

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



DISERTAČNÍ PRÁCE

2009

Ing. Pavel Pírk

Mapování prostředí a plánování trajektorie pohybu mobilního robotu

Disertační práce v oboru Technická kybernetika

Ing. Pavel Pírk

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

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

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP, a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé disertační práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své disertační práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím disertační práce.

Datum:

Podpis:

Anotace

Mapování prostředí a plánování trajektorie pohybu mobilního robotu

Ing. Pavel Pírk

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 Pirkel, 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	V
Obsah	IX
Poděkování	XI
Seznam použitých symbolů	XIII
Seznam zkratk a značek	XVII
1 Úvod	19
1.1 Současný stav problematiky, motivace	20
1.2 Cíle disertační práce	20
1.3 Členění disertační práce	21
2 Návrh architektury mobilního robotu	23
2.1 Návrh motorického subsystém robotu	24
2.1.1 Výběr kolového podvozku	25
2.1.2 Ackermanův způsob řízení	25
2.1.3 Jednokolové řízení	26
2.1.4 Diferenční způsob řízení	27
2.1.5 Synchronní způsob řízení	28
2.1.6 Řízení s všesměrovými koly	28
2.1.7 Porovnání jednotlivých koncepcí	29
2.1.8 Návrh elektrického pohonu	30
2.1.9 Elektrické motory a převodovky	31
2.1.10 Snímače pro zpětné vazby	32
2.1.11 Návrh měniče a regulátoru servopohonu	33
2.2 Návrh řídicího systému mobilního robotu	34
2.2.1 Návrh řídicího systému robotu z hlediska HW vybavení	34
2.2.2 Návrh řídicího systému robotu z hlediska SW vybavení	35
2.2.3 Popis SW pro řídicí systém mobilního robotu	35
2.2.4 Popis klientské aplikace běžící na vzdáleném řídicím systému robotu	37
3 Odometrie mobilního robotu	39
3.1 Systematické chyby měření	41
3.2 Nesystematické chyby měření	42
3.3 Zpřesnění polohy robotu na základě lokalizačních metod	42
3.4 Kompenzace systematických chyb	43
3.5 Výsledky kompenzace na reálném systému robotu	46
4 Sledování trajektorie pohybu robotu	49
4.1 Model kinematiky mobilního robotu	49
4.2 Dynamický model robotu	51
4.3 Model stejnosměrného pohonu	52
4.4 Návrh nelineárního způsobu řízení	52

4.5	Návrh lineárního zpětnovazebního regulátoru	54
4.6	Model mobilního robotu s řídicí strukturou regulátoru	55
4.7	Odvození žádaných hodnot pohybu robotu	55
4.8	Optimalizace parametrů regulátoru	57
4.8.1	Popis konkrétního algoritmu globální optimalizační metody	58
4.9	Simulace pohybu mobilního robotu	59
4.9.1	Výsledky simulace I	61
4.9.2	Výsledky simulace II	63
4.9.3	Shrnutí dosažených výsledků aplikace na reálný systém	66
4.10	Ověření výsledků simulace na reálném systému mobilního robotu	67
5	Senzorický subsystém	69
5.1	Bezkontaktní snímače	69
5.1.1	Ultrazvuková čidla	69
5.1.2	Laserová čidla	71
5.1.3	Kamera	72
5.2	Návrh vlastního sensorického systému robotu	73
5.2.1	Snímač ve funkci vysílače a přijímače	73
5.2.2	Snímač ve funkci přijímače	74
5.2.3	Popis navrženého sensorického systému	74
5.3	Výhody navrženého sensorického systému	75
5.4	Měření základních parametrů ultrazvukového snímače	76
5.4.1	Měření závislosti přesnosti čidla na vzdálenosti k překážce	76
5.4.2	Měření intenzity odraženého signálu	77
6	Reprezentace okolí mobilního robotu	78
6.1	Způsoby reprezentace světa	78
6.1.1	Sensorické mapy	78
6.1.2	Geometrické mapy	78
6.1.3	Topologické mapy	78
6.1.4	Symbolické mapy	79
6.2	Sensorické mapy reprezentované pomocí mřížek obsazenosti	79
6.2.1	Pravděpodobnostní mřížky obsazenosti	79
6.2.2	Mřížky obsazenosti založené na D-S teorii	80
6.3	Ohodnocení kvality vnitřní mapy prostředí	82
7	Model ultrazvukového snímače	84
7.1	Elfesův model sonaru	84
7.2	Exponenciální model sonaru	85
7.3	Kombinovaný model sonaru	86
7.4	Zdvojování ultrazvukových čidel	87
7.5	Výsledky experimentů	87
7.5.1	Vliv modelu ultrazvukového snímače na kvalitu vytvářené mapy	88
7.5.2	Vliv kombinovaného modelu na kvalitu vytvářené mapy	89
7.5.3	Vliv zdvojení čidel na kvalitu vytvářené mapy	90
7.5.4	Vliv sdružování dat na kvalitu vytvářené mapy	92
7.5.5	Shodnocení dosažených výsledků pro použité modely sonarů	93

8	Geometrické mapy	94
8.1	Sekvenční a dávkové vytváření mapy prostředí	94
8.2	Realizace geometrické mapy na základě mřížek obsazenosti	95
8.2.1	Segmentace mřížky obsazenosti	95
8.2.2	Zpracování mřížky obsazenosti	97
8.2.3	Nalezení kostry objektů	98
8.2.4	Identifikace objektů pomocí Houghovy transformace	99
8.2.5	Určení úseček pro přímky nalezené pomocí Houghovy transformace	102
8.2.6	Zhodnocení dosažených výsledků	104
9	Plánování cesty pohybu robotu	105
9.1	Ověření plánování cesty pohybu robotu na reálném systému	107
9.1.1	Plánování cesty pohybu robotu ve známém prostředí	109
9.1.2	Plánování cesty pohybu robotu v neznámém prostředí	109
10	Shrnutí, dosažené cíle disertace	112
10.1	Sledování trajektorie pohybu robotu	112
10.2	Reprezentace okolí mobilního robotu	112
10.3	Plánování pohybu robotu	113
10.4	Dosažené cíle práce, porovnání se stanovenými cíli	113
11	Závěr	115
	Literatura	116

Poděkování

V dnešní době je vše nové v technických vědách výsledkem týmové spolupráce, bez které žádná osobnost ani dílo nevznikne. Moje poděkování směřuje ke všem těm, kteří mi pomohli při řešení úkolu a to jak po stránce odborné, organizační, administrativní, ale i po stránce morální podpory. Bez zázemí fakulty a rodiny by nikdy tato práce nevznikla.

V první řadě bych chtěl poděkovat svému školiteli Doc. Ing. Mgr. Václavu Zádovi, CSc. za odborné vedení a ochotu mi pomáhat při celém doktorandském studiu i mimo něj. Celá práce vznikla za finanční podpory Ústavu technické informatiky a mechatroniky. Zejména bych chtěl poděkovat jeho vedoucímu Doc. Ing. Petru Tůmovi, CSc., který byl vždy ochoten najít finanční prostředky.

Velký dík patří Prof. M. Courdessovi z University v Toulouse, kde jsem měl možnost se poprvé setkat s nejmodernějším vybavením v oblasti mobilní robotiky.

Opomenout nemohu ani celý kolektiv našeho ústavu. Speciální dík patří Ing. Přemku Svobodovi a Ing. Tomáši Martincovi.

Nakonec bych rád poděkoval své rodině za finanční i duševní podporu. Děkuji své přítelkyni Petře za trpělivost, starostlivost a nekonečné hodiny čtení mé disertační práce.

V Liberci, březen 2009

Seznam použitých symbolů

Elektrické

U_n	V	jmenovité napětí motoru
P_{mech}	W	jmenovitý výkon motoru
n_n	min^{-1}	jmenovité otáčky motoru
I_n	A	jmenovitý proud motoru
G		převodový poměr motoru
i	A	elektrický proud procházející motorem
V	V	elektrické napětí motoru
L	H	elektrická indukčnost kotvy motoru
R	Ω	vnitřní odpor kotvy
K_m	$\frac{N \cdot m}{A}$	konstanta motoru

Řízení robotů

R_p		referenční bod robotu
b	m	rozvor kol robotu
l	m	rozchod kol robotu
R_t	m	teoretický poloměr zatáčení robotu
c_L, c_R		kompenzační faktory levého, pravého kola robotu
d	m	průměr těla robotu
r	m	poloměr kola robotu
m	kg	hmotnost kola robotu
M	kg	hmotnost těla robotu
K	J	kinetická energie
I	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti
τ	$N \cdot m$	kroutící moment
v	$m \cdot s^{-1}$	tečná (výsledná) rychlost robotu
v_L, v_R	$m \cdot s^{-1}$	obvodová rychlost levého, pravého kola robotu
$(\dot{x}, \dot{y})$	$m \cdot s^{-1}$	rychlost robotu vyjádřená v kartézském souřadném systému
$\omega, \dot{\theta}$	$rad \cdot s^{-1}$	úhlová rychlost robotu
ω_L, ω_R	$rad \cdot s^{-1}$	úhlová rychlost levého, pravého kola robotu
$(\ddot{x}, \ddot{y})$	$m \cdot s^{-2}$	zrychlení robotu v kartézském souřadném systému
a	$m \cdot s^{-2}$	zrychlení robotu
(x, y)	m	aktuální poloha robotu vyjádřená v kartézském souřadném systému
θ	rad	úhel natočení podélné osy robotu vůči ose y
P		počet pulsů na obvodu inkrementálního snímače
n_l, n_r		relativní počet pulsů levého a pravého kola robotu
E_d		systematická chyba způsobená různým průměrem kol robotu
E_b		systematická chyba způsobená špatným určením vzdálenosti rozvoru kol
α		chyba rotace robotu
β		chyba orientace robotu

t	s	čas
q		vektor zobecněných souřadnic
$\dot{q}$		vektor zobecněných rychlostí
u		vektor řídicích vstupů
e		vektor chyby stavů sledování trajektorie
$\dot{e}$		vektor chyby dynamiky sledování trajektorie
ς		tlumicí koeficient řídicího systému
c		koeficient řídicího systému
ξ		dynamický zpětnovazební kompenzátor
$k_{p1}, k_{d1}, k_{p2}, k_{d2}$		zesílení řídicího systému
A	m	amplituda sinusové trajektorie
x_T	m	perioda sinusové trajektorie
V_A	$m \cdot s^{-1}$	rychlost robotu dosažená po rozjezdu
T_n	s	doba rozjezdu robotu
m_n		mocnina náběhové rampy
$F(x, y)$		optimalizace s požadavkem přesnosti polohy
$F(v)$		optimalizace s požadavkem přesnosti rychlosti
$F(x, y v)$		optimalizace s rovnocenným požadavkem přesnosti na polohu a rychlost
F		výsledná hodnota optimalizačního kritéria
n_I		počet iteračních kroků optimalizace
T_v	s	perioda vzorkování simulace
$\dot{y}$		derivace podle času t
y'		derivace podle x
$s(t)$	m	délka trajektorie

Ultrazvuk

$model_o^d$		míra obsazenosti modelu
$model_v^d$		míra volnosti modelu
d	m	vzdálenost naměřená snímačem
$\delta, \emptyset$		polární souřadnice buňky modelu vztažené k pozici a natočení sensoru
o, v		obsazená, volná buňka
$s(a) = o$		stav buňky a - obsazeno
$s(a) = v$		stav buňky a - volno
$P(s(a) = o d)$		pravděpodobnost obsazení buňky pro aktuální měření
M		množina všech možných světů
m_a		buňka odpovídající buňce a ve světě m
$P(m d)$		pravděpodobnost světa m při aktuálním měření d
$p(d s(a) = o)$		hustota pravděpodobnosti modelu
X		množina stavů
p		pravděpodobnostní míra
Pl		míra plausability
Bel		míra důvěry v obsazenost buňky

$\tilde{P}(o)$		výsledná mřížka obsazenosti
$shoda$		míra shody
ϵ	m	přesnost snímače
φ	rad	horizontální vyzařovací úhel snímače
V		potenciální pole
F	N	síla

Množinové operace

O	pravděpodobnostní mřížka obsazenosti
P	hodnota prahování
O^b, Q	binární matice
B	strukturní element
$\backslash$	jednostranný množinový rozdíl
$\otimes$	transformace tref či miň
$\oplus$	dilatace množin
$\ominus$	eroze množin
$\bullet$	transformace uzavření
$\oslash$	ztenčování objektů

Seznam zkratek a značek

P	pól pohybu mobilního robotu
IRC	inkrementální rotační snímač
HW	hardware
SW	software
TCP/IP	sada protokolů pro komunikaci v počítačové síti
ZV	zpětná vazba
SS	stejnoseměrný
DC	stejnoseměrné napětí
B	byte, jednotka digitální informace
MB	Megabyte, jednotka digitální informace rovna 1048576 B
USB	universální sériová sběrnice
RS-232	sériová komunikace - rozhraní
CW	po směru hodinových ručiček
CCW	proti směru hodinových ručiček
PID	typ zpětnovazební regulace
RTOS	operační systém s podporou reálného času
TTL	tranzistorově tranzistorová logika
OS	operační systém
GNU	volný software inspirovaný operačním systémem unixového typu
C++	typ programovacího jazyku
CRS	typ algoritmu
SLAM	současná lokalizace a mapování
DS	Dempstera-Shafera

1 Úvod

Slovo *robot* se poprvé objevilo v roce 1921 v divadelní hře Karla Čapka R.U.R. (Rossum's Universal Robots), kde charakterizovalo umělé bytosti vytvořené člověkem. Díky originálnímu a velmi zajímavému tématu se Čapkova hra stala brzy světoznámou a s ní i pojem *robot*. Toto populární, původem tedy české, slovo prodělalo od doby svého vzniku jistě významový vývoj. Dnes je chápáno v obecném slova smyslu jako označení pro automaticky pracující, účelové nebo zábavní zařízení, jež nemusí mít nutně lidské tvary.

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.

Již od nepaměti touží lidstvo po ulehčení práce a zautomatizování často opakovaných úkonů. Zprvu se jednalo o jednoduché, člověku nepodobné stroje. Ale stále tu byla snaha o vytvoření umělého člověka. Již v 18. století pánové Pier a Henry Droz vytvořili svého androida - písaře, který byl schopen napsat několik vět. Veliký zlom ve vývoji robotů však nastal s příchodem průmyslové revoluce a pokračoval ve 20. století, kdy hnacím motorem byla automatizace rychle se rozvíjejícího průmyslu. Přichází období mechanických rukou a manipulátorů. První uplatnění samozřejmě nachází při práci s těžkými výrobky a člověku nebezpečnými látkami. Mezníkem můžeme nazvat rok 1961, kdy firma General Motors nasadila do praxe prvního průmyslového robota UNIMATE, který byl vyvinut na Columbia University U.S.A.

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. Stejně tak mobilní roboty pracují ve službách armády nebo záchranných složek, kde slouží pro průzkum a vyhledávání obětí pohrom v civilním sektoru, nebo například pro odminování oblastí zasažených válečným konfliktem. Zde roboty slouží především jako prodloužené oči a ruce člověka. 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 vyhrančeném 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.

1.1 Současný stav problematiky, motivace

Část disertační práce je věnována oblasti řízení mobilních robotů po předepsané trajektorii s respektováním požadované polohy a rychlosti. V článcích [17], [18] a [19] 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 článcích [21] a [22] 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 1.2 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 [32] 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 článcích [28] a [27] 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 využívajícími laserových hloubkoměrů, u kterých lze dosáhnout lepších výsledků v porovnání s ultrazvukovými systémy. Například v [33] a [36] 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 1.2.

1.2 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 nas-

tavení 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.

1.3 Členění disertační práce

V této kapitole uvedeme členění disertační práce společně s krátkou charakteristikou jednotlivých kapitol.

- Druhá kapitola se zabývá návrhem mechanických a elektromechanických částí mobilního robotu vyvinutého na naší fakultě. V rámci této kapitoly jsou porovnány používané koncepce při realizaci mobilního robotu. Dále je zde popsán návrh elektrického pohonu včetně měniče a regulátoru servopohonu. V závěru kapitoly popisujeme vytvořený řídicí systém robotu včetně SW vybavení.
- V třetí kapitole jsou uvedeny systematické a nesystematické chyby měření vzniklých při výpočtu odometrie robotu. Popisujeme zde konkrétní algoritmus používaný při kompenzaci systematických chyb včetně výsledků na reálném systému robotu.
- Čtvrtá kapitola je věnována vytvoření modelu mobilního robotu zahrnující kinematický a dynamický model mobilního robotu včetně dané řídicí struktury. Uvádíme zde jednotlivé způsoby zpětnovazebního řízení pro účely sledování trajektorie pohybu robotu. Dále je zde popsána metoda pro optimální nastavení parametrů regulátorů s požadavkem na předepsanou přesnost polohy a rychlosti robotu. Uvádíme zde výsledky simulace a ověření na reálném systému robotu.

- Pátá kapitola obsahuje návrh a realizaci vlastního sensorického subsystému vytvořeného pro účely mapování prostředí robotu. Jsou zde zmíněny jednotlivé druhy sensorů s uvedením jejich výhod a nevýhod.
- Šestá kapitola popisuje možné způsoby reprezentace okolního prostředí robotu. Velká část je věnována sensorickým mapám reprezentovaným pomocí mřížek obsazenosti a ohodnocení kvality vnitřní mapy prostředí.
- Sedmá kapitola se zabývá realizací modelu ultrazvukového snímače a jeho vlivu na kvalitu vytvořené mapy prostředí. Je zde uvedena řada různých typů modelů a metod používaných k eliminaci vícenásobných odrazů.
- Osmá kapitola popisuje sekvenční a dávkové vytváření mapy prostředí. Dále pak uvádí metodu umožňující vytvoření geometrické mapy prostředí na základě mřížek obsazenosti.
- Devátá kapitola je věnována plánování trajektorii pohybu robotu na základě geometrické mapy. Jsou zde uvedeny výsledky plánování na reálném systému robotu ve známém a neznámém prostředí.
- Desátá kapitola uvádí shrnutí dosažených výsledků a porovnává je se stanovenými cíly disertace.
- Jedenáctá kapitola obsahuje závěrečné zhodnocení celé práce.

2 Návrh architektury mobilního robotu

Návrh a realizace mobilního robotu je rozsáhlá úloha, zasahující do mnoha oborů inženýrské činnosti. Jedná se o komplexní řešení mechanických, elektromechanických, elektronických a programových systémů. Součástí disertační práce je stavba laboratorního mobilního robotu včetně řídicího systému vlastní konstrukce a softwarového vybavení, nebo-li jedná se o návrh vlastní architektury mobilního robotu. V této souvislosti je na místě uvést a popsat základní komponenty tvořící takový systém. Základní koncepce mobilního robotu je bez ohledu na typ či funkci tvořena z následujících částí:

1. machineware

- lokomoční ústrojí
- vlastní pohonné jednotky
- primární zdroj energie
- účelové nadstavby

2. hardware

- měniče elektrické energie pro napájení pohonných jednotek
- elektronika pro řízení pohonů
- senzorický subsystém
- elektronika pro řízení senzorického subsystému
- sledování stavu zdroje energie
- řídicí subsystém pro celý robot

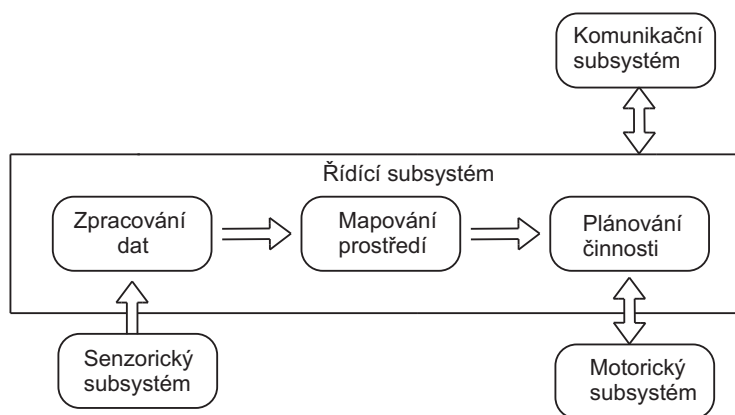
3. software

- řízení lokomoce
- plánování činnosti
- navigace (lokální i globální)

Ve většině literatur [2] se však můžeme setkat s daleko přehlednějším dělením robotického systému pouze na čtyři základní vrstvy.

- motorický subsystém
- senzorický subsystém
- řídicí (kognitivní) subsystém
- komunikační subsystém

Na obrázku 2.1 je zobrazena typická architektura mobilního robotu včetně vzájemných interakcí mezi základními vrstvami. Motorický subsystém zajišťuje vlastní pohyb mobilního robotu a je úzce spojen s návrhem mechanických a elektromechanických částí mobilního robotu, kterému je věnována kapitola 2.1. Sensorický subsystém přijímá informace z vnitřních a vnějších čidel. Problematika spojená s odometrií robotu je věnována kapitola 3. Návrhem sensorického subsystému se budeme zabývat v kapitole 5. Řídicí subsystém je představován vlastním řídicím systémem robotu, kde probíhají řídicí činnosti vyšší úrovně. Zajišťuje příjem a zpracování dat ze sensorického subsystému. Mohou zde probíhat operace spojené s mapováním okolního prostředí robotu či plánováním činnosti pohybu robotu, jak vidíme na obrázku 2.1. Někdy však mohou být tyto operace vykonávány ve vzdáleném řídicím systému, jak bude vysvětleno dále v textu. Komunikační subsystém zajišťuje komunikaci s výkonnějším řídicím systémem. Zde mohou probíhat náročnější operace spojené s realizací mapy prostředí či plánováním trajektorie pohybu robotu.



Obrázek 2.1: Typické uspořádání architektury mobilního robotu.

V další části textu se budeme nejprve zabývat návrhem motorického subsystému, tj. návrhem mechanických a elektromechanických částí mobilního robotu. Tento návrh zahrnuje:

- výběr a návrh kolového podvozku
- návrh elektrického pohonu

2.1 Návrh motorického subsystém robotu

Součástí disertační práce je návrh elektrického pohonu mobilního robotu s hmotností 150 kg, maximální rychlosti pohybu robotu 5 km.h^{-1} ve všech směrech v rovině. O dalších specifikacích se práce nevyjadřuje. Naskytla se tak velká oblast možných řešení, kterou bylo nutné přesně vymezit. V naší laboratoři inteligentních robotů se nacházel již realizovaný podvozek mobilního robotu. U něj však neexistovala žádná technická dokumentace, ani žádná zpráva zmiňující se o záměru či konkrétních postupech řešení, ale přesto se konstrukcí udal směr konkrétního řešení. Jedná se tedy o mobilní robot:

1. pro výukové účely s možným připojením různých nadstaveb
2. indoor aplikace

3. pro standardní typ prostředí
4. s kolovým lokomočním systémem
5. s rámovou konstrukcí
6. s bateriovým zdrojem energie

Po tomto krátkém úvodu se stanovily konkrétní požadavky a nyní je možné přejít k technickému řešení lokomočního subsystému včetně pohonů.

2.1.1 Výběr kolového podvozku

Při výběru kolového lokomočního subsystému je nutné také zachovat komplexní přístup. V této fázi návrhu vyvstává potřeba řešit další otázky:

- koncepce uspořádání kolového podvozku - počet kol, hnacích, řídících, ...
- koncepce technického řešení skupiny podvozku - mechaniky jízdy, jízdní odpory, jízdní vlastnosti, ...
- koncepce konstrukční podskupiny pohybového mechanismu - typ nápravy, seřízení kol, uložení kol, ...
- užité vlastnosti skupiny podvozku - rozměry, nosnost, poloměr zatačení, stoupavost, ...

Uspořádání kolových podvozků je celá řada. Používají se konstrukce podobného charakteru jako u osobních nebo nákladních automobilů, pracovních strojů a samozřejmě také konstrukce vyvinuté speciálně pro účely mobilní robotiky. Koncepcí, které lze uvažovat pro zmíněné potřeby, je několik.

2.1.2 Ackermanův způsob řízení

S tímto typem řízení se v běžné praxi setkáme u automobilů. Jedná se o dvounápravové systémy se čtyřmi nebo třemi koly, viz obrázek 2.2. Princip řízení spočívá ve splnění *Ackermanovy podmínky*

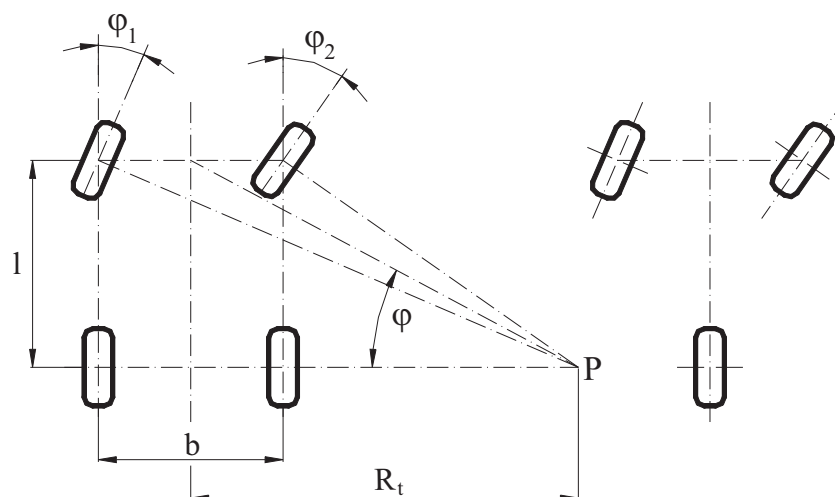
$$\cot g \varphi_2 - \cot g \varphi_1 = -\frac{b}{l}, \quad (2.1)$$

kde φ_1, φ_2 jsou úhly natočení, b rozvor a l rozchod kol. Teoretický poloměr zatačení při zanedbání odchylek kol je potom

$$R_t = \frac{l}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (2.2)$$

Technicky se tato podmínka realizuje na přední nápravě kloubovým lichoběžníkovým řízením. Hnaná kola mohou být jak na přední, tak na zadní nápravě.

- Výhody: poměrně snadný způsob řízení směru pomocí jednoho řídícího motoru a rychlosti pohybu pomocí hnacího motoru, možnost dosažení velkých rychlostí.
- Nevýhody: relativně špatné manipulační vlastnosti vyplývající z výše popsaných rovnic (2.1), (2.2), nemožnost otočení se na místě, problematické určení polohy, rozdílné vlastnosti při jízdě dopředu a dozadu.



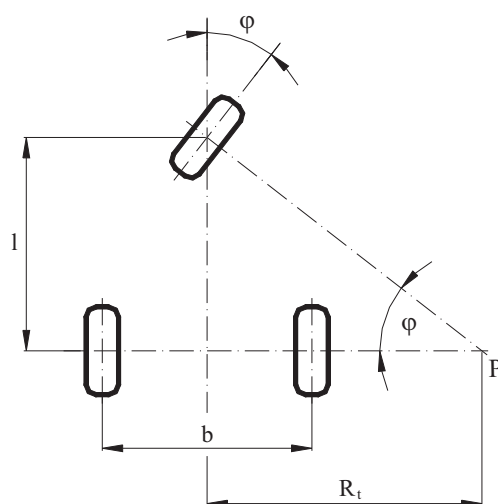
Obrázek 2.2: Čtyř- a tří-kolový podvozek s Ackermanovým způsobem řízení.

2.1.3 Jednokolové řízení

Jednokolové řízení (tříkolka viz obrázek 2.3) je vlastně zjednodušeným případem typu podvozku z předchozí kapitoly. Teoretický poloměr zatáčení

$$R_t = \frac{l}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (2.3)$$

o tom vypovídá. Jedná se tedy o jedno otočné kolo umístěné vpředu nebo vzadu, vzhledem ke směru pohybu, a dvě kola poháněná.



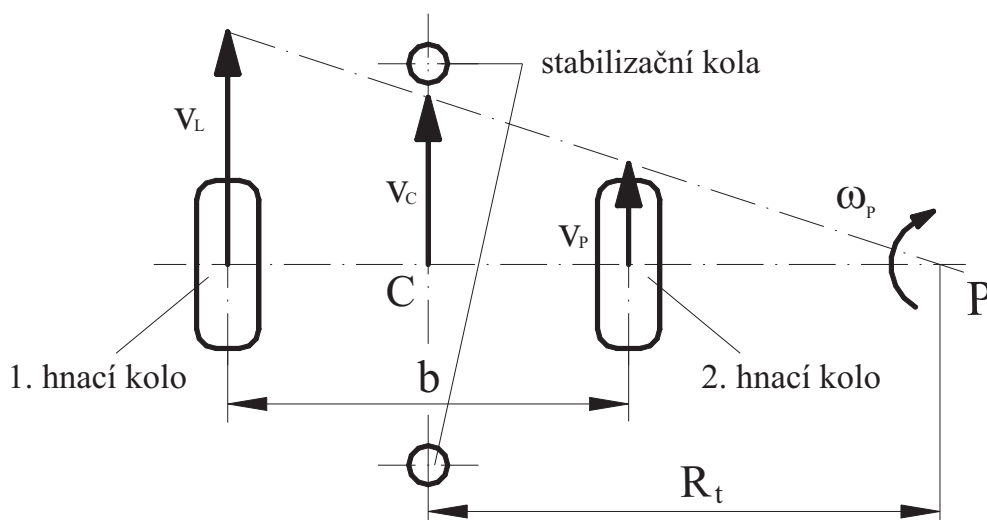
Obrázek 2.3: Tříkolový podvozek s jedním řízeným kolem.

- Výhody: použití motoru k řízení natočení kola a motoru k pohonu, snadnější realizace oproti předchozímu Ackermanovu typu, možnost dosažení velkých rychlostí.

