo ke ztrátě odhadu polohy robotu a lokalizační systém pracoval bez problémů. Příklad odhadu polohy robotu během pohybu získaný z logovaných údajů během provozu je zobrazen na obrázku 7.2.



Obr. 7.1 Rozmístění majáků během použití v obchodním centru



Obr. 7.2 Odhad polohy robotu během činnosti v obchodním centru

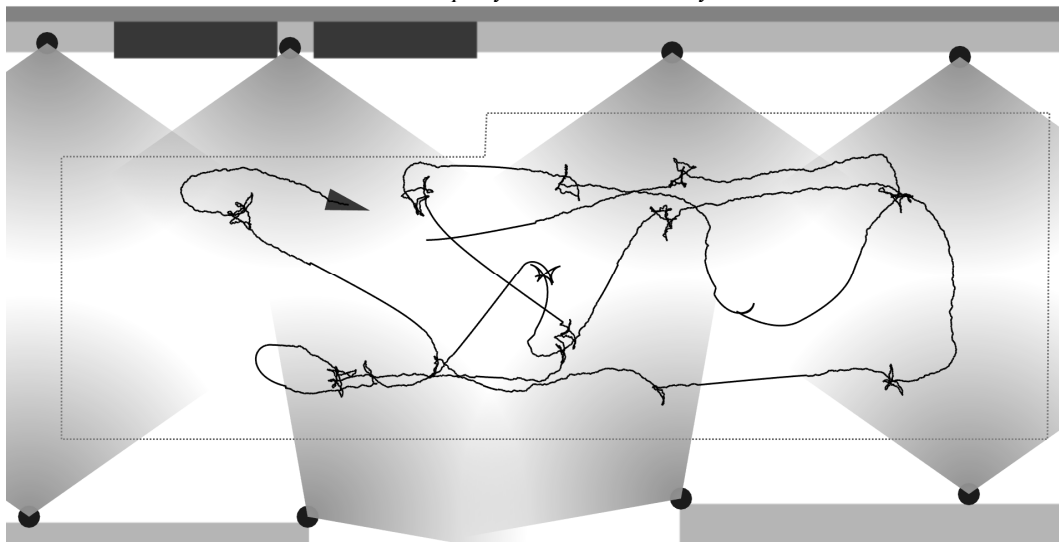
7.1.2 Areál výstaviště BVV

Příkladem nasazení v podmínkách extrémně vysoké koncentrace lidí je prostředí pavilonu veletržního areálu, konkrétně se jednalo o přední část pavilonu P areálu BVV během veletrhu Amper 2011. Tato koncentrace je ilustrována na obrázku 7.3, kde je vidět robot obklopený lidmi prakticky ze všech stran. Vzhledem k rozlehlosti areálu a omezenému dosahu majáků není možné umístit majáky natolik vysoko, aby byl příjem zaručen i v takové situaci. Robot se v případě, že je úplně obklopen lidmi, nepohybuje. Nedochozí tak ke kumulaci procesních

chyb a lokalizační metoda je stabilní. Během provozu nedošlo ke ztrátě odhadu polohy robotu. Příklad trajektorie je uveden na obrázku 7.4.



Obr.7.3 Robot obklopený lidmi v areálu výstaviště BVV



Obr.7.4 Odhad polohy robotu během činnosti v areálu BVV

7.2 Zhodnocení

Celková dosavadní doba provozu robotu Advée je k srpnu 2011 cca 900 hodin, přičemž cca 500 hodin je doba provozu v autonomním režimu v běžném prostředí. Během autonomního režimu doposud nedošlo ke ztrátě polohy robotu. Operační nasazení prokázalo:

- Vysokou odolnost vůči dynamickým překážkám. Příkladem může být použití v obchodním domě Tesco, kde byla velmi vysoká koncentrace nakupujících pohybujících se v operačním prostoru. Podobný případ nastal v části pavilonu P areálu BVV během veletrhu Amper 2011. V obou případech bylo možné umístit majáky dostatečně vysoko, takže ke ztrátě přímé viditelnosti docházelo pouze výjimečně, a to i v případě, že je robot zcela obklopen lidmi.
- Vysokou odolnost vůči výpadkům snímačů. Tato odolnost byla ověřena nechtěně, kdy hrubým zacházením při transportu robotu došlo k posunutí některých přijímačů a scanner majáků získával validní data pouze z poloviny přijímačů. Problém byl detekován a odstraněn až po skončení nasazení robotu a lokalizační systém přesto pracoval spolehlivě.
- Bezproblémovou instalaci. Cca od května 2011 je robot využíván jen běžně proškolenou obsluhou připravující instalaci, u které nelze předpokládat extrémní pečlivost například při určování korektních poloh majáků v prostředí, atd. Přesto nedošlo k žádnému problému v oblasti lokalizace.

