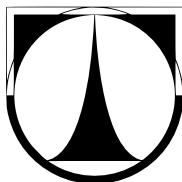


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



**AUTOREFERÁT
DISERTAČNÍ PRÁCE**

2009

PAVEL PIRKL

Mapování prostředí a plánování trajektorie pohybu mobilního robotu

Autoreferát disertační práce

Ing. Pavel Pirkl

Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
březen 2009

Rozsah disertační práce a příloh

Počet stran: 120
Počet obrázků: 67
Počet tabulek: 11

Disertační práce je k nahlédnutí na děkanátu FM, TU v Liberci

Studentská 2, budova A, tel.:+420 485 353 110

Téma disertační práce: Mapování prostředí a plánování trajektorie pohybu
mobilního robotu

Disertant: Ing. Pavel Pírk

Studijní program: 2612V Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Pracoviště: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Fakulta mechatroniky, informatiky a
mezioborových studií
Technická univerzita v Liberci

Školitel: Doc. Mgr. Ing. Václav Záda, CSc.

Sazba provedena autorem v systému L^AT_EX 2_ε

© Ing. Pavel Pírk, 2009

Anotace

Mapování prostředí a plánování trajektorie pohybu mobilního robotu

Ing. Pavel Pirkl

V disertační práci je navržena a realizována vlastní mechanická konstrukce mobilního robotu. Robotický systém je osazen řídicím subsystémem a sensorickým subsystémem vlastní konstrukce včetně programového vybavení.

V práci byl také vytvořen model mobilního robotu včetně řídicí struktury regulátoru, která umožňuje pohyb robotu po předepsané trajektorii. Byla realizována metoda pro optimální nastavení parametrů regulátoru s požadavkem na předepsanou přesnost polohy a rychlosti.

Práce se rovněž zabývá tvorbou okolního prostředí mobilního robotu na základě sensorické mapy reprezentované pomocí mřížek obsazenosti. Část práce je věnována vytvoření pravděpodobnostního modelu ultrazvukového snímače a jeho vlivu na zachycenou mapu prostředí robotu. K eliminaci vícenásobných odrazů byly navrženy další metody.

Na základě sensorické mapy je navržena metoda pro vytvoření geometrické mapy prostředí, která je dále použita pro plánování pohybu robotu. Veškeré navržené metody byly testovány na vytvořeném mobilním robotu ve známém a neznámém prostředí robotu.

Klíčová slova: mobilní robotika, řízení po trajektorii
pravděpodobnostní model ultrazvukového sensoru
sensorická, geometrická mapa prostředí
plánování trajektorie pohybu robotu

Annotation

The Mapping of Environment and Path Planning of Motion of Mobile Robot

Pavel Pirkl, MSc.

The own mechanical construction of a mobile robot is developed and realized in this work. The robotic system contains control subsystem and sensory subsystem of an own construction and software.

The model of the mobile robot is realized in this work and it contains the control structure of a regulator. This regulator makes possible the motion of the mobile robot along desired path. The new method was developed for optimal setting of parameters of feedback controller with requirement to desired accuracy of posture and velocity of mobile robot.

Further the work is engaged in a creation of surrounding environment of the mobile robot based on sensory map represented by grids of probability. The probabilistic models of ultrasonic sensor were created. Each model was tested on the quality representation of surrounding environment. The new methods were developed for the elimination of multiple reflection of ultrasonic signal.

The new method based on sensory map is developed for the representation of geometric map of environment. The geometric map can be used to planning the motion of robot. The new designed methods were tested on the real mobile robot in known and unknown environment.

Key Words: mobile robot, trajectory tracking
probability model of ultrasonic sensor
sensory, geometric map of environment
path planning of motion of mobile robot

Obsah

Anotace	III
Obsah	V
1 Úvod	7
2 Současný stav problematiky, motivace	8
3 Cíle disertační práce	9
4 Sledování trajektorie pohybu robotu	10
4.1 Model robotu s řídicí strukturou	10
4.2 Optimalizace parametrů regulátoru	12
4.3 Simulace pohybu mobilního robotu	13
4.3.1 Výsledky simulace	13
4.3.2 Shrnutí dosažených výsledků, aplikace	17
5 Návrh vlastního sensorického systému	17
6 Reprezentace okolí mobilního robotu	18
6.1 Způsoby reprezentace světa	19
6.2 Model ultrazvukového snímače	19
6.2.1 Výsledky experimentů	20
6.2.2 Vliv ultrazvukového snímače na kvalitu mapy	20
6.2.3 Vliv kombinovaného modelu na kvalitu mapy	21
6.2.4 Vliv zdvojení čidel na kvalitu mapy	22
6.2.5 Shodnocení dosažených výsledků	23
7 Plánování cesty pohybu robotu	24
7.1 Ověření na reálném systému	24
7.1.1 Plánování cesty ve známém prostředí	25
7.1.2 Plánování cesty v neznámém prostředí	26
8 Shrnutí, dosažené cíle disertace	28
8.1 Dosažené cíle, porovnání se stanovenými cíli	30
9 Závěr	31
Literatura	32

1 Úvod

Robotika je vědní odvětví, jež slučuje poznatky z mnoha technických směrů. Jedná se o interdisciplinární problematiku. Složitost návrhu, stavby a funkce robotu, ať už průmyslového nebo mobilního, je úkolem pro kolektiv odborníků z různých oborů. Jedná se o strojní inženýry, o inženýry silnoproudé a slaboproudé elektrotechniky, o tvůrce programového vybavení, o specialisty zabývající se umělou inteligencí a další.

Spojením rozvoje robotiky a lidské touhy po prozkoumání nepřístupných oblastí jak na zemi, ve vodě, tak i povrchů planet ve vesmíru přišla řada na vývoj a vysílání mobilních robotů i do těchto oblastí. V letech 1966-1972 byl ve Stanford Research Institute vytvořen první autonomní mobilní robot (robot umožňuje samostatný pohyb bez zásahu člověka), který se jmenoval "Shakey". Byl vybaven taktilními čidly, videokamerou a sonarovým hloubkoměrem. Na dálku byl spojen s řídicím počítačem a umožňoval plánování cesty a reakce na změny okolního prostředí. V současnosti se můžeme setkat s nasazením robotů i v běžném životě, jedná se například o automatickou travní sekačku firmy Husqvarna, která dokáže ve vyhraněném prostoru pracovat zcela samostatně. Dále se můžeme setkat s autonomními vysavači umožňujícími automatické vysávání.

Na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií se od počátku 90. let začala budovat Laboratoř inteligentních robotů, jejímž zakladatelem byl doc. V. Záda. Díky jeho iniciativě se podařilo laboratoř vybavit moderními průmyslovými roboty. V roce 2004 se na fakultě začala rozvíjet oblast mobilní robotiky.

V "Atelier Interuniversitaire de Productique" spadající pod universitu Paul Sabatier v Toulouse jsem se zúčastnil tříměsíční stáže. Díky vedoucímu tohoto institutu prof. M. Courdessovi jsem mohl pracovat s nejmodernějšími technologiemi v oblasti mobilní robotiky. Velkou část pobytu jsem věnoval možnostem řízení pohybu robotu po předepsané trajektorii s respektováním jeho polohy a rychlosti.

Bohužel na naší universitě doposud neexistoval žádný laboratorní mobilní robot, na kterém bych mohl ihned od počátku pokračovat na rozpracovaných tématech. Proto velká část mého doktorandského studia byla směřována ke stavbě mobilního robotu, který byl postupně vybaven řídicím subsystémem a později i sensorickým subsystémem.

V této práci se budeme zabývat metodami řízení, rozpoznáváním prostředí a plánováním. Dále uvedeme současný stav problematiky ve světě včetně motivací, vedoucích k cílům disertační práce.

2 Současný stav problematiky, motivace

Část disertační práce je věnována oblasti řízení mobilních robotů po předepsané trajektorii s respektováním požadované polohy a rychlosti. V článkách [1], [2] a [3] jsou uvedeny používané metody řízení mobilních robotů (lineární, nelineární) včetně řídicích struktur použitých regulátorů. Uvedené metody vycházejí z linearizace jednokolového modelu mobilního robotu a při volbě vhodných parametrů regulátorů umožňují přesné řízení s dodržением požadované polohy a rychlosti robotu.

Dále v článkách [6] a [7] se můžeme setkat s řízením robotů využívajících fuzzy logiky. Navržený přístup však neumožňuje dodržení přesnosti na požadovanou rychlost mobilního robotu. Jedná se o prosté řízení z bodu do bodu bez respektování požadované trajektorie a rychlosti pohybu mobilního robotu.

V žádném z uvedených článků se však nesetkáme s obecnou metodou zabývající se optimálním nastavením parametrů použité řídicí struktury pro dosažení předepsané přesnosti rychlosti a polohy. Při realizaci takové metody vyjdeme z již navržených řídicích struktur lineárního a nelineárního regulátoru, kterou doplníme o model mobilního robotu, skládajícího se z kinematiky a dynamiky robotu. V kapitole 3 jsou uvedeny cíle, kterých se budeme snažit dosáhnout, v této oblasti.