- Nevýhody: jako u Ackermanova způsobu řízení společně s horší stabilitou.

2.1.4 Diferenční způsob řízení

Na obrázku 2.4 je příklad čtyřkolového podvozku. Princip řízení není založen na otočných kolech, ale na rozdílné rychlosti otáčení souose uložených kol podobně jako u invalidních vozíků. Systém z obrázku 2.4 se tedy skládá ze dvou samostatně poháněných a ze dvou stabilizačních kol.



Obrázek 2.4: Podvozek s diferenčním způsobem řízení.

Pro okamžitou rychlost bodu C platí

$$v_C = \frac{v_P + v_L}{2}, \quad (2.4)$$

kde v_P a v_L jsou obvodové rychlosti hnacích kol.

Teoretický poloměr zatáčení je popsán vztahem

$$R_t = \frac{v_C \cdot b}{v_P - v_L}, \quad (2.5)$$

kde b je rozvor podvozku.

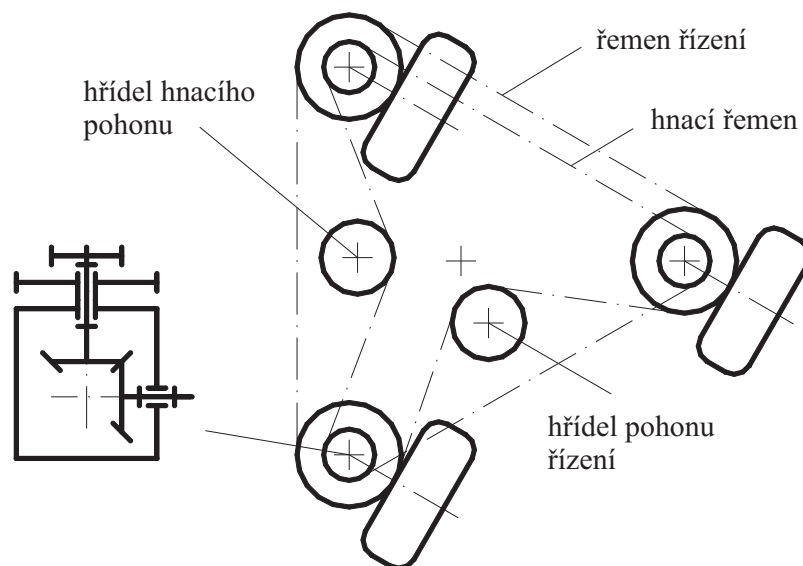
Podvozek se dále otáčí kolem pólu pohybu P, který leží v průsečíku os kol a spojnice vrcholu vektoru rychlosti, úhlovou rychlostí

$$\omega_P = \frac{v_C}{R_t}. \quad (2.6)$$

- Výhody: možnost snadného řízení směru pohybu pomocí dvou motorů, velmi dobré manipulační vlastnosti (dosažení $R_t = 0 \rightarrow C \equiv P$), stejné podmínky při jízdě vpřed i vzad.
- Nevýhody: možné problémy při požadavku jízdy přímo, vysoké nároky na konstrukční přesnost.

2.1.5 Synchronní způsob řízení

Jedná se o uspořádání tří (obrázek 2.5), čtyř i více kol. Principem je shodné, synchronní, natočení a pohánění všech kol pomocí řemenů nebo řetězů. Pohon kol může být například realizován kuželovým soukolím tak, jak je schématicky naznačeno na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Tříkolový podvozek se synchronním způsobem řízení.

- Výhody: jednoduché řízení natočení kol jedním a rychlosti pohybu druhým motorem, velmi dobré manipulační vlastnosti ve všech směrech v rovině, rovnoměrné rozložení zatížení na všechna kola.
- Nevýhody: konstrukční náročnost přenosu otáček, nutný hladký povrch pohybového prostoru.

2.1.6 Řízení s všesměrovými koly

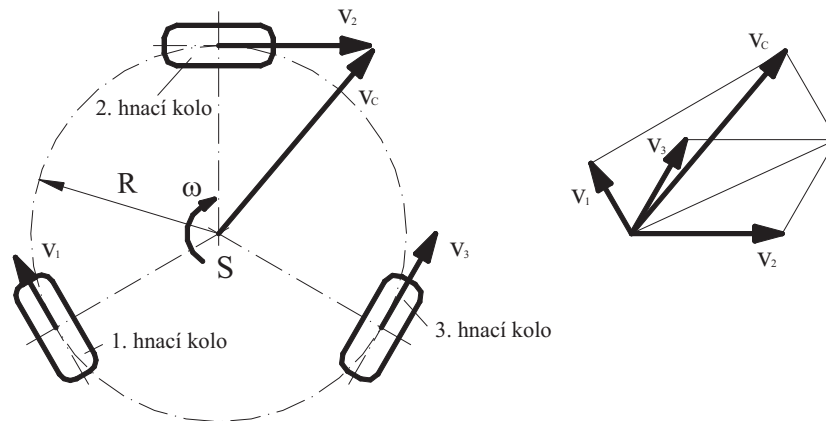
Funkce podvozku je založena na použití speciálních tzv. všesměrových kol. Tato kola umožňují díky pohyblivým elementům na jejich obvodu pohyb radiálním i axiálním směrem. Nejčastěji se jedná o tři (otočená po 120°, viz. obrázek 2.6) nebo čtyři (otočená po 90°) kola, přičemž každé má svůj vlastní řízený pohon.

Směr a rychlost pohybu je dána vektorovým složením obvodových rychlostí jednotlivých kol (obrázek 2.6) popsaných rovnicí

$$v_C = v_1 + v_2 + v_3, \quad (2.7)$$

kde $v_{1,2,3}$ jsou vektory obvodových rychlostí hnaných kol.

- Výhody: výborné manipulační vlastnosti, schopnost otočení kolem osy robotu.
- Nevýhody: problém konstrukce všesměrových kol, komplikovanější způsob řízení.



Obrázek 2.6: Podvozek s všesměrovými koly.

2.1.7 Porovnání jednotlivých koncepcí

Na základě srovnání výše uvedených uspořádání kolových podvozků z hlediska konstrukční náročnosti provedení, manipulačních vlastností a řízení, lze provést výběr konkrétní koncepce. Z hlediska konstrukčního je srovnání od nejjednodušší koncepce:

1. jednokolová,
2. Ackermanova,
3. diferenční,
4. synchronní,
5. s všesměrovými koly.

Z hlediska manipulačních vlastností je srovnání od koncepce s největším pokrytím a dynamikou v rovině:

1. s všesměrovými koly,
2. synchronní,
3. diferenční,
4. Ackermanova společně s jednokolovou.

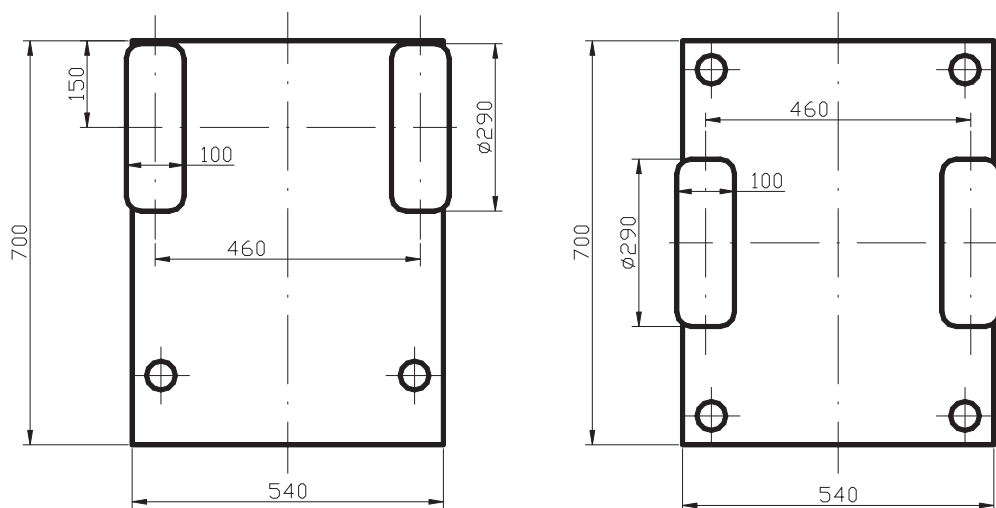
Z hlediska řízení s možným přímým určením polohy vychází srovnání od nejsnadnějšího způsobu u koncepce:

1. diferenční,
2. synchronní,

3. Ackermanova společně s jednokolovou,
4. s všesměrovými koly.

Nejlépe z těchto srovnání celkově vychází koncepce s diferenčním principem řízení. Na obrázku 2.7a je zobrazeno původní řešení konstrukce umístěné v laboratoři inteligentních robotů, které lze v mnoha směrech zlepšit.

Nákres na obrázku 2.7b poskytuje současné schéma podvozku, které bylo po dohodě se školitelem přestavěno z původního řešení. Takto upravený podvozek zmenšuje potřebný manipulační prostor a zlepšuje pohybové vlastnosti, jež jsou shodné při pohybu vpřed i vzad, neboť se ztotožnila poloha geometrického a hmotného středu podvozku. Díky této přestavbě jsme získali totožnou koncepci s diferenčním principem řízení, která byla uvedena na obrázku 2.4.

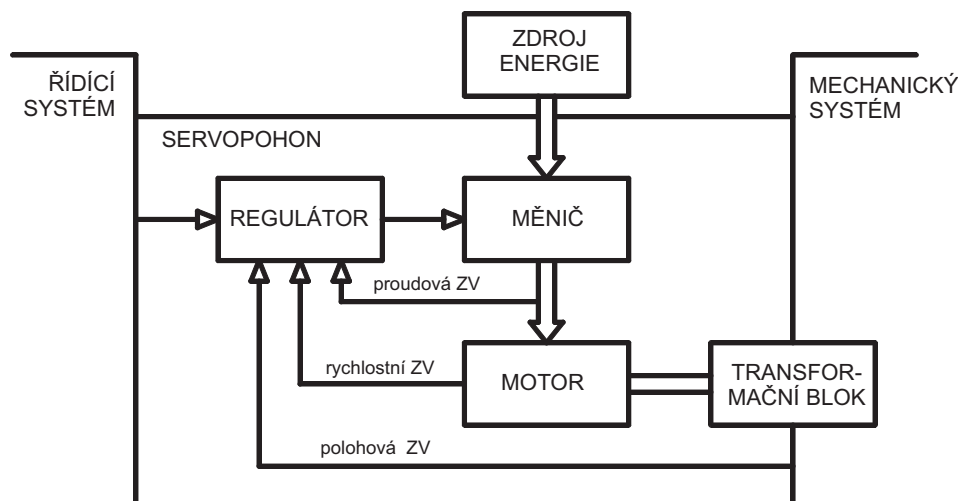


Obrázek 2.7: a) Původní schéma podvozku v laboratoři inteligentních robotů. b) Současné schéma.

2.1.8 Návrh elektrického pohonu

Na základě vybrané kolové koncepce lokomočního ústrojí je třeba navrhnout dva shodně řízené elektrické pohony (servopohony). Obecné schéma servopohonu je na obrázku 2.8.

Servopohon je složen z motoru, z výkonového měniče, snímačů zajišťujících zpětné vazby, regulátoru a v některých případech, pokud není motor přímo napojen na mechanismus, je součástí i mechanický transformační prvek (nejčastěji převodovka). Servopohon sám o sobě nemůže pracovat bez napojení na zdroj energie a systém řízení. Vyjmenované části mohou být realizovány diskrétně, současný trend konstrukce servopohonu však vede k integraci všech jeho částí do jednoho pláště (fy. Maxon, Siemens, Control Techniques, Berger Lahr, Lenze, ...).



Obrázek 2.8: Obecné schéma servopohonu.

2.1.9 Elektrické motory a převodovky

Jádrem servomechanismu je motor, v našem případě elektrický. V mobilní robotice se používají v převážné většině stejnosměrné a krokové motory. Pro náš účel lze hned na začátku vyloučit krokové motory, neboť nejsou vhodné pro dynamicky neurčitý provoz, jakým by byl pohon kol diferenčně řízeného robotu takových rozměrů.

Stejnosměrný motor je doposud jedním z nejpoužívanějších motorů nasazovaných do regulačních pohonů. Jeho otáčky je možno měnit buď napětím kotvy (nejčastější) nebo magnetickým tokem. Lze ho provozovat se značným rozsahem řízení ve všech čtyřech kvadrantech $\omega(M)$. Nevýhodou je existence mechanického komutátoru, u kterého dochází k opotřebení. Existují však stejnosměrné motory s elektronickou komutací, u nichž k problému opotřebení nedochází. Jejich systém řízení je ale poměrně náročný.

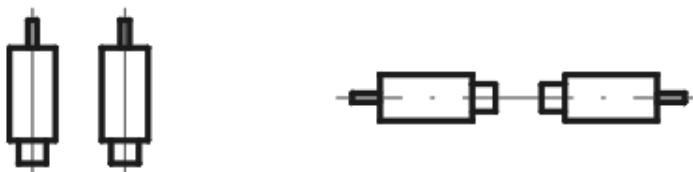
K mechanické transformaci otáček motoru lze použít ozubené (převodovky) nebo řetězové převody nebo ozubené řemeny. Konkrétní výběr závisí na konstrukčním uspořádání v dané aplikaci. Obrázek 2.9 naznačuje dvě možnosti, jak ve vybrané kolové koncepci uložit motory.

Na obrázku 2.9a je radiální uložení motorů vůči ose kol. To předpokládá transformační prvek, jehož výstupní hřídel bude pootočená vůči vstupní o 90° . V tomto případě lze uvažovat o šnekové převodovce, či kuželovém soukolí. Vlastnosti obou se poměrně liší. Mezi výhody šnekové převodovky patří dosažení velkých převodových poměrů¹ při poměrně malých rozměrech. Naopak nevýhodou je její nízká účinnost. U kuželových soukolí, ač mají vysokou účinnost, nedosáhneme velkých převodových poměrů při zachování malých rozměrů.

Axiální uložení, jak ho popisuje obrázek 2.9b, je konkrétním případem sousedního uložení. V tomto případě může být transformačním prvkem planetová, harmonická nebo cykloidní převodovka. U všech lze dosáhnout velkých převodových poměrů při velkých účinnostech. Díky malým rozměrům se často integrují do plášťů motorů, jak bylo zmíněno výše. Axiální

¹převodový poměr = $\frac{\text{vstupní otáčky}}{\text{výstupní otáčky}}$

uložení může být dále řešeno jako rovnoběžné. Zde by se pak uplatnila čelní ozubená soukolí, řetězové nebo řemenové převody.



Obrázek 2.9: a) Radiální uložení, b) Axiální uložení motoru vůči ose kol.

Na současném podvozku jsou umístěny dva stejnosměrné motory ATAS P2SZ447 s cizím buzením permanentními magnety s parametry, viz tabulka 2.1.

Jmenovité napětí U_n	24 V
Jmenovitý výkon P_{mech}	200 W
Jmenovité otáčky n_n	3000 min^{-1}
Jmenovitý proud I_n	10.5 A

Tabulka 2.1: Štítkové údaje motoru ATAS P2SZ447.

Uložení motoru radiálním způsobem je (obrázek 2.9a) s mechanickým spojením s níže popsányými šnekovými převodovkami. Použití motoru, jak uvádí výrobce [3], je pro všeobecné účely. Motor však neumožňuje připevnění čidla otáček k plášti z druhé strany, než je vyvedena hnací hřídel, čímž se při nevhodné volbě převodovky zamezí přímému snímání otáček na motoru a zkomplikuje se rychlostní regulace.

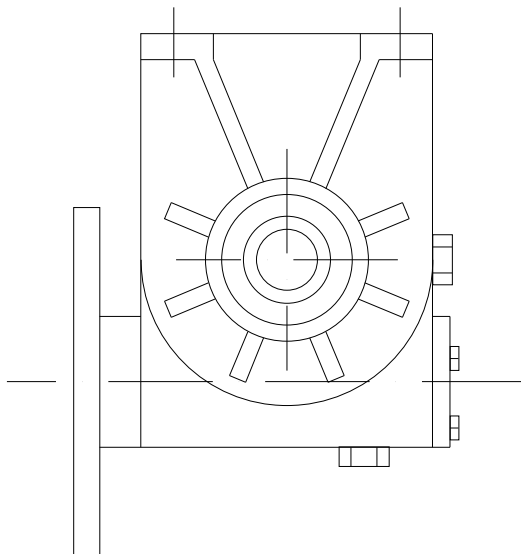
Použitým transformačním blokem jsou šnekové převodovky RMI 28 S firmy STM S.p.A. [4] (viz obrázek 2.10) s převodovými poměry $G = 100$ a účinností nepřesahující hodnotu 40 %. Tento typ převodovky s vyvedeným hřídelem na převodovce umožňuje nepřímé snímání otáček na jednotlivých kolech mobilního robotu. Dané řešení umožňuje přesnější určení polohy mobilního robotu, než v případě přímého snímání otáček na motoru, kde se mohou po transformaci pohybu objevit nepřesnosti spojené s vůlemi šnekové převodovky. Další výhodou je snadnější výpočet polohy mobilního robotu. Na druhou stranu se mohou vyskytnout problémy při regulaci nižších otáček pohonu, které se dají snadno odstranit použitím přesnějších čidel ve zpětné vazbě.

2.1.10 Snímače pro zpětné vazby

V obecném schématu servopohonu (obrázek 2.8) jsou uvedeny tři typy zpětných vazeb – proudová, polohová a rychlostní.

Proudová zpětná vazba se používá u servopohonu v případě požadavku řízení momentu motoru (obráběcí stroje) nebo při požadavku sledování velikosti proudu a jeho případného omezení (proudová pojistka). V našem případě nemá regulace momentu opodstatnění, ale o druhém využití lze uvažovat.

K zajištění polohové nebo rychlostní zpětné vazby rotačního pohybu lze použít řady čidel pracujících na různých principech. Rozhodli jsme se použít snímače pracující na



Obrázek 2.10: Převodovka RMI 28 S.

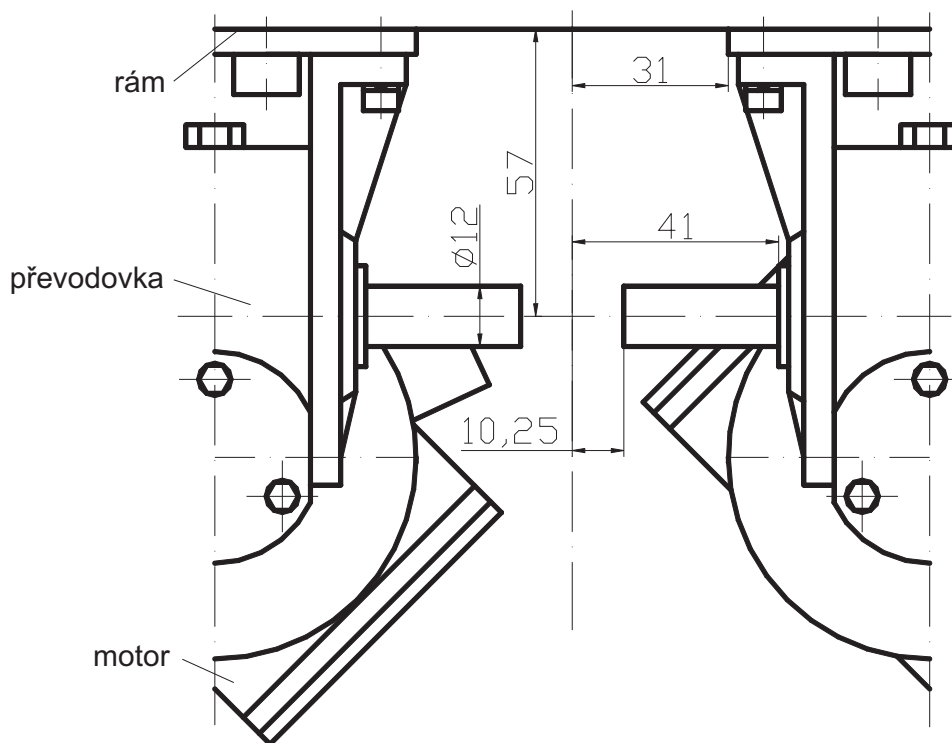
fotoelektrickém principu. Jedná se o inkrementální rotační snímače (IRC), které umožňují snímání polohy nebo rychlosti.

Na obrázku 2.11 je detailní náčrt prostoru, kam můžeme čidlo v našem případě umístit. Z rozměru je jasné, že výběr bude značně omezen. Bude se tedy jednat o výběr inkrementálních rotačních čidel s dutou hřídelí o průměru 12 mm a tloušťce max. 41 mm. Ta však představuje teoretickou hodnotu. Ve skutečnosti je třeba počítat s tloušťkou přípravku, na které snímače připevníme, neboť v převodovkách nejsou žádné k tomu určené otvory. Prostor se tím ještě více zúží.

Enkodér, který by rozměrově vyhovoval má ve svém výrobním programu firma Agilent Technologies (bývalý Hewlett Packard). Jedná se o optické kolečko HEDM-6120T13 a snímací modul HEDS-9000T00 [5]. Jedná se o snadno namontovatelný enkodér s rozlišením 2048 pulzů na otáčku s TTL úrovní výstupu.

2.1.11 Návrh měniče a regulátoru servopohonu

Měnič a regulátor servopohonu, které jsou uvedeny v obecném schématu servopohonu (obrázek 2.8), společně zajišťují řízení stejnosměrného (SS) pohonu. Měniče pro SS pohony se nejčastěji realizují pomocí H-můstků, tak je to i v našem případě. S přihlédnutím na parametry pohonů, viz tabulka 2.1 jsme vybrali můstky *ICON H-Bridge* firmy Solutions Cubed, jež umožňují připojení motoru s maximálním napájecím napětím 40V s trvalým proudem 12A, což pro naše účely zcela vyhovuje. Stejná firma dodává regulátor servopohonu *ICON PID Position Controller*, který je plně kompatibilní s použitou výkonovou jednotkou. Umožňuje připojení vybraného typu enkodéru pracující s danou logikou signálů. Komunikace s řídicím systémem je zajištěna pomocí sériového rozhraní. Samozřejmostí je polohové a rychlostní řízení otáček motoru.



Obrázek 2.11: Rozměrový nákres prostoru pro uložení IRC.

2.2 Návrh řídicího systému mobilního robotu

Řídicí systém tvoří jednu z nejdůležitějších částí architektury mobilního robotu. Dochází zde ke zpracování informací z vnitřních a z vnějších čidel sensorického subsystému. Dále pak zajišťuje komunikaci se vzdáleným řídicím systémem, ve kterém probíhají náročnější operace spojené například s mapováním prostředí a rozpoznáváním scény okolního prostředí robotu. Na základě řídicích algoritmů je ovládán motorický subsystém robotu, jehož návrh jsme si uvedli v kapitole 2.1. Návrh koncepce řídicího systému se odvíjí od požadavků kladených na jednotlivé funkce robotu, které musí být při vlastní realizaci tohoto systému zahrnuty a v našem případě **musí** korespondovat s cíly disertační práce.

Požadavky kladené na řídicí systém robotu:

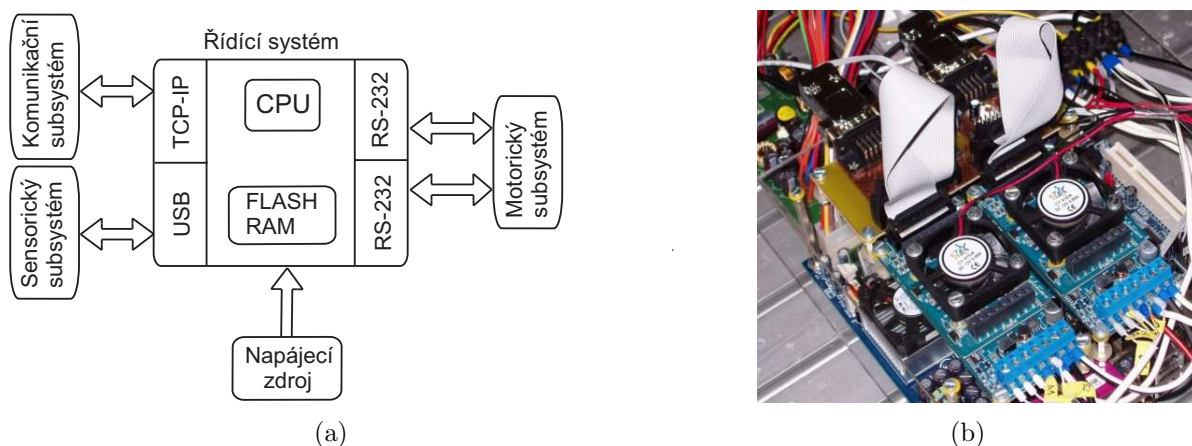
1. Příjem a zpracování sensorických dat z ultrazvukového subsystému.
2. Příjem a zpracování informací z IRC snímačů.
3. Nezávislé řízení servopohonů na základě koncepce s diferenčním způsobem řízení.
4. Komunikaci se vzdáleným řídicím systémem.

2.2.1 Návrh řídicího systému robotu z hlediska HW vybavení

Při návrhu HW části řídicího systému vyjdeme z požadavků uvedených v předchozí kapitole 2.2. Návrhu sensorického subsystému je věnována kapitola 5 a ke komunikaci s jeho řídicí částí je použito USB rozhraní. Řízení servopohonů a příjem informací z

IRC snímačů probíhá prostřednictvím dvou nezávislých sériových rozhraní RS-232. Ke komunikaci se vzdáleným řídicím systémem je použito standardu TCP/IP.

Námi vybraný řídicí systém robotu musí obsahovat požadované komunikační rozhraní uvedené v předchozí části textu, dále musí disponovat dostatečným výkonem a velikostí operační paměti. Na následujícím obrázku 2.12a je uvedeno blokové schéma použité koncepce řídicího systému. Na obrázku 2.12b je uveden reálný řídicí systém ještě ve stádiu vývoje, který byl později uzavřen do kovového šasi.



Obrázek 2.12: a) Blokové schéma koncepce řídicího systému z pohledu HW vybavení. b) Reálný řídicí systém mobilního robotu.

Jako řídicí systém robotu byla vybrána *VIA EPIA mini-ITX*, která splňovala veškeré požadavky kladené na HW zařízení.

2.2.2 Návrh řídicího systému robotu z hlediska SW vybavení

Při výběru vhodného SW vybavení řídicího systému robotu musíme vyjít z návrhu popsaného v kapitole 2.2.1. Operační systém musí splňovat požadavky kladené na real-time systémy (RTOS), tj. přesné řízení událostí ve stovkách mikrosekund. Samozřejmostí je paralelní zpracování více úloh najednou. Při výběru systému jsme vzhledem k finančním požadavkům vyloučili platformy OS firmy Microsoft. Jediným a správným řešením byla volba volně dostupného systému Linux, který byl dále rozšířen o real-time funkce instalací SW balíčku Xenomai.

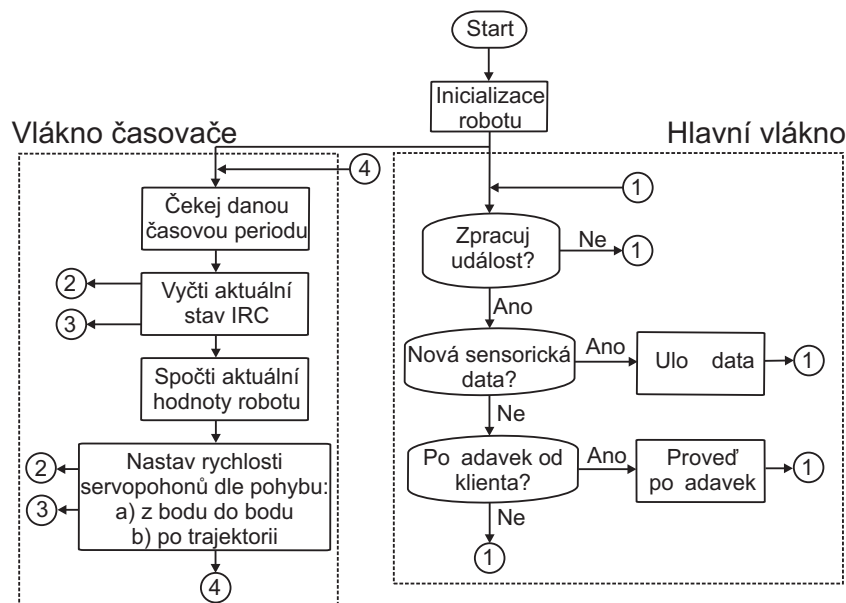
Xenomai: Real-Time systém pro Linux

Xenomai je real-time vývojový systém spolupracující s jádrem Linuxu. Poskytuje hard real-time podporu aplikacím v uživatelském prostoru, který je uceleně integrován v prostředí GNU/Linux. Technologie Xenomai umožňuje vývojářům aplikací jednoduše včlenit podporu RTOS bez nutnosti přepisu celého zdrojového kódu.

2.2.3 Popis SW pro řídicí systém mobilního robotu

Řídicí SW mobilního robotu je postaven na OS Linux s podporou reálného času, jak bylo zmíněno v kapitole 2.2.2. Na obrázcích 2.13 a 2.14 jsou uvedena bloková schémata

struktury řídicího programu skládající se celkem ze 4 vláken.



Obrázek 2.13: Blokové schéma koncepce řídicího systému z pohledu SW vybavení - hlavní vlákno, vlákno časovače.