8 Závěr

8.1 Aktuálnost řešené problematiky

Aktuálnost lokalizace mobilních robotů výrazně vzrostla v poslední dekádě. Je to dáno především rozšiřujícím se oborem možného nasazení mobilních robotů v běžném prostředí, ať se jedná o prostředí vnější nebo vnitřní. Množství aplikací se již začíná promítat i do právního systému, viz mediálně známé přijetí zákona AB511 státem Nevada, USA v roce 2011, upravujícího provoz autonomních vozidel na veřejných komunikacích.

V současné době existuje velké množství rozpracovaných koncepcí ve fázích návrhu a demonstračních prototypů pocházejících jak z univerzitního prostředí, tak laboratorní řady firem. V operačním nasazení je nicméně prozatím jen relativně malé množství robotů, což je dáno vysokými požadavky na bezpečnost a spolehlivost, přičemž právě problematika lokalizace hraje v oblasti bezpečnosti autonomních mobilních robotů jednu z klíčových rolí.

V teoretické oblasti můžeme najít v literatuře řadu velmi sofistikovaných metod a často je celá série publikací věnována některému minoritnímu parametru určité metody s cílem snížit chyby lokalizace na co nejnižší úroveň. Při reálném nasazení robotu v reálném prostředí jsou ale nejdůležitější jiné dva aspekty, a to je spolehlivost lokalizace (robot neztratí svoji polohu do takové míry, aby to vedlo ke ztrátě operační způsobilosti) a cena (kombinace finanční náročnosti použitých senzorů a výpočetní náročnosti). To je jeden z hlavních důvodů, proč byla tato práce zaměřena na vývoj metody reálně použitelné v praxi.

Aktuálnost práce kromě výš uvedených důvodů vyplývá především z rozšiřujícího se nasazení servisních robotů do praxe a velmi malého množství dostupných informačních zdrojů věnovaných reálnému použití lokalizačních metod v běžném prostředí.

8.2 Shrnutí obsahu a splnění cílů habilitační práce

S využitím dostupné literatury byla provedena obsáhlá rešerše možných koncepcí řešení lokalizační úlohy s ohledem na požadavky na ni kladené při operačním nasazení v reálných podmínkách. V úvodní kapitole jsou uvedeny metody lokalizace ve vnitřním prostředí pomocí proximních senzorů, konkrétně metody PCSM a PSCM, které využívají srovnávacích technik pro data laserového dálkoměru. Tyto originální metody byly navrženy, implementovány a otestovány na reálném zařízení ve spolupráci s Ing. Stanislavem Věchetem, PhD. Vzhledem k požadavkům reálného nasazení lokalizační metody byla ale zvolena koncepce aktivních orientačních bodů (majáků), která je dále rozpracována.

Dále je odvozen základní nástroj fúze senzorických dat - Kalmanův filtr a jeho nelineární varianty, rozšířený Kalmanův filtr a unscented Kalmanův filtr. Aplikace filtru na úlohu lokalizace s využitím aktivních orientačních bodů je uvedena jak nezávisle na konkrétní technologii snímání informací z aktivních orientačních bodů, tak pro majáky poskytující pouze informace o vzdálenosti nebo o relativním úhlu mezi směrem robotu a majákem.

Navržená metoda je implementována pro účely simulací v prostředí Matlab. Byla provedena řada simulací se zaměřením na vliv parametrů metody a parametrů senzoru a vnějšího prostředí na kvalitu lokalizace, konkrétně především vliv počtu detekovaných majáků, jejich umístění, úroveň procesního šumu a šumu měření a systematické chyby měření. Výstupem je řada závislostí kvality lokalizace na hodnotách parametrů. Simulační výstupy umožňují kvalifikovaný odhad chování metody v reálných podmínkách.

Lokalizační metoda byla po ukončení simulací ověřena nejprve na reálném robotu menších rozměrů, postaveném výhradně za tímto účelem. Je navržen jednoduchý způsob

určování relativního úhlu mezi směrem robotu a majáky z dat poskytnutých scannerem majáku, včetně odhadu validity daného měření.