Velká část této práce je dále věnována oblasti reprezentace okolí mobilního robotu založené na sensorických mapách, reprezentovaných pomocí mřížek obsazenosti či geometrickém přístupu. V práci [15] jsou uvedeny metody sdružování sensorických dat vycházejících z pravděpodobnostního modelu použitého snímače - ultrazvukový a laserový hloubkoměr. Práce se z části zabývá eliminací vícenásobných odrazů u ultrazvukových snímačů s relativně malým vyzařovacím úhlem 23° . V článkách [13] a [12] je uvedena konstrukce ultrazvukového subsystému s 24 čidly s velkým vyzařovacím úhlem 60° . Autor se zde věnuje budování mapy prostředí, vycházející z hrubých sensorických dat bez použití mřížek obsazenosti. Použití ultrazvukového snímače s velkým vyzařovacím úhlem se stalo i jedním z hlavních témat pro tuto disertační práci. V oblasti geometrického mapování se spíše setkáváme s metodami využívajících laserových hloubkoměrů, u kterých lze dosáhnout lepších výsledků v porovnání s ultrazvukovými systémy. Například v [16] a [19] jsou uvedeny metody geometrického mapování, které využívají již zmiňovaných laserových snímačů. Použití ultrazvukového systému pro realizaci geometrické mapy je také jedno z témat této práce. Cíle práce v této oblasti jsou uvedeny v kapitole 3.

3 Cíle disertační práce

V následující části textu uvedeme hlavní cíle disertační práce:

1. Na základě studia používaných metod pro řízení mobilního robotu po zadané trajektorii s respektováním předepsané rychlosti navrhnout přístup pro optimální nastavení jeho parametrů. Přístup by měl umožňovat optimální nastavení parametrů regulátoru s požadavkem na předepsanou přesnost polohy a rychlosti robotu.
2. Na základě studia používaných modelů ultrazvukových snímačů navrhnout vlastní model snímače včetně metody ohodnocující kvalitu okolního prostředí robotu. Model by měl eliminovat nedostatky ultrazvukových snímačů především vlivu vícenásobných odrazů v uzavřeném prostředí. Dále navrhnout metody potlačující nežádoucí vliv vícenásobných odrazů.
3. Návrh vlastního přístupu pro realizaci geometrické mapy okolního prostředí robotu, vycházejícího z metod a modelu ultrazvukového snímače eliminující vliv vícenásobných odrazů.
4. Experimentálně ověřit výše uvedené metody na reálném systému, při plánovaném pohybu robotu.

Pro splnění výše uvedených cílů bylo **nutné** navrhnout a realizovat:

1. Mechanickou konstrukci mobilního robotu na základě zvolené koncepce řízení. Pro zvolenou koncepci mobilního robotu navrhnout odpovídající elektrické pohony.
2. Řídicí systém mobilního robotu, včetně výběru vhodné distribuce Linuxu s podporou reálného času.
3. Sensorický subsystém umožňující připojení až 24 ultrazvukových čidel s možnou komunikací s řídicím systémem robotu.
4. Programové vybavení pro sensorický systém robotu, řídicí systém robotu a vzdálený řídicí systém.

4 Sledování trajektorie pohybu robotu

V následující kapitole se budeme zabývat pohybem robotu po dané trajektorii s respektováním jeho polohy, rychlosti a zrychlení. Budeme uvažovat prostředí, ve kterém se nevyskytují žádné překážky.

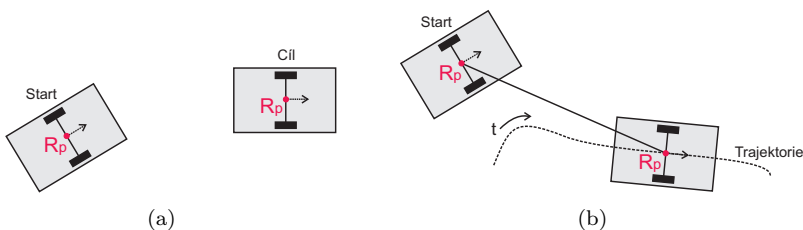
Základní úkoly pohybu mobilního robotu ve volném prostředí jsou:

- **Pohyb z bodu do bodu.**

Zvolený referenční bod robotu R_p musí dosáhnout pozice požadovaného cílového bodu ze zadaného počátečního bodu. V daném případě není zadána požadovaná trajektorie pohybu robotu mezi oběma body. Taková situace je znázorněna na obrázku 4.1a.

- **Sledování trajektorie.**

Zvolený referenční bod robotu R_p musí sledovat zadanou trajektorii s respektováním počáteční konfigurace (výchozí poloha robotu nemusí odpovídat poloze na zadané trajektorii). Takový případ je uveden na obrázku 4.1b. Dále jsou například kladeny požadavky na dodržení předepsané rychlosti během pohybu po dané trajektorii.

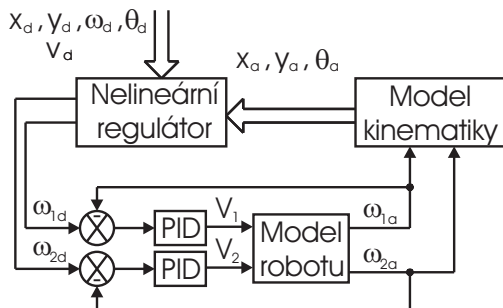


Obrázek 4.1: Pohyb robotu a) z bodu do bodu b) po předepsané trajektorii.

4.1 Model robotu s řídicí strukturou

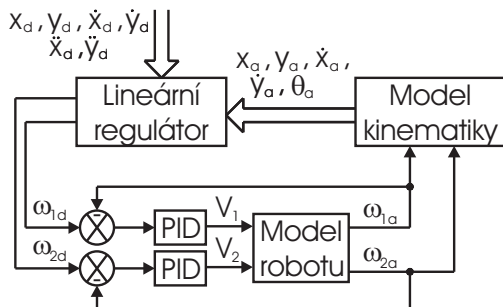
V této kapitole si nejprve uvedeme model mobilního robotu s koncepcí diferenčního způsobu řízení, který používá jako řídicí strukturu nelineární zpětnovazební regulátor popsany v [3]. Výsledný model robotu je uveden na obrázku 4.2 a skládá se z dynamického modelu robotu a modelu stejnosměrného pohonu. Vstupem daného modelu jsou akční zásahy v podobě napětí V_1 a V_2 , které jsou vypočteny na základě požadovaných

hodnot otáček ω_{1_d} a ω_{2_d} a aktuálních hodnot otáček ω_{1_a} a ω_{2_a} v PID regulátoru stejnosměrného pohonu. Model kinematiky robotu pouze přepočítává aktuální hodnoty otáček ω_{1_a} a ω_{2_a} na vstupní parametry pro nelineární regulátor x_a , y_a a θ_a . Nelineární regulátor na základě požadovaných hodnot x_d , y_d , ω_d , θ_d a v_d vypočte žádané hodnoty ω_{1_d} a ω_{2_d} .



Obrázek 4.2: Model mobilního robotu s nelineárním zpětnovazebním regulátorem.

Návrh lineárního regulátoru je uveden v [4, 5], kde jeho vstupními parametry jsou x_a , y_a , \dot{x}_a , \dot{y}_a a θ_a . Lineární regulátor na základě požadovaných hodnot x_d , y_d , \dot{x}_d , \dot{y}_d , \ddot{x}_d , \ddot{y}_d vypočte opět žádané hodnoty ω_{1_d} a ω_{2_d} vstupující do modelu mobilního robotu. Struktura lineárního regulátoru společně s modelem robotu je uvedena na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Model mobilního robotu s lineárním zpětnovazebním regulátorem.

4.2 Optimalizace parametrů regulátoru

Použitá řídicí struktura nelineárního, lineárního zpětnovazebního regulátoru závisí na dvou ς , c resp. čtyřech parametrech k_{p1}, k_{p2}, k_{d1} a k_{d2} . Pokud budeme definovat určité kritérium pro ohodnocení kvality nastavených parametrů, lze i definovat algoritmus pro optimální nastavení parametrů. Obecně definované kritérium může mít velmi komplikovanou strukturu, popsanou vztahem

$$J(\mathbf{p}) = g(\mathbf{p}) + \int_0^T F(t, \mathbf{p}, x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, e, \dot{e}, \ddot{e}) dt, \quad (4.1)$$

kde $g(\mathbf{p})$ je mezní část, p je vektor vybraných parametrů, F je funkce proměnných x, y, e a jejich derivací. Pokud je funkcionál příliš komplikovaný, může se objevit více jak jeden extrém. Z tohoto důvodu je lepší použít globální optimalizační metodu pro nalezení parametrů. Například se jedná o CRS algoritmy, evoluční strategie, globální optimalizace založené na křivkové interpolaci [8],[9], [10] a [11]. V této práci používáme následující kritérium

$$J = \int_0^T F dt, \quad (4.2)$$

kde

$$F = k_0 [|x - x_d| + |y - y_d|] + k_1 |v - v_d|^p \eta(t - t_{d1}) + k_2 |\dot{v} - \dot{v}_d|^q \eta(t - t_{d2}), \quad (4.3)$$

$0 < p < 4$, $0 < q < 4$, $\eta(t)$ je Heavisideova funkce, t_{d1} a t_{d2} jsou kladné konstanty a T je čas ukončení pohybu robotu. Pokud parametry p nebo q jsou větší jak jedna, pak funkce F představuje normu. V takovém případě může být trajektorie pohybu zakmitaná. Potom je lepší volit parametry p a q menší jak jedna i s rizikem, že zde bude více lokálních minim a z tohoto důvodu bude muset být použita globální optimalizace.