V hlavním vlákne programu je nejprve provedena inicializace robotu, kde se postupně inicializuje počáteční nastavení servopohonů, časovače, rozhraní pro vzdálené řízení a rozhraní ultrazvukového systému. Hlavní vlákno přijímá z klientské aplikace vzdáleného řídicího systému následující požadavky:

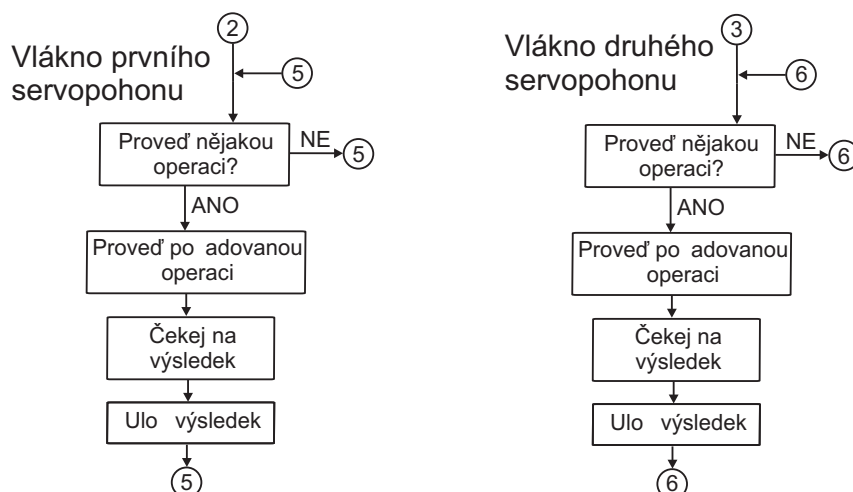
1. Připojení na serverovou část řídicího systému robotu.
2. Pohyb robotu z bodu do bodu či po dané trajektorii.
3. Vyčtení vnitřních a vnějších stavů snímače.

Klientská aplikace bude popsána v následující kapitole. Vlákno časovače na základě aktuálních informací z vnitřních stavů snímače vypočte aktuální hodnoty robotu (poloha, rychlost) s periodou 20 ms. Se stejnou periodou jsou nastaveny požadované hodnoty otáček jednotlivým servopohonům na základě vybraného způsobu řízení z bodu do bodu nebo po dané trajektorii. S požadavkem vyčtení aktuálního stavu IRC nebo nastavení požadované hodnoty otáček se spustí současně dvě vlákna uvedená na obrázku 2.14, označené na obrázku 2.13 čísly 2 a 3, pro obsluhu sériových rozhraní připojených k řídicím jednotkám servopohonů. Díky podpoře systému s reálným časem jsou oba servopohony obslouženy takřka ve stejném okamžiku.

Přesnost obsluhy servopohonů s výše uvedenou periodou časování se pohybovala v rozmezí $\pm 10 \mu s$, což považuji za výborný výsledek.

Základní funkce SW pro řídicí systém robotu jsou:

1. Rychlostní a polohové řízení DC motorů pomocí sériové komunikace RS232.
2. Komunikaci se sensorickým systémem robotu pomocí USB portu.



Obrázek 2.14: Blokové schéma koncepce řídicího systému z pohledu SW vybavení - vlákno prvního a druhého servopohonu.

3. Komunikaci se vzdáleným řídicím systémem přes protokol TCP/IP.
4. Výpočet aktuální polohy, rychlosti robotu včetně korekce systematických chyb.
5. Řízení pohybu robotu z bodu do bodu nebo po dané trajektorii s respektováním rychlosti.

Problematicke řízení pohybu po dané trajektorii se budeme podrobněji věnovat v kapitole 4.

2.2.4 Popis klientské aplikace běžící na vzdáleném řídicím systému robotu

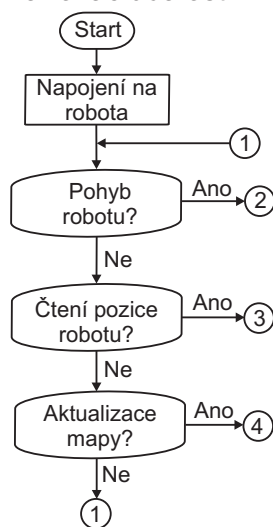
Klientská aplikace byla vytvořena pro potřeby reprezentace okolí mobilního robotu, které budou věnovány postupně kapitoly 6, 7, 8 a 9. Aplikace byla napsána v prostředí Visual Studio 2005 firmy Microsoft v jazyce C++ a umožňuje následující funkce:

1. Spojení se serverovou částí řídicího systému mobilního robotu.
2. Vyčtení aktuálních hodnot robotu - poloha, úhel natočení.
3. Vykreslení okolního prostředí robotu na základě informací z vnějších čidel ultrazvukového subsystému.
4. Řízení pohybu robotu z bodu do bodu či po dané trajektorii.
5. Plánování cesty pohybu robotu na základě požadavků uživatele.

Komunikace mezi klientskou částí a řídicím systémem robotu probíhá pomocí speciálního protokolu. Na obrázcích 2.15 a 2.16 jsou uvedena bloková schémata klientské aplikace.

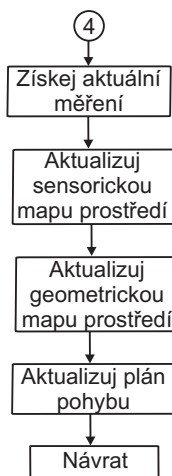
Hlavní vlákno *plánovače událostí* provádí vyčtení aktuální polohy robotu, získání aktuálního sensorického měření a nastavení pohybu robotu. Požadované akce jsou vykonávány v oddělených vláknech dle potřeb konkrétní aplikace.

Plánovač událostí



(a)

Aktualizace mapy



(b)

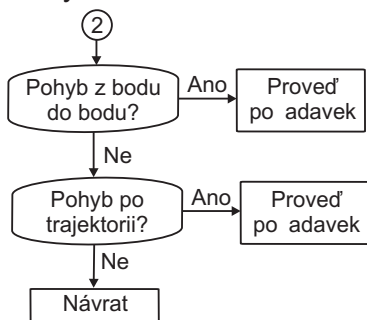
Obrázek 2.15: Blokové schéma klientské aplikace a) plánovač událostí, b) aktualizace mapy.

Vlákno *aktualizace mapy* získá s periodou 200 ms aktuální sensorické měření, na základě kterého se provede aktualizace sensorické mapy. Následně je aktualizována geometrická mapa prostředí, která je použita pro plánování trajektorie pohybu robotu.

Vlákno *pohyb robotu* provádí požadované akce spojené s plánováním pohybu robotu. Jedná se buď o pohyb z bodu do bodu, nebo pohyb po předepsané trajektorii s respektováním dané rychlosti.

Vlákno *čtení pozice robotu* čte aktuální polohu a úhel natočení robotu, která jsou vypočtena v řídicím systému na základě odometrie robotu.

Pohyb robotu



(a)

Čtení pozice robotu

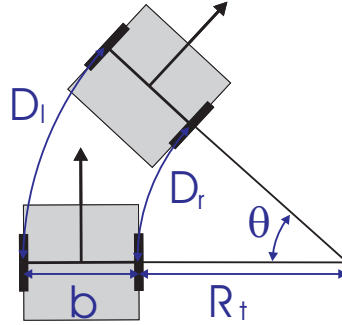


(b)

Obrázek 2.16: Blokové schéma klientské aplikace a) pohyb robotu, b) čtení pozice robotu.

3 Odometrie mobilního robotu

Odometrie je proces, který popisuje transformaci dat poskytnutých enkodéry na změnu pozice a orientace robotu. Základem odometrie je znalost geometrického modelu robotu [1]. Součástí regulační smyčky stejnosměrného servopohonu bývá nejčastěji inkrementální rotační snímač (IRC), stejně tomu je i v našem případě. Rozlišení snímače je dáno celkovým počtem rysek na kolečku a má podstatný vliv na celkovou přesnost polohové a rychlostní regulace servopohonu. Pomocí změny stavu přírůstků inkrementálních snímačů levého a pravého kola a kinematických vlastností robotu lze stanovit relativní polohu mobilního robotu. Náš mobilní robot používá diferenční způsob řízení a poloha jeho geometrického středu je totožná s hmotným středem, viz obrázek 2.7b. Při výpočtu odometrie dostaneme kartézský souřadný systém vztažený ke středu robotu (x, y) a dále pak úhel θ odpovídající natočení podélné osy robotu vůči ose y . Na obrázku 3.1 je znázorněna trajektorie pohybu robotu po obloukové dráze.



Obrázek 3.1: Schéma pro výpočet odometrie mobilního robotu.

K výpočtu ujeté vzdálenosti středu robotu použijeme následující vztah

$$D = \frac{D_l + D_r}{2}, \quad (3.1)$$

kde D_l a D_r je ujetá vzdálenost levého a pravého kola. Dané vzdálenosti určíme na základě těchto vztahů

$$D_l = \frac{2\pi r}{P} \cdot n_l \quad (3.2)$$

$$D_r = \frac{2\pi r}{P} \cdot n_r, \quad (3.3)$$

kde r je poloměr kola robotu, P je počet pulsů na obvodu snímače a n_l , n_r je aktuální počet pulsů levého a pravého kola robotu. Z obrázku 3.1 vidíme, že vzdálenost D_l reprezentuje část obvodu kružnice o poloměru $b + R_t$ vyjádřenou vztahem

$$C_l = 2\pi(b + R_t), \quad (3.4)$$

kde C_l je část obvodu kružnice sledovaná levým kolem robotu, b je rozteč mezi koly robotu a R_t je poloměr obloukové dráhy. Dále platí následující vztah mezi ujetou vzdáleností D_l a obvodem kružnice C_l

$$\frac{D_l}{C_l} = \frac{\theta}{2\pi} \Rightarrow C_l = \frac{2\pi D_l}{\theta}. \quad (3.5)$$

Z rovnic (3.4) a (3.5) vyjádříme úhel θ

$$\theta = \frac{D_l}{b + R_t} \quad (3.6)$$

Obdobně kratší vzdálenost D_r reprezentuje část obvodu kružnice o poloměru R_t

$$C_r = 2\pi R_t, \quad (3.7)$$

kde C_r je část obvodu kružnice sledovaná pravým kolem robotu. Obdobně platí vztah mezi ujetou vzdáleností D_r a částí obvodu kružnice C_r

$$C_r = \frac{2\pi D_r}{\theta}. \quad (3.8)$$

Z rovnic (3.7) a (3.8) vyjádříme R_t

$$R_t = \frac{D_r}{\theta}. \quad (3.9)$$

Dosazením rovnice (3.9) do rovnice (3.6) dostaneme změnu úhlu natočení robotu

$$d\theta = \frac{D_l}{b + \frac{D_r}{\theta}} = \frac{D_l - D_r}{b}. \quad (3.10)$$

Pomocí triangulačních vztahů můžeme nyní vypočítat přírůstky robotu v jednotlivých osách

$$\Delta x = D \cos(\theta) \quad (3.11)$$

$$\Delta y = D \sin(\theta) \quad (3.12)$$

Integrací výše uvedených vztahů dostaneme relativní polohu mobilního robotu

$$\theta(t) = \theta(0) + \int_0^t \omega(t) dt \quad (3.13)$$

$$x(t) = x(0) + \int_0^t v(t) \cos(\theta(t)) dt \quad (3.14)$$

$$y(t) = y(0) + \int_0^t v(t) \sin(\theta(t)) dt, \quad (3.15)$$

kde ω představuje úhlovou rychlost a v výslednou (tečnou) rychlost mobilního robotu. Dále platí následující vztah pro úhlovou rychlost otáčení robotu kolem vlastní osy

$$\omega = \frac{r}{b}(\omega_l - \omega_r), \quad (3.16)$$

kde ω_l a ω_r jsou úhlové rychlosti levého a pravého kola robotu.

Úhlovou rychlost levého kola lze vyjádřit z počtu pulsů levého kola n_l za elementární čas dt

$$\omega_l = \frac{2\pi}{P} \cdot n_l \cdot \frac{1}{dt}. \quad (3.17)$$

Úhlovou rychlost pravého kola lze stejným způsobem vyjádřit z počtu pulsů pravého kola n_r

$$\omega_r = \frac{2\pi}{P} \cdot n_r \cdot \frac{1}{dt}. \quad (3.18)$$

Dosazením vztahů (3.17) a (3.18) do vztahu (3.16) dostaneme úhlovou rychlost vyjádřenou pomocí odvozené změny úhlu natočení robotu, viz vztah (3.10)

$$\omega(t) = \frac{D_l - D_r}{d} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{d\theta}{dt}. \quad (3.19)$$

Pro tečnou rychlost mobilního robotu platí

$$v = \frac{v_l + v_r}{2} = \frac{r}{2} \cdot (\omega_l + \omega_r). \quad (3.20)$$

Dosazením vztahů (3.17) a (3.18) do vztahu (3.20) dostaneme tečnou rychlost vyjádřenou pomocí vzdálenosti středu robotu, viz vztah (3.1)

$$v = \frac{1}{2} \cdot (D_l + D_r) \cdot \frac{1}{dt} = \frac{D}{dt}. \quad (3.21)$$

Výhodu odometrie lze spatřit v tom, že můžeme využít stávajících inkrementálních rotačních snímačů *nutných* pro správnou funkci servopohonů. Jedná se tedy o velmi levný způsob odměřování polohy mobilního robotu bez nutnosti dalších snímačů. Na druhou stranu nám poskytuje pouze krátkodobou přesnost, kterou lze aktualizovat s velkou frekvencí. Vztah pro výpočet polohy mobilního robotu je založen na předpokladu, že rotační pohyb kol lze převést na lineární pohyb. Daný předpoklad však platí jen v omezené míře. Může nastat extrémní situace, kdy jedno z kol mobilního robotu proklouzne. V taktovém případě dojde k výraznému zkreslení přesnosti polohy robotu. Přesnost odometrie je ovlivněna: *systematickými a nesystematickými* chybami měření, které si popíšeme dále.

3.1 Systematické chyby měření

Systematické chyby jsou způsobeny daným kinematickým uspořádáním robotu, který se odlišuje od ideálních parametrů uvažovaných při výpočtu polohy robotu [8]. Konkrétní chyby se odvíjí od daného uspořádání podvozku a většinou se s časem nemění, tudíž je lze detekovat a kompenzovat. Systematické chyby jsou způsobeny:

- Rozdílným průměrem jednotlivých kol.
- Průměrná hodnota kola se liší od skutečné.
- Nepřesné určení vzdálenosti rozvoru kol.

- Kola nejsou uložena v jedné ose.
- Nízká rozlišovací schopnost snímače.
- Nízká frekvence vyčítání stavu snímačů.

3.2 Nesystematické chyby měření

Nesystematické chyby nejsou způsobeny kinematickými vlastnostmi robotu. Jsou dány vlivem okolního prostředí, který na robotický systém působí během jeho jízdy. Hlavním zdrojem chyb jsou:

- Nerovná nebo kluzká podložka, po které se robot pohybuje.
- Vzorkování měřicího systému nepostačuje zaznamenat velké změny zrychlení.
- Předměty na podložce ovlivňující pohyb robotu.
- Smyk kola způsobený rychlým zatáčením.
- Změna průměru kola robotu při velkém zatížení.

Na hrubém povrchu s výraznými nerovnostmi jsou nesystematické chyby dominantním zdrojem odometrických chyb. Na druhou stranu, systematické chyby jsou nebezpečné zejména díky stálému navyšování. Na hladkých površích přispívají systematické chyby k odometrickým chybám mnohem více, než chyby nesystematické [9].

Nesystematické chyby je velmi obtížné detekovat a korigovat, jelikož se vyskytují v nepředvídatelných situacích. V porovnání se systematickými chybami jsou schopny během krátké doby způsobit značnou chybu mezi skutečnou a měřenou polohou. K eliminaci pouze některých nesystematických chyb (například prokluz kola) lze použít další vnitřní snímače: akcelerometry a gyroskopy [48].

3.3 Zpřesnění polohy robotu na základě lokalizačních metod

K potlačení vlivu systematických a nesystematických chyb lze úspěšně použít lokalizačních metod. Postupy pro vlastní lokalizaci (termín označovaný jako self-localization) lze rozdělit do dvou základních skupin:

- globální (absolutní) lokalizace
- kontinuální (lokální) lokalizace

Většina metod globální lokalizace je založena na předem známém prostředí, které může být modelováno například jednoduchým polygonem. Tento přístup je uveden v článcích [11] a [12]. Pro úlohy současné lokalizace a mapování (Simultaneous Localization and Mapping) se používají metody kontinuální lokalizace [10]. Základní charakteristikou tohoto přístupu je postupná korekce polohy mobilního robotu během jeho jízdy s využitím vnějších a vnitřních snímačů robotu. S problematikou kontinuální lokalizace úzce souvisí modelování okolního prostředí, ve kterém se mobilní robot pohybuje. Bez přesné lokalizace nejsme schopni zobrazit aktuální stav mapy. Na základě znalosti prostředí lze vykonávat

další úkoly: navigace, plánování cesty a bezkolizní pohyb. Modelováním okolního prostředí se budeme zabývat v samotné kapitole 6.

V naší práci se nebudeme zabývat problematikou lokalizace mobilního robotu. V další kapitole si uvedeme metody kompenzace systematických chyb.

3.4 Kompenzace systematických chyb

Kompenzace systematických chyb spočívá v měření odchylky polohy mobilního robotu během definované trajektorie. Určení skutečných (korigovaných) parametrů robotického systému probíhá tak, aby odchylka od skutečné polohy robotu byla minimální. U koncepce s diferenciálním řízením kol se vyskytují dva dominantní zdroje systematických chyb. Jedná se o rozdílné průměry kol a nepřesné určení vzdálenosti rozvoru kol, které označíme postupně symboly E_d a E_b . Dané chyby jsou jinak velké pro různé roboty a zpravidla neměnné během jeho jízdy. Pouze změna zatížení může kvantitativně ovlivnit jejich velikost. Rozdílný průměr kol se projevuje pouze při zatáčení, naproti tomu nepřesné určení rozvoru kol převážně při přímočarém pohybu [7]. Definujme vztah pro chybu E_d podle

$$E_d = \frac{d_R}{d_L}, \quad (3.22)$$

kde d_R a d_L jsou skutečné průměry pravého a levého kola. Nominální poměr mezi průměry kol je roven jedné. Definujme vztah pro chybu E_b

$$E_b = \frac{b_{actual}}{b_{nominal}}, \quad (3.23)$$

kde b je rozvor kol. Metoda popsaná v článku [7] eliminuje systematické chyby podle následujících kroků:

1. Získej sadu správně definovaných experimentálních jízd.
2. Proveď analýzu získaných dat.

Při experimentální jízdě je mobilní robot naprogramován k projetí 4 rohů čtverce o straně dlouhé 4 m. Trasa dovede robota zpět do výchozího bodu. Díky odometrickým a řídicím chybám neodpovídá tato pozice přesné výchozí poloze robotu. Během experimentu je třeba měřit absolutní pozici (x_{abs}, y_{abs}) před a po každé jízdě robotu za použití pevných bodů (zdí apod.). Tyto absolutní hodnoty jsou pak následně porovnány s polohou a natočením, které jsou vypočteny pomocí odometrie robotu. Tím dostaneme soubor chyb pozice robotu způsobených špatným výpočtem odometrie, které označíme Δx , Δy . Pak platí následující vztahy:

$$\Delta x = x_{abs} - x_{calc} \quad (3.24)$$

$$\Delta y = y_{abs} - y_{calc}, \quad (3.25)$$

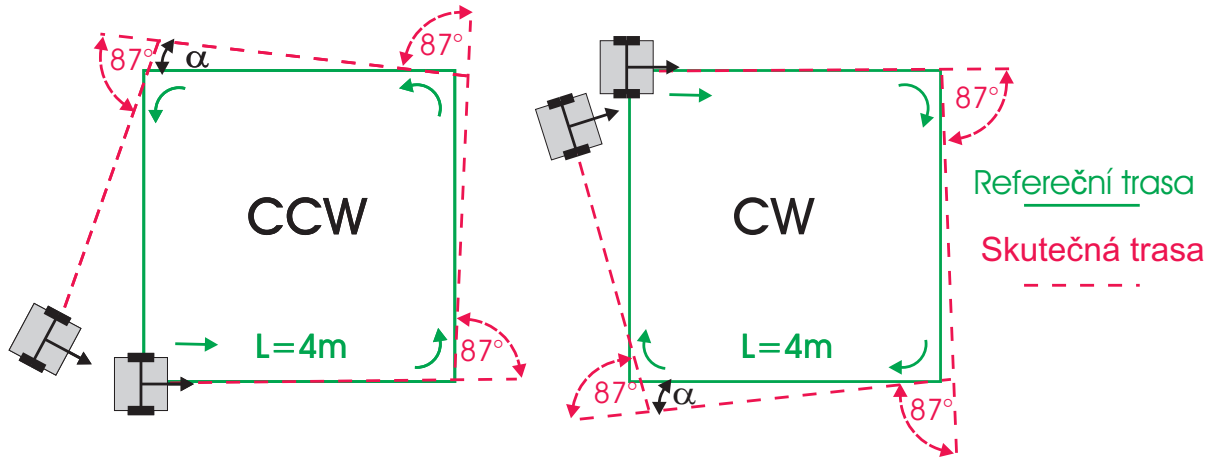
kde (x_{calc}, y_{calc}) je poloha robotu vypočtená pomocí odometrie. Experimentální pohyb robotu a s ním spojené měření je vykonáno sedmkrát po směru hodinových ručiček a stejně tak i proti směru hodinových ručiček. V dalším textu budeme výraz po směru

hodinových ručiček označovat podle anglického výrazu *clockwise* symbolem *cw* a výraz proti směru hodinových ručiček podle *counter-clockwise* symbolem *ccw*. Po skončení experimentu budeme mít celkem sedm sad chyb pro směr *cw* a sedm sad pro směr *ccw*, které označíme $(\Delta x_{i,cw/ccw}, \Delta y_{i,cw/ccw})$. Pro každou sadu měření *cw* a *ccw* vypočteme průměrné hodnoty podle vztahů (3.26) a (3.27). Průměrování odstraňuje vliv nesystematických chyb, které způsobují rozptřené hodnoty chyb v jednotlivých sadách měření.

$$\Delta x_{M,cw/ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_{i,cw/ccw} \quad (3.26)$$

$$\Delta y_{M,cw/ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta y_{i,cw/ccw} \quad (3.27)$$

Existují dva typy chyb, které označíme symboly *typ A* a *typ B*.



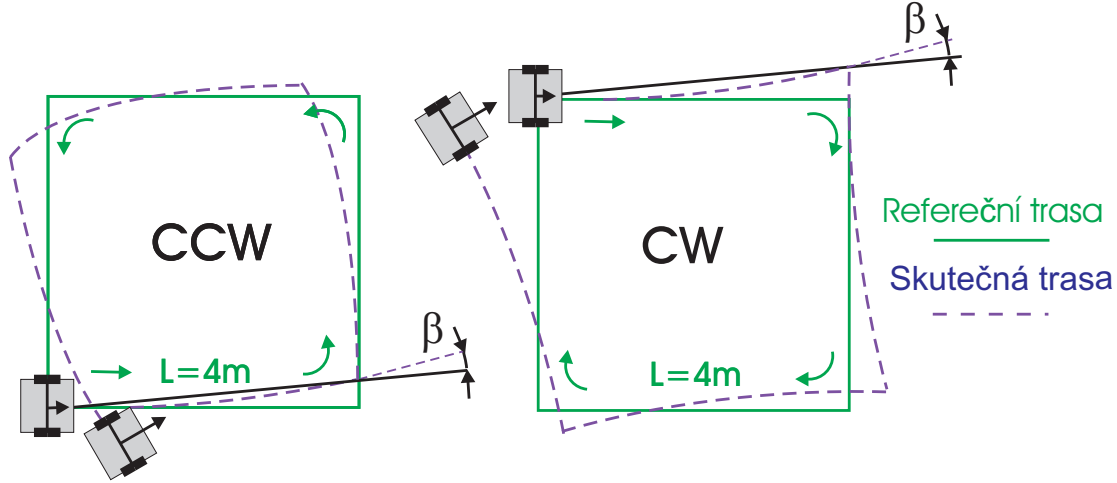
Obrázek 3.2: Chyba typu A vzniklá při průjezdu mobilního robotu po čtvercové trajektorii ve směru jízdy *cw* a *ccw*.

Chyba *typu A* zmenšuje (zvětšuje) výsledné natočení robotu během čtvercového pohybu v obou směrech jízdy *cw* a *ccw*. Tato chyba je způsobena převážně systematickou chybou E_b a způsobuje buď přetočení nebo nedotočení při čtvercovém pohybu, jak je patrné z obrázku 3.2. Neznámou chybu rotace od nominální hodnoty 90° označíme úhlem α .

Chyba *typu B* zmenšuje (zvětšuje) výsledné natočení robotu během čtvercového pohybu v jednom směru, ale zvětšuje (zmenšuje) výsledné natočení ve druhém směru pohybu robotu, jak je patrné z obrázku 3.3. Daná chyba je způsobena převážně systematickou chybou E_d a způsobuje mírně zakulacenou kružnici místo přímého pohybu u čtvercové cesty. Protože se jedná o kružnicový pohyb, bude mít robot zesílenou chybu v orientaci, kterou označíme úhlem β .

Přesné odvození vztahů pro výpočet úhlů α a β je uvedeno v článku [7]. Dále uvedeme výsledné vztahy pro výpočet úhlu α .

$$\alpha = \frac{\Delta x_{M,cw} + \Delta x_{M,ccw}}{4L} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}, \quad (3.28)$$



Obrázek 3.3: Chyba typu B vzniklá při průjezdu mobilního robotu po čtvercové trajektorii ve směru jízdy cw a ccw.

kde L je velikost strany čtvercové cesty. Úhel β vypočteme podle vztahu

$$\beta = \frac{\Delta x_{M,cw} - \Delta x_{M,ccw}}{4L} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (3.29)$$

Poloměr zakřivení R způsobený chybou *typu B* lze vypočítat dle vztahu

$$R = \frac{L/2}{\sin(\beta/2)}. \quad (3.30)$$

Poměr mezi průměrem pravého a levého kola způsobuje místo přímého pohybu zakřivený pohyb po kružnici poloměru R a lze jej vypočítat podle vztahu

$$E_d = \frac{d_R}{d_L} = \frac{R + b/2}{R - b/2}. \quad (3.31)$$

Vztah (3.31) lze použít ke korekci chyby *typu B*, jak bude vysvětleno dále v textu. Podobně můžeme spočítat chybu E_b . Rozvor kol b je přímo úměrný aktuální hodnotě natočení a tedy můžeme použít následující vztah

$$\frac{b_{actual}}{90^\circ} = \frac{b_{nominal}}{90^\circ - \alpha} \Rightarrow b_{actual} = \frac{90^\circ}{90^\circ - \alpha} \cdot b_{nominal}. \quad (3.32)$$

Podle definice (3.23) dostáváme vztah

$$E_b = \frac{90^\circ}{90^\circ - \alpha}. \quad (3.33)$$

Korekce chyby E_b provedeme podle vztahu (3.33). Korekce chyby E_d je komplikovanější. Po vykonání experimentální procedury známe *aktuální* poměr průměrů kol $E_d = \frac{d_R}{d_L}$ z rovnice (3.31). Pokud použijeme kompenzační faktor, musíme si být jisti, že se nezmění průměrná hodnota průměru kol D_a . Ta zůstane nezměněna, pokud ji budeme pokládat za konstantní

$$D_a = \frac{d_R + d_L}{2}. \quad (3.34)$$

Řešením dvou lineárních rovnic (3.31) a (3.34) s dvěma neznámými d_R a d_L dostaneme vztahy

$$d_L = \frac{2}{E_d + 1} \cdot D_a, \quad (3.35)$$

$$d_R = \frac{2}{1/E_d + 1} \cdot D_a. \quad (3.36)$$

Nyní můžeme definovat dva kompenzační faktory

$$c_L = \frac{2}{E_d + 1}, \quad (3.37)$$

$$c_R = \frac{2}{1/E_d + 1}. \quad (3.38)$$

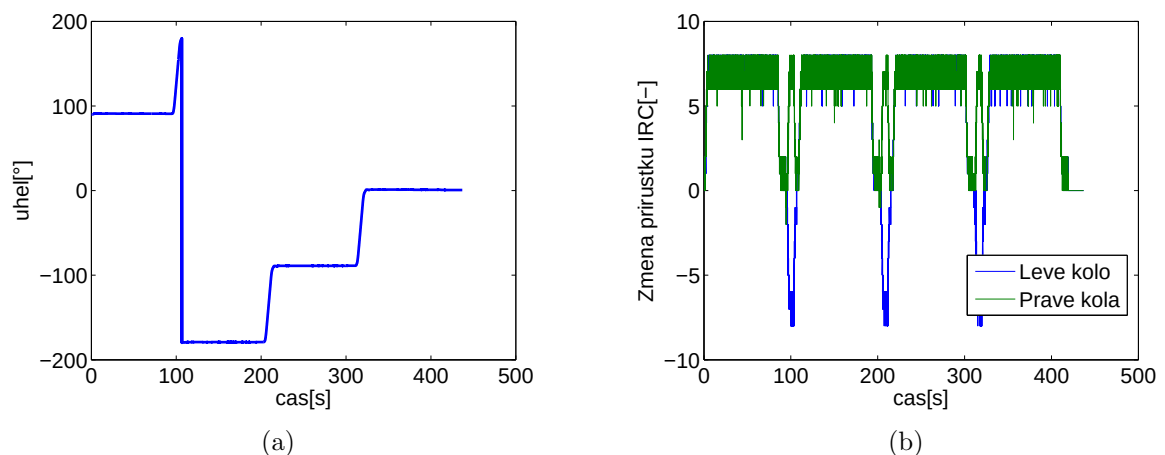
Dosažením kompenzačních faktorů do vztahů pro odometrii (3.2) a (3.3) dostaneme upravenou rovnici pro vzdálenosti levého a pravého kola robotu

$$D_l = \pi \frac{n_l}{P} c_L D_a, \quad (3.39)$$

$$D_r = \pi \frac{n_r}{P} c_R D_a. \quad (3.40)$$

3.5 Výsledky kompenzace na reálném systému robotu

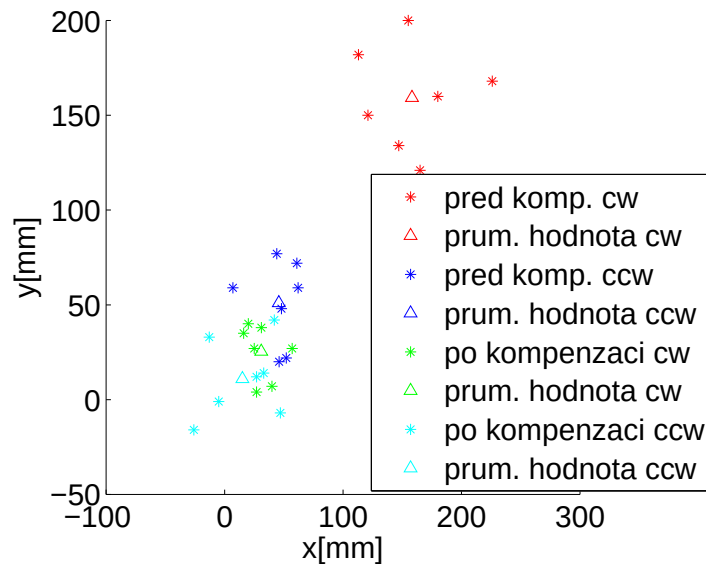
Polohu mobilního robotu určujeme ze změny natáčení jednotlivých kol dle dané koncepce systému s diferenčním způsobem řízení. Nesystematické chyby odometrie lze odstranit pouze s využitím vnějších čidel, jak bylo uvedeno v kapitole 3.3. Tento druh kompenzace však není předmětem této práce a nebudeme se jim dále zabývat. Pro naše účely si vystačíme s kompenzací systematických chyb. Daný postup byl uveden v předchozí kapitole 3.4.