Zásadním ověřením použitelnosti metody v praxi byla aplikace v prezentačním robotu Advee. Nutné úpravy pro tuto aplikaci a především poznatky z operačního nasazení robotu jsou shrnuty v závěrečných kapitolách habilitační práce. Lokalizační metoda se v praxi osvědčila a je schopna transferu na široký okruh aplikací servisní robotiky.

Na základě uvedeného shrnutí obsahu práce lze konstatovat, že se podařilo beze zbytku úspěšně splnit všechny cíle stanovené v úvodu práce.

8.3 Přínos práce

Přínos práce spočívá ve vytvoření funkčního lokalizačního systému, který splňuje řadu kritérií nezbytných pro nasazení v servisní robotice, specifikovaných v úvodu. Konkrétní výhody navrženého lokalizačního systému jsou:

- Robustnost vůči dynamickým překážkám. Dynamické překážky nepředstavují pro navržený systém principiální problém. Ke snížení kvality lokalizace může dojít v případě, že překážky zabraňují přímé viditelnosti majáku z majákového přijímače. V případě robotu Advee je přijímač umístěn dostatečně vysoko a přímá viditelnost majáků tak není ohrožena ani v případě, že je robot úplně obklopen lidmi. Metoda využívá pouze informaci o směru. Oproti metodám využívajícím i naměřenou vzdálenost sice prezentovaná metoda vyžaduje větší počet majáků, na druhou stranu ovšem mohou být majáky umístěny libovolně vysoko, pokud to umožňují dispozice budovy. Díky tomu lze snížit oblast, ve které dochází k ovlivnění přímé viditelnosti dynamickými překážkami i pro servisní roboty, u kterých je vyžadováno umístění přijímače do menší výšky.
- Robustnost vůči výpadkům senzorů. Primárním snímačem lokalizačního systému je přijímač signálů majáků, tvořený sadou infračervených přijímačů umístěných po obvodu kruhové základny. Díky navrženému způsobu fúze přijímaných hodnot jednotlivých přijímačů je systém schopen funkce i při výpadku poloviny přijímačů, pokud se nejedná o výpadek souvislé řady navazujících přijímačů. Sekundárním snímačem mohou být IRC snímače odometrie, pokud není jako vstupu použito řídicích signálů kontrolérů aktuátorů. V tomto případě byl lokalizační systém schopen pracovat i při chybách IRC snímačů v řádu desítek procent. V případě úplného výpadku IRC senzoru na jednom z kol je metoda funkční pouze v případě dostatečného pokrytí oblasti majáky, nicméně díky přepočtu odometrických dat do zobecněných rychlostí je jednoduché detekovat takový výpadek z prostých kinematických omezení daného podvozku robotu, a nesmyslná data ignorovat. Díky tomu nedojde k fatálním chybám určení polohy robotu.
- Nezávislost na osvětlení prostředí. Pro servisní roboty do vnitřního prostředí je velkou výhodou, pokud mohou pracovat nezávisle na kvalitě osvětlení, případně za tmy. Navržený lokalizační systém je osvětlení plně nezávislý. Obavy, zda při použití infračervených majáků nebudou problematická prostředí s přístupem slunečního světla se nepotvrdily, funkce systému nevykazovala žádná omezení při reálném nasazení v budově s proskleným stropem, která byla osvětlena přímým slunečním světlem.
- Malé rozměry, nízká spotřeba a hmotnost. Přijímač majáků má velmi nízkou spotřebu i hmotnost, rozměrová omezení jsou dána minimální velikostí kruhové základny. Vlastní majáky mají pro dostatečný dosah spotřebu při vysílání značnou, nicméně díky navržené komunikaci mezi majáky a robotem jsou ve vysílacím režimu pouze nezbytně krátkou dobu. Navíc jsou aktivní pouze ty majáky, které jsou v předpokládaném dosahu přijímače. Celková doba provozu majáků při napájení z bateriového zdroje, která určuje nezbytné servisní intervaly při jejich údržbě, tak může dosahovat i pro nižší kapacity baterií

(umožňující nízké rozměry a hmotnost majáků) řádově desítky dní. Tento interval lze snadno zvýšit zvýšením kapacity baterií, pokud to umožňují podmínky instalace majáků. Ty jsou závislé na konkrétní aplikaci robotu.