Předchozí vztahy (4.2) a (4.3) mohou být použity při simulaci a nastavení parametrů regulátoru. Na reálném systému lze tuto metodu použít pro adaptivní nastavení parametrů regulátoru. Pokud je model mobilního robotu nahrazen za reálný systém, je hodnota kritéria (4.3) známa po opakování jízdy robotu po dané trajektorii. Následně mohou být všechny parametry určeny daleko přesněji a přizpůsobivě.

4.3 Simulace pohybu mobilního robotu

V této kapitole uvedeme výsledky simulace pohybu robotu řízeného pomocí nelineárního, lineárního zpětnovazebního regulátoru. Uvažujme simulační schémata uvedená v kapitole 4.1. Pro ověření pohybu robotu budeme předpokládat sinusovou trajektorii v kartézském souřadnicovém systému (x, y) popsanou vztahem

$$y = A \cdot \sin(2\pi x/x_T), \quad (4.4)$$

kde A je amplituda sinusové trajektorie a x_T její perioda. S ohledem na plynulost rozjezdu mobilního robotu uvažujeme rampový průběh rychlosti popsaný následujícím vztahem

$$v(t) = V_A - V_A(1 - (\frac{t}{T_n})^{m_n}), \quad (4.5)$$

kde V_A je rychlost robotu dosažená po plynulém rozjezdu, T_n doba náběhu a m_n je mocnina náběhové rampy rychlosti robotu.

V následující kapitole si uvedeme výsledky simulace pohybu robotu pro konkrétní tvar sinusové trajektorie s různě nastavenými parametry nelineárního a lineárního zpětnovazebního regulátoru. Uvedeme výsledky bez optimalizace a s optimalizací parametrů jednotlivých regulátorů. Dále se zaměříme na optimalizaci parametrů regulátorů s požadavkem na větší přesnost žádané polohy či rychlosti.

Zavedeme následující označení, které budeme uvažovat dále v textu.

$F_{(x,y)}$	optimalizace regulátoru s větší přesností polohy
$F_{(v)}$	optimalizace regulátoru s větší přesností rychlosti
$F_{(x,y/v)}$	optimalizace regulátoru s rovnocennou přesností
F	výsledná hodnota optimalizačního kritéria
n_I	počet iteračních kroků optimalizace
T_v	perioda vzorkování simulace
$(x, y, \theta)_{t=0s}$	výchozí poloha robotu v čase $t = 0s$
$Obr_{(e)}$	číslo obrázku výsledku simulace pro chybu polohy
$Obr_{(x,y)}$	číslo obrázku výsledku simulace pro polohu
$Obr_{(v)}$	číslo obrázku výsledku simulace pro rychlost

Chyba polohy je vypočtena jako absolutní hodnota z rozdílu žádané a aktuální polohy mobilního robotu.

4.3.1 Výsledky simulace

Při simulaci pohybu robotu uvažujeme parametry uvedené v tabulce 4.1. Výchozí nastavení robotu neodpovídá požadované poloze a má

následující hodnoty $(x, y) = (-0.1, -0.1)$ m s úhlem natočení $\theta = \pi/4$ rad. Volbou tohoto nastavení vznikne již v počátku simulace výraznější regulační odchylka. Zavádíme optimalizaci typu $F_{(x,y)}$ a $F_{(v)}$ zpřesňující výslednou polohu robotu resp. její rychlosti. Dále zde uvádíme typ optimalizace $F_{(x,y/v)}$, která zpřesňuje polohu a rychlost robotu téměř stejnou měrou.

trajektorie:	$A = 0m$	$x_T = 2.5m$			
rychlosti:	$v = 0.1ms^{-1}$	$T_n = 10s$	$m_n = 4$		
$F_{(x,y)}$:	$k_0 = 200$	$k_1 = 10$	$k_2 = 0$	$p = 1$	$t_{d1} = 0s$
$F_{(v)}$:	$k_0 = 1$	$k_1 = 500$	$k_2 = 0$	$p = 1$	$t_{d1} = 0s$
$F_{(x,y/v)}$:	$k_0 = 50$	$k_1 = 50$	$k_2 = 0$	$p = 1$	$t_{d1} = 0s$
simulace:	$T_v = 0.075s$				
$(x, y, \theta)_{t=0s}$:	$(-0.1, -0.1, \pi/4)$				

Tabulka 4.1: Parametry simulace pohybu robotu.

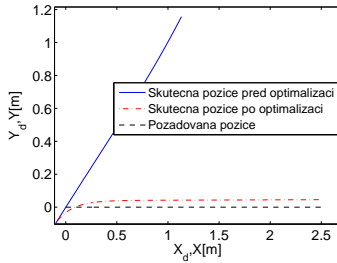
V tabulce 4.2 jsou uvedeny výsledky simulace pro nelineární regulátor. Výchozí hodnoty parametrů nelineárního regulátoru ζ , c jsme zvolili zcela libovolně. Následně jsme provedli jednotlivé typy optimalizace. Díky počátečnímu rozvážení systému není volba parametrů regulátoru tak jednoznačná a má značný vliv na výslednou přesnost polohy a rychlosti robotu. V obou případech optimalizace však došlo k výraznému zlepšení výsledného kritéria F již v prvních krocích optimalizačního algoritmu. Výsledky simulace jsou uvedeny na obrázcích 4.4 a 4.5. Z obrázku 4.4a vidíme, že v případě nelineárního regulátoru vzniká trvalá chyba polohy i po skončení optimalizace. V porovnání s výsledkem optimalizace, upřednostňující přesnost rychlosti, z obrázku 4.5a je tato chyba menší. Přesnost rychlosti robotu se díky procesu optimalizace projevila v obou případech. Při optimalizaci typu $F_{(v)}$ bylo docíleno daleko menšího překmitu rychlosti než u optimalizace upřednostňující polohu, jak je patrné z obrázků 4.5b, resp. 4.4b.

–	F	ζ	c	n_I	$Obr_{(x,y)}$	$Obr_{(v)}$
$F_{(x,y)}$	6370	0.1	0.1	0	4.4a	4.4b
$F_{(x,y)}$	304	0.99	12.5	20	4.4a	4.4b
$F_{(v)}$	408	0.1	0.1	0	4.5a	4.5b
$F_{(v)}$	63	0.95	42	20	4.5a	4.5b

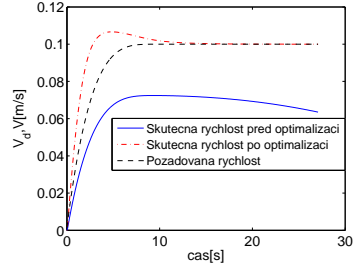
Tabulka 4.2: Výsledky simulace pro nelineární regulátor.

V tabulce 4.3 jsou uvedeny výsledky simulace pro lineární regulátor, kde počáteční nastavení jeho parametrů bylo provedeno zcela libovolně.

Ve všech typech optimalizace došlo ke zlepšení a v porovnání s výsledky nelineárního regulátoru z tabulky 4.2 bylo dosaženo lepších výsledků.

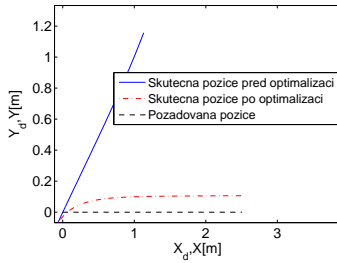


(a)

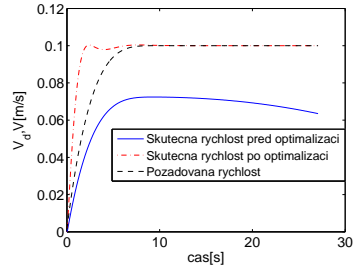


(b)

Obrázek 4.4: Řídící struktura s nelineárním regulátorem, typ optimalizace $F(x,y)$: a) Poloha pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.



(a)

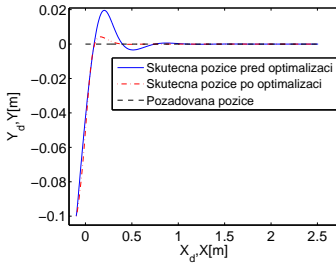


(b)

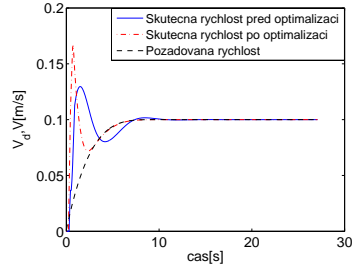
Obrázek 4.5: Řídící struktura s nelineárním regulátorem, typ optimalizace $F(v)$: a) Poloha pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.