Obrázek 3.4: a) Úhel, b) změna přírůstků levého resp. pravého kola mobilního robotu při jízdě po čtvercové trajektorii proti směru hodinových ručiček.

Postupně jsme uskutečnili celkem sedm sad měření proti a po směru hodinových ručiček. Pro tyto účely jsme zvolili referenční čtvercovou trajektorii o rozměru 4×4 m. Nejprve jsme provedli měření bez kompenzace systematických chyb, na jejichž základě byly vypočteny kompenzační koeficienty c_L a c_R eliminující chybu *typu B*. Dále pak zpřesňující parametr rozvoru kol b_{actual} eliminující chybu *typu A*. Pro porovnání dosažených výsledků jsme provedli stejná měření s použitými kompenzačními koeficienty a zpřesňujícím rozvorem kol.

Na obrázku 3.4 a) je znázorněn vypočtený úhel robotu získaný na základě odometrie při pohybu po čtvercové trajektorii o rozměru 4×4 m proti směru hodinových ručiček. Výchozí úhel robotu byl $\theta(0) = 90^\circ$. Pro stejnou trajektorii pohybu jsou znázorněny na obrázku 3.4 b) změny přírůstků (rychlost) levého resp. pravého kola IRC snímače vzorkovaných s frekvencí 50 [Hz]. V průběhu jízdy robotu nedocházelo k výraznějším odchylkám, které by mohly způsobit zneřádnění výsledné polohy mobilního robotu.



Obrázek 3.5: Chyba polohy mobilního robotu před kompenzací a po kompenzaci při jízdě po čtvercové trajektorii.

Při měření chyby polohy robotu se ve směru jízdy *cw* projevovala chyba *typu A* nedotáčením robotu. To bylo způsobeno špatným určením vzdálenosti rozvoru kol b . Dále se v tomto směru jízdy robotu projevovala chyba *typu B* zvětšením výsledného úhlu, kde průměr levého kola byl na reálném systému o něco menší než na pravém kole. Vlivem těchto dvou nepřesností došlo k sumaci výsledné chyby v orientaci robotu, jak je patrné z obrázku 3.5 a průměrná chyba polohy byla $(\Delta x_{M,cw}, \Delta y_{M,cw}) = (160, 160)$ mm. Ve směru jízdy robotu *ccw* způsobovala chyba *typu A* taktéž nedotáčení robotu. Naproti tomu chyba *typu B* zmenšovala výslednou chybu natáčení. Proto průměrná chyba polohy robotu $(\Delta x_{M,ccw}, \Delta y_{M,ccw}) = (46, 51)$ mm je v tomto případě daleko menší než v opačném směru jízdy.

Při použití kompenzačních koeficientů $c_L = 1.0013$ a $c_R = 0.9987$ s upraveným rozvorem kol z původní hodnoty $b_{nominal} = 472$ mm na korigovanou hodnotu $b_{actual} = 466$ mm došlo k výraznému zpřesnění polohy mobilního robotu. Průměrná chyba polohy

robotu ve směru *cw* byla $(\Delta x_{M,cw}, \Delta y_{M,cw}) = (31, 26)$ mm
a ve směru *ccw* $(\Delta x_{M,ccw}, \Delta y_{M,ccw}) = (15, 10)$ mm.

Kompenzací systematických chyb se nám výrazně zpřesnila skutečná poloha mobilního robotu vypočtená na základě jeho odometrie. Pomocí údajů vypočtených z odometrie můžeme nyní realizovat řízení pohybu robotu po dané trajektorii s respektováním rychlosti, kterým se budeme zabývat v další kapitole.

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. Uvedeme kinematický a dynamický model mobilního robotu včetně modelu stejnosměrného pohonu. Dále pak popíšeme dva způsoby zpětnovazebního řízení a odvození žádaných hodnot pohybu robotu pro jednotlivé zpětnovazební regulátory. Na závěr popíšeme optimalizační algoritmus pro nastavení parametrů použitých zpětnovazebních regulátorů.

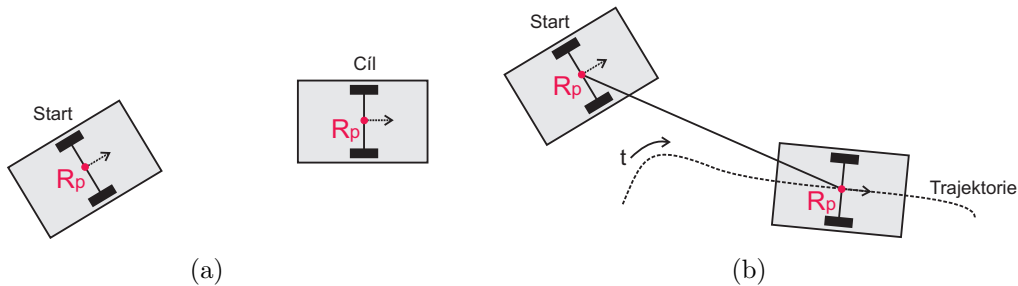
Základní úkoly pohybu mobilního robotu ve volném prostředí jsou:

- **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 kinematiky mobilního robotu

Nechť q je n -rozměrný vektor zobecněných souřadnic mobilního robotu. Dále předpokládáme systém s m -rozměrným vektorem řídicích vstupů u . Neholonomní systémy jsou popsány $n - m$ diferenciálními omezeními, které závisí na zobecněných rychlostech $\dot{q}$ ve formě

$$A(q)\dot{q} = 0. \quad (4.1)$$

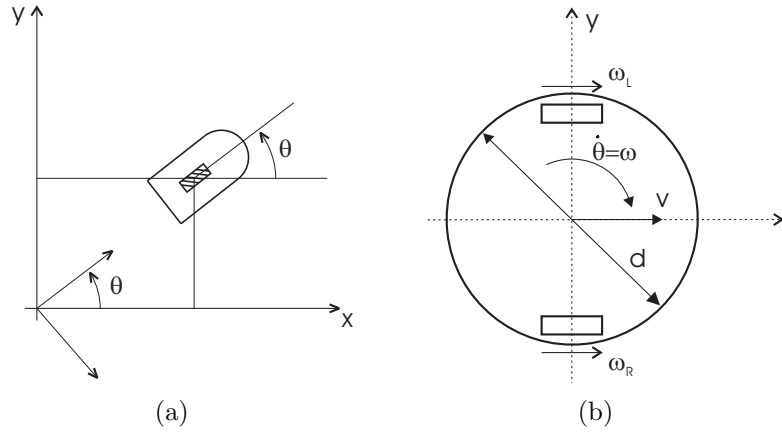
Matice $A(q)$ o rozměru $n \times 1$ je závislá na zobecněných souřadnicích. Pro kolové mobilní roboty vznikají daná omezení z pohybu kola robotu beze smyku. Ostatní skutečně proveditelné pohyby mohou být popsány podle vztahu

$$\dot{q} = G(q)u, \quad (4.2)$$

kde složky vektorů $g_i, i = 1, \dots, m$, v matici $G(q)$ o rozměrech $n \times m$ jsou vybrány tak, aby tvořily nulový prostor v matici $A(q)$. Rovnice (4.2) se nazývá kinematický model prvního řádu a reprezentuje nelineární systém.

Nejjednodušším modelem neholonomního mobilního robotu je jednokolka, která odpovídá samostatnému svisle uloženému kolu točícímu se na rovné ploše, viz obrázek 4.2a. Zobecněné souřadnice jsou $q = (x, y, \theta)$. Omezení, že kolečko nesmí dostat smyk v bočním směru jízdy je dáno na základě rovnice (4.1) podle následujícího vztahu

$$A(q)\dot{q} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = 0. \quad (4.3)$$



Obrázek 4.2: a) Model jednokolky. b) Model koncepce s diferenčním způsobem řízení.

Pak kinematický model robotu je dán rovnicí

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = g_1(q)v + g_2(q)\omega = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega, \quad (4.4)$$

kde tečná rychlost v a úhlová rychlost ω jsou předpokládány jako dostupné řídicí vstupy $u = (v, \omega)$. Takto koncipovaný model odpovídá našemu mobilnímu robotu s diferenčním způsobem řízení s dvěma poháněnými koly o poloměru r a hmotnosti m , viz obrázek 4.2b. Úhlová rychlost levého a pravého kola jsou označeny ω_L a ω_R . Tělo robotu představuje kruhový profil o průměru d a hmotnosti M .

Aktuální polohu mobilního robotu získáme integrací vztahu (4.4) a je dána vektorem

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

který obsahuje absolutní polohu robotu vztaženou k jeho referenčnímu bodu R_p a úhel θ určující směr pohybu robotu s respektováním x -ové osy. Pro výpočet jeho členů použijeme

vztahy (3.14), (3.15) a (3.13) uvedené v kapitole 3. Vzhledem k trigonometrickým vztahům potřebným k projekci tečné rychlosti do jednotlivých os, se jedná o nelineární systém. Vztahy mezi úhlovou rychlostí levého a pravého kola a tečnou a úhlovou rychlostí jsou odvozeny z modelu robotu, který předpokládá diferenční řízení. Tyto vztahy jsou dány následujícími rovnicemi

$$\omega = \dot{\theta} = \frac{r}{d}(\omega_L - \omega_R), \quad (4.6)$$

$$v = \frac{r}{2}(\omega_L + \omega_R). \quad (4.7)$$

4.2 Dynamický model robotu

Příslušné dynamické rovnice mobilního robotu mohou být odvozeny pomocí Lagrangeovy metody, která je založena na určení energie systému. Celkovou energii robotu lze spočítat jako součet kinetické energie těla robotu K_B a jednotlivých kol K_{W_1}, K_{W_2} podle vztahu

$$K = K_B + K_{W_1} + K_{W_2}. \quad (4.8)$$

Potenciální energie není uvažována za předpokladu pohybu robotu po rovné podložce. Každý z členů rovnice (4.8) bude obsahovat energii způsobenou lineárním a rotačním pohybem. Kinetickou energii těla robotu vypočteme podle vztahu

$$K_B = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}I_B\omega^2, \quad (4.9)$$

kde I_B představuje moment setrvačnosti těla robotu k jeho středu, M jeho hmotnost a v, ω jeho tečnou resp. úhlovou rychlost.

Kinetickou energii levého a pravého kola robotu vypočteme podle vztahu

$$K_{W_i} = \frac{1}{2}mv_i^2 + \frac{1}{2}I_W\omega_i^2, \quad i = 1, 2, \quad (4.10)$$

kde I_W představuje moment setrvačnosti jednotlivých kol robotu, m představuje jejich hmotnosti a v_i, ω_i jejich obvodové resp. úhlové rychlosti. Tělo a kola robotu jsou uvažovány jako pevná tělesa.

Moment setrvačnosti robotu se vypočte podle vztahu

$$I_B = \frac{1}{2}M(d/2)^2, \quad (4.11)$$

kde d představuje jeho průměr.

Moment setrvačnosti kola robotu se vypočte podle vztahu

$$I_W = \frac{1}{2}mr^2, \quad (4.12)$$

kde r představuje poloměr kola robotu. Dosazením vztahů (4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.6) a (4.7) do vztahu (4.8) dostaneme upravený výraz pro celkovou energii robotu

$$K = \left[\frac{3r^2}{16}(M + 4m) \right] (\omega_1^2 + \omega_2^2) + \left[\frac{Mr^2}{8} \right] \omega_1\omega_2. \quad (4.13)$$

Vztah mezi úhlovým zrychlením každého kola a kroutícím momentem je vyjádřen z rovnice (4.13) za použití vztahu

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \omega_i} K \right) - \frac{\partial}{\partial \omega_i} K. \quad (4.14)$$

Pokud dosadíme rovnici (4.13) do vztahu (4.14) a provedeme příslušné derivace dostaneme vztah mezi úhlovým zrychlením každého kola a kroutícím momentem

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{3r^2}{8}(M+4m) & \frac{Mr^2}{8} \\ \frac{Mr^2}{8} & \frac{3r^2}{8}(M+4m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

4.3 Model stejnosměrného pohonu

K tomu, abychom vytvořili kompletní model mobilního robotu je třeba vytvořit model stejnosměrného pohonu. Pohony musí být schopny dát potřebný kroutící moment pro požadovanou hodnotu zrychlení. Nyní uvedeme zjednodušené rovnice, které uvádějí ve vztah napětí působící na každém pohonu V_i , s požadovaným kroutícím momentem τ_i

$$L \frac{di_i}{dt} + Ri_i = V_i - K_m G \omega_i, \quad i = 1, 2 \quad (4.16)$$

$$\tau_i = G K_m i_i, \quad i = 1, 2, \quad (4.17)$$

kde L představuje elektrickou indukčnost kotvy motoru, R vnitřní odpor kotvy, K_m konstantu motoru, i_i elektrický proud i -tým pohonem a G reprezentuje poměr převodovky připojené ke každému pohonu.

Vstupními parametry pro stejnosměrné pohony jsou napětí V_1 a V_2 . Z rovnic (4.15), (4.16) a (4.17) vyjádříme výsledný dynamický model mobilního robotu. Úhlové rychlosti ω_i obou kol jsou řízeny přes zpětnou vazbu klasickým PID regulátorem.

4.4 Návrh nelineárního způsobu řízení

V této kapitole uvedeme jeden z nejjednodušších návrhů způsobu řízení pohybu robotu po dané trajektorii, který je založen na linearizaci podél referenční trajektorie [19].

Definujme vektor chyby stavů sledování trajektorie e podle vztahu

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \theta_d - \theta \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

kde (x, y, θ) , (x_d, y_d, θ_d) představují aktuální resp. požadované hodnoty stavů robotu. Pak nelineární transformaci vstupních rychlostí definujeme podle vztahu

$$\begin{aligned} v &= v_d \cos e_3 - u_1 \\ \omega &= \omega_d - u_2, \end{aligned} \quad (4.19)$$

kde (v, ω) , (v_d, ω_d) představuje aktuální resp. požadované hodnoty řídicích vstupů.

Za použití rovnice (4.19) dostaneme následující chybu dynamiky

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_d & 0 \\ -\omega_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} 0 \\ \sin e_3 \\ 0 \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

Linearizací rovnice (4.20) kolem referenční trajektorie dostaneme lineárně časově proměnné rovnice

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_d & 0 \\ -\omega_d & 0 & v_d \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

Nyní můžeme definovat lineární zpětnovazební předpis

$$\begin{aligned} u_1 &= -k_1 e_1 \\ u_2 &= -k_2 \operatorname{sign}(v_d(t)) e_2 - k_3 e_3. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Pak požadovaná charakteristická rovnice uzavřené smyčky, kterou dostaneme ze vztahů (4.20) a (4.22) je

$$(\lambda + 2\zeta\omega_o)(\lambda^2 + 2\zeta\omega_o\lambda + \omega_o^2), \quad \zeta, \omega_o > 0. \quad (4.23)$$

Rovnice obsahuje konstantní vlastní hodnoty ($\lambda_1 = -2\zeta\omega_o$ je záporná reálná λ_2, λ_3 jsou komplexně sdružené, s vlastní frekvencí $\omega_o > 0$ a tlumícím koeficientem $\zeta \in (0, 1)$), které lze vyjádřit volbou zesílení v rovnici (4.22) podle vztahů

$$k_1 = k_3 = 2\zeta\omega_o, \quad k_2 = \frac{\omega_o^2 - \omega_d(t)^2}{|v_d(t)|}. \quad (4.24)$$

Koeficient k_2 se blíží k nekonečnu, pokud $v_d \rightarrow 0$. Proto je důležité zvolit vhodné zesílení položením $\omega_o = \omega_o(t) = \sqrt{\omega_d^2(t) + cv_d^2(t)}$. Následně dostaneme upravené vztahy pro výpočet zesílení

$$k_1 = k_3 = 2\zeta\sqrt{\omega_d^2(t) + cv_d^2(t)}, \quad k_2 = c|v_d(t)|, \quad (4.25)$$

kde koeficient $c > 0$ je chápán jako další stupeň volnosti. Daná zesílení budou mít hodnoty blíží se k nule, pokud dojde k zastavení pohybu robotu vlivem ztráty říditelnosti. Pokud použijeme originální řídicí vstupy, pak tento návrh vede na nelineární časově proměnné řízení, které lze popsat následujícími rovnicemi

$$\begin{aligned} v &= v_d \cos(\theta_d - \theta) + k_1[(x_d - x) \cos \theta + (y_d - y) \sin \theta] \\ w &= w_d + k_2 \operatorname{sign}(v_d)[(x_d - x) \cos \theta - (y_d - y) \sin \theta] + k_3(\theta_d - \theta). \end{aligned} \quad (4.26)$$

Řídicí pravidlo popsané vztahem (4.26) nemusí vždy garantovat asymptotickou stabilitu stavové chyby sledování e , pokud jsou vlastní hodnoty uzavřené smyčky konstantní a obsahují zápornou reálnou část. To je způsobeno tím, že systém je neustále časově proměnný.

4.5 Návrh lineárního zpětnovazebního regulátoru

V této kapitole si uvedeme proces linearizace pro jednokolový model, viz obrázek 4.2a, který je detailně popsán v [14, 15]. Definujme linearizovaný výstupní vektor $\eta = (x, y)$, pak jeho derivací podle času dostaneme vztah

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (4.27)$$

Vektor $\dot{\eta}$ je závislý pouze na rychlosti v . Záměrně zde uvádíme úhlovou rychlost ω , která na tomto vektoru není závislá. Z tohoto důvodu je nutné přidat integrátor na vstupní rychlost

$$v = \xi, \quad \dot{\xi} = a \quad \Rightarrow \quad \dot{\eta} = \xi \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (4.28)$$

kde ξ je označován jako dynamický zpětnovazební kompenzátor. Dále zavádíme nový vstup a , který představuje zrychlení jednokolového systému. Derivací vektoru $\dot{\eta}$ dostaneme následující vztah

$$\ddot{\eta} = \dot{\xi} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + \xi \dot{\theta} \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\xi \sin \theta \\ \sin \theta & \xi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

Matice, která je vynásobená modifikovaným vstupem (a, ω) , je regulární za podmínky, že $\xi \neq 0$. Za tohoto předpokladu můžeme definovat vztah

$$\begin{bmatrix} a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\xi \sin \theta \\ \sin \theta & \xi \cos \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}. \quad (4.30)$$

Po další úpravě dostaneme rovnici

$$\begin{bmatrix} a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\frac{\sin \theta}{\xi} & \frac{\cos \theta}{\xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad (4.31)$$

kde jsme zavedli následující označení

$$\ddot{\eta} = \begin{bmatrix} \ddot{\eta}_1 \\ \ddot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = u. \quad (4.32)$$

Pak výsledný dynamický kompenzátor je vyjádřen vztahem

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= u_1 \cos \theta + u_2 \sin \theta \\ v &= \xi \\ \omega &= \frac{u_2 \cos \theta - u_1 \sin \theta}{\xi}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Pokud je dynamický kompenzátor jednodimensionální, pak celkový počet výstupních derivovaných veličin v rovnici (4.31) se rovná 4. Tudíž v novém systému souřadnic dostaneme rozšířený systém $z = T(q, \xi)$

$$\begin{aligned} z_1 &= x \\ z_2 &= y \\ z_3 &= \dot{x} = \xi \cos \theta \\ z_4 &= \dot{y} = \xi \sin \theta, \end{aligned} \quad (4.34)$$

který je plně linearizovaný v říditelné formě a je popsán pomocí dvou řídicích vstupů daných podle rovnice (4.32), který lze přepsat podle vztahu

$$\begin{aligned}\ddot{z}_1 &= u_1 \\ \ddot{z}_2 &= u_2.\end{aligned}\tag{4.35}$$

Zpětnovazební dynamický regulátor je popsán vztahem (4.33), má možnou singularitu v $\xi = v = 0$. Jedná se o případ, kdy jednokolka stojí. Při návrhu řízení, pro příslušný model robotu, musí být tento problém brán na zřetel. Předpokládejme, že robot musí sledovat hladkou výstupní trajektorii $(x_d(t), y_d(t))$, která je stálá, tj. nominální řídicí vstup $v_d = (\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2)^{1/2}$ podél celé trajektorie nikdy nebude směřovat k nule. Pro odpovídající lineární systém (4.35) potřebujeme navrhnout pro požadovanou trajektorii exponenciálně stabilní zpětnou vazbu definovanou podle vztahu

$$\begin{aligned}u_1 &= \ddot{x}_d(t) + k_{p1}(x_d(t) - x) + k_{d1}(\dot{x}_d(t) - \dot{x}) \\ u_2 &= \ddot{y}_d(t) + k_{p2}(y_d(t) - y) + k_{d2}(\dot{y}_d(t) - \dot{y}),\end{aligned}\tag{4.36}$$

pro kterou musí platit, že $k_{pi} > 0$, $k_{di} > 0$, pro $i = 1, 2$. Při aplikaci rovnice (4.36) mohou být rychlosti $\dot{x}$ a $\dot{y}$ vypočteny buď podle posledních dvou vztahů v rovnici (4.34) jako funkce stavu robotu a kompenzátoru ξ nebo mohou být určeny na základě odometrie robotu.

4.6 Model mobilního robotu s řídicí strukturou regulátoru

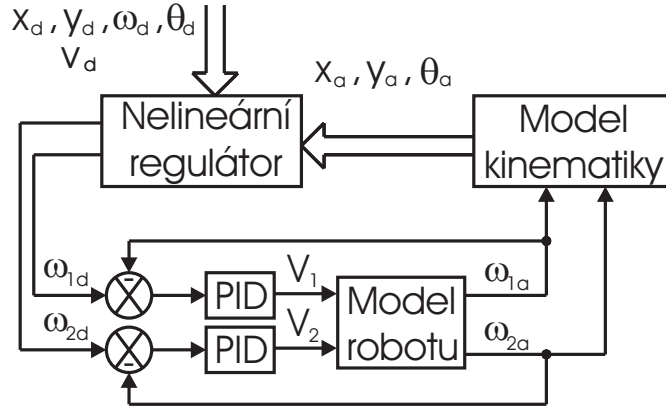
V této kapitole si nejprve uvedeme model mobilního robotu s koncepcí diferenčního způsobu řízení, který používá jako řídicí strukturu nelineární zpětnovazební regulátor (4.26) popsáný v kapitole 4.4. Výsledný model robotu je uveden na obrázku 4.3 a skládá se z dynamického modelu robotu (4.15) popsáného v kapitole 4.2 a modelu stejnosměrného pohonu (4.16) a (4.17) uvedeného v kapitole 4.3. 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 (4.4), popsáný v kapitole 4.1, 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} .

Návrhu lineárního regulátoru (4.33) jsme se věnovali v kapitole 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 4.4.

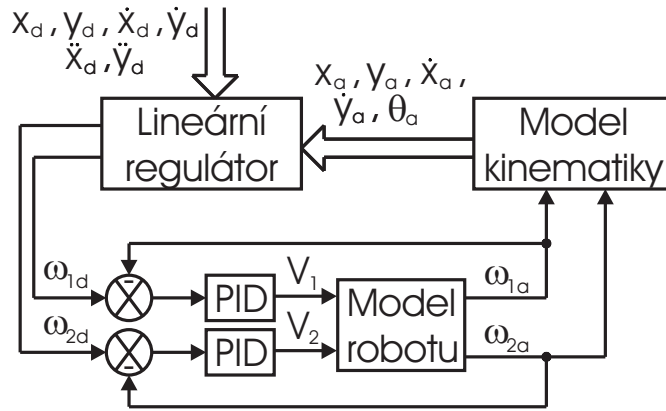
V další kapitole si uvedeme odvození žádaných hodnot pohybu robotu a popíšeme si metodu pro nalezení optimálních parametrů nelineárního regulátoru ς a c a lineárního regulátoru $k_{pi} > 0$, $k_{di} > 0$, pro $i = 1, 2$.

4.7 Odvození žádaných hodnot pohybu robotu

Vstupem zpětnovazebních regulátorů jsou žádané hodnoty pohybu robotu vztažené k souřadnicím (x, y) v kartézském souřadnicovém systému. V následující části textu



Obrázek 4.3: Model mobilního robotu s nelineárním zpětnovazebním regulátorem.



Obrázek 4.4: Model mobilního robotu s lineárním zpětnovazebním regulátorem.

uvedeme vztahy potřebné pro výpočet těchto hodnot z trajektorie pohybu robotu a jeho tečné rychlosti. Předpokládejme, že trajektorie pohybu robotu je definována podle funkce $y = f(x)$ a rychlost pohybu robotu je definována funkcí $v = v(t)$. Zavedeme následující označení. Tečka nad písmenem označuje derivaci v čase, zatímco čárka představuje derivaci podle proměnné x . Pro danou trajektorii pohybu platí následující vztah

$$\dot{y}' = \frac{dy}{dx}, \quad \dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = y' \dot{x}. \quad (4.37)$$

Délku trajektorie lze vypočítat z následujících vztahů

$$s(t) = s_0 + \int_0^t \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt \quad (4.38)$$

nebo

$$s(x) = s_0 + \int_0^x \sqrt{1 + y'^2} dx. \quad (4.39)$$

Rychlosti v jednotlivých směrech pohybu robotu se vypočtou podle následujících vztahů

$$\dot{x} = \frac{v}{\sqrt{1 + y'^2}} \quad (4.40)$$

a

$$\dot{y} = \dot{x}y'. \quad (4.41)$$

Integrací vztahů (4.40) a (4.41) dostaneme polohu robotu v čase t s respektováním definované trajektorie a rychlosti

$$x(t) = x_0 + \int_0^t \frac{v(t)}{\sqrt{1+y'^2}} dt \quad (4.42)$$

$$y(t) = y_0 + \int_0^t \dot{x}y' dt. \quad (4.43)$$

Pro druhé derivace, s respektováním času, dostaneme následující vztahy

$$\ddot{x} = \frac{\dot{v}}{\sqrt{1+y'^2}} - \frac{v^2 y' y''}{(1+y'^2)^2} \quad (4.44)$$

a

$$\ddot{y} = \ddot{x}y' + \dot{x}^2 y''. \quad (4.45)$$

Pro danou časovou sekvenci časů $t_0 = 0, t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_n$ musíme vypočítat sekvenci x_k , pro $k = 0, 1, 2, \dots, n$, tak, že $x(t_k) = x_k$, x_0 je dána jako počáteční hodnota. Z rovnice (4.40) dostaneme následující vztah

$$\Delta x = \frac{v \Delta t}{\sqrt{1+y'^2}} \quad (4.46)$$

a dále pro $\Delta x_k = x_{k+1} - x_k$ a $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ dostaneme upravený vztah

$$x_{k+1} = x_k + \frac{v(t_{k+1} - t_k)}{\sqrt{(1+y_k'^2)}}, \quad (4.47)$$

kde $y_k' = [dy/dx]_{x=x_k}$.

Předchozí rovnice (4.38) až (4.47) dovolují vypočítat polohu, rychlost, případně zrychlení středu robotu, na základě definované trajektorie a rychlosti v kartézském souřadnicovém systému x, y . Tyto hodnoty jsou označeny v rovnicích (4.26) resp. (4.36) indexem d .