- Nízká cena celého systému včetně majáků. Finanční náklady na kompletní lokalizační systém se pohybují v řádu tisíců korun, jsou tedy řádově nižší než při použití srovnávacích metod využívajících jako primárních senzorů laserových dálkoměrů.
- Nízká výpočetní náročnost. Při použití rozšířeného Kalmanova filtru jsou výpočetní a paměťové nároky metody velmi nízké. V případě nasazení výkonného palubního počítače robotu je tak možné ušetřený výkon věnovat dalším navigačním podúlohám (sofistikované verze plánovačů), případně úlohám souvisejícím s vlastní servisní činností robotu.
- Modularita. Navržený lokalizační systém je možné díky výše uvedeným nízkým nárokům na spotřebu a výkon a nezávislosti na dalších snímačích kromě majákového přijímače (který neposkytuje informace žádnému z dalších navigačních subsystémů robotu) integrovat do jediného samostatného zařízení, které jako vstup vyžaduje pouze řídicí signály aktuátorů, případně odometrická data. Lokalizační modul tak může pracovat nezávisle na ostatních systémech robotu a je možné takový modul vytvořit jako samostatnou jednotku i fyzicky. Takový lokalizační systém, pokud je mi známo, v současné době není na trhu dostupný. Využití pro širokou škálu servisních robotů je zřejmé.

Často opomíjenou stránkou návrhu a implementace lokalizačního systému je jeho doladění pro použití v reálném prostředí, kde se vyskytuje řada situací, které je obtížné simulovat, případně modelovat v laboratorních podmínkách. Praktický přínos práce je tedy v prezentaci metody, která je doladěna do podoby použitelné v praxi, na reálných robotech a v reálném prostředí. Metoda byla otestována na reálném zařízení v běžném komerčním provozu a osvědčila se i při nasazení s jen minimálně proškolenou obsluhou. Lokalizační systém je tak možno převzít a aplikovat na jinou úlohu s minimem potřebných úprav.

8.4 Náměty a možnosti dalšího využití

V lokalizačním systému dosud není implementována možnost lokalizovat více robotů zároveň, což je úprava poměrně triviální. Zajímavější možností je ovšem v případě více robotů instalovat majáky také na roboty a využívat je tak k lepšímu pokrytí daného prostoru. V tomto případě je nutné do komunikačního protokolu mezi majákem a přijímačem majáků vložit informaci o tom, že se jedná o maják dynamický a jeho polohu (z odhadu polohy daného robotu) a to jak vektor \mathbf{x}_k , tak příslušnou kovarianční matici \mathbf{P}_k . Měření z majáku umístěného na robotu, jehož poloha je silně neurčitá (vysoké hodnoty rozptylů v matici \mathbf{P}_k) musí mít menší váhu než měření majáků statických. Tento námět je aktuálně ve vývoji.

Lokalizační systém je aktuálně použit v robotu relativně velkých rozměrů, kde spotřeba a váha komponent nutných k lokalizaci nehraje velkou roli. Je zde ovšem otevřené pole technologických vylepšení směřujících ke zmenšení rozměrů a energetických nároků, které by umožnili použití i na malých robotech. Miniaturizace přijímače majáků je ovšem principiálně omezená, vzhledem k nutnosti dodržet rozlišení přijímače. Díky nízké ceně vyvinuté technologie je ale spektrum možných aplikací široké.

Nezávislost lokalizačního systému na odometrii umožňuje jeho jednoduchou aplikaci pro transportní prostředky nejrůznějšího typu. Existuje řada takových vozidel, která mají elektronické řízení a díky lokalizaci a dalším subsystémům navigace (detekce překážek, plánování trajektorie) je tak možné z nich s relativně malými náklady učinit prostředky autonomní.