–	F	K_{p1}	K_{p2}	K_{d1}	K_{d2}	n_I	$Obr(x,y)$	$Obr(v)$
$F(x,y)$	82	1	1	1	1	0	4.6a	4.6b
$F(x,y)$	48	4.4	1.7	3.8	1.9	10	4.6a	4.6b
$F(v)$	85	1	2	1	2	0	4.7a	4.7b
$F(v)$	51	1.3	0.3	2.4	2.8	10	4.7a	4.7b
$F(x,y/v)$	25	1	1	3	1	0	4.8a	4.8b
$F(x,y/v)$	12	2.6	0.4	3	1.2	20	4.8a	4.8b

Tabulka 4.3: Výsledky simulace pro lineární regulátor.

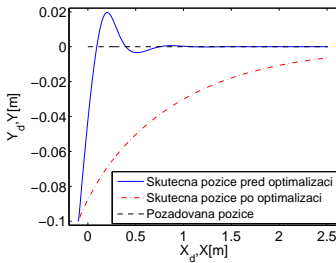


(a)

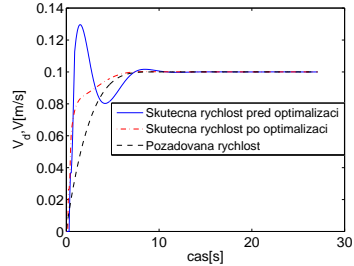


(b)

Obrázek 4.6: Řídící struktura s lineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(x,y)}$: a) Poloha pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.



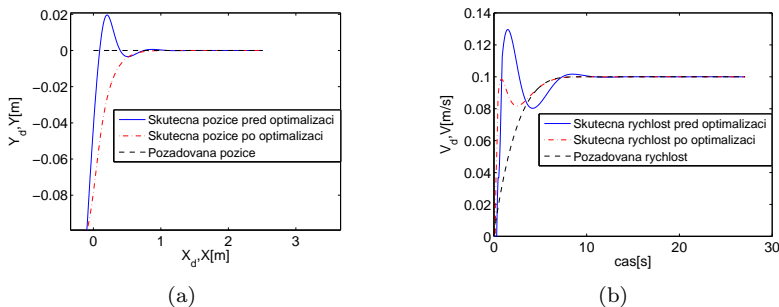
(a)



(b)

Obrázek 4.7: Řídící struktura s lineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(v)}$: a) Poloha pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.

U lineárního regulátoru se však daleko více projevil vliv optimalizace upřednostňující přesnost rychlosti či polohy. Při optimalizaci typu $F_{(x,y)}$ jsme si docílili takřka ideálního průběhu polohy, avšak za cenu výraznějšího překmitu rychlosti, jak je patrné z obrázku 4.6. Obdobných výsledků v opačném významu, obrázek 4.7, bylo dosaženo pro optimalizaci typu $F_{(v)}$. Jediným správným řešením je upřednostňovat oba typy optimalizace stejnou vahou. Výsledky optimalizace $F_{(x,y/v)}$ jsou uvedeny na obrázku 4.8, kde bylo dosaženo kompromisu mezi oběma typy optimalizace.



Obrázek 4.8: Řídící struktura s lineárním regulátorem, typ optimalizace $F(x,y/v)$: a) Poloha pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.

4.3.2 Shrnutí dosažených výsledků, aplikace

Díky vytvořenému modelu mobilního robotu (kapitola 4.1) bylo možné ověřit uvedené řídicí struktury regulátorů pro různé typy trajektorií. Volba parametrů regulátorů má podstatný vliv na výslednou přesnost polohy a rychlosti robotu. Špatnou volbou těchto parametrů může vzniknout i nestabilní systém. Při použití globální optimalizace lze dosáhnout požadovaných výsledků s daleko větší přesností, které lze snadno aplikovat na reálný systém. U lineárního regulátoru bylo dosaženo lepších výsledků v porovnání s nelineárním regulátorem díky jeho řídicí struktuře s větší možností nastavení jeho parametrů. Většina řídicích systémů mobilních robotů využívá řízení po přímé trajektorii s respektováním plynulého rozjezdu a dojezdu. Díky simulačnímu programu lze nejprve ověřit chování na modelu robotu a následně přenést na reálný systém. Ověření na reálném systému mobilního robotu uvedeme v kapitole 7.1.2.

5 Návrh vlastního sensorického systému

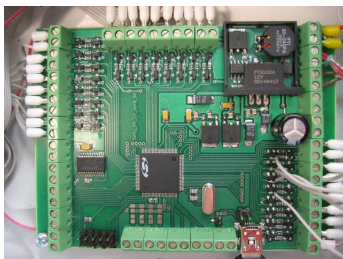
Jedním z cílů této disertační práce bylo vytvořit vlastní sensorický systém mobilního robotu, který bude obsahovat pouze ultrazvukové snímače. Námi navržený sensorický systém obsahuje snímače firmy Robert Bosh GmbH běžně používaných v automobilovém průmyslu při realizaci systému parkovacího pilota.

Výhodu použitého čidla lze spatřit v jeho velkém vyzářovacím kuželu, který umožňuje detekci překážek v prostoru. Uvnitř sensoru je integrován vysílač a přijímač ultrazvukového signálu. Dále je zde umístěna elektronika, která zajišťuje generování, příjem a zpracování ultrazvukového signálu.

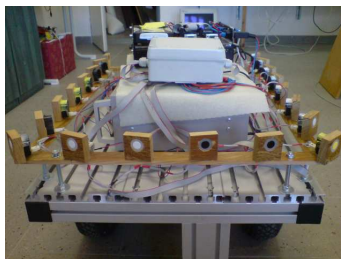
Na obrázku 5.1a je uveden HW navrženého sensorického systému a na

obrázku 5.1b rozmístění sensoru na mobilním robotu. Na reálném mobilním robotu je umístěno pouze 18 snímačů, jak je patrné z obrázku 5.1b.

Takto navržený sensorický subsystém bude použit k detekci okolního prostředí mobilního robotu, kterým se budeme zabývat v kapitolách 6 a 6.2.



(a)



(b)

Obrázek 5.1: a) HW navrženého sensorického systému. b) Umístění snímačů na těle robotu.

Výhody sensorického subsystému

- Velké vyzařovací úhly umožňují detekci většího prostoru s překážkami. Díky tomu lze lépe vytvořit mapu prostředí robotu.
- Systém umožňuje snímat intenzity odražených signálů, které lze využít k filtraci slabých signálů.
- Příjem až M odražených signálů včetně jejich intenzit při jednom vyslání ultrazvukového signálu.
- Současnou obsluhu až čtyř snímačů. Tím vzhledem k velkému počtu čidel dojde k výrazné úspoře času.
- Detekci nepřipojeného snímače.
- Libovolné natočení snímačů na těle robotu.

6 Reprezentace okolí mobilního robotu

Mezi základní způsoby reprezentace světa patří sensorické, geometrické, topologické a symbolické mapy. V práci se věnujeme reprezentaci světa podle prvních dvou zmíněných metod.

6.1 Způsoby reprezentace světa

Sensorické mapy

Jedná se o nejjednodušší způsob reprezentace světa mobilního robotu, který pracuje s nezpracovanými sensorickými daty. Sensorická mapa umožňuje datovou fúzi z jednotlivých měření buď ze stejného typu čidla, nebo různých druhů čidel [15]. Pro reprezentaci zpracovaných sensorických měření lze použít pravděpodobnostní mřížku obsazenosti, kterou poprvé použil Elfes [14]. Jedná se většinou o čtvercovou matici obsahující v jednotlivých buňkách pravděpodobnost výskytu překážky. K vytvoření přesné mapy je nutné znát přesnou polohu a natočení mobilního robotu.

Geometrické mapy

V tomto případě je prostor reprezentován pomocí geometrických útvarů, nejčastěji úseček nebo křivek druhého řádu. Geometrickou mapu lze stavět buď přímo z hrubých sensorických dat nebo z již předzpracovaných sensorických dat [19], vzniklých datovou fúzí z jednotlivých měření.

6.2 Model ultrazvukového snímače

Elfesův model sonaru

Elfesův model ultrazvukového snímače je na základě svého matematického vyjádření označován taktéž jako kvadratický model a byl poprvé použit v práci [14]. Vychází ze základních parametrů snímače, přesnosti a horizontálního vyzařovacího úhlu.

Exponenciální model sonaru

Stejně jako kvadratický model vychází exponenciální model taktéž ze základních parametrů snímače. Modely volnosti a obsazenosti byly vytvořeny na základě statistického měření a lze je popsat rovnicemi uvedenými v [15]. Tento model částečně kompenzuje vliv vícenásobných odrazů.

Kombinovaný model sonaru

Kombinovaný model sonaru [31] je navržen na základě dříve uvedených modelů. Model volnosti vychází z kvadratického modelu a model obsazenosti omezíme z exponenciálního modelu. Pro ještě větší potlačení vlivu vícenásobných odrazů jsme zavedli další změny.

Zdvojování ultrazvukových čidel

Pro odstranění vícenásobných odrazů zavedeme další filtr, který spočívá v porovnávání výsledků odpovídajících dvojic levých a pravých ultrazvukových snímačů. Každá z příslušných dvojic musí být stejně nakloněna.