4.8 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

$$J(\mathbf{p}) = g(\mathbf{p}) + \int_0^T F(t, \mathbf{p}, x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, e, \dot{e}, \ddot{e}) dt, \quad (4.48)$$

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 [23], [24], [25] a [26]. V této práci používáme následující kritérium

$$J = \int_0^T F dt, \quad (4.49)$$

kde

$$F = k_0 [|x - x_d| + |y - y_d|] + k_1 |v - v_d|^p \eta(t - t_{d1}) + k_2 |\dot{v} - \dot{v}_d|^q \eta(t - t_{d2}), \quad (4.50)$$

$0 < p < 4$, $0 < q < 4$, $\eta(t)$ 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 (4.49) a (4.50) 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 (4.50) známa po opakování jízdy robotu po dané trajektorii. Následně mohou být všechny parametry určeny daleko přesněji a přizpůsobivě.

4.8.1 Popis konkrétního algoritmu globální optimalizační metody

V následující části textu popíšeme konkrétní algoritmus globální optimalizace, který jsme použili pro nastavení optimálních parametrů daných zpětnovazebních regulátorů [47].

Nechť máme danou funkci $F : \Omega \rightarrow R$, kde $\Omega \subset R^m$ je množina přípustných stavů $\mathbf{p}$. Označíme $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ pro všechna $p \in \Omega$. Pak optimalizační algoritmus hledá takový bod $\mathbf{p}^{min} \in \Omega$ tak, že platí následující podmínka

$$(\forall \mathbf{p} \in \Omega) : F(\mathbf{p}^{min}) \leq F(\mathbf{p}). \quad (4.51)$$

Jádro optimalizačního algoritmu má následující kroky:

0. Výběr konstant: Nechť $\epsilon > 0$; k, n jsou přirozená čísla; $h > 0$, $a > h$; $0 < q < 1$ a $\delta > 1$. Předpokládejme $q \cdot \delta > 1$. Například $q = 0.65$ a $\delta = 2$.
1. Pro počáteční odhad vektoru parametrů $\mathbf{p}^0 \in \text{int}(\Omega)$, z vnitřního prostoru množiny Ω , vypočti hodnotu $F(\mathbf{p}^0)$.
2. Vygeneruj náhodná čísla $c_1, c_2, \dots, c_m$ s normálním rozdělením, kde pro vektor $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ platí následující rovnice $\mathbf{E}(\mathbf{c}) = \mathbf{0}$, $\mathbf{E}(\mathbf{c} \cdot \mathbf{c}^T) = \mathbf{I}$, kde $\mathbf{I}$ označuje jednotkovou matici.
3. Definuj body $\mathbf{p}^i = \mathbf{p}^0 + i \cdot h \cdot \mathbf{c}$, pro $i \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$. Zatímco $h < a$ a všechny body $\mathbf{p}^i \in \text{int}(\Omega)$, prováděj zvětšení h s kvocientem δ .

4. Pokud $\mathbf{p}^i \notin \Omega$ pro nějaká i , pak opakuj zmenšení h s kvocientem q až $\mathbf{p}^j \in \text{int}(\Omega)$ pro všechna j .
5. Vypočti $F(\mathbf{p}^j)$ pro všechna j a interpoluj jejich hodnoty přímkou $\mathbf{p}^0 + t \cdot h \cdot \mathbf{c}$ s Lagrangeovým interpolačním polynomem $g(t) = At^4 + Bt^3 + Ct^2 + Dt + E$. Pokud $A = 0$, pak hodnota $|A|$ je tak malá, že použijeme Lagrangeův polynom $g(t) = Ct^2 + Dt + E$ druhého řádu. Pokud $C = 0$, pak hodnota $|C|$ je tak malá, jdi do kroku 8.
6. Vypočti minimum funkce $g(t)$. Předpokládejme, že $A \neq 0$. Potom pro řešení rovnice $dg(t)/dt = 0$ můžeme použít goniometrické řešení algebraické rovnice třetího stupně, protože řešení není numerické. Proto získáme jeden nebo tři reálné kořeny. Pro speciální případ $A = 0$ dostaneme triviální řešení. Označme $t_{\min}$ hodnotu, kde funkce $g(t)$ nabývá minima. Pokud $g(t_{\min}) \leq \mathbf{F}(\mathbf{p}^0) - \epsilon$, pak definujeme nový bod $\mathbf{p} = \mathbf{p}^0 + t_{\min} \cdot h \cdot \mathbf{c}$, jinak jdeme do kroku 2.
7. Pokud $\mathbf{p} \notin \text{int}(\Omega)$, potom zmenši h s kvocientem q , vypočti nové body $\mathbf{p}^i$ (jako v kroku 3) a vrať se do kroku 4; jinak vypočti $F(\mathbf{p})$. Pokud $F(\mathbf{p}) < F(\mathbf{p}^0)$ pak vyměň $\mathbf{p}^0 := \mathbf{p}$ a $\mathbf{F}(\mathbf{p}^0) := \mathbf{F}(\mathbf{p})$ a vrať se do kroku 2. Pro $F(\mathbf{p}) \geq F(\mathbf{p}^0)$ se vrať do kroku 1, ale bez záměny (neúspěšná iterace).
8. Tento krok je proveden pokud $C = 0$. Porovnej $F(\mathbf{p}^{-1})$, $F(\mathbf{p}^0)$, $F(\mathbf{p}^1)$ a najdi nejmenší z nich. Pokud $F(\mathbf{p}^0)$ je nejmenší, potom se vrať do kroku 2. Pokud $F(\mathbf{p}^i)$ je nejmenší, kde $i = 1$ nebo $i = -1$, potom prohoď $\mathbf{p}^0 := \mathbf{p}^i$ a $\mathbf{F}(\mathbf{p}^0) := \mathbf{F}(\mathbf{p}^i)$ a jdi do kroku 1.

Při použití výše popsané metody globální optimalizace je možné dokončit její výpočet po vykonání jistého počtu iteračních kroků nebo pokud hodnota kritéria klesne pod danou mez. Daný algoritmus může být modifikován dle potřeb uživatele. Přestože je globální optimalizační metoda velmi obecná, je velmi vhodné ji kombinovat s lokálními konvergenčními metodami vzájemným střídáním. Potom globální metoda hledá okolí globálního extrému a lokální metoda hledá přesnější hodnotu funkcionálu a hodnoty parametrů.

4.9 Simulace pohybu mobilního robotu

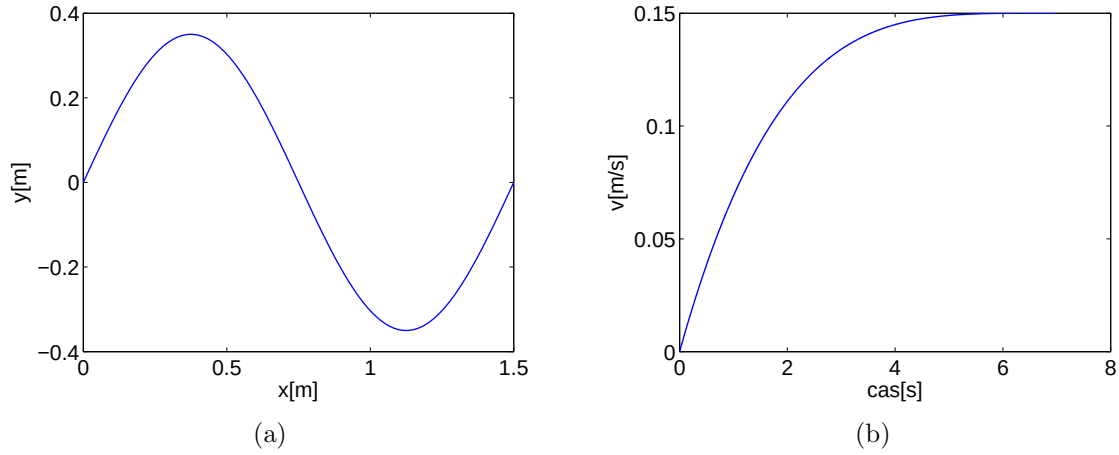
V této kapitole uvedeme výsledky simulace pohybu robotu řízeného pomocí nelineárního, lineárního zpětnovazebního regulátoru. Uvažujme simulační schémata uvedená v kapitole 4.6. Pro ověření pohybu robotu budeme předpokládat sinusovou trajektorii v kartézském souřadnicovém systému (x, y) popsanou vztahem

$$y = A \cdot \sin(2\pi x/x_T), \quad (4.52)$$

kde A je amplituda sinusové trajektorie a x_T její perioda. Na obrázku 4.5a je uvedena sinusová trajektorie pohybu robotu pro hodnoty $A = 0.35m$ a $x_T = 1.5m$. S ohledem na plynulost rozjezdu mobilního robotu uvažujeme rampový průběh rychlosti popsany následujícím vztahem

$$v(t) = V_A - V_A(1 - (\frac{t}{T_n})^{m_n}), \quad (4.53)$$

kde V_A je rychlost robotu dosažená po plynulém rozjezdu, T_n doba náběhu a m_n je mocnina náběhové rampy rychlosti robotu. Na obrázku 4.5b je uveden rampový průběh rychlosti pro hodnoty $V_A = 0.15 \text{ m s}^{-1}$, $T_n = 7 \text{ s}$ a $m_n = 4$.



Obrázek 4.5: a) Sinusová trajektorie pohybu robotu. b) Průběh rychlosti pohybu robotu.

Pro simulační účely uvažujeme parametry mobilního robotu uvedené v tabulce 4.1, které zahrnují rozměry mobilního robotu a konstanty použitého stejnosměrného motoru s převodovkou.

parametry	hodnoty
d	0.25 m
r	0.05 m
M	20 kg
m	0.5 kg
R	3 Ω
L	0.02 H
Km	0.025 $\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{A}}$
G	100

Tabulka 4.1: Rozměry mobilního robotu a konstanty stejnosměrného motoru s převodovkou.

V následující kapitole si uvedeme výsledky simulace pohybu robotu pro různé tvary 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 parametrů regulátoru s požadavkem na větší přesnost polohy
$F_{(v)}$	optimalizace parametrů regulátoru s požadavkem na větší přesnost rychlosti
$F_{(x,y/v)}$	optimalizace parametrů regulátoru s rovnocenným požadavkem přesnosti na polohu, rychlost
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 zobrazující výsledek simulace pro chybu polohy
$Obr_{(x,y)}$	číslo obrázku zobrazující výsledek simulace pro polohu
$Obr_{(v)}$	číslo obrázku zobrazující výsledek simulace pro rychlost

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

4.9.1 Výsledky simulace I

Při simulaci pohybu robotu uvažujeme parametry uvedené v tabulce 4.2.

trajektorie:	$A = 0.35m$	$x_T = 1.5m$			
rychlosti:	$v = 0.15ms^{-1}$	$T_n = 7s$	$m_n = 4$		
optimalizace $F_{(x,y)}$:	$k_0 = 100$	$k_1 = 1$	$k_2 = 0$	$p = 1$	$t_{d1} = 0s$
optimalizace $F_{(v)}$:	$k_0 = 1$	$k_1 = 100$	$k_2 = 0$	$p = 1$	$t_{d1} = 0s$
simulace:	$T_v = 0.075s$				
$(x, y, \theta)_{t=0s}$:	$(0,0,0.81)$				

Tabulka 4.2: Parametry simulace pohybu robotu - příklad I.

Pro zvýšení přesnosti polohy mobilního robotu zavádíme optimalizaci typu $F_{(x,y)}$, která se snaží v daném optimalizačním kritériu brát větší váhu na přesnost polohy než předepsané rychlosti. Obdobně pokud chceme zvýšit přesnost rychlosti robotu, použijeme optimalizaci typu $F_{(v)}$. Výchozí polohu robotu (x, y) v čase $t = 0$ s jsme zvolili tak, aby vycházela z počátku požadované trajektorie tj. je nastavena na hodnoty $(x, y) = (0, 0)$ m. Aktuální natočení robotu θ odpovídá směru požadované trajektorie tj. $\theta = 0.81$ rad.

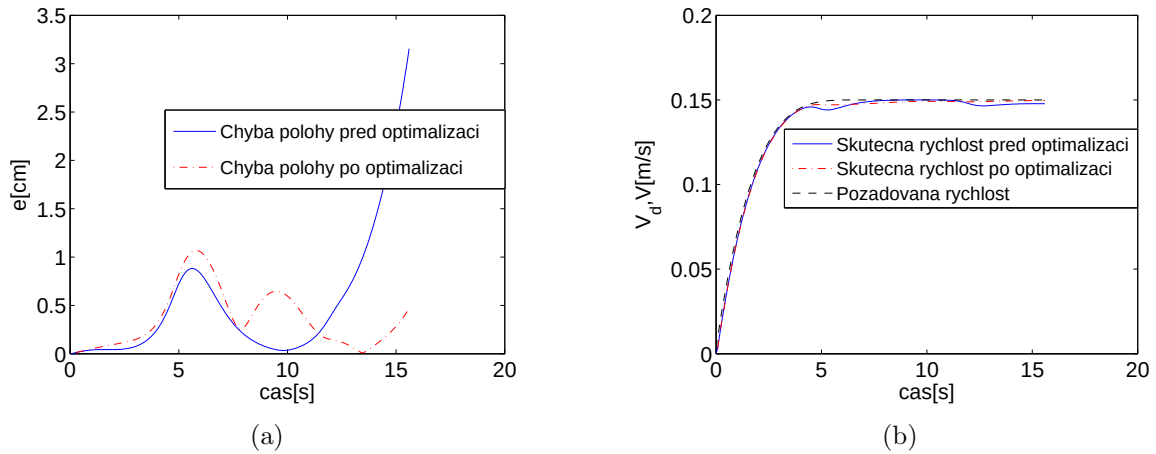
V tabulce 4.3 jsou uvedeny výsledky simulace pro nelineární regulátor. Počáteční hod-

–	F	ς	c	n_I	$Obr_{(x,y)}$	$Obr_{(v)}$
$F_{(x,y)}$	10.7	0.8	2	0	4.6a	4.6b
$F_{(x,y)}$	6.9	0.2	35	20	4.6a	4.6b
$F_{(v)}$	3.3	0.9	5	0	4.7a	4.7b
$F_{(v)}$	2.4	0.01	11.5	20	4.7a	4.7b

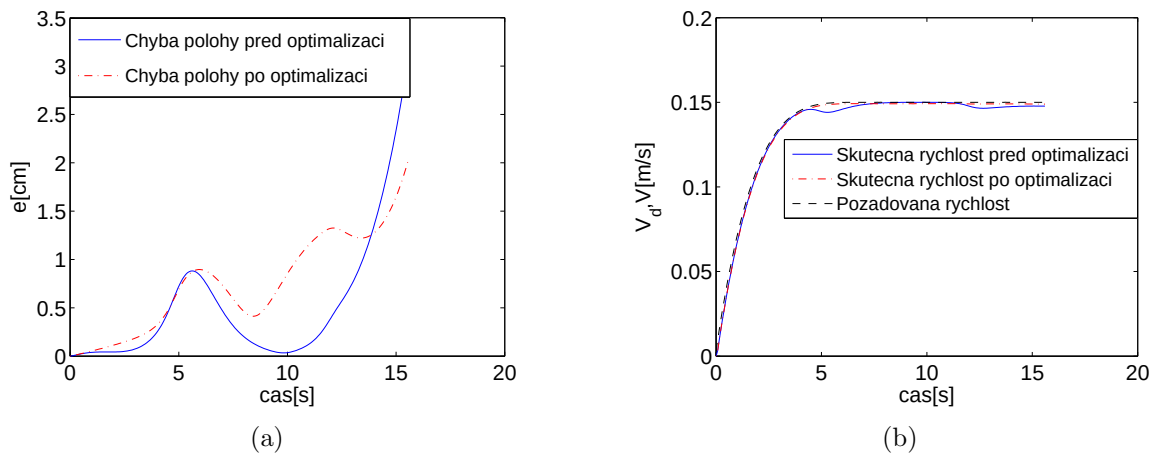
Tabulka 4.3: Výsledky simulace pro nelineární regulátor - příklad I.

noty parametrů nelineárního regulátoru ς , c jsme zvolili zcela libovolně a provedli jsme optimalizaci s požadavkem na zvýšení přesnosti polohy, rychlosti mobilního robotu. Z

výsledného kritéria optimalizace F je patrné, že v obou případech došlo ke zlepšení již po 20ti krocích optimalizace. Na obrázcích 4.6 a 4.7 jsou uvedeny výsledky obou optimalizací. Z obrázku 4.6a je patrné snížení chyby polohy po optimalizaci typu $F_{(x,y)}$. Obdobné výsledky vidíme z obrázku 4.7b pro rychlost. Je však nutné říci, že rozdíly před a po optimalizaci nejsou příliš velké. Tato skutečnost je způsobena volbou vhodných počátečních parametrů nelineárního regulátoru, které zapříčinily snížení kritéria F .



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



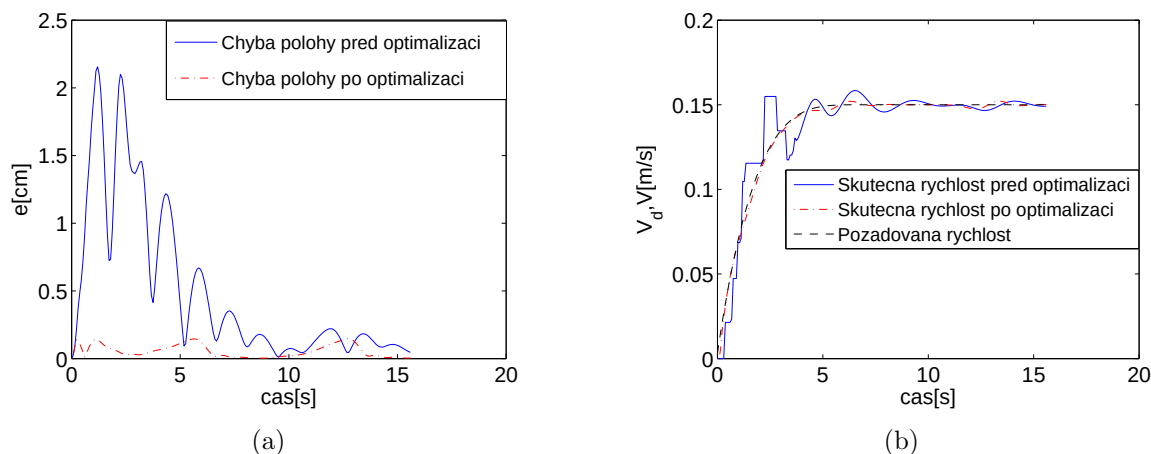
Obrázek 4.7: Řídící struktura s nelineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(v)}$: a) Chyba polohy pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.

V tabulce 4.4 jsou uvedeny výsledky simulace pro lineární regulátor. Opět jsme provedli libovolné nastavení hodnot parametrů lineárního regulátoru $K_{p1,p2}$, $K_{d1,d2}$. Parametry optimalizace zvyšující přesnost polohy, rychlosti mají stejné hodnoty jako u nelineárního regulátoru. Z hodnot výsledného kritéria F je patrné výrazné zlepšení již po 10ti krocích optimalizačního algoritmu. V porovnání s hodnotami nelineárního regulátoru uvedenými

v tabulce 4.3 jsme dosáhli lepších výsledků v obou případech optimalizace. Na obrázku 4.8 a 4.9 jsou uvedeny výsledky simulace. Chyba polohy u lineárního regulátoru je výrazně menší v porovnání s nelineárním regulátorem. Zároveň zde nevzniká trvalá regulační odchylka, jak je patrné z obrázku 4.8a. Volbou špatných počátečních hodnot parametrů lineárního regulátoru může dojít k výraznému rozkmitání výsledné rychlosti robotu, jak vidíme z obrázku 4.9b. Díky globální optimalizaci však můžeme dosáhnout, již po několika krocích optimalizace, velmi slušných výsledků v podobě stabilního systému.

–	F	K_{p1}	K_{p2}	K_{d1}	K_{d2}	n_I	$Obr_{(e)}$	$Obr_{(v)}$
$F_{(x,y)}$	10	7	5	10	1	0	4.8a	4.8b
$F_{(x,y)}$	1	6.7	12	2.2	1.8	10	4.8a	4.8b
$F_{(v)}$	7	5	5	7	1	0	4.9a	4.9b
$F_{(v)}$	1	1.8	0.3	6.8	7.9	10	4.9a	4.9b

Tabulka 4.4: Výsledky simulace pro lineární regulátor - příklad I.

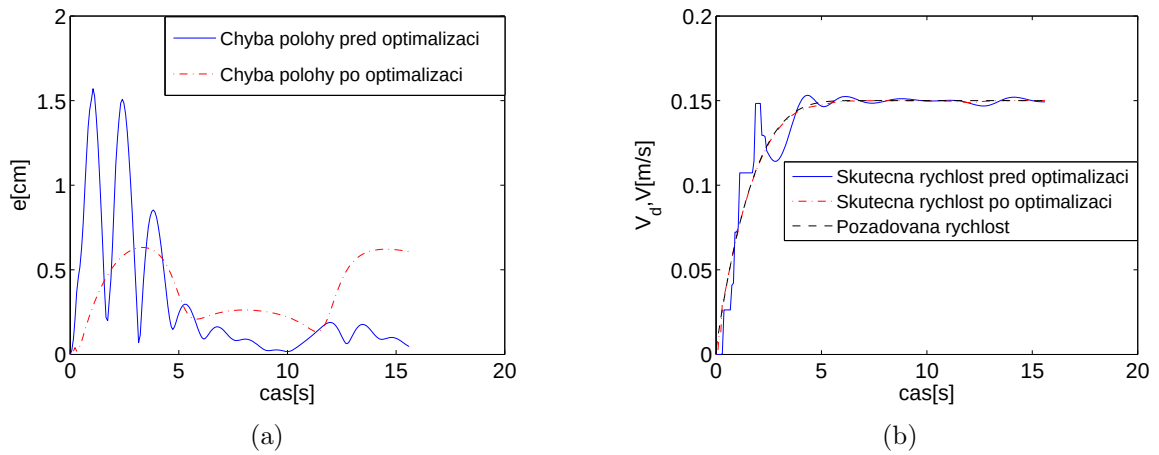


Obrázek 4.8: Řídící struktura s lineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(x,y)}$: a) Chyba polohy pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.

4.9.2 Výsledky simulace II

Při simulaci pohybu robotu uvažujeme parametry uvedené v tabulce 4.5. 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. Stejně jako v předchozím příkladě zavádíme optimalizaci typu $F_{(x,y)}$ a $F_{(v)}$ zpřesňující výslednou polohu robotu resp. její rychlosti. Dále zde uvádíme nový typ optimalizace $F_{(x,y/v)}$, která zpřesňuje polohu a rychlost robotu téměř stejnou měrou.

V tabulce 4.6 jsou uvedeny výsledky simulace pro nelineární regulátor. Výchozí hodnoty parametrů nelineárního regulátoru ς , c jsme zvolili zcela libovolně. Následně jsme provedli jednotlivé typy optimalizace. Díky počátečnímu rozvážení systému není volba



Obrázek 4.9: Řídící struktura s lineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(v)}$: a) Chyba polohy pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.

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

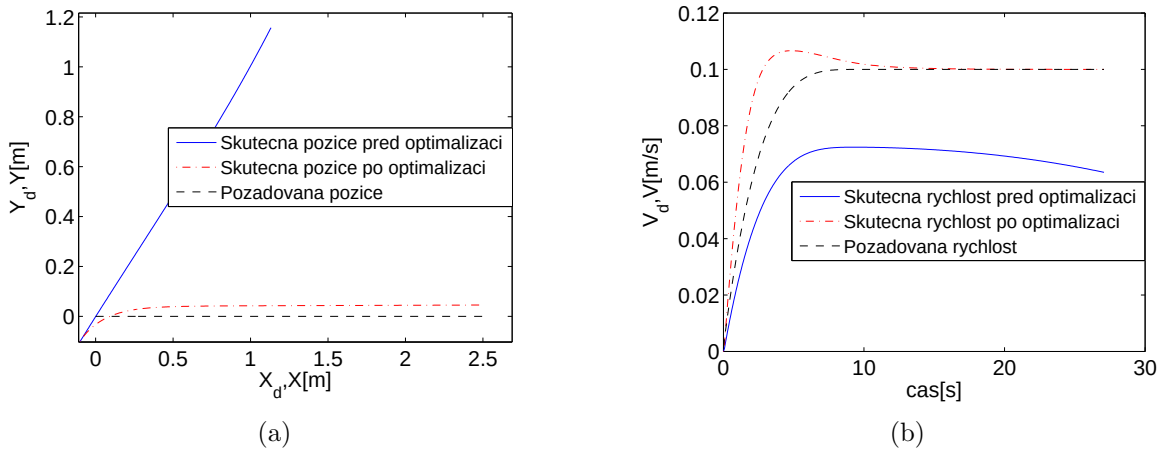
Tabulka 4.5: Parametry simulace pohybu robotu - příklad II.

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 4.10 a 4.11. Z obrázku 4.10a vidíme, že v případě nelineárního regulátoru vzniká trvalá chyba polohy i po skončení optimalizace. V porovnání s výsledkem optimalizace, upřednostňující přesnost rychlosti, z obrázku 4.11a 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 4.11b, resp. 4.10b.

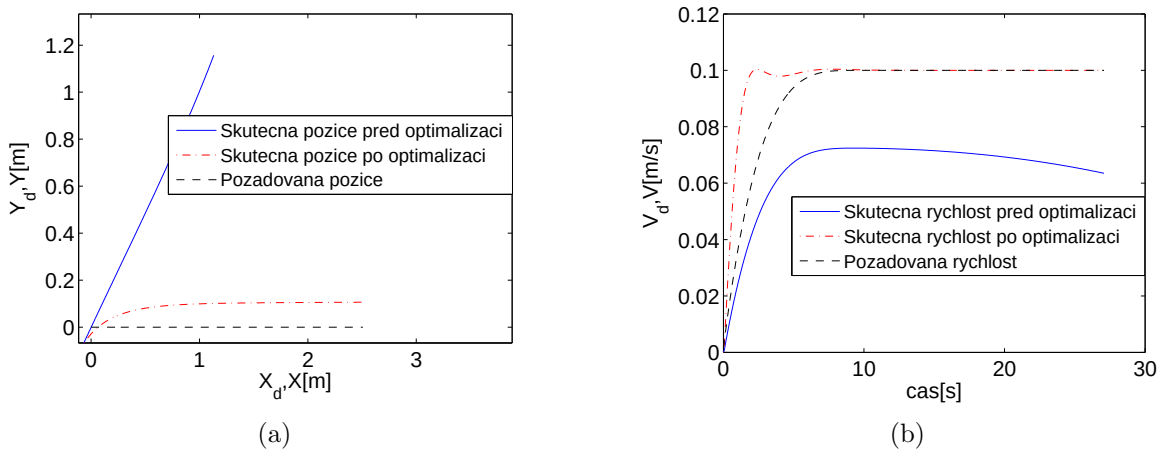
—	F	ς	c	n_I	$Obr_{(x,y)}$	$Obr_{(v)}$
$F_{(x,y)}$	6370	0.1	0.1	0	4.10a	4.10b
$F_{(x,y)}$	304	0.99	12.5	20	4.10a	4.10b
$F_{(v)}$	408	0.1	0.1	0	4.11a	4.11b
$F_{(v)}$	63	0.95	42	20	4.11a	4.11b

Tabulka 4.6: Výsledky simulace pro nelineární regulátor - příklad II.

V tabulce 4.7 jsou uvedeny výsledky simulace pro lineární regulátor, kde počáteční nastavení jeho parametrů bylo provedeno zcela libovolně.



Obrázek 4.10: Řídící struktura s nelineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(x,y)}$: a) Poloha pohybu robota. b) Rychlost pohybu robota.

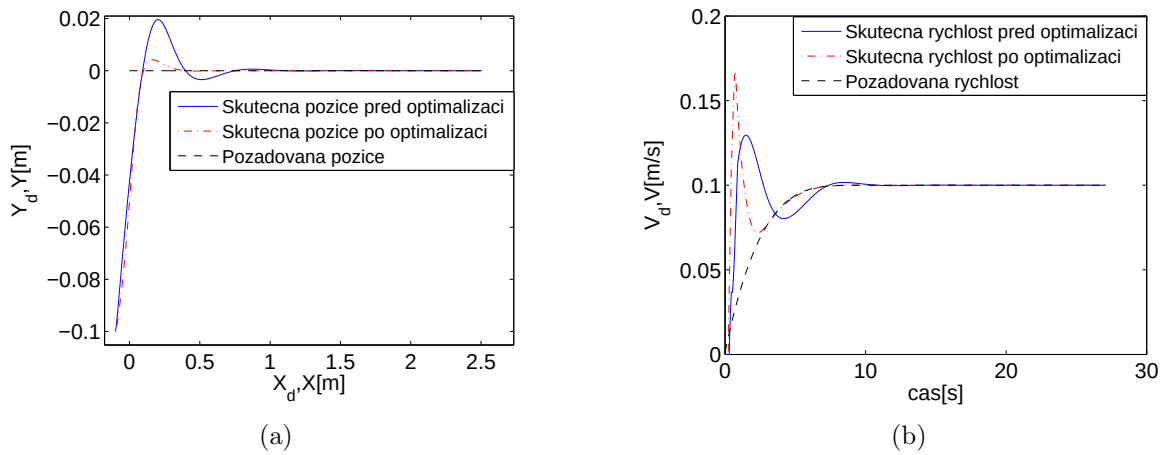


Obrázek 4.11: Řídící struktura s nelineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(v)}$: a) Poloha pohybu robota. b) Rychlost pohybu robota.