9 Literatura

- Aethon - TUG™, 2011: The Automated Robotic Delivery System, online <http://www.aethon.com/products/logistics.php> (2011)
- Arkin R.C., Mosnkina L., 2007: Lethality and Autonomous Robots: An Ethical Stance, Technology and Society, ISTAS 2007, IEEE International Symposium on, pp.1-3, 2007
- Bakari M.J., Zied K.M., Seward D.W., 2007: Development of a Multi-Arm Mobile Robot for Nuclear Decommissioning Tasks, *Advanced Robotic Systems*, 4(4), pp. 387–406, 2007
- Ballard D.H., 1981: Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes, *Pattern Recognition*, vol.13, No.2, p.111-122, 1981
- Barshan B., Durrant-White H.F., 1994: Orientation Estimate for Mobile Robots Using Gyroscopic Information, *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94)*, Munich, Germany, pp. 1867-1874, 1994
- Barshan B., Durrant-White H.F., 1995: Inertial navigation systems for mobile robots, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1995
- Bellotto N., Hu H., 2005: Multisensor Integration for Human-Robot Interaction, *IEEE Journal of Intelligent Cybernetic Systems*, 2005
- Bennewitz, M. Faber, F. Joho, D; Schreiber, M. Behnke, S., 2005: Towards a humanoid museum guide robot that interacts with multiple persons, *Humanoid Robots, 2005 5th IEEE-RAS International Conference on*, vol., no., pp.418-423, 2005
- Borenstein J., 1995: Control and kinematic design of multi-degree-of-freedom robots with compliant linkage, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995
- Borenstein J., Feng L., 1996a: Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12, pp. 869-880, 1996
- Borenstein J., Feng L., 1996b: Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots, *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, pp. 423-428, 1996
- Briggs A., Scharstein D., Brazianus D., Dima C., Wall P., 2000: Mobile Robot Navigation Using Self-Similar Landmarks, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1428-1434, 2000
- Bromiley P.A., 2003: Products and Convolutions of Gaussian Distributions, *Tina Internal Report 2003-003*, 2003
- Burgard W., Cremers A.B., Fox D., et al., 1999: Experiences with an interactive museum tour-guide robot. *Artificial Intelligence*, 114(1-2), 1999.
- Campbell J., Sukthankar R., Nourbakhsh I., Pittsburgh I.R., 2004: Techniques for evaluating optical flow for visual odometry in extreme terrain, *Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, 2004
- Cheng Y., Maimone M.W., Matthies L., 2006: Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers, *IEEE Robotics and Automation Magazine* 13 (2), pp. 54–62, 2006
- Chmura B. et al., 2003: Robotic vacuum with removable portable vacuum and semi-automated environment mapping, *US Patent US 2003/0229421 A1*, 2003
- Cho H., Kim S. W., 2010: Mobile robot localization using biased chirp-spread-spectrum ranging, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp 2826-2835, Aug. 2010
- Choi C., et al., 2006a: Tele-Operated Fuel Handling Machine Manipulation Robot for the Nuclear Power Plants, *The Asian Control Conf.*, pp. 983-987, 2006
- Choi C., et al., 2006b: A Radiation Hardened Redundant Controller for a Nuclear Robot, *Int. Conf. on Electrical Engineering (ICEE2006)*, EC1-02, 2006
- Choi C., Jung S., Kim S., 2006: Feeder Pipe Inspection Robot with an Inch-Worm Mechanism Using Pneumatic Actuators, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 87-95, 2006
- Choset H., et al., 2005, *Principles of Robot Motion*, MIT Press, 2005