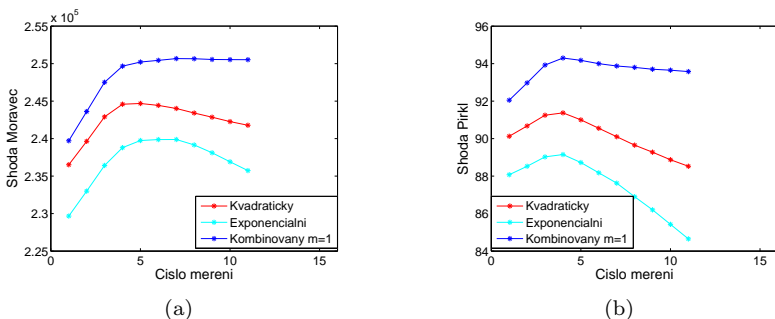
6.2.1 Výsledky experimentů

Budeme se zabývat vlivem modelů ultrazvukových snímačů na výslednou mapu okolí mobilního robotu. V laboratoři robotiky jsme vytvořili členité prostředí, na základě kterého jsme realizovali model vzorové mřížky obsazenosti uvedeného na obrázku 6.2a. Vzhledem k plánovanému porovnání jednotlivých modelů ultrazvukových snímačů jsme vytvořili takové prostředí robotu, ve kterém se budou určitě vyskytovat vícenásobné odrazy. Robot se pohyboval po čtvercové trajektorii o rozměru 2×2 m rychlostí 10 cm/s s výchozí a koncovou pozicí v pravém dolním rohu mapy. Na obrázku 6.2b je vyznačena zelenou barvou trasa pohybu robotu, modrou barvou tělo robotu společně s rozmístěním sensorů a červenou barvou skutečné překážky.

Pro posouzení vlivu modelu ultrazvukového snímače na vytvořenou mapu prostředí jsme vypočetli, pro každý model snímače, míru shody mezi vzorovou a naměřenou mřížkou obsazenosti. K výpočtu ohodnocení kvality jsme použili vztahy [17], [15] a vlastní vztah [31]. Pro každý typ modelu jsme provedli celkem 11 výpočtů míry shody mezi vzorovou a aktuálně naměřenou mřížkou obsazenosti v jednotlivých úsecích trajektorie pohybu robotu.

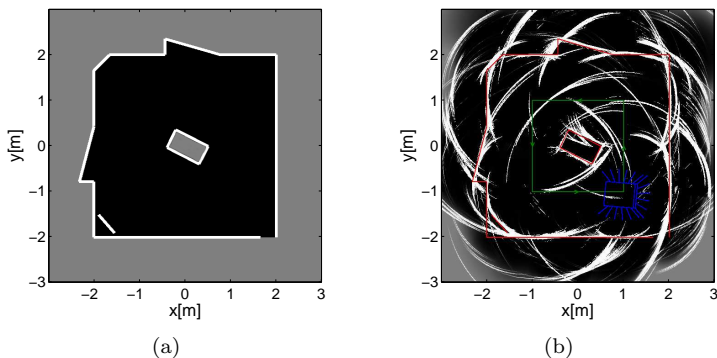
6.2.2 Vliv ultrazvukového snímače na kvalitu mapy

V rámci daného experimentu jsme provedli celkem tři různá měření s jednotlivými modely snímačů. Na obrázku 6.1 jsou uvedeny výsledky míry shody pro 11 měření v průběhu jízdy robotu vypočtené na základě vztahů [17] (Moravec) a [31] (Pirkl). Obě míry shody pro jednotlivé modely vykazují velmi podobné výsledky, kdy v začátku jízdy robotu výrazně narůstá, zhruba do 4-5 měření.



Obrázek 6.1: Míra shody, různých typů modelů, vyjádřená pomocí a) Moravec b) Pirkl

Kvalita mapy pro kombinovaný model sonaru uvedená na obrázku 6.1a se v dalším průběhu jízdy takřka nemění. Na obrázku 6.1b, pro stejný typ modelu,



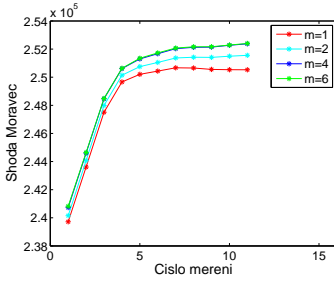
Obrázek 6.2: a) Vzorová mapa prostředí robotu b) Kvadratický model

dochází k mírnému poklesu míry shody. Daná skutečnost je způsobena jednak výpočtem míry shody, kdy není uvažován neurčitý prostor vzorové mřížky (pravděpodobnost rovna 0.5) a zejména však výskytem vícenásobných odrazů. Z tohoto vyplývá, že u míry shody vypočtené podle vztahu [31] se daleko více projevuje vliv vícenásobných odrazů. U zbylých dvou modelů dochází k výraznějším poklesům míry shody po provedení 4-5 měření, kde na obrázku 6.1b je vidět strmější pokles způsobený větším vlivem vícenásobných odrazů. Na obrázku 6.2b je uvedená výsledná mapa prostředí, která vznikla v průběhu jízdy robotu při použití kvadratického modelu, která je výrazně ovlivněna výskytem vícenásobných odrazů. Obdobně na obrázku 6.4a je uvedena mapa prostředí pro kombinovaný model sonaru s $m = 1$, kde dochází k výraznému potlačení vlivu vícenásobných odrazů.

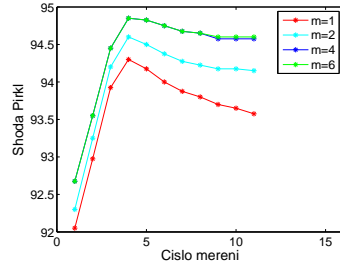
6.2.3 Vliv kombinovaného modelu na kvalitu mapy

V rámci daného experimentu jsme provedli celkem jedenáct různých měření s kombinovaným modelem snímače pro čtyři různé velké hodnoty mocnin u modelu obsazenosti. Na obrázku 6.3 jsou uvedeny výsledky míry shody pro jednotlivá měření. Obě míry shody výrazně narůstají do 4-5 měření a dále pak narůstají pozvolněji v případě obrázku 6.3a. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, daná míra shody tolik nevystihuje výskyt vícenásobných odrazů. Na obrázku 6.3b vidíme, že od 4-5 měření dochází k pozvolnému poklesu míry shody způsobené výskytem vícenásobných odrazů. Pro mocniny $m = 4, 6$ je daný pokles zanedbatelný a naznačuje, že se v dané scéně již nevyskytují vícenásobné odrazy.

Na obrázku 6.4a a 6.4b jsou uvedeny výsledné mapy prostředí pro kombinovaný model snímače s různou mocninou u obsazeného modelu. Z obrázku je velmi patrný vliv velikosti mocniny na potlačení vícenásobných odrazů,



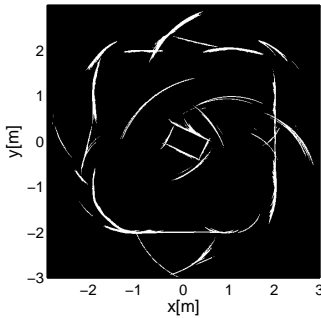
(a)



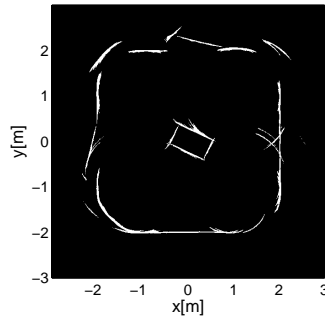
(b)

Obrázek 6.3: Míra shody pro kombinované modely s různou mocninou m , vyjádřená pomocí a) Moravec b) Pirkel

kteřé se v případě vyšších mocnin nevyskytují. Nevýhodou této filtrace je potlačení delších vzdáleností naměřených snímačem, které by nemusely nutně vést k výskytu vícenásobných odrazů. Takto vytvořený model snímače lze velmi dobře použít k realizaci lokální sensorické mapy prostředí.