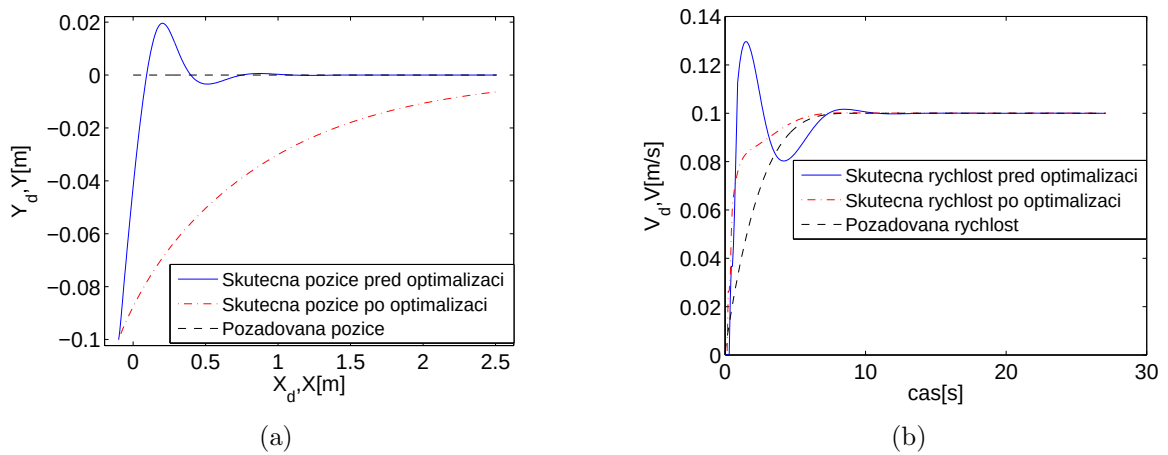
—	F	K_{p1}	K_{p2}	K_{d1}	K_{d2}	n_I	$Obr_{(x,y)}$	$Obr_{(v)}$
$F_{(x,y)}$	82	1	1	1	1	0	4.12a	4.12b
$F_{(x,y)}$	48	4.4	1.7	3.8	1.9	10	4.12a	4.12b
$F_{(v)}$	85	1	2	1	2	0	4.13a	4.13b
$F_{(v)}$	51	1.3	0.3	2.4	2.8	10	4.13a	4.13b
$F_{(x,y/v)}$	25	1	1	3	1	0	4.14a	4.14b
$F_{(x,y/v)}$	12	2.6	0.4	3	1.2	20	4.14a	4.14b

Tabulka 4.7: Výsledky simulace pro lineární regulátor - příklad II.

Ve všech typech optimalizace došlo ke zlepšení a v porovnání s výsledky nelineárního regulátoru z tabulky 4.6 bylo dosaženo lepších výsledků. U lineárního regulátoru se však



Obrázek 4.12: Řídící struktura s lineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(x,y)}$: a) Poloha pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.

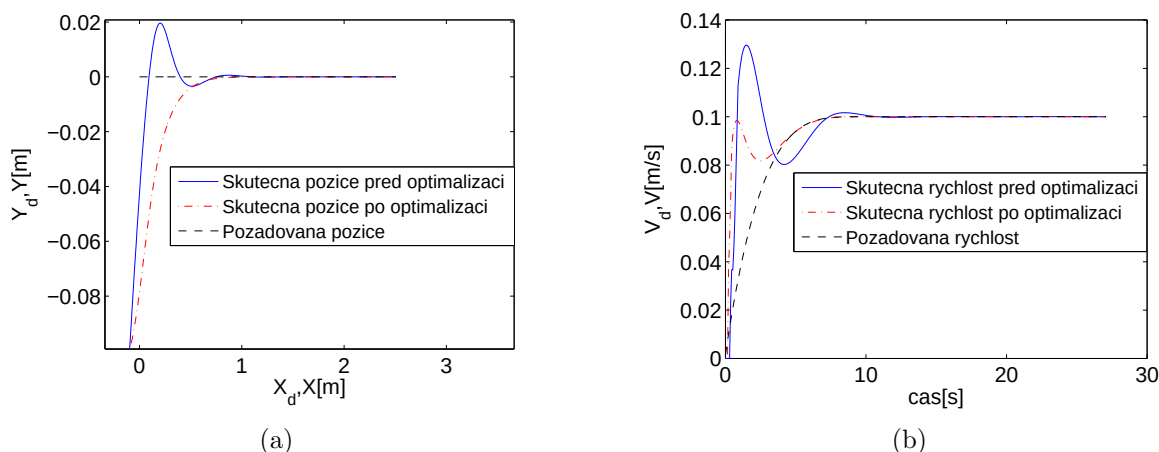


Obrázek 4.13: Řídící struktura s lineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(v)}$: a) Poloha pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.

daleko více projevil vliv optimalizace upřednostňující přesnost rychlosti či polohy. Při optimalizaci typu $F_{(x,y)}$ jsme sice docílili takřka ideálního průběhu polohy, avšak za cenu výraznějšího překmitu rychlosti, jak je patrné z obrázku 4.12. Obdobných výsledků v opačném významu, obrázek 4.13, 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 4.14, kde bylo dosaženo kompromisu mezi oběma typy optimalizace.

4.9.3 Shrnutí dosažených výsledků aplikace na reálný systém

Díky vytvořenému modelu mobilního robotu (kapitola 4.6) bylo možné ověřit uvedené řídicí struktury regulátorů pro různé typy trajektorií. Volba parametrů regulátorů



Obrázek 4.14: Řídící struktura s lineárním regulátorem, typ optimalizace $F_{(x,y/v)}$: a) Poloha pohybu robotu. b) Rychlost pohybu robotu.

má podstatný vliv na výslednou přesnost polohy a rychlosti robotu. Špatnou volbou těchto parametrů může vzniknout i nestabilní systém. Při použití globální optimalizace uvedené v kapitole 4.8.1 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. V následující kapitole bude takové chování ověřeno na reálném systému mobilního robotu pouze pro řídicí strukturu s lineárním regulátorem.

4.10 Ověření výsledků simulace na reálném systému mobilního robotu

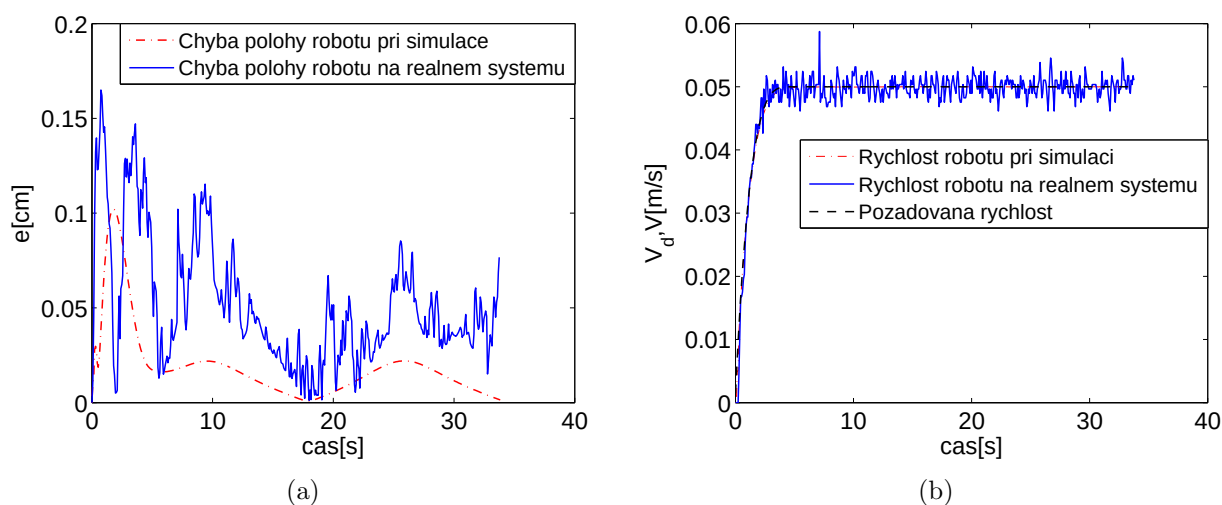
V tabulce 4.8 jsou uvedeny parametry pohybu robotu. Pro nastavení parametrů regulátoru jsme použili optimalizační kritérium $F_{(x,y/v)}$ upřednostňující stejným dílem průběh polohy a rychlosti robotu. Výsledky simulace a ověření na reálném systému jsou uvedeny na obrázku 4.15a,b.

trajektorie:	$A = 0.15m$	$x_T = 1.5m$			
rychlosti:	$v = 0.05ms^{-1}$	$T_n = 5s$	$m_n = 4$		
optimalizace $F_{(x,y/v)}$:	$k_0 = 50$	$k_1 = 50$	$k_2 = 0$	$p = 1$	$t_{d1} = 0s$
simulace:	$T_v = 0.075s$				
$(x, y, \theta)_{t=0s}$:	$(0,0,0.54 \text{ rad})$				

Tabulka 4.8: Parametry pohybu robotu na reálném systému.

Chyba polohy měřená na reálném systému je zhruba stejná v porovnání s výsledky simulace. Stejných výsledků bylo dosaženo v případě rychlosti mobilního robotu. Oba dva

průběhy měřené na reálném systému jsou zašuměny vlivem drobných vibrací vzniklých během jízdy robotu.



Obrázek 4.15: a) Chyba polohy pohybu robotu. b) Skutečná a požadovaná rychlost pohybu robotu.

V této kapitole uvádíme pouze část ověřovacích výsledků na reálném systému robotu. Další budou uvedeny při plánovaném pohybu robotu na základě geometrické mapy prostředí v kapitolách 9.1.1 a 9.1.2.

5 Senzorický subsystém

Senzory tvoří nedílnou součást architektury mobilního robotu. Prostřednictvím senzorů získává robot informace o neznámém prostředí, ve kterém se pohybuje. Senzory lze rozdělit do dvou základních skupin, na **interní** a **externí**. Obecně lze říci, že interní čidla se používají k získání základních parametrů uvnitř motorického subsystému. Jedná se například o rychlost a polohu mobilního robotu nebo stav nabití akumulátoru. Naproti tomu externí čidla slouží k získávání a následnému zpracování informací o okolním prostředí, ve kterém se robot pohybuje. Rozeznávají barvu, tvar, rozměry a všeobecné vlastnosti prostředí (teplota, zvuk).

Externí čidla se dále rozdělují na **kontaktní** a **bezdotyková**. Kontaktní čidla pracují na principu přímého dotyku s objektem. Sem patří například taktilní a hmatová čidla. Naproti tomu bezkontaktní čidla se objektu nedotýkají. Do tohoto druhu senzorů patří sonarové, laserové hloubkoměry a kamery.

V dalších kapitolách se budeme zabývat popisem a porovnáním jednotlivých externích-bezkontaktních čidel, popisem námi navrženého sensorického systému a měřením jeho základních parametrů.

5.1 Bezkontaktní snímače

V následující kapitole se budeme zabývat externími-bezkontaktními snímači, které se používají k detekci objektů, vyskytujících se na krátkých, středních a dlouhých vzdálenostech. Objekty nacházející se na velmi krátkých vzdálenostech nejsou těmito čidly detekovány, jelikož většina těchto snímačů má danou minimální měřitelnou vzdálenost, od které spolehlivě fungují. V dalším textu se zaměříme především na ultrazvukové a laserové snímače a dále pak na kamery. Uvedeme jejich stručný princip, výhody a nevýhody.

5.1.1 Ultrazvuková čidla

V počátcích rozvoje mobilní robotiky se staly sonarové hloubkoměry nejpoužívanějšími čidly pro mapování prostředí a lokalizaci robotu. Ultrazvuková čidla se používají k měření vzdálenosti k překážce, popř. k detekci překážky a jsou založeny na měření doby mezi vysláním akustického impulsu a okamžikem přijetí odraženého signálu od překážky. Vlastní čidlo se skládá buď ze samotného vysílače nebo přijímače signálu nebo jsou obě části integrovány v jednom pouzdře. Akustický signál z ultrazvukového čidla je šířen na základě její vyzařovací charakteristiky a většina výrobců jej popisuje pomocí vertikálních a horizontálních vyzařovacích úhlů. Intenzita vysílaného signálu je nejsilnější směrem ke středu čidla.

Výhody:

- Jednoduché zpracování dat z čidel, měřící čas mezi vysláním a příjmem odraženého signálu.
- Nízké pořizovací náklady.

Nevýhody:

- **Změna rychlosti šíření signálu v závislosti na typu prostředí.**

Vlivem rozdílné teploty, tlaku a vlhkosti prostředí dochází ke změnám rychlosti šíření ultrazvukového signálu. Naměřená vzdálenost je zatížena nepřesnostmi, jelikož jsou čidla ve většině případů umístěna v neznámém prostředí, které se může taktéž po dobu měření měnit.

- **Překážky pohlcující zvuk nejsou detekovány.**

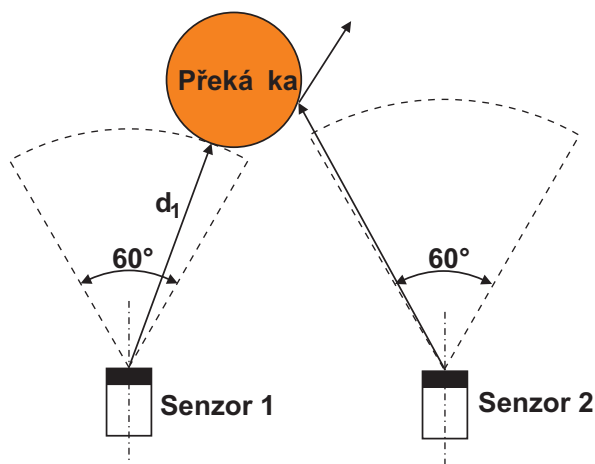
Ultrazvukový signál se velmi dobře odráží pouze od látek vyrobených z pevného materiálu. Naproti tomu látky měkké, například vyrobené z textilního materiálu, pohlcují signál nebo jej rozptylují.

- **Vícenásobné odrazy.**

Pokud není překážka umístěna kolmo k danému senzoru, dochází k odrazu signálu mimo oblast, kde jej může čidlo zachytit. V některých případech může nastat taková situace, že čidlo přijme signál až po několika odrazech od překážky. Takto dojde k chybné detekci překážky, která je ve skutečnosti umístěna blíže k danému sonaru.

- **Překážka nemusí být detekována přímo v ose senzoru.**

Signál je šířen na základě vyzařovací charakteristiky, kde dochází k šíření signálu nejenom v ose senzoru, ale také po jejích stranách, viz obrázek 5.1. I když daný signál nemá takovou intenzitu, může dojít k detekci překážky, která se nenachází přímo v ose senzoru.

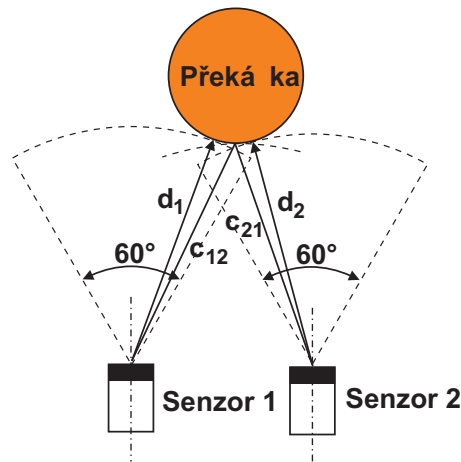


Obrázek 5.1: Rozsahy čidel se nepřekrývají.

Dále se zaměříme na některé situace, které mohou nastat při detekci překážek pomocí ultrazvukových snímačů. Na obrázku 5.1 je znázorněn případ, kdy se dvě čidla nepřekrývají ve svém detekčním kuželu o velikosti 60° . V daném okamžiku dojde pouze k přímému odrazu od překážky ve vzdálenosti d_1 . Druhý senzor nezachytí žádný odražený signál a tudíž nelze přesně určit polohu dané překážky, která se může nacházet kdekoli v rozsahu prvního senzoru.

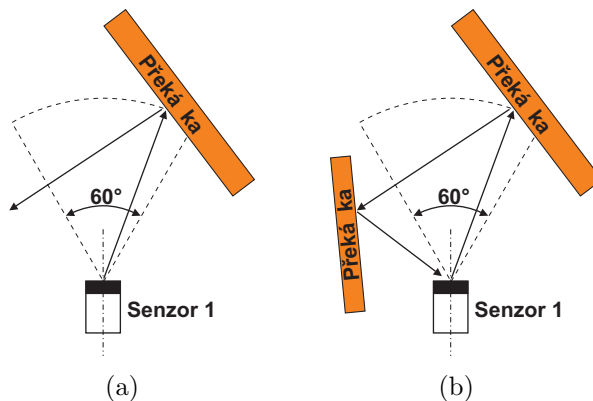
Na obrázku 5.2 je znázorněna situace, kdy se dvě čidla překrývají v určitých částech svých rozsahů. Uvnitř překrývacího rozsahu vzniká přímý odraz od překážky ve vzdálenostech d_1 a d_2 . Dále pak mezi oběma snímači vznikají křížové odrazy c_{12} od prvního senzoru k druhému a c_{21} od druhého senzoru k prvnímu.

Na základě přímých a křížových odrazů lze velice přesně určit vzdálenost a pozici objektu. Při realizaci přesného určení vzdálenosti objektu musíme dát pozor, aby nedocházelo ke vzájemným interferencím mezi ultrazvukovými signály.



Obrázek 5.2: Rozsahy čidel se překrývají.

Objekt může být detekován ultrazvukovým senzorem, jestliže povrch překážky směřuje kolmo k detekčnímu rozsahu snímače. Pokud se překážka nachází v daném rozsahu snímače, ale povrch objektu neleží přesně kolmo k čidlu, může nastat situace, kdy odražený signál bude směřovat mimo detekční rozsah čidla (obrázek 5.3 a)) nebo odražený signál se vrátí značně zkreslen (obrázek 5.3 b)) vlivem vícenásobného odrazu.



Obrázek 5.3: Různé situace při detekci překážky ultrazvukem.

5.1.2 Laserová čidla

Laserové sensory se pro svůj daleký dosah a relativně velkou přesnost staly v poslední době velmi oblíbeným a používaným snímačem v oblasti mobilní robotiky. Princip laserového hloubkoměru buď spočívá v měření doby mezi vyslaným paprskem a okamžikem přijetí odraženého paprsku, nebo v měření fázového posunu mezi vyslaným a přijatým paprskem.

Současné laserové hloubkoměry jsou konstruovány tak, že jsou schopny provést měření vzdáleností v jedné rovině v intervalu například 0° - 180° s rozlišením 0.25° . Šířka paprsku je zanedbatelná, tudíž lze tímto čidlem měřit objekty vyskytující se v rovině vyzařovaného paprsku. Nevýhody spojené s ultrazvukovými čidly se u těchto snímačů neprojevují.

Výhody:

- Rychlost a přímočarost šíření signálu.
Proto je možné provádět měření mnohem častěji v porovnání s ostatními čidly (přibližně 1000krát rychleji než se sonarovými sensory).
- Velká přesnost detekce objektů, jak směru tak i vzdálenosti bez vlivu okolního prostředí.

Nevýhody:

- Špatná detekce skleněných ploch.
Tento nedostatek lze eliminovat v kombinaci s ultrazvukovým systémem.
- Snímání prostoru pouze v rovině čidla.
Pokud však bude stávající zařízení doplněno o mechanismus umožňující rotační pohyb v ose laserového snímače, lze i tento systém využít k pořízení 3D modelu okolního prostředí. V současnosti se již vyrábějí 3D laserové hloubkoměry, které jsou schopny zachytit scénu ve 3-rozměrném prostoru.
- Vysoká cena.

5.1.3 Kamera

Jedná se o velmi moderní sensor, který se může mnohem více prosazovat nejen v oblasti mobilní robotiky. Existuje mnoho způsobů detekce objektů či mapování prostředí pomocí kamery. Například informaci o vzdálenosti k překážce lze získat prostřednictvím soustavy dvou kamer. Princip je založen na detekci význačných bodů v obraze a nalezení jejich korespondencí. To je však velmi časově náročné a neumožňuje detekovat překážky v reálném čase.

Dalším způsobem, jak určit vzdálenost k překážce, je použití kamery k detekci rozmítaného laserového paprsku. Na základě triangulace lze určit vzdálenost k překážce.

Výhody:

- Získáváme také informaci o barvě prostředí.

Nevýhody:

- Velké množství dat a informací o prostředí, které je velmi časově náročné na zpracování.

5.2 Návrh vlastního sensorického systému robotu

Jedním z cílů této disertační práce bylo vytvořit vlastní sensorický systém mobilního robotu, který bude obsahovat pouze ultrazvukové snímače. Námi navržený sensorický systém obsahuje celkem 24 ultrazvukových snímačů firmy Robert Bosh GmbH běžně používaných v automobilovém průmyslu při realizaci systému parkovacího pilota.

Základní parametry sensoru jsou uvedeny v tabulce 5.1. Výhodu použitého čidla lze spatřit v jeho velkém vyzařovacím 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. Vně pouzdra je umístěn konektor se třemi piny zajišťující napájení a řízení snímače. Komunikace s čidlem probíhá prostřednictvím řídicího pinu, pomocí něhož může být snímač uveden do dvou základních režimů vysílače nebo přijímače, který je nastaven ihned po přivedení napájecího signálu na zbylé dva piny konektoru.

V následujícím textu popíšeme přepnutí ultrazvukového sensoru do režimu vysílače a následný přechod do režimu přijímače.

Minimální měřitelná vzdálenost	0.22m
Maximální měřitelná vzdálenost	3.3m
Přesnost snímače	0.04m
Vyzařovací úhel vertikální	120°
Vyzařovací úhel horizontální	60°

Tabulka 5.1: Parametry použitého ultrazvukového snímače.

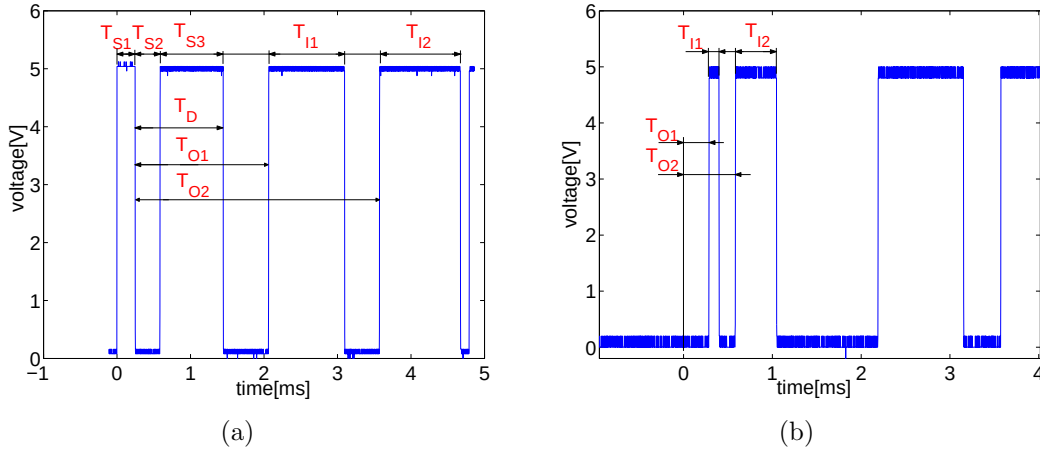
5.2.1 Snímač ve funkci vysílače a přijímače

Přivedením aktivačního pulsu na řídicí pin snímače uvedeme sensor do režimu vysílače. Nejprve dojde k vyslání řady pulsů (počet je dán konkrétním systémem) o frekvenci 40kHz. Snímač následně projde několika stavy, než se opět vrátí do režimu přijímače. Informace o jednotlivých stavech sensoru jsou předávány uživateli prostřednictvím řídicího pinu a komunikace probíhá v časové ose, jak lze vidět na obrázku 5.4a. V následujícím textu uvedeme přehled použitých symbolů z obrázku 5.4a.

- T_{S1} - čas potřebný pro uvedení snímače do stavu vysílače.
- T_{S2} - čas potřebný pro uklidnění membrány.
- T_{S3} - čas potřebný pro přepnutí snímače do funkce přijímače.
- T_D - čas ve kterém není čidlo schopno přijímat informace o odraženém signálu.
- T_{O1} - čas mezi vysláním ultrazvukového signálu a následným příjmem odraženého signálu od první překážky.
- T_{O2} - čas mezi vysláním ultrazvukového signálu a následným příjmem odraženého signálu od druhé překážky.

- T_{I1} - intenzita odraženého signálu od první překážky vyjádřena pomocí času.
- T_{I2} - intenzita odraženého signálu od druhé překážky vyjádřena pomocí času.

Přivedením aktivačního pulsu na řídicí pin po přesně definovanou dobu $T_{S1} = 250 \mu s$ uvedeme sensor do režimu vysílače. Následuje přechod snímače do stavu, kde dochází k uklidnění rozkmitané membrány způsobené vysláním ultrazvukového signálu. Čas uklidnění se pohybuje okolo $T_{S2} = 350 \mu s$. Po uplynutí času $T_{S3} = 900 \mu s$ přejde snímač opět do režimu přijímače. Po dobu $T_D = 1250 \mu s$ nemůže sensor přijímat informace o odraženém signálu. Tím je definovaná minimální měřitelná vzdálenost k překážce odpovídající 22 cm. Celkový čas počítaný od okamžiku uvedení sensoru do stavu vysílače až po příchod prvního respektive druhého odraženého signálu od překážky je označen symbolem T_{O1} , resp. T_{O2} . Odpovídající intenzity odražených signálů T_{I1} a T_{I2} jsou vyjádřeny prostřednictvím časové informace. Přesný vztah mezi intenzitou odraženého signálu a časovou informací T_{I_i} , kde $i = 1, 2, \dots$ výrobce čidla neuvádí. Víme pouze, že delší časová informace odpovídá větší intenzitě odraženého signálu.



Obrázek 5.4: Snímač ve funkci: a) vysílače a současně přijímače, b) pouze přijímače.

5.2.2 Snímač ve funkci přijímače

Snímač přechází do režimu přijímače ihned po přivedení napájecího napětí, popřípadě se do funkce přijímače vrací z režimu vysílače, vysvětleného v předchozí kapitole. S využitím dvou nezávislých čidel, z nichž jedno bude plnit roli vysílače (může současně i přijímat odražený signál po uplynutí doby T_D) a druhé roli přijímače, lze detekovat i překážky nacházející se v minimální měřitelné vzdálenosti. Typický průběh signálu lze vidět na obrázku 5.4b. Použité symboly mají stejný význam jako v předchozí kapitole.

5.2.3 Popis navrženého sensorického systému

Z hlediska požadavků kladených na hardware sensorického systému bylo zapotřebí navrhnout elektroniku, která by umožňovala připojit 24 nezávislých sensorů s možností přepínání mezi režimem vysílače a přijímače. Vzhledem k rozdílným napěťovým úrovním

použitého čidla a procesoru bylo nutné přizpůsobit navrženou elektroniku pro možnost vzájemné komunikace prostřednictvím řídicího pinu snímače. Při realizaci návrhu byl brán ohled na možnost rozšíření sensorického systému o taktilní čidla. Z navržené desky jsou dále vyvedeny piny s analogovými a digitálními vstupy pro obecné využití. Ke komunikaci s nadřazeným řídicím systémem je použita sériová komunikace.

Navržený software umožňuje aktivovat současně až 4 snímače v režimu vysílače. Následný příjem a dekodování odraženého ultrazvukového signálu od překážek je řešen pomocí stavového diagramu. V nekonečném cyklu jsou kontrolovány jednotlivé stavy právě aktivních snímačů a v případě detekování odraženého signálu jsou uloženy pro každý sensor časy T_{O_i} a T_{I_i} , kde i nabývá hodnot $i = 0 \dots M$ a M označuje počet odražených signálů detekovaných snímačem při jednom vysílání ultrazvukového signálu. Takto je postupně obslouženo všech 24 sensorů celkem v 6 cyklech trvajících okolo 200 ms. Výsledky všech měření jsou převedeny na definovaný protokol a vyslány jako celek řídicímu systému po sériové lince. Komunikační protokol obsahuje následující informace:

- Číslo sensoru.
- Počet překážek, které daný sensor detekoval při jednom vysílání ultrazvukového signálu, maximálně však M .
- Časové informace o vzdálenosti k dané překážce.
- Časové informace o intenzitě odraženého signálu od dané překážky.

Může nastat i případ, kdy daný sensor nedetekuje žádnou překážku nebo není vůbec připojen k danému sensorickému systému. V tomto okamžiku je vyslána informace, že sensor nedetekoval žádnou překážku, resp. není vůbec připojen. Přesný popis protokolu zde nebudeme zatím uvádět.

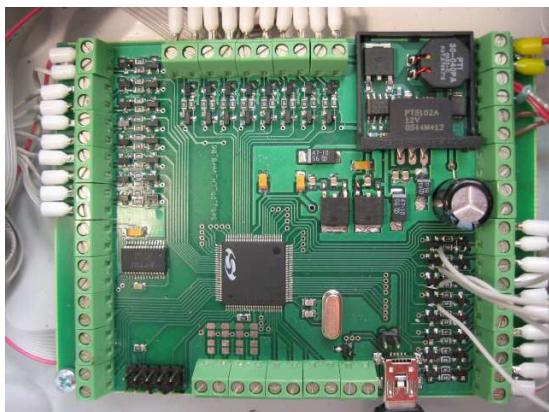
Program uvnitř procesoru potlačuje vícenásobné odrazy. Pokud je naměřená vzdálenost snímačem větší jak maximální měřitelná vzdálenost senzoru, je dané měření potlačeno. Slabé signály vzniklé například odrazem od země způsobené velkým vyzařovacím úhlem čidla jsou na základě intenzity signálu taktéž vyloučeny. Měřením závislosti intenzity odraženého signálu snímače se budeme zabývat v kapitole 5.4. Na obrázku 5.5a je uveden HW navrženého sensorického systému a na obrázku 5.5b rozmístění sensoru na mobilním robotu. V této kapitole popisujeme ultrazvukový systém s 24 čidly. Na reálném mobilním robotu je umístěno pouze 18 snímačů, jak je patrné z obrázku 5.5b. Zbýlých 6 čidel není umístěno na zadní části těla robotu, protože uvažujeme pouze pohyb vpřed.