- Corke P., Strelow D., Singh S., 2004: Omnidirectional visual odometry for a planetary rover, *Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, 2004
- Dao N., You B., Oh S., Hwangbo M., 2003: Visual Self-Localization for Indoor Mobile Robots Using Natural Lines, *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, USA, 2003
- Dereniowski D., Kubale M., 2004: Cholesky Factorization of Matrices in Parallel and Ranking of Graphs, *5th International Conference on Parallel Processing and Applied Mathematics*, Lecture Notes on Computer Science, Springer-Verlag, pp. 985–992, 2004
- Doucet A., Godsill S., Andrieu C., 2000: On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering, *Statistics and Computing* 10 (3), pp 197–208, 2000
- EATR: Energetically Autonomous Tactical Robot, Press release, RTI Inc., 2009, online <http://www.roboticstechnologyinc.com/images/upload/file/Presentation%20EATR%20Brief%20Overview%206%20April%2009.pdf>
- Edlund L. et al., 1997: Method for localization of beacons for an autonomous device, US Patent 5682313, 1997
- Gonzalez J., et al., 2009: Mobile robot localization based on Ultra-Wide-Band ranging: A particle filter approach, *Robotics and autonomous systems*, vol. 57 (5), pp. 496-507, 2009
- Gray S. et al., 2007: DARPA Urban Challenge, DARPA technical paper, 2007
- Gutmann J., Schlegel Ch., 1996: AMOS: Comparison of Scan Matching Approaches for Self-Localization in Indoor Environments, *Proceeding of the First Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robot*, pp. 61-67, 1996
- Haralick R., Lee C., Ottenberg K., Nolle M., 1994: Review and Analysis of Solutions of the Three Point Perspective Pose Estimation Problem, *International Journal of Computer Vision*, 13(3), pp.331-356, 1994
- Harris C., Stephens M., 1988: A Combined Corner and Edge Detector, *Proc. Fourth Alvey Vision Conference*, pp.147-151, 1988
- Hernandez S., Torres J.M., Morales C.A., Acosta L., 2003: A new low cost system for autonomous robot heading and position localization in a closed area, *Autonomous robots*, vol. 15 (2), pp 99-110, 2003
- Hrbáček J., Ripel T., Krejsa J., 2010: Ackermann mobile robot chassis with independent rear wheel drives, In *Proceedings of EPE- PEMC 2010*, Skopje, pp. T5/ 46-51, 2010
- Hrbáček J., Hrbáček R., Věchet S., 2011: Modular control system architecture for a mobile robot, *Engineering Mechanics 2011*, Svatka, pp. 211-214, 2011
- Huang, A.S., Olson, E. & Moore, D.C., 2009: Lightweight Communications and Marshalling for Low-Latency Interprocess Communication. Technical Report MIT-CSAIL-TR-2009-041, Cambridge, USA, 2009
- Huang, A.S., Olson, E. & Moore, D.C., 2010: LCM: Lightweight Communications and Marshalling. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Taipei, Taiwan, 2010
- Jacoby G.A., Chang D.J., 2008: Towards command and control networking of cooperative autonomous robotics for military applications (CARMA), *Electrical and Computer Engineering, CCECE 2008, Canadian Conference on*, pp. 815-820, 2008
- Jang G., Kim S., Lee W., Kweon I., 2002: Color Landmark Based Self-Localization for Indoor Mobile Robots, *Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002
- Jaugitz M., 2001: *Funklenkpanzer: A History of German Army Remote-and Radio-Controlled Armor Units*, trans. David Johnston, Winnipeg, Manitoba, J.J. Fedorowicz Publishing, Inc., 2001
- Julier S.J., Uhlmann J.K., 1997: A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems, *International Symposium of Aerospace/Defense Sensing, Simulations. and Controls*, 1997
- Kalman R.E., 1960: A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of Basic Engineering* 82 (1), pp 35–45, 1960
- Keicher R., Seufert H., 2000: Automatic Guidance for Agricultural Vehicles in Europe, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 25, Issues 1-2, pp. 169-194, 2000

- Kim S., Jung S.H., Lee S.U., Kim C.H., Shin H.C., Seo Y.C, Lee N.H.,Jung K.M., 2010: Application of Robotics for the Nuclear Power Plants in Korea, 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal, Canada, 2010
- King S., Weiman C., 1990: Helpmate autonomous mobile robot navigation system. *Proceedings of the SPIE Conference on Mobile Robots*, 1990
- Komoriya K., Oyama E., 1994: Position Estimation of a mobile Robot Using Optical Fiber Gyroscope (OFG), International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94), Munich, Germany, pp. 143-149, 1994
- Krejca J., Věchet S., 2008a: Dealing with Sensor Errors in Scan Matching for Simultaneous Localization and Mapping, *Engineering Mechanics*, Vol. 15, No. 5 (2008), pp. 337-344, 2008
- Krejca J., Věchet S., 2008b: Scan Matching Based SLAM - Dealing with Dynamic Obstacles, In *Modelling and Optimization of Physical Systems*, Gliwice, pp. 59 – 62, 2008
- Krejca J., Věchet S., Hrbáček J., Schreiber P., 2009a: High Level Software Architecture for Autonomous Mobile Robot. In *Recent Advances in Mechatronics*, Springer, pp. 185 – 190, 2009
- Krejca J., 2011a: Reduction of face detection false positives in mobile robot interaction using proximity sensors, *Proc. of Mendel 2011, 17th International Conference on Soft Computing*, pp. 540-545, 2011
- Krejca J., Ondrousek V., 2011b: The design of human-machine interface module of presentation robot Advée, *Recent Advances in Mechatronics*, Springer-Verlag, pp. 423-428, 2011
- Krejca J., Věchet S., et.at., 2011c: Presentation robot Advée, *Engineering Mechanics*, 2011, in press
- Krotkov E, Simmons R., Cozman F., Koenig S., 1996: Safeguarded teleoperation for lunar rovers: from human factors to field trials, *Proceedings of IEEE Planetary Rover Technology and Systems Workshop*, Minn., MN, USA, 1996
- Li Q., Zheng N., Cheng H., 2004: Springrobot: a prototype autonomous vehicle and its algorithms for lane detection, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* , vol.5, no.4, pp. 300- 308, 2004
- Li R., Di K., Matthies L.H., Arvidson R.E., Folkner W.M., Archinal B.A., 2004: Rover Localization and Landing-Site Mapping Technology for the 2003 Mars Exploration Rover Mission, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(1), pp 77-90, 2004
- Li R., Ma F., Xu F., Matthies L.H., Arvidson R.E., 2002: Localization of Mars rovers using descent and surface-based image data, *Journal of Geophysical Research, Planets, FIDO Special Issue*, 107(E11), 2002
- Maimone M., Johnson A., Cheng Y., Willson R., Matthies L., 2006: Autonomous Navigation Results from the Mars Exploration Rover (MER) Mission, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Volume 21/2006, pp 3-13, 2006
- McBride J., 2007: DARPA Urban Challenge - Intelligent Vehicle Systems, DARPA technical paper, 2007
- Murriet R., Briot M., Vandapel N., 1998: Landmark identification and tracking in natural environment, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.1, pp. 179–184, 1998
- Niechwiadowicz K., Khan Z., 2008: Robot Based Logistics System for Hospitals - Survey, technical report, Mälardalen University, 2008
- Nister D., 2003: An Efficient Solution to the Five-Point Relative Pose Problem, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Volume 2, pp. 195-202, 2003
- Nister D., Naroditsky O., Bergen J., 2004: Visual odometry, *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 652-659, IEEE Computer Society Press, 2004
- Ozkil A.G., Fan Z., Dawids S., Aanes, H., Kristensen J.K., Christensen K.H., 2009: Service robots for hospitals: A case study of transportation tasks in a hospital, *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp.289-294, 2009
- Pedersen L., Bualat M., Kunz C., Lee S., Sargent R., Washington R., Wright A, 2003: Instrument Deployment for Mars Rovers, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, pp. 2535-2542, 2003
- Rahok S.A., Koichi O., 2009: Odometry Correction with Localization Based on Landmarkless Magnetic Map for Navigation System of Indoor Mobile Robot, *Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*, Wellington, New Zealand, 2009