(a)



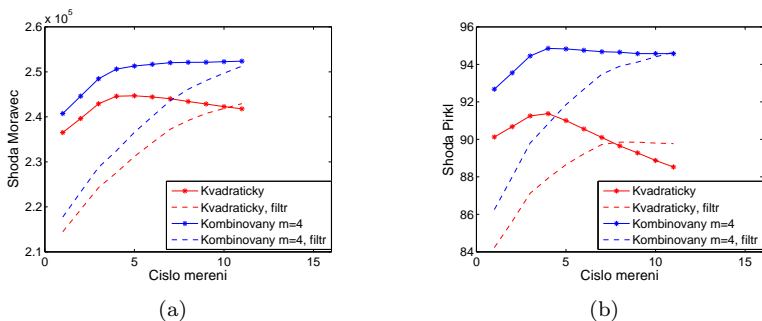
(b)

Obrázek 6.4: a) Kombinovaný model $m=1$ b) Kombinovaný model $m=4$

6.2.4 Vliv zdvojení čidel na kvalitu mapy

Pro ještě větší potlačení nežádoucích měření, které vznikají v průběhu jízdy robotu, jsme zavedli další filtraci. Metoda spočívá ve zdvojení ultrazvukových čidel, jak bylo vysvětleno dříve. Provedli jsme experimenty pro dva

různé typy modelů ultrazvukových snímačů s použitím a bez použití filtru pro vzájemné porovnání výsledků. Na obrázku 6.5 jsou uvedeny výsledky míry shody. Obě míry shody pro filtrovaná data narůstají pozvolna v průběhu celé jízdy robotu a dosáhnou téměř stejných hodnot jako v případě nefiltrovaných měření. Míra vypočtená dle vztahu [31] zde opět potvrzuje lepší popis výskytu vícenásobných odrazů zejména v případě kvadratického modelu, jak je patrné z obrázku 6.5b. Nízká míra shody, v počátku jízdy robotu, u filtrovaných měření je způsobena menším zanášením volného prostoru do mapy prostředí.

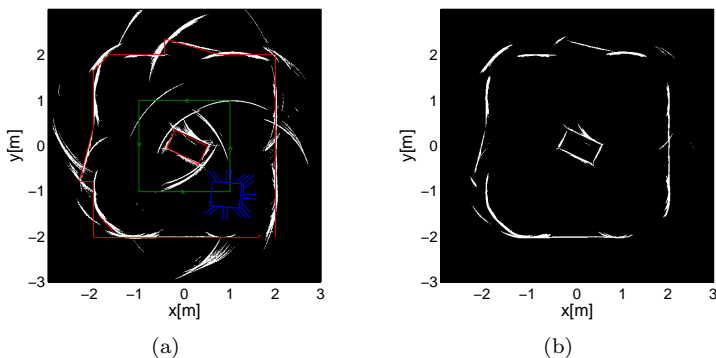


Obrázek 6.5: Míra shody, při zdvojení čidel, vyjádřená pomocí a) Moravec b) Pirkel

Na obrázku 6.6a je uvedena mapa prostředí pro kvadratický model s filtrací měření, která je v porovnání s obrázkem 6.2b výrazně kvalitnější. Na obrázku 6.6b je uvedena stejná situace pro kombinovaný model, u kterého došlo k mírnému zlepšení v porovnání s obrázkem 6.4b. Zavedením této filtrace dojde k dalšímu potlačení vlivu vícenásobných odrazů.

6.2.5 Shodnocení dosažených výsledků

Pro porovnání vlivu jednotlivých modelů ultrazvukových snímačů na realizovanou mapu okolí robotu jsme provedli řadu měření pro různé scény prostředí. Kvadratické a exponenciální modely snímačů, které jsou publikovány v práci [15] jsou pro naše účely nepoužitelné vzhledem k malému potlačení vlivu vícenásobných odrazů. Výrazně lepších výsledků dostaneme použitím kombinovaného modelu, který spojuje výhody dříve publikovaných modelů. Výskyt vícenásobných odrazů dále eliminujeme zdvojením ultrazvukových čidel. Díky širokému spektru úhlu vyzářování čidel dochází k téměř totožnému pokrytí prostoru, jako v případě nezdvojených snímačů. Nesmíme dále opomenout filtraci odražených signálů na základě informace o jejich intenzitě. Díky výše popsaným metodám se nám podařilo získat mapu prostředí, která odpovídá reálné scéně a můžeme ji použít k realizaci geometrické mapy.



Obrázek 6.6: a) Kvadratický model se zdvojením čidel b) Kombinovaný model pro $m=4$ se zdvojením čidel

7 Plánování cesty pohybu robotu

Mezi základní činnosti mobilního robotu patří plánování jeho cesty z výchozí polohy do cílového bodu. Metody pro plánování cesty jsou závislé na reprezentaci prostředí okolí mobilního robotu, které byly uvedeny v kapitole 6. Většina řídicích systémů robotů, které obsahují sensorický subsystém pro detekci překážek používají metody plánování založené na potencionálním poli, který je použit i v naší práci.

7.1 Ověření na reálném systému

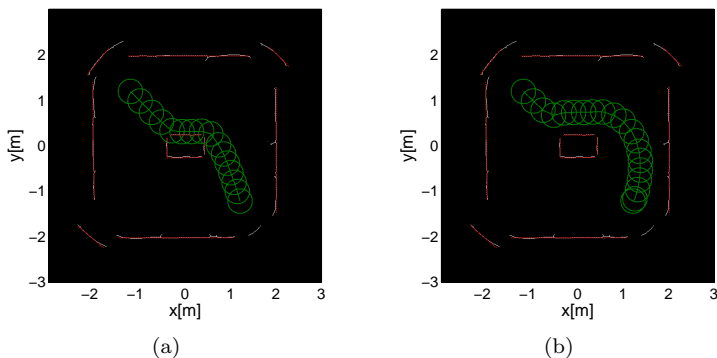
Při ověření výsledků metody pro plánování cesty pohybu robotu na reálném systému budeme uvažovat dva případy.

Známé prostředí robotu

Prostředí robotu je známo a je reprezentováno pomocí geometrické mapy. Daná mapa může být zachycena průjezdem robotu v prostředí na základě pokynů uživatele zadaných například z klientské aplikace. Pro zjednodušení dané situace neuvažujeme překážky během daného průjezdu. Po skončení daného průjezdu má robot již známou mapu okolního prostředí, na základě které může provádět plánování pohybu po předepsané trajektorii.

Neznámé prostředí robotu

Druhý případ je daleko obecnější a předpokládá, že mobilní robot nemá vytvořenou mapu okolního prostředí. Uživatel zadá prostřednictvím klientské aplikace pouze požadovaný cílový bod pohybu robotu. Robot na základě



Obrázek 7.1: a) Plánovaná cesta pohybu robotu bez rozšíření hranic překážek. b) Plánovaná cesta pohybu robotu s rozšířením hranic překážek.

sekvenčního zpracování sensorických dat postupně vytváří mapu prostředí reprezentovanou pomocí geometrického přístupu. Na základě právě zachycené mapy prostředí provádí postupné plánování cesty pohybu směrem k cílovému bodu.

7.1.1 Plánování cesty ve známém prostředí

Při ověření metody plánování pohybu robotu uvažujeme známou geometrickou mapu prostředí, která byla získána na základě sensorické mapy. Na obrázku 7.1a je zachycena situace, kde nebyla uvažována šířka robotu s odpovídajícím rozšířením detekovaných hranic objektů. V takovém případě došlo ke kolizi mezi překážkou a mobilním robotem. Na obrázku 7.1b je uvedena trajektorie pohybu robotu s rozšířením hranic původně zachycených překážek. V daném případě již nedochází ke kolizi robotu s detekovanými překážkami.

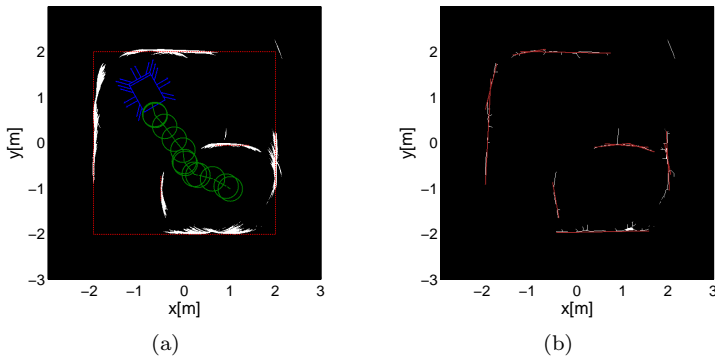
Zelenou kružnicí jsou naznačeny rozměry mobilního robotu. Stejnou barvou je naznačena trajektorie pohybu robotu, která byla pro potřeby řízení rozdělena na skupinu vzájemně navazujících úsečků o délce 20 cm. Řízení probíhá po sinusové trajektorii s amplitudou $A = 0$ m o dané délce úsečky. Pro tyto účely byl použit lineární regulátor uvedený v kapitole 4.1. Rychlost mobilního robotu byla nastavena na $v = 10$ cm/s. Rozměr prostředí je 4×4 m. Výchozí poloha robotu je $(x, y)_S = (1, -1)$ m s úhlem natočení $\phi = \pi/2$ rad. Cílová pozice robotu je $(x, y)_F = (-1, 1)$ m.

7.1.2 Plánování cesty v neznámém prostředí

Uvedený přístup předpokládá neznámé prostředí okolí robotu. Uživatel prostřednictvím klientské aplikace zadá požadovaný cílový bod pohybu robotu. Vyhodnocení okolního prostředí probíhá tzv. sekvenčním zpracováním sensorických dat. Nalezené objekty v podobě úseček jsou použity k postupnému plánování pohybu robotu. Pohyb mezi jednotlivými cílovými body již neprobíhá pomocí zpětnovazebního řízení. Uvažujeme zde pouze řízení z bodu do bodu.