Takto navržený sensorický subsystém bude použit k detekci okolního prostředí mobilního robotu, kterým se budeme zabývat v kapitolách 6 a 7.

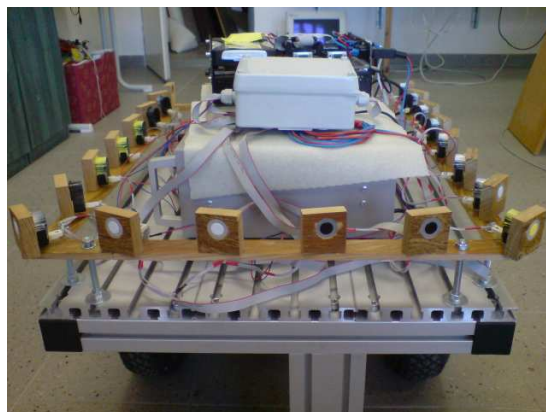
5.3 Výhody navrženého sensorického systému

V předchozích kapitolách jsme popsali námi navržený sensorický systém. V této kapitole uvedeme některé z výhod tohoto systému:

- Velké vyzařovací úhly umožňují detekci většího prostoru s překážkami. Díky tomu lze lépe vytvořit mapu prostředí robotu.



(a)



(b)

Obrázek 5.5: a) HW navrženého sensorického systému. b) Umístění snímačů na těle 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.

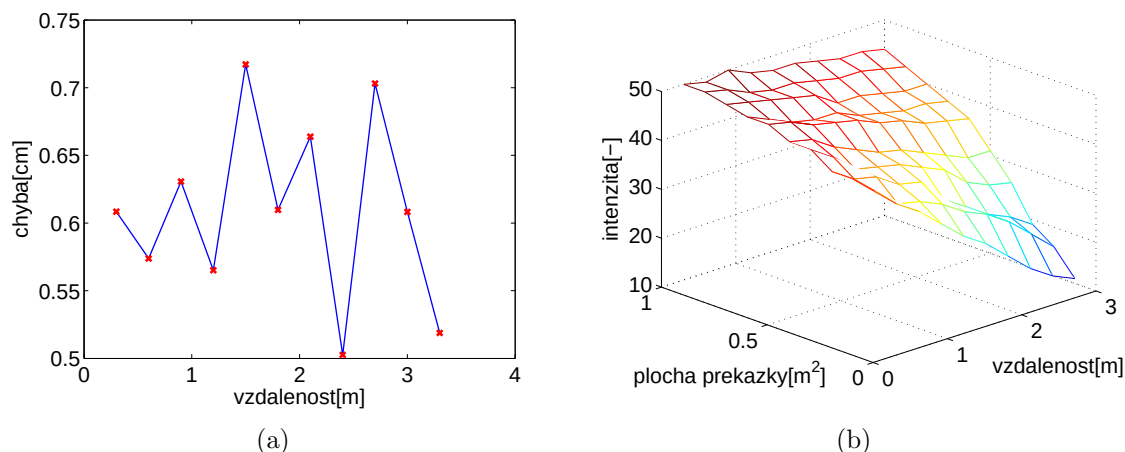
5.4 Měření základních parametrů ultrazvukového snímače

Vzhledem k plánovanému vytvoření modelu ultrazvukového snímače jsme provedli řadu měření, na základě kterých stanovíme základní parametry snímače. Vytvořením modelu se budeme zabývat v kapitole 7. V dalších kapitolách uvedeme výsledky následujících měření:

- Přesnost snímače na měřené vzdálenosti k překážce.
- Závislosti intenzity odraženého signálu na vzdálenosti a ploše překážky.

5.4.1 Měření závislosti přesnosti čidla na vzdálenosti k překážce

Přesnost čidla je jedním z parametrů modelu ultrazvukového snímače, kterou určíme jako rozdíl skutečné hodnoty naměřené posuvným metrem od hodnoty naměřené ultrazvukovým snímačem. K určení průměrné chyby sensoru jsme použili celkem sedm sad měření, každá obsahovala 10 měření pokrývajících vzdálenosti od minimálních hodnot po maximální. Průměrná chyba sensoru vyšla 0.6 cm s rozptylem 0.01 cm. Průběh chyby sensoru v závislosti na vzdálenosti k překážce je uveden na obrázku 5.6a.



Obrázek 5.6: a) Závislost přesnosti čidla na měřené vzdálenosti k překážce, b) intenzity odraženého signálu na vzdálenosti a ploše překážky.

Výrobce senzoru uvádí přesnost čidla 4 cm, která již zahrnuje vliv okolní teploty prostředí. Při návrhu ultrazvukového modelu budeme počítat s touto přesností snímače.

5.4.2 Měření intenzity odraženého signálu

Ultrazvuková čidla poskytují informace o intenzitě odraženého signálu, jak bylo uvedeno výše. Vzhledem k využití dané intenzity snímače pro potlačení slabých signálů vzniklých odrazem od země nebo vlivem vícenásobných odrazů jsme identifikovali závislost intenzity odraženého signálu na vzdálenosti k dané překážce a její ploše.

Při měření jsme použili překážku z pevného materiálu s konstantní výškou 74 cm a s proměnlivou šířkou tak, abychom dosáhli různé plochy překážky. Jednotlivé plochy jsme postupně vzdalovaly od referenčního čidla a průběžně odečítali naměřenou vzdálenost a intenzitu odraženého signálu. Výsledky pro různé plochy překážek jsou uvedeny na obrázku 5.6b. Z grafu je patrný pokles intenzity odraženého signálu s rostoucí vzdáleností od měřené překážky. Závislost na ploše dané překážky má podobný charakter chování. K dosažení věrohodných výsledků měření bylo nutné dodržet následující podmínky: střed překážky musí ležet proti středu referenčního snímače, rovina překážky musí být souběžná s rovinou snímače.

Mezní hodnotu intenzity odraženého signálu je velmi obtížné stanovit. Pokud bychom zvolili příliš velkou hodnotu, byly by například potlačeny překážky nacházející se v delší vzdálenosti. Proto při výběru mezní hodnoty intenzity budeme velmi opatrní a zvolíme raději nižší hodnotu, v našem případě se jedná o hodnotu 20. Díky prahování budou jistě potlačeny slabé signály vzniklé například odrazem od země či vícenásobným odrazem od jednotlivých překážek [49]. Součástí této filtrace není nutnost potlačit veškeré vícenásobné odrazy. Potlačení vícenásobných odrazů se budeme detailněji zabývat při realizaci modelu ultrazvukového snímače.

6 Re prezentace okolí mobilního robotu

V následující kapitole se budeme zabývat budováním okolního prostředí, ve kterém se mobilní robot pohybuje. Nejprve uvedeme možné způsoby reprezentace světa a zaměříme se především na sensorické mapy reprezentované pomocí mřížek obsazenosti. V závěru kapitoly uvedeme vztahy pro ohodnocení kvality vnitřní mapy prostředí.

6.1 Způsoby reprezentace světa

V další části textu uvedeme čtyři základní způsoby reprezentace světa: jedná se o sensorické, geometrické, topologické a symbolické mapy. Uvedeme jejich výhody a nevýhody. Dále se zaměříme na jejich konkrétní využití.

6.1.1 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 [32]. Pro reprezentaci zpracovaných sensorických měření lze použít pravděpodobnostní mřížku obsazenosti, kterou poprvé použil Elfes [29]. 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.

Vzhledem k velké paměťové náročnosti se používá sensorická mapa k vytváření lokální mapy. Pro realizaci globální mapy lze použít také sensorické mapy s menší rozlišovací schopností mřížky obsazenosti nebo geometrického přístupu popsaného v následující kapitole. Na základě mřížek obsazenosti lze zpřesňovat skutečnou polohu robotu hledáním odpovídajících korespondencí mezi lokální a globální mapou [30].

6.1.2 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, vzniklých datovou fúzí z jednotlivých měření. Nevýhodou prvního přístupu je přiřazování daných sensorických měření k jednotlivým zakresleným geometrickým útvarům. Výhodou je větší přesnost výsledné mapy.

Naproti tomu druhý přístup vytváří geometrickou mapu z již zpracovaných měření, vzniklých datovou fúzí z jednotlivých čidel, kde je přesnost mapy dána rozlišovací schopností použité mřížky. Práce [33] se zabývá problematikou zpřesňování polohy mobilního robotu (lokalizací) na základě sensorických měření a stavbou světa pomocí geometrické mapy. V současné době je stále řešena problematika současné lokalizace a mapování prostředí známých pod označením SLAM (simultaneous localization and mapping) [37], [38]. Metodami geometrického mapování se budeme zabývat v samostatné kapitole 8.

6.1.3 Topologické mapy

Ve většině případů vycházejí topologické mapy z geometrických map. Topologické mapy zavádějí zobecnění reprezentace světa robotu a jsou velmi vhodné pro popis velkých

prostorů. Kromě geometrického popisu prostředí mohou obsahovat např. informace o propojení jednotlivých místností a prostorovém uspořádání budov. V topologické mapě mohou být vyznačeny bezpečné spoje tvořící graf cest, které vznikají umístěním bodů do středu volného prostoru [31].

6.1.4 Symbolické mapy

Pro komunikaci mezi operátorem a robotem se používají symbolické mapy, které nevznikají na základě informací z vnějších čidel. Symbolické mapy obsahují informace potřebné k zadávání příkazů robotu v přirozeném jazyce. Jedná se například o symbolické označení objektů používaných lidmi. Výhodu symbolických map lze spatřit v rozšíření použití robotů například pro dlouhodobé plánování činností. Symbolické mapy lze rozšířit o algoritmy analýzy řeči, jež lze využít pro hlasové ovládání operací robotu [51].

6.2 Sensorické mapy reprezentované pomocí mřížek obsazenosti

Mřížky obsazenosti si v oblasti mobilní robotiky získaly oblibu kvůli možnosti datové fúze sensorických měření z různých pozic robotu, které jsou schopny se vyrovnat se šumem. Prostor okolí robotu je většinou rozdělen na čtvercovou matici obsahující v jednotlivých buňkách míru volnosti, či obsazenosti [29]. Mřížky obsazenosti umožňují provádět datovou fúzi z různých typů sensorů a datovou fúzi jednotlivých měření (stejněho typu čidla) z různých pozic robotu. Obsazenost v mřížce lze vyjádřit pomocí několika přístupů [32]:

- Pravděpodobnostní přístup, využívající Bayesova vztahu pro slučování dat.
- Věrohodnostní přístup, který je postavený na Dempster-Shaferově teorii.

Při vytváření mřížek obsazenosti pracujeme s modelem sensoru, který vychází ze základních vlastností snímače a je tvořen dvěma funkcemi: mírou obsazenosti $model_o^d(\delta, \phi)$ a mírou volnosti modelu $model_v^d(\delta, \phi)$, kde d představuje naměřenou vzdálenost snímačem, δ a ϕ jsou polární souřadnice buňky modelu, vztažené k pozici a natočení sensoru a symboly o , v označují obsazenou resp. volnou buňku.

6.2.1 Pravděpodobnostní mřížky obsazenosti

V další části textu je chápán pojem "svět", jako zachycené prostředí v okolí mobilního robotu daným sensorickým systémem. Mřížky obsazenosti založené na pravděpodobnostním přístupu tvoří dvoudimensionální matici buněk, která zachycuje pravděpodobnost obsazení prostoru překážkou. Tuto pravděpodobnost obsazení prostoru překážkou jedné buňky vypočteme jako poměr počtu zachycených světů, kde byla daná buňka obsazena, ku počtu všech zachycených světů, které odpovídají dosavadním měřením [32]. Pokud označíme $\mathbf{s}(\mathbf{a})=\mathbf{o}$ stav buňky $\mathbf{a}$ je *obsazeno* a $\mathbf{s}(\mathbf{a})=\mathbf{v}$ stav buňky $\mathbf{a}$ je *volno*, pak pravděpodobnost obsazení buňky $\mathbf{a}$ pro aktuální měření $\mathbf{d}$ je dáno vztahem

$$P(s(a) = o|d) = \frac{\sum_{m \in M \wedge s(m_a)=o} P(m|d)}{\sum_{m \in M} P(m|d)}, \quad (6.1)$$

kde M je množina všech možných světů, m_a je buňka odpovídající buňce a ve světě m a $P(m|d)$ je pravděpodobnost světa m při aktuálním měření d [32].

Ze vztahu vidíme, že pravděpodobnost jednotlivých buněk mřížky je vzájemně provázaná (podmíněná pravděpodobnost) a výpočet obsazenosti buňky pro dané měření vede na exponenciální výpočetní náročnost. Z tohoto důvodu metody založené na pravděpodobnostním přístupu zavádějí zjednodušení a neuvažují závislost pravděpodobnosti obsazení jednotlivých buněk.

Při realizaci mřížek obsazenosti předpokládáme, že každá buňka obsahuje jednu hodnotu $P(s(a) = o)$ a pro $P(s(a) = v)$ platí následující vztah

$$P(s(a) = v) = 1 - P(s(a) = o) \quad (6.2)$$

představující doplňkovou pravděpodobnost.

Hodnotu pravděpodobnosti obsazené buňky $P(s(a) = o|d)$ pro nové měření d určíme z aktuálního modelu sensoru $p(d|s(a) = o)$ a předchozí hodnoty v mřížce $P(s(a) = o)$ dle Bayesova vztahu pro případ slučování sensorických dat

$$P(s(a) = o|d) = \frac{p(d|s(a) = o)P(s(a) = o)}{p(d|s(a) = o)P(s(a) = o) + p(d|s(a) = v)P(s(a) = v)}. \quad (6.3)$$

Hustota pravděpodobnosti $p(d|s(a) = o)$ je definována na základě modelu sensoru, uvedeného v kapitole 7, následující rovnicí

$$p(d|s(a) = o) = \frac{1 + model_o^d(\delta, \phi) - model_v^d(\delta, \phi)}{2}, \quad (6.4)$$

kde (δ, ϕ) jsou polární souřadnice buňky a v soustavě sensoru a d je naměřená vzdálenost sensoru. Z důvodu přehlednosti představuje označení $p(\dots)$ hustotu pravděpodobnosti modelu a $P(\dots)$ pravděpodobnost budovaného prostředí.

6.2.2 Mřížky obsazenosti založené na D-S teorii

Věrohodnostní přístup, který je založený na Dempstera-Shafera teorii lze také aplikovat pro vytváření mřížek obsazenosti. V daném případě jsou buňky mřížky rozděleny na obsazené a volné. Pak základní množina stavů je dvouprvková $X = \{V, O\}$ a množina všech případů, které se mohou pro danou buňku vyskytnout je dána $\Delta = 2^X = \{\emptyset, V, O, \{V, O\}\}$. Míra důvěry v obsazenost jedné buňky je dána základním pravděpodobnostní mírou p , tj. $p : \Delta \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$ pomocí vztahů

$$Bel(\{V\}) = \sum_{A \in \Delta, A \subset \{V\}} p(A) = p(\{V\}), \quad (6.5)$$

$$Bel(\{O\}) = \sum_{A \in \Delta, A \subset \{O\}} p(A) = p(\{O\}), \quad (6.6)$$

kde $Bel(A)$ je definováno dle vztahu

$$Bel(A) = \sum_{B \in \Delta, B \subset A} p(B), \quad pro A \subset \Delta. \quad (6.7)$$

Velmi často se počítá míra plausibility v obsazenosti jedné buňky podle vztahu $Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A})$. Tedy míra plausibility v obsazenosti jedné buňky je rovna doplňku míry důvěry ve volnost buňky. Míru plausibility lze určit ze základního pravděpodobnostního přiřazení dle následujícího vztahu

$$Pl(\{V\}) = \sum_{A \in \Delta, A \cap \{V\} \neq \emptyset} p(A) = 1 - p(\{O\}) \quad (6.8)$$

$$Pl(\{O\}) = \sum_{A \in \Delta, A \cap \{O\} \neq \emptyset} p(A) = 1 - p(\{V\}) \quad (6.9)$$

Pro základní pravděpodobnostní přiřazení platí následující vlastnosti

$$p(\emptyset) = 0, \quad (6.10)$$

$$\sum_{A \in \Delta} p(A) = 1, \quad (6.11)$$

neboť se jedná o pravděpodobnostní míru. Z výše uvedených vlastností vyplývá, že pro uchování informací o míře důvěry v obsazenost a volnost buňky v mřížce postačí, zapamatovat si hodnoty základního pravděpodobnostního přiřazení pro množiny $\{V\}$ a $\{O\}$. Jedná se tedy o údaje $p(\{V\})$ a $p(\{O\})$. Hodnotu neurčitosti $p(\{V, O\})$ určíme na základě vztahu (6.11), jako $p(\{V, O\}) = 1 - p(\{V\}) - p(\{O\})$.

Při integraci stávajícího pravděpodobnostního přiřazení náležící mřížce p^B a pravděpodobnostního přiřazení, odpovídající novému měření p^d , dostaneme nové pravděpodobnostní přiřazení p^N dle následujících vztahů

$$p^N(\{V\}) = \frac{p^B(\{V\})p^d(\{V\}) + p^B(\{V\})p^d(\{V, O\}) + p^B(\{V, O\})p^d(\{V\})}{1 - p^B(\{V\})p^d(\{O\}) - p^B(\{O\})p^d(\{V\})} \quad (6.12)$$

$$p^N(\{O\}) = \frac{p^B(\{O\})p^d(\{O\}) + p^B(\{O\})p^d(\{V, O\}) + p^B(\{V, O\})p^d(\{O\})}{1 - p^B(\{V\})p^d(\{O\}) - p^B(\{O\})p^d(\{V\})}, \quad (6.13)$$

kde při počátečním nastavení mřížky obsazenosti jsou základní pravděpodobnostní přiřazení $p(\{V\})$, $p(\{O\})$ rovny 0 a $p(\{V, O\})=q$. Výhodou věrohodnostního přístupu jsou nezávislé hodnoty pro obsazenost a volnost, na základě kterých můžeme zjistit neurčitost měření. Pravděpodobnostní přiřazení odpovídající novému měření d stanovíme na základě modelu sonaru uvedeného v kapitole 7 dle následujících vztahů

$$p^d(\{O\}) = model_o^d(\delta, \phi) \quad (6.14)$$

$$p^d(\{V\}) = model_v^d(\delta, \phi), \quad (6.15)$$

kde (δ, ϕ) jsou polární souřadnice buňky a v soustavě sensoru a d je naměřená vzdálenost sensoru. K tomu, abychom mohli ohodnotit kvalitu vytvořené mřížky, musíme danou mřížku obsazenosti převést na ohodnocení míry charakterizující současně obsazenost a

volnost prostředí. Jeden z přístupů je uveden v [32], kde výslednou mřížku obsazenosti určíme dle následujících vztahů

$$\begin{aligned}\tilde{P}(\{O\}) &= \frac{1}{2}(Bel_x(\{O\}) + Pl_x(\{O\})) \\ &= \frac{1}{2}(1 + p(\{O\}) - p(\{V\})).\end{aligned}\quad (6.16)$$

6.3 Ohodnocení kvality vnitřní mapy prostředí

Ohodnocení kvality mřížky obsazenosti nám umožňuje posoudit vliv modelu sonaru na kvalitu vytvořené mapy prostředí. V práci [39] je uveden vztah pro ohodnocení kvality mřížky pomocí shody mezi vzorovou mřížkou a mřížkou vytvořenou na základě sensorických měření. Ohodnocení lze vypočítat dle následujícího vztahu

$$shoda_M(C, V) = \sum_{a \in C} shoda_M(C_a, V_a), \quad (6.17)$$

kde

$$shoda_M(C_a, V_a) = P(s(C_a) = o)P(s(V_a) = o) + P(s(C_a) = v)P(s(V_a) = v). \quad (6.18)$$

Porovnáváná vzorová mřížka je označena C resp. V . Dále C_a označuje buňku a mřížky C a V_a buňku, odpovídající polohou buňce a ve vzorové mřížce V . V další části textu představuje výraz $shoda_M$ vztah (6.17) definovaný podle Moravce ve [39].

V práci [32] je uveden vztah (6.19) pro ohodnocení kvality, který se snaží vyvážit poměr mezi počtem volných a obsazených buněk. Daná míra shody naměřené a vzorové mřížky vychází ze součtu čtverců odchylek odpovídajících buněk vzorové a testované mřížky, které jsou určeny odděleně pro obsazené a volné buňky vzorové mřížky. Výsledná míra shody je určena váženým průměrem vyrovnávající rozdíly mezi počtem volných a obsazených buněk ve vzorové mapě.

$$shoda_S(C, V) = -\frac{|V_v|shoda^O(C, O_v) + |O_v|shoda^V(C, V_v)}{|O_v| + |V_v|}, \quad (6.19)$$

kde V označuje vzorovou mapu, C měřenou mapu, O_v množinu všech obsazených buněk vzorové mapy a V_v množinu všech volných buněk vzorové mapy. Míru shody mezi vzorovou a naměřenou mřížkou obsazenosti pro obsazené a volné buňky vzorové mřížky vypočteme dle následujících vztahů:

$$shoda^O(C, O_v) = \sum_{o \in O_v} P(s(C_o) = v)^2 \quad (6.20)$$

$$shoda^V(C, V_v) = \sum_{v \in V_v} P(s(C_v) = o)^2, \quad (6.21)$$

kde C_o je buňka mřížky C , odpovídající polohou buňce o . Záporná hodnota je zvolena kvůli zachování vlastnosti, že kvalitnější mřížka obsazenosti má větší hodnotu míry shody v porovnání se vzorovou mřížkou. V další části textu představuje výraz $shoda_S$ vztah (6.19) definovaný podle Stepan ve [32].

V této práci zavedeme naši definici nové míry shody, vycházející z rovnic (6.20) a (6.21), podle následujícího vztahu

$$shoda_P(C, V) = \frac{shoda^O(C, O_v) + shoda^V(C, V_v)}{|O_v| + |V_v|} \cdot 100. \quad (6.22)$$

V případě, že platí následující rovnosti $shoda^O(C, O_v) = |O_v|$ a $shoda^V(C, V_v) = |V_v|$ je ohodnocení kvality mezi vzorovou a měřenou mřížkou 100%. Dále musíme poznamenat, že tento vztah je podobný definici míry uvedené v rovnici (6.17). Daná míra shody však nerozděluje obsazené a volné buňky vzorové mřížky a tudíž jsou ve výsledné míře shody zahrnuta místa s neurčitým prostorem vzorové mřížky. V další části textu představuje výraz $shoda_P$ vztah (6.22) definovaný podle Pirkla.

7 Model ultrazvukového snímače

V následujícím textu popíšeme ultrazvukové modely tak, jak byly publikovány různými autory. Nejprve se budeme zabývat Elfesovým a dále pak exponenciálním modelem ultrazvukového snímače. Uvedeme jejich matematický popis, výhody a nevýhody spojené s vytvářením mapy prostředí. Dále zavedeme vlastní model, který bude odstraňovat nevýhody výše uvedených modelů. Jednotlivé modely snímačů budou porovnány v reálném prostředí a pro každý typ modelu bude ohodnocena kvalita vytvořené mřížky obsazenosti.

7.1 Elfesův model sonaru

Elfesův model ultrazvukového snímače je na základě svého matematického vyjádření označován taktéž jako kvadratický model a byl poprvé použit v práci [29]. Vychází ze základních parametrů snímače, přesnosti ϵ a horizontálního vyzařovacího úhlu φ . Pro naměřenou vzdálenost d lze model popsat následujícími rovnicemi:

$$\begin{aligned} V_d(\delta) &= 1 - (\delta/d)^2, & \text{pro } \delta \in \langle 0, d - \epsilon \rangle \\ V_d(\delta) &= 0, & \text{jinak} \end{aligned} \quad (7.1)$$

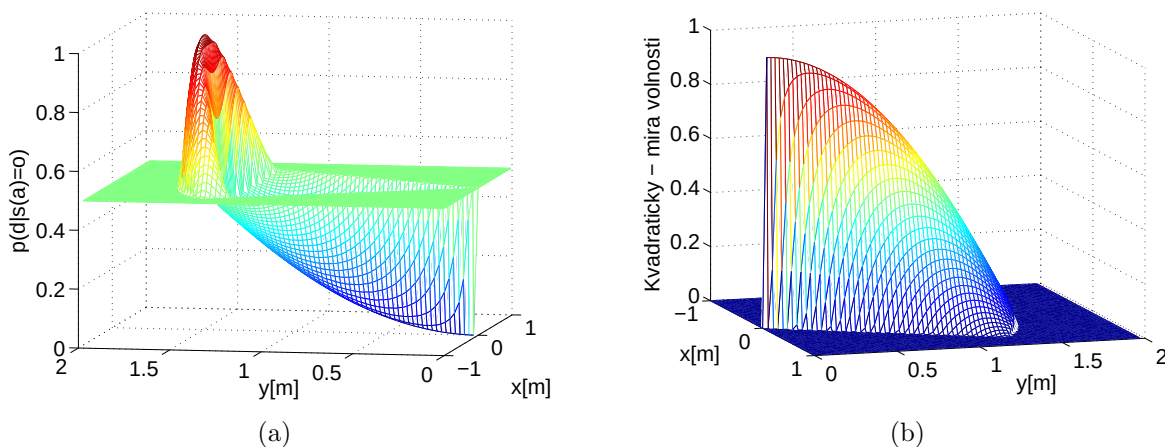
$$\begin{aligned} O_d(\delta) &= 1 - ((\delta - d)/\epsilon)^2, & \text{pro } \delta \in \langle d - \epsilon, d + \epsilon \rangle \\ O_d(\delta) &= 0, & \text{jinak} \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\begin{aligned} A(\phi) &= 1 - (2\phi/\varphi)^2, & \text{pro } \phi \in \langle -\varphi/2, \varphi/2 \rangle \\ A(\phi) &= 0, & \text{jinak} \end{aligned} \quad (7.3)$$

$$\begin{aligned} model_v^d(\delta, \phi) &= V_d(\delta)A(\phi) \\ model_o^d(\delta, \phi) &= O_d(\delta)A(\phi), \end{aligned} \quad (7.4)$$

kde $model_v^d$ a $model_o^d$ představují model volnosti resp. obsazenosti snímače. Rovnici (6.4) pro výpočet hustoty pravděpodobnosti modelu sonaru $p(d|s(a) = o)$ jsme uvedli v kapitole 6.2.1. Na obrázku 7.1a je uvedena hustota pravděpodobnosti Elfesova modelu pro parametry $\varphi = 60^\circ$, $\epsilon = 0.04$ m a vzdálenost $d = 1.5$ m, měřenou od počátku souřadnicového systému $[0,0]$ ve směru osy y . Pro správné zobrazení této funkce je nutné provést transformaci z polárních souřadnic (δ, ϕ) do kartézských (x, y) .

Model volnosti $model_v^d(\delta, \phi)$ je realizován pomocí kvadratické funkce a jeho míra volnosti se s rostoucí vzdáleností snižuje kvadraticky, jak vidíme na obrázku 7.1b. Model obsazenosti je taktéž realizován pomocí kvadratické funkce, kde maximální míra obsazenosti se nachází právě v naměřené vzdálenosti d . Nevýhodou Elfesova modelu je, že neuvažuje výskyt vícenásobných odrazů, vyskytujících se v prostředí s nerozptylujícími se překážkami. Tento nedostatek se snaží odstranit disertační práce [32], kde je definován tzv. exponenciální model ultrazvukového snímače popsany v následující kapitole.



Obrázek 7.1: a) Hustota pravděpodobnosti Elfesova modelu sonaru pro překážku ve vzdálenosti 1.5 m. b) Míra volnosti Elfesova modelu.

7.2 Exponenciální model sonaru

Stejně jako kvadratický model, popsáný v kapitole 7.1, vychází exponenciální model také ze základních parametrů snímače. Modely volnosti a obsazenosti byly vytvořeny na základě statistického měření a lze je popsat následujícími rovnicemi [32]:

$$\begin{aligned} V_d(\delta) &= e^{-\delta}, \quad \text{pro } \delta \in \langle 0, d - \epsilon \rangle \\ V_d(\delta) &= 0, \quad \text{jinak} \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\begin{aligned} O_d(\delta) &= (1/d) (1 - ((\delta - d) / \epsilon)^2), \quad \text{pro } \delta \in \langle d - \epsilon, d + \epsilon \rangle \\ O_d(\delta) &= 0, \quad \text{jinak.} \end{aligned} \quad (7.6)$$

Pro výpočet $A(\phi)$, $model_v^d$ a $model_o^d$ použijeme vztahy (7.3) a (7.4). Model volnosti je v tomto případě realizován pomocí exponenciální funkce. Dochází v něm k rychlejšímu poklesu míry volnosti prostoru. Model obsazenosti je realizován obdobně jako kvadratický model, s tím rozdílem, že je omezen funkcí $1/d$. Pro delší vzdálenosti tedy dostaneme menší míru obsazenosti.