- Raibert M., Blankespoor K., Nelson G., Playter R., 2008 : BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot, Proceedings of the 17th World Congress, Seoul, Korea, pp 10822-10825, 2008
- Ripel T., Hrbáček J., 2011: Complex mechanical design of autonomous robot Advee, Recent Advances in Mechatronics, Springer-Verlag, pp. 121-130, 2011
- Scaramuzza D., Siegwart R., 2008: Appearance-Guided Monocular Omnidirectional Visual Odometry for Outdoor Ground Vehicles, IEEE Transactions on Robotics, 1–12, 2008
- Schreiber P., Ondroušek V., Věchet S., Krejsa J., 2010: Parallelizing the Precomputed Scan Matching Method for Graphics Card processing, in Proceedings of the 1st International Conference RiE2010, Bratislava, pp. 197-202, 2010
- Seetharaman G., Lakhota A., Blasch E.P., 2006: Unmanned Vehicles Come of Age: The DARPA Grand Challenge, *Proceedings in Computer, The flagship magazine of the IEEE Computer Society*, 2006
- Shieh, M.Y., Hsieh, J.C., Cheng, C.P., 2004: Design of an intelligent hospital service robot and its applications, *Systems, Man and Cybernetics*, 2004 IEEE International Conference on , vol.5, no., pp. 4377- 4382 vol.5, 2004
- Thrun S., 1998: Finding landmarks for mobile robot navigation, Proceedings of IEEE International Conference of Robotics and Automation, pp. 958-963, 1998
- Thrun S., Fox D., Burgard W., Dellaert F., 2001: Robust Monte Carlo localization for mobile robots, *Artificial Intelligence* 128, 1-2, pp. 99-141, 2001
- Thrun S., Burgard W., Fox D., 2006: Probabilistic Robotics, MIT Press, 2006
- Torii T., 2000: Research in Autonomous Agricultural Vehicles in Japan, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 25, Issues 1-2, pp. 133-153, 2000
- Věchet S., Krejsa J., 2005: Real Time Localization for Mobile Robot. *Engineering Mechanics*, Vol 12 (A1) (2005) pp 3-10, 2005
- Věchet S., Krejsa J., 2007a: Potential-Based Scan Matching in Mobile Robot Localization, *Modelling and Optimization of Physical Systems*, Gliwice, pp. 185-188, 2007
- Věchet S., Krejsa J., Houška P., 2007b: The Enhancement of PCSM Method by Motion History Analysis, In *Recent Advances in Mechatronics*, Berlin, Springer, pp. 107 – 110, 2007
- Věchet S., 2011: The rule based path planner for autonomous mobile robot, Proc. of Mendel 2011, 17th International Conference on Soft Computing, pp. 546-551, 2011
- Viola P.A., Jones M.J., 2004: Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision*, 57(2):137–154, 2004.
- Wilcox B., Nguyen T., 1998: Sojourner on Mars and Lessons Learned for Future Planetary Rovers, 28th International conference on Environmental Systems, Danvers, MA, USA, 1998
- Ye C., Borenstein J., 2002: Characterization of a 2-D Laser Scanner for Mobile Robot Obstacle Negotiation, in Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2512-2518, Washington DC, USA, 2002
- Yenilmez L., Terneltas H., 2006: Ultrasonic positioning of a mobile robot using single external beacon, *Dynamics of Continuous Discrete and Impulsive Systems*, Vol. 13E, pp 2837-2841, 2006
- Yun J., et al., 2006: Robust positioning a mobile robot with active beacon sensors, *Knowledge-based intelligent information and engineering systems*, Vol. 4251, pp 890-897, 2006
- Zákon AB 511, stát Nevada, USA, 2011, dostupné online na http://www.leg.state.nv.us/Session/76th2011/Bills/AB/AB511_EN.pdf
- Zalud L., Kopecny L., Burian F., 2008: Orpheus Reconnaissance Robots, Safety, Security and Rescue Robotics, SSRR 2008, IEEE International Workshop on, pp.31-34, 2008
- Zhang Y., Yan G., 2007: In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting, *Mechanism and Machine Theory*, vol 42, issue 12, pp 1618-1631, 2007