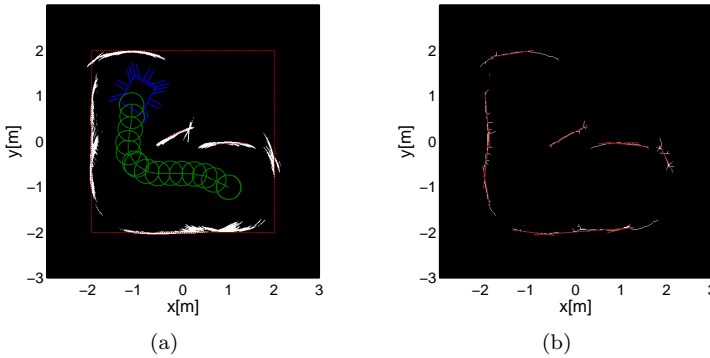
Obrázek 7.2: Skutečné prostředí mobilního robotu a) scéna I, b) scéna II.



Obrázek 7.3: Plánovaná cesta robotu v neznámém prostředí a) reálné překážky a cesta pohybu robotu, b) detekované překážky pomocí Houghovy transformace - Scéna I.

Nyní uvedeme výsledky plánování pohybu robotu na dvou odlišných prostředích z obrázku 7.2. Následující parametry platí shodně pro obě scény.

Rozměr prostředí je 4×4 m. Výchozí poloha robotu je $(x, y)_S = (1, -1)$ m s úhlem natočení $\phi = \pi$ rad. Cílová pozice robotu je $(x, y)_F = (-1, 1)$ m.



Obrázek 7.4: Plánovaná cesta robotu v neznámém prostředí a) reálné překážky a cesta pohybu robotu, b) detekované překážky pomocí Houghovy transformace - Scéna II.

Na obrázku 7.3a jsou zakresleny červenou barvou skutečné překážky scény, zelenou barvou je zachycena trajektorie pohybu robotu společně s jeho rozměrem. Uvažujeme kombinovaný model sonaru ($m=4$) s pravděpodobnostním přístupem sdružování dat dle D-S teorie. Modrou barvou je znázorněno tělo robotu společně s rozmístěním čidel, kde uvažujeme zdvojení senzorů. Z daného obrázku vidíme, že ultrazvukový systém dokázal velmi věrohodně pokrýt skupinu překážek nacházejících se v jeho blízkosti. Překážka umístěná vpravo od robotu nebyla vůbec detekována z důvodu maximální měřitelné vzdálenosti snímače 3.3 m. Na obrázku 7.3b uvádíme geometrickou mapu zachyceného prostředí, která byla získána na základě Houghovy transformace. Některé rovné stěny byly rozděleny na skupinu úseček (červená barva) vzájemně se překrývajících jen ve velmi omezené délce. Na obrázku 7.4 jsou uvedeny výsledky pro druhé prostředí robotu. Zde bylo dosaženo velmi podobných výsledků, jako u první scény.

8 Shrnutí, dosažené cíle disertace

V předkládané práci je řešena problematika optimálního nastavení parametrů regulátorů pro řízení robotu po předepsané trajektorii s respektováním dané rychlosti. Proto jsou v práci podrobně uvedeny dva základní přístupy zpětnovazebního řízení robotu.

V další části práce jsou uvedeny v současnosti používané metody reprezentace okolí mobilního robotu společně s modely ultrazvukového snímače. Dále jsou popsány přístupy pro ohodnocení kvality zachyceného prostředí.

Hlavní přínos práce spatřuji v návrhu metody pro optimální nastavení parametrů regulátorů vycházející z vytvořeného modelu robotu. Dále byla navržena metoda eliminující vliv vícenásobných odrazů, vycházející z modelu ultrazvukového snímače a realizovaného ultrazvukového subsystému. Dané přístupy byly použity při realizaci geometrické mapy okolního prostředí vycházející z námi navrženého přístupu. Veškeré navržené metody byly ověřeny na reálném systému při plánovaném pohybu robotu.

Metody pro optimální nastavení parametrů regulátoru společně s modelem robotu byly realizovány v programu MATLAB a následně ověřeny na reálném systému robotu. Přístupy spojené s mapováním okolního prostředí, vytvářením geometrické mapy a plánováním pohybu robotu byly ověřeny v klientské aplikaci, která byla napsána v prostředí VisualStudio v jazyce C++. Klientská aplikace komunikuje s řídicím systémem robotu, který byl napsán taktéž v jazyce C++.

Dále uvedeme souhrn nových metod a přístupů, které byly vytvořeny v rámci této práce.

Sledování trajektorie pohybu robotu

Na základě studia metod používaných pro zpětnovazební řízení byl navržen model mobilního robotu s odpovídající strukturou regulátoru. Byla realizována metoda pro optimální nastavení parametrů regulátoru s požadavkem na předepsanou přesnost polohy a rychlosti mobilního robotu.

Přínosy práce jsou uvedeny v následujících bodech:

- Byl realizován model mobilního robotu včetně řídicí struktury, který lze použít k optimálnímu nastavení parametrů regulátoru.
- Vzhledem ke složitosti jednotlivých řídicích struktur je velmi obtížné provést nastavení regulátoru tak, aby celý systém byl stabilní. Proto byl navržen přístup, který na vytvořeném modelu robotu nejprve umožňuje optimální nastavení parametrů regulátoru pro zvolenou trajektorii pohybu. Výsledky mohou být následně aplikovány na reálný systém robotu bez dalších zásahů.

Reprezentace okolí mobilního robotu

Na základě studia metod používaných pro reprezentaci okolí mobilního

robotu byla nejprve realizována pravděpodobnostní mapa mřížky obsazenosti vycházející z námi navrženého modelu ultrazvukového snímače. Při návrhu sensorického subsystému a modelu ultrazvukového snímače byl brán zřetel na co největší potlačení vlivu vícenásobných odrazů. Na základě pravděpodobnostní mřížky obsazenosti byl navržen postup pro realizaci geometrické mapy okolního prostředí.

Přínosy práce jsou uvedeny v následujících bodech:

- Návrh vlastního sensorického subsystému s možností připojení až 24 čidel s širokým úhlem vyzařování. Systém je navržen tak, aby ultrazvukový snímač umožňoval zachycení odražených signálů od více překážek během jednoho taktu. Společně s informací o vzdálenostech k daným překážkám je měřena i intenzita odraženého signálu. Díky současné obsluze více čidel najednou lze redukovat čas pro získání aktuální podoby scény.
- V práci byl uveden nový vztah pro ohodnocení kvality vnitřní mapy prostředí. V porovnání s uvedenými vztahy jiných autorů umožňuje náš vztah daleko lépe vystihnout zachycené prostředí robotu, ve kterém se nacházejí vícenásobné odrazy.
- Pro potlačení vlivu vícenásobných odrazů v uzavřeném prostředí robotu byl navržen kombinovaný model ultrazvukového snímače. V porovnání s ostatními modely ultrazvukových sensorů publikovaných různými autory došlo k výraznému zlepšení zachycené scény prostředí, kterou lze využít k tvorbě geometrické mapy.
- Byl uveden přístup zdvojování ultrazvukových čidel, který taktéž potlačuje vliv vícenásobných odrazů. Vzhledem k širokému úhlu vyzařování použitého ultrazvukového snímače byl detekován takřka stejný prostor okolí robotu.
- V oblasti geometrického mapování byl navržen postup vytváření scény, která je reprezentována pomocí úseček. Daný postup využívá k identifikaci objektů Houghovy transformace, jejíž úspěšnost byla zlepšena morfologickou operací pro nalezení kostry objektů.

Plánování pohybu robotu

V této části práce byly ověřeny námi navržené metody uvedené v kapitole 8. Plánování pohybu robotu je realizováno na základě geometrické mapy, která je v průběhu plánování pohybu již známa nebo se během jízdy robotu vytváří. Oba přístupy plánování byly ověřeny na reálném systému robotu. V případě známé mapy okolí bylo řízení robotu realizováno na základě lineárního regulátoru s požadavkem na přesnost polohy a rychlosti. Nastavení parametrů použitého regulátoru bylo provedeno pomocí optimalizačního kritéria. V případě postupného vytváření mapy prostředí jsme použili prostého řízení z bodu do bodu bez požadavku na přesnost polohy a rychlosti robotu.

8.1 Dosažené cíle, porovnání se stanovenými cíli

V této kapitole uvedeme závěrečné zhodnocení dosažených cílů s ohledem k jejich zadání z úvodu kapitoly 3.

1. V práci jsou uvedeny dva základní přístupy řízení mobilního robotu. Metoda pro optimální nastavení parametrů regulátoru, která vychází z modelu robotu je uvedena v kapitole 4.2. Navržený přístup umožňuje optimální nastavení parametrů regulátoru s požadavkem na předepsanou přesnost polohy a rychlosti robotu.
2. Byl navržen kombinovaný model ultrazvukového snímače, který eliminuje vliv vícenásobných odrazů. Dále byl navržen vztah pro ohodnocení kvality prostředí a navržena metoda zdvojování čidel potlačující nežádoucí vliv vícenásobných odrazů, která úzce souvisí s návrhem sensorického subsystému.
3. Byla navržena metoda pro realizaci geometrické mapy na základě mřížek obsazenosti. Metoda vychází z kombinovaného modelu ultrazvukového snímače a dále využívá k identifikaci objektů ve scéně Houghovy transformace.
4. Všechny navržené metody byly experimentálně ověřeny na reálném systému při plánovaném pohybu robotu ve známém a neznámém prostředí.