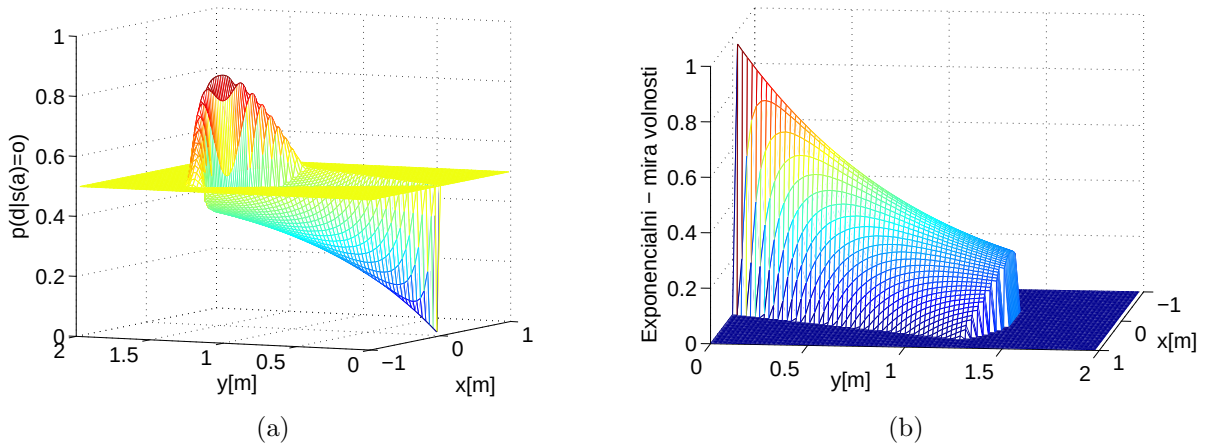
Výhody:

- Omezení míry pravděpodobnosti obsazeného prostoru funkcí $1/d$ částečně kompenzuje vliv vícenásobných odrazů, jak bylo v [32] dokázáno.

Nevýhody:

- Nejsou uvedeny omezující podmínky míry pravděpodobnosti obsazeného prostoru pro případ vzdáleností menších jak 1m.

- Exponenciální model volnosti zanáší menší množství informace do realizované mapy. Projevuje se pozvolnějším pokrýváním volného prostoru v mapě a především pozvolnějším překreslováním již zakreslených překážek.
- Míra volnosti neklesne k nule pro naměřenou vzdálenost d . Například pro vzdálenosti 1.5m je míra volnosti rovna 0.22, jak lze vidět na obrázku 7.2b. Výsledná hustota pravděpodobnosti exponenciálního modelu představuje pro naměřenou vzdálenost d výrazný skok a tudíž průběh není tak spojitý jako v případě kvadratického modelu.



Obrázek 7.2: a) Hustota pravděpodobnosti exponenciálního modelu sonaru pro překážku ve vzdálenosti 1.5 m, b) Míra volnosti exponenciálního modelu.

7.3 Kombinovaný model sonaru

Kombinovaný model sonaru [49] je navržen na základě modelů uvedených v kapitolách 7.1 a 7.2. Model volnosti vychází z kvadratického modelu a model obsazenosti omezíme obdobně jako v případě exponenciálního modelu funkcí $1/d$. Pro ještě větší potlačení vlivu vícenásobných odrazů jsme zavedli funkci $1/(1 + d^m)$, kde $m = 1, 2, 3, \dots$. Jednička uvedená ve jmenovateli předchozího vztahu zamezuje výskytu míry volnosti větší jak jedna v případě naměřené vzdálenosti menší jak 1m.

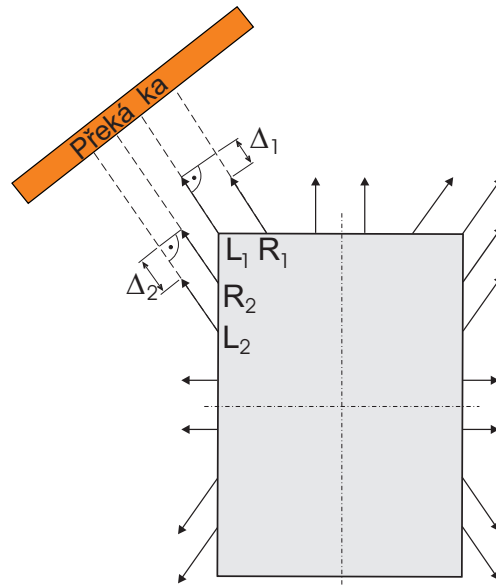
$$\begin{aligned} V_d(\delta) &= 1 - (\delta/d)^2, & \text{pro } \delta \in \langle 0, d - \epsilon \rangle \\ V_d(\delta) &= 0, & \text{jinak} \end{aligned} \quad (7.7)$$

$$\begin{aligned} O_d(\delta) &= (1/(1 + d^m)) (1 - ((\delta - d)/\epsilon)^2), & \text{pro } \delta \in \langle d - \epsilon, d + \epsilon \rangle \\ O_d(\delta) &= 0, & \text{jinak} \end{aligned} \quad (7.8)$$

Pro výpočet $A(\phi)$, $model_v^d$ a $model_o^d$ použijeme vztahy (7.3) a (7.4).

7.4 Zdvojování ultrazvukových čidel

Pro odstranění vícenásobných odrazů zavedeme další filtr, který spočívá v porovnávání výsledků odpovídajících dvojic levých a pravých ultrazvukových snímačů L_i a R_i pro $i = 1, \dots, 9$. Každá z příslušných dvojic musí být stejně nakloněna. Na ilustrativním obrázku 7.3 je orientace čidla dána šipkou a jeho skutečné umístění na konci této šipky. Vzhledem k různým vzdálenostem dvojic čidel bylo nutné provést odpovídající korekci vzdáleností o Δ_i . Pokud je rozdíl naměřených vzdáleností dané dvojice čidel v určité toleranci d_t , je dané měření zakresleno do mapy prostředí.



Obrázek 7.3: Zdvojování ultrazvukových čidel.

7.5 Výsledky experimentů

V této kapitole se budeme 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 7.5a. 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 7.5b je vyznačena zelenou barvou trasa pohybu robotu, modrou barvou tělo robotu společně s rozmístěním sensorů a červenou barvou skutečné překážky.

Experimenty byly provedeny s následujícími podmínkami:

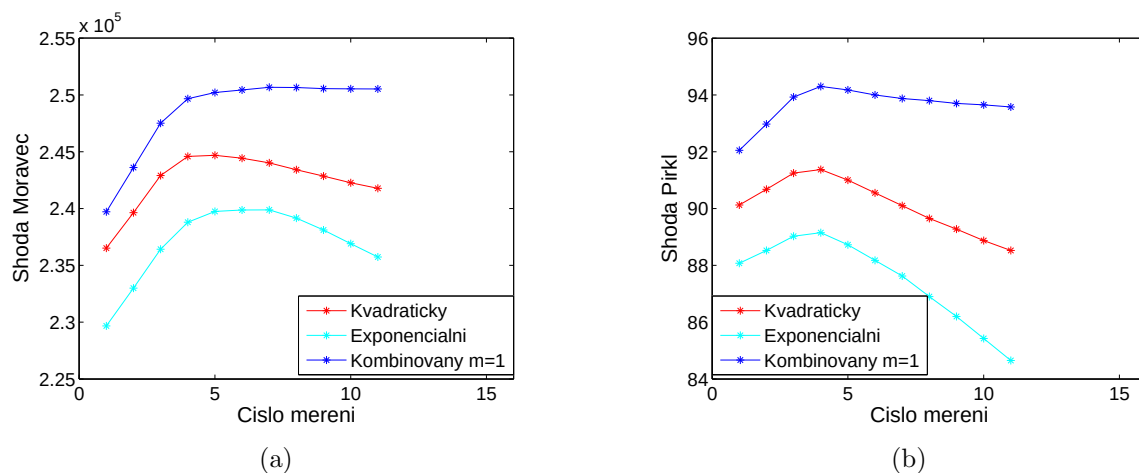
- Pokud je naměřená vzdálenost větší jak maximálně měřitelná vzdálenost ultrazvukového snímače, v našem případě 3.3 m, není překážka zakreslena do mapy. Tato podmínka částečně kompenzuje výskyt vícenásobných odrazů, ne však zcela. Filtrace probíhá přímo v navrženém sensorickém subsystému uvedeném v kapitole 5.

- Pokud je pravděpodobnost buňky v mřížce obsazenosti právě vytvářené mapy větší jak předepsaný práh, v našem případě 0.99, je buňka ve výsledné mapě ponechána beze změny. Pokud bychom nezavedli tuto podmínku, budou v průběhu jízdy robotu překreslovány již zachycené překážky.
- Pokud je intenzita odraženého signálu od překážky menší jak předepsaný práh, v našem případě 20, není překážka zakreslena do mapy. Díky možnosti měření intenzity odraženého signálu snímače došlo jednak k potlačení odrazů vzniklých od země, které byly způsobeny značným vyzařovacím úhlem sensoru, zejména však došlo k potlačení vlivu vícenásobných odrazů. Filtrace probíhá taktéž přímo v navrženém sensorickém subsystému.

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 (6.17), (6.19) a (6.22) definované v kapitole 6.3. Pro každý typ modelu jsme provedli celkem 11 výpočtů míry shody mezi vzorovou a aktuálně naměřenou mřížkou obsazenosti v jednotlivých úsecích trajektorie pohybu robotu.

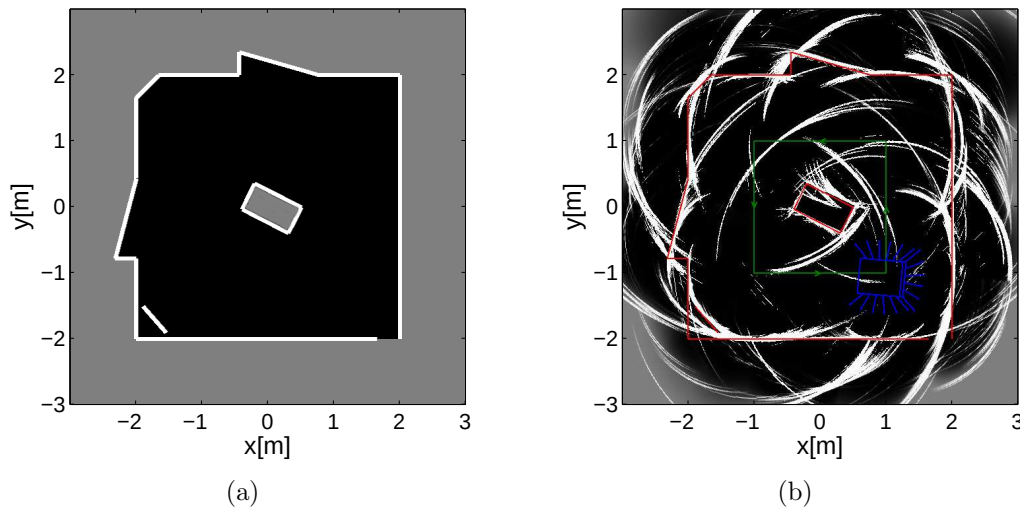
7.5.1 Vliv modelu ultrazvukového snímače na kvalitu vytvářené mapy

V rámci daného experimentu jsme provedli celkem tři různá měření s jednotlivými modely snímačů. Na obrázku 7.4 jsou uvedeny výsledky míry shody pro 11 měření v průběhu jízdy robotu vypočtené na základě vztahů (6.17) (Moravec) a (6.22) (Pirkl). Obě míry shody pro jednotlivé modely vykazují velmi podobné výsledky, kdy v začátku jízdy robotu výrazně narůstá, zhruba do 4-5 měření.



Obrázek 7.4: Míra shody, různých typů modelů, vyjádřená pomocí a) Moravec b) Pirkl

Kvalita mapy pro kombinovaný model sonaru uvedená na obrázku 7.4a se v dalším průběhu jízdy takřka nemění. Na obrázku 7.4b, pro stejný typ modelu, 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



Obrázek 7.5: a) Vzorová mapa prostředí robotu b) Kvadratický model

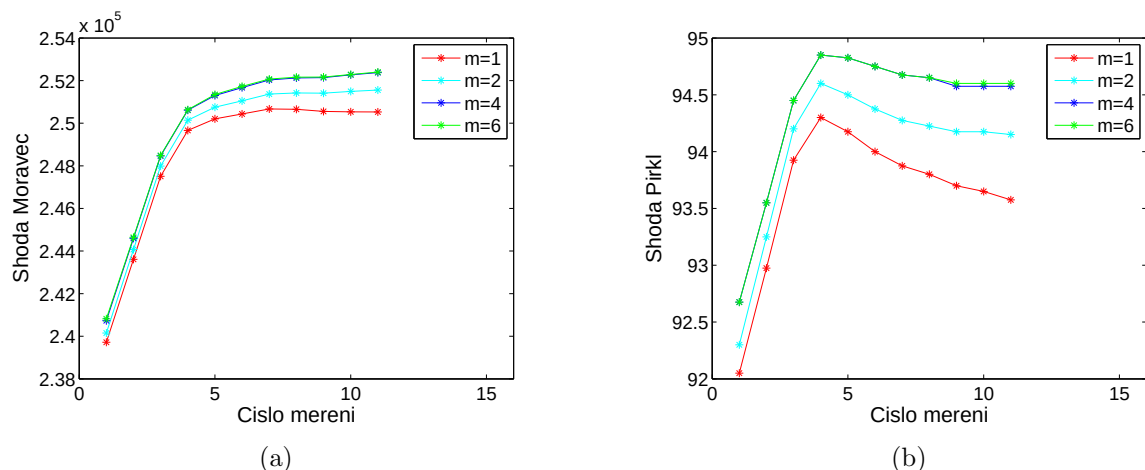
podle vztahu (6.22) se daleko více projevuje vliv vícenásobných odrazů. U zbylých dvou modelů dochází k výraznějším poklesům míry shody po provedení 4-5 měření, kde na obrázku 7.4b je vidět strmější pokles způsobený větším vlivem vícenásobných odrazů. Na obrázku 7.5b je uvedena výsledná mapa prostředí, která vznikla v průběhu jízdy robotu při použití kvadratického modelu, která je výrazně ovlivněna výskytem vícenásobných odrazů. Obdobně na obrázku 7.7a je uvedena mapa prostředí pro kombinovaný model sonaru s $m = 1$, kde dochází k výraznému potlačení vlivu vícenásobných odrazů.

V kapitole 6.3 jsme uvedli vztah (6.19) (Stepan) pro ohodnocení kvality mapy prostředí, který se snaží vyvážit poměr mezi počtem volných a obsazených buněk. Bohužel se nám tento vztah v průběhu práce neosvědčil a vykazoval opačné výsledky, než které odpovídaly dané skutečnosti.

7.5.2 Vliv kombinovaného modelu na kvalitu vytvářené mapy

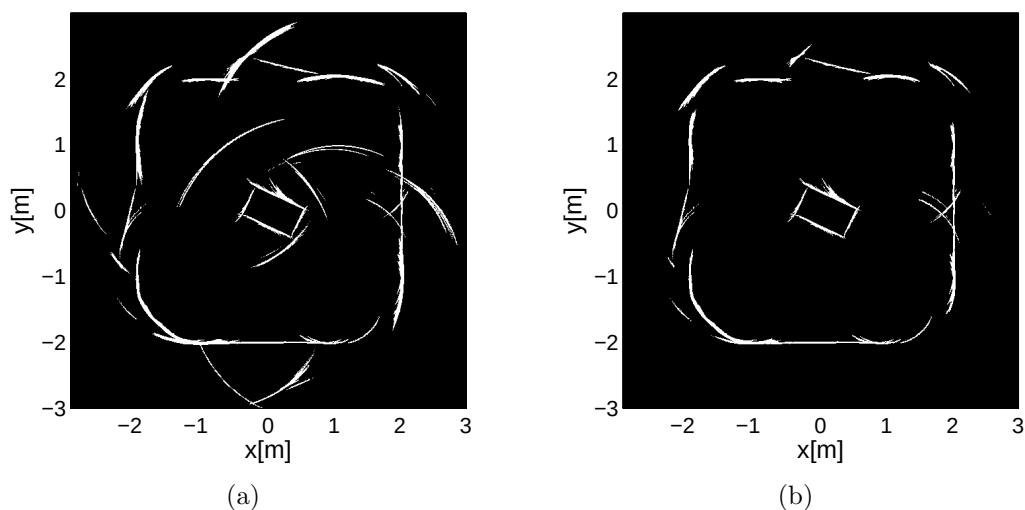
V rámci daného experimentu jsme provedli celkem jedenáct různých měření s kombinovaným modelem snímače pro čtyři různě velké hodnoty mocnin u modelu obsazenosti. Na obrázku 7.6 jsou uvedeny výsledky míry shody pro jednotlivá měření vypočtené na základě vztahů (6.17) a (6.22). Obě míry shody výrazně narůstají do 4-5 měření a dále pak narůstají pozvolněji v případě obrázku 7.6a. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole 7.5.1, daná míra shody tolik nevystihuje výskyt vícenásobných odrazů. Na obrázku 7.6b 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 7.7a a 7.7b 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, které 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



Obrázek 7.6: Míra shody pro kombinované modely s různou mocninou m , vyjádřená pomocí a) Moravec b) PírkI

lze velmi dobře použít k realizaci lokální sensorické mapy prostředí.

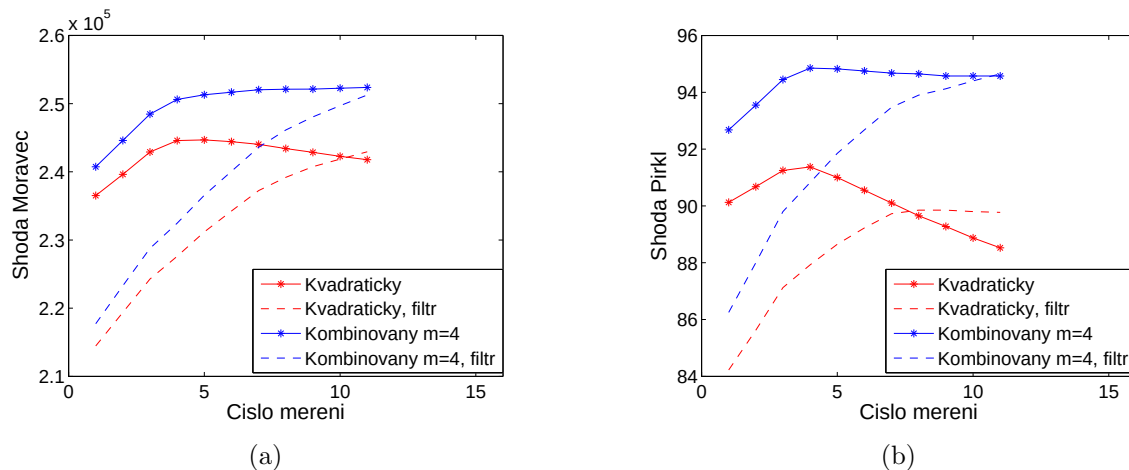


Obrázek 7.7: a) Kombinovaný model $m=1$ b) Kombinovaný model $m=4$

7.5.3 Vliv zdvojení čidel na kvalitu vytvářené mapy

Pro ještě větší potlačení nežádoucích měření, které vznikají v průběhu jízdy robotu, jsme zavedli další filtraci. Metoda spočívá ve zdvojení ultrazvukových čidel a její princip byl uveden v kapitole 7.4. Provedli jsme experimenty pro dva různé typy modelů ultrazvukových snímačů s použitím a bez použití filtru pro vzájemné porovnání výsledků. Na obrázku 7.8 jsou uvedeny výsledky míry shody pro jednotlivá měření, vypočtené na základě vztahů (6.17) a (6.22). Obě míry shody pro filtrovaná data narůstají pozvolna v průběhu celé jízdy robotu a dosáhnou téměř stejných hodnot jako v případě nefiltrovaných

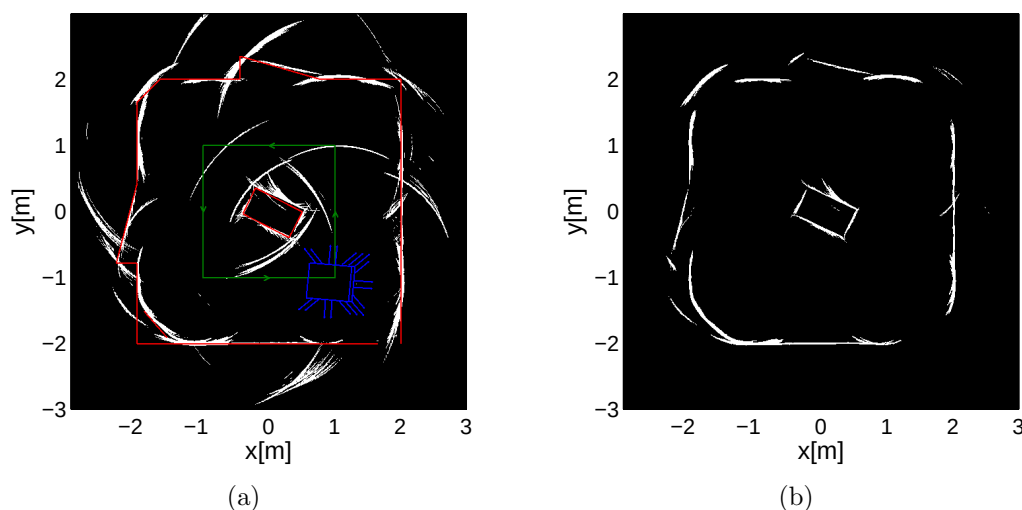
měření. Míra vypočtená dle vztahu (6.22) zde opět potvrzuje lepší popis výskytu vícenásobných odrazů zejména v případě kvadratického modelu, jak je patrné z obrázku 7.8b. Nízká míra shody, v počátku jízdy robotu, u filtrovaných měření je způsobena menším zanášením volného prostoru do mapy prostředí.



Obrázek 7.8: Míra shody, při zdvojení čidel, vyjádřená pomocí a) Moravec b) Pírků

Na obrázku 7.9a je uvedena mapa prostředí pro kvadratický model s filtrací měření, která je v porovnání s obrázkem 7.5b výrazně kvalitnější. Na obrázku 7.9b je uvedena stejná situace pro kombinovaný model, u kterého došlo k mírnému zlepšení v porovnání s obrázkem 7.7b.

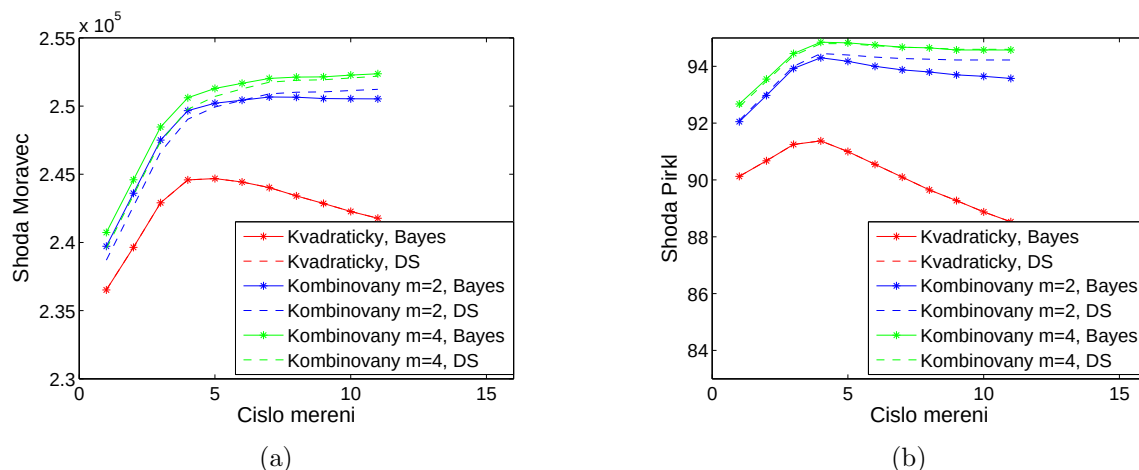
Zavedením této filtrace dojde k dalšímu potlačení vlivu vícenásobných odrazů.



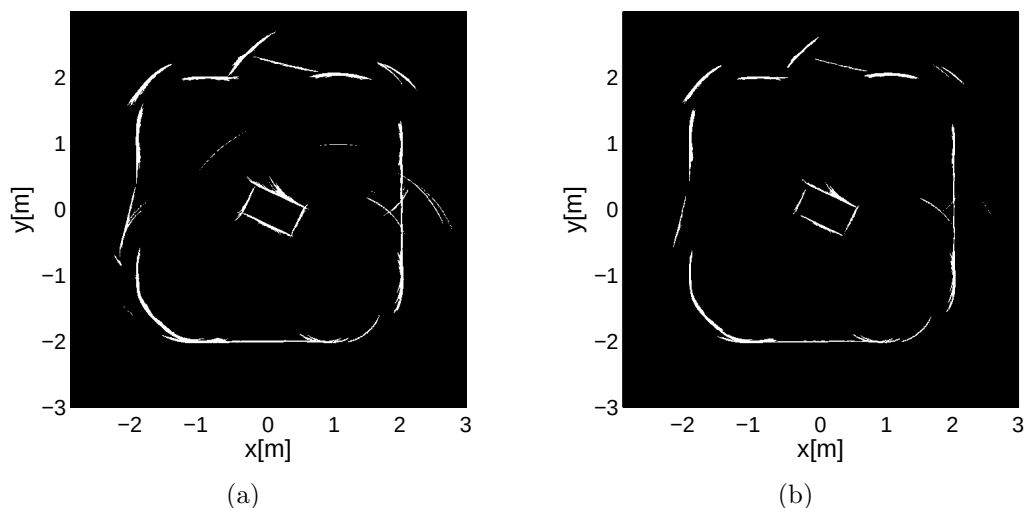
Obrázek 7.9: a) Kvadratický model se zdvojením čidel b) Kombinovaný model pro $m=4$ se zdvojením čidel

7.5.4 Vliv sdružování dat na kvalitu vytvářené mapy

V kapitolách 6.2.1 a 6.2.2 jsme uvedli dva způsoby sdružování sensorických dat pomocí pravděpodobnostního přístupu využívajícího Bayesova vztahu a D-S teorie. V této kapitole uvedeme výsledky experimentů pro kvadratický a kombinovaný model ultrazvukového snímače s výše uvedenými způsoby slučování dat. Na obrázku 7.10 jsou uvedeny výsledky míry shody pro jednotlivá měření vypočtené na základě vztahů (6.17) a (6.22).



Obrázek 7.10: Míra shody, pro Bayesovu a D-S teorii sdružování dat, vyjádřená pomocí a) Moravec b) PirkI



Obrázek 7.11: a) Kombinovaný model pro m=2, Bayesovo sdružování dat b) Kombinovaný model pro m=2, sdružování dat pomocí D-S teorie

V případě kvadratického modelu vyšly výsledky pro oba způsoby slučování dat totožně. Pro kombinovaný model s mocninou $m = 2$ však došlo ke zlepšení kvality mapy prostředí v případě D-S teorie slučování dat. Pro mocninu $m = 4$ jsou výsledky míry shody opět

velmi podobné. Na obrázku 7.11a je uvedena mapa prostředí, pro kombinovaný model s mocninou $m = 2$, která vznikla na základě Bayesova způsobu sdružování dat. Pro stejný model čidla je uvedena mapa prostředí na obrázku 7.11b, která vznikla na základě D-S teorie slučování dat. Z druhého obrázku je patrné, že došlo k potlačení vícenásobných odrazů.

7.5.5 Shodnocení dosažených výsledků pro použité modely sonarů

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 [32] 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 zdvojováním ultrazvukových čidel. Díky širokému spektru úhlu vyzařování 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.

8 Geometrické mapy

Popis prostředí pomocí geometrických útvarů přináší mnoho výhod. Reprezentace modelu je srozumitelná člověku a obsahuje informace o tvaru, velikosti a poloze překážky, použitelné pro dlouhodobé plánování trajektorie pohybu robotu, jak bude ukázáno v kapitole 9. Zároveň paměťová náročnost je velmi malá a aktuálně vytvořený obraz prostředí lze například dále použít pro lokalizaci robotu využívající geometrického modelu prostředí [33]. Je však třeba poznamenat, že geometrické modelování se začalo rozvíjet až s nástupem přesnějších sensorických čidel a nebylo na toto téma uveřejněno tolik publikací jako v oblasti lokalizace.

8.1 Sekvenční a dávkové vytváření mapy prostředí

Geometrický model prostředí robotu lze vytvářet pomocí sekvenčního zpracování aktuálně snímaných sensorických dat a jejich postupným přidáváním do realizované mapy. Kostru algoritmu lze popsat následujícími kroky:

1. Získej aktuální sensorické měření.
2. Aproximuj dané měření množinou úseček.
3. Najdi odpovídající si dvojice úseček z aktuálního měření a vytvořené mapy dle korespondenčního kritéria.
4. Pokud pro úsečku z aktuálního měření nebyla nalezena korespondující dvojice, přidej ji do mapy.
5. Odstraň takové úsečky z již vytvořené mapy pro něž současně platí:
 - a) K úsečce z vytvořené mapy nebyla nalezena odpovídající si úsečka z aktuálního měření.
 - b) Úsečka z vytvořené mapy by měla být viditelná v aktuálním měření a není.
6. Úsečky z již vytvořené mapy, pro něž byla nalezena korespondující úsečka z aktuálního měření, uprav dle této úsečky.
7. Pokud jsou dostupná sensorická měření opakuj kroky 1 až 6.

Existuje řada algoritmů určených pro hledání množiny úseček v aktuálním sensorickém měření, kterými se zde nebudeme podrobněji zabývat. V publikaci [36] je uvedeno porovnání šesti nejpoužívanějších metod. Jako korespondenční kritérium lze použít například metodu popsanou v článku [40], kde dvě úsečky jsou označeny za odpovídající, pokud jsou téměř paralelní a jejich vzájemná vzdálenost není příliš velká.

Výhodou sekvenčního zpracování sensorických dat je *aktuálnost* modelu s ohledem na všechny doposud získaná měření. Mapa je