Abstrakt

Tato práce se zabývá lokalizací autonomních mobilních robotů, tedy určením odhadu jejich polohy a to ve vnitřním prostředí. Hlavní důraz je kladen na vývoj lokalizační metody použitelné v reálném prostředí a na reálných robotech, což klade na lokalizační systém řadu požadavků. Klíčová je odolnost vůči dynamickým překážkám, odolnost proti výpadku senzorů, nezávislost na osvětlení prostředí, ve kterém se robot pohybuje, malé rozměry, nízká spotřeba energie a nízká cena celého lokalizačního systému.

V práci je navržen lokalizační systém využívající infračervených majáků a odpovídajícího scanneru majáků spolu s informacemi o relativním pohybu robotu získanými buď přímo z plánovače pohybu, nebo z odometrických měření. Odhad polohy je získán fúzí těchto dat pomocí estimátoru založeném na nelineárních verzích Kalmanova filtru.

V práci je uvedeno detailní odvození metody, výsledky řady simulačních experimentů ilustrující vliv parametrů metody a použitých prostředků na kvalitu lokalizace, ověření metody jednak na reálném testovacím robotu v laboratorních i běžných podmínkách, a dále na prezentačním robotu určenému pro komerční využití v běžných vnitřních prostředích za přítomnosti kolemjdoucích. Výsledný lokalizační systém pracuje spolehlivě bez nutnosti zásahu obsluhy.

Hlavním přínosem práce je vytvoření lokalizačního systému, který splňuje v plné míře výše uvedené požadavky na něj kladené. Systém je potenciálně využitelný v řadě aplikací servisní robotiky.

Abstract

This thesis deals with the localization of autonomous mobile robots, i.e. determination of the position estimate in indoor environment. The main focus is set on the development of localization method usable in real environment on real robots. This brings a number of requirements onto the localization system. The key features are: robustness against dynamic obstacles, robustness against partial sensor failures, independence on environment lighting, small dimensions, low energy requirements and low cost of the whole localization system.

Thesis propose localization system using infrared beacons and corresponding beacons scanner together with information regarding robot relative motion obtained directly from the motion planner or from odometry readings. Position estimate is obtained by fusion of such data using estimator based on nonlinear versions of Kalman filter.

Thesis contain detailed theoretical background of proposed method, number of simulation experiments illustrating the influence of method parameters and robot means on localization quality, the verification of the method both on simple test robot used in laboratory and ordinary environment and presentation robot intended for commercial utilization in common indoor environment with nearby people present. Created localization system operates reliably with no need of outside service.

The main contribution of the thesis is in creation of localization system that can handle all the requirements given. The system can be used in a number of applications of service robotics.