9 Závěr

Předkládaná práce se zabývá problematikou řízení pohybu robotu s požadavkem na předepsanou přesnost polohy a rychlosti pohybu. Velká část práce je věnována mapování okolí mobilního robotu, která je reprezentována pravděpodobnostní mřížkou obsazenosti nebo geometrickou mapou. Souhrn navržených metod v daných oblastech je uveden v kapitole 8. Všechny přístupy byly ověřeny na reálném systému při plánovaném pohybu robotu ve známém a neznámém prostředí. Porovnání dosažených cílů se stanovenými cíli je uvedeno v kapitole 8.1. Veškeré vytčené cíle z kapitoly 3 byly splněny.

Pro splnění cílů disertační práce jsem musel navrhnout mechanickou konstrukci robotu společně s odpovídajícími elektrickými pohony. Mobilní robot jsem postupně doplnil o řídicí subsystém a sensorický subsystém. Nesmíme také opomenout na nezbytné programové vybavení pro sensorický subsystém robotu, řídicí subsystém robotu a vzdálený řídicí subsystém. Výzkum práce jsem realizoval v průběhu několika let.

Na výsledky této práce lze navázat problematikou lokalizace robotu vycházející z geometrické mapy okolního prostředí. Stávající systém by mohl být doplněn o přesnější snímače například laserové hloubkoměry. V současnosti je stále řešena problematika postupné lokalizace a mapování prostředí, která by mohla taktéž navázat na tuto práci.

Reference

- [1] De Luca, A.; Oriolo, G.; Vendittelli, M. *WMR Control Via Dynamic Feedback Linearization: Design, Implementation, and Experimental Validation*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 10, No. 6 (2002).
- [2] Samson, C. *Time-varying Feedback Stabilization of Car-like Wheeled Mobile Robots*. International Journal of Robotics Research 12(1),55–64 (1993).
- [3] Canudas de Wit, C.; Khenouf, H.; Samson, C.; Srdalen, O. J. *Nonlinear Control Design for Mobile Robots*. In: Zheng Y. F.(ed) Recent Trends in Mobile Robots. World Scientific Publisher, 121–156 (1993).
- [4] d’Andréa-Novel, B.; Bastin, G.; Campion, G. *Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots by State Feedback Linearization*. International Journal of Robotics Research 14(6), 543–559(1995).
- [5] De Luca, A.; Di Benedetto, M. D. *Control of Nonholonomic Systems Via Dynamic Compensation*. Kybernetika 29(6), 593–608 (1993).
- [6] Carrasco, R.; Cipriano, A.; Carelli, R. *Nonlinear State Estimation in Mobile Robots Using a Fuzzy Observer*. IFAC (2005).
- [7] Carrasco, R.; Cipriano, A. *Fuzzy Logic Based Nonlinear Kalman Filter Applied to Mobile Robots Modelling*. (2004).
- [8] Záda, V.; Zádová, V. *Global Optimisation with Spline-interpolation*. Proceedings of the Mathematical Method in Economics - MME’97: International Scientific Conference on the Occassion of the 20th Anniversary of Foundation of the Faculty, Ostrava, Czech Republic, 198-202 (1997).
- [9] Price, W. L. *A Controlled Random Search Procedure for Global Optimization*. Computer Journal, 20(4), 367-370 (1996).
- [10] Reiner, H.; Tuy, H. *Global Optimisation*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1990).
- [11] *Handbook of Global Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands (1995).
- [12] Bank, D. *Map Building for Mobile Robots by High-Resolution Ultrasonic Sensing*. ICAR, Portugal (2003).
- [13] Bank, D. *A Novel Ultrasonic Sensing System for Autonomous Mobile Systems*. IEEE sensors journal, ISSN 1530-437X, vol. 2, pp. 597-606 (2002).
- [14] Elfes, A. *Occupancy Grids: A Probabilistic Framework of Robot Perception and Navigation*. PhD. Thesis. Electrical and Computer Engineering Department, Robotics Institute. Carnegie-Mellon University (1989).
- [15] Štěpán, P. *Vnitřní reprezentace prostředí pro autonomní mobilní roboty*. Disertační práce. ČVUT Praha (2001).

- [16] Kulich, M. *Lokalizace a tvorba modelu prostředí v inteligentní robotice*. Disertační práce. ČVUT Praha (2003).
- [17] Martin, M. C.; Moravec, H. P. *Robot Evidence Grid. Technical Report CMU-RI-TR-96-06*. The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania (1996).
- [18] Wullschleger, H.; Arras, O.; Vestli J. *A Flexible Exploration Framework for Map Building*. (1999).
- [19] Nguyen, V.; Martinelli, A.; Tomatis, N.; Siegwart, R. *A Comparison of Line Extraction Algorithms Using 2D Laser Rangefinder for Indoor Mobile Robotics*. Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'2005, Edmonton, Canada (2005).
- [20] Iocchi, L.; Nardi, D. *Hough Transform Based Localization for Mobile Robots*. Advances in Intelligent Systems and Computer Science (N.Mastorakis,Ed.). World Scientific Engineering Society (1999).
- [21] *The Hough Transform*. Massey University – Institute of Information and Mathematical Science – Computer Science. [online].
Dostupné na [http : //www.cs – alb – pc3.massey.ac.nz/notes/59318/l11.html](http://www.cs-alb-pc3.massey.ac.nz/notes/59318/l11.html).
- [22] Horčíčka, J. *Počítačové zpracování digitálních obrázků – Houghova transformace*. K7 – vědecko populární časopis Fakulty mechatroniky TU v Liberci, 01/2005, ISSN 1214-7370 (2005).
- [23] Hlaváč, V.; Sedláček, M. *Zpracování signálů a obrazů*. ČVUT, Praha, ISBN 80-01-02114-9 (2002).
- [24] Sonka, M.; Hlavac, V.; Boyle, R. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. PWS, Boston (1999).
- [25] Connolly, C.; Grupen, C. *The Application of Harmonic Functions to Robotics*. Journal of Robotic Systems, 931-946 (1993).
- [26] Wang, Ch. Ch. *Simultaneous Localization, Mapping and Moving Object Tracking*. Pittsburgh USA (2004).
- [27] Thrun, S.; Fox, D.; Burgard, W.; Dellaert, F. *Robust Monte Carlo Localization for Mobile Robots*. Artificial Intelligence (2001).
- [28] Tarin, S. C.; Brugger, H.; Hofer, E. P.; Tibken, B. *Odometry Error Correction by Sensor Fusion for Autonomous Mobile Robot Navigation*. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. Proceedings of the 18th IEEE, Issue , vol.3, 1654 - 1658 (2001).

Seznam vlastních publikovaných prací

- [29] Záda, V.; Pirk, P. *Optimization Method for Parameters Setting of Feedback Controller of Mobile Robot*. In: ECMS2005 (2005).
- [30] Pirk, P. *Compensation of the Dynamic Behavior of the Static Bias Drift of the Vibrating Gyroscope*. 5th International PhD Conference on Mechanical Engineering (PhD 2007). Pilsen, Czech republic (2007).
- [31] Pirk, P. *Representation of Environment Using Ultrasonic Sensing System for Mobile Robots*. 8th International Workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement, and Signals (ECMS 2007). Liberec, Czech republic, May 2007. ISBN: 978-80-7372-202-9 (2007).
- [32] Pirk, P. *Navigation System for Mobile Robots*. 8th International Workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement, and Signals (ECMS 2007). Liberec, Czech republic, May 2007. ISBN: 978-80-7372-202-9 (2007).
- [33] Holada, M.; Kopetschke, I.; Pirk, P.; Pelc, M.; Matela, L.; Horčíčka, J.; Štilec, J. *The Prototype of Human – Robot Interactive Voice Control System*. The Fourth International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2007). Proc. of ICINCO 2007, Angers, France, May 2007, vol. RA-1, 307-310, ISBN: 978-972-8865-83-2 (2007).
- [34] Holada, M.; Pelc, M.; Kopetschke, I.; Pirk, P.; Matela, L.; Horčíčka, J.; Štilec, J. *Voice Interactive Control System for Robotics with Distributed Components*. 8th International Workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement, and Signals (ECMS 2007), Liberec, Czech republic, May 2007, ISBN: 978-80-7372-202-9 (2007).
- [35] Špánek, R.; Pirk, P.; Kovář, P. *The BlueGame Project: Ad-hoc Multi-layer Mobile Game with Social Dimension*. CoNEXT'07 Annual Conference /3./ Student Workshop, New York, USA, 2007. Emerging Network Experiment and Technology, New York : ACM DL, 1-2, ISBN 978-1-59593-770-4 (2007).
- [36] Špánek, R.; Pirk, P. *Supporting Secure Communication in Distributed Environments*. Konference o informačních (inteligentních) technologiích - aplikace a teorie (ITAT 2007), Slovakia (2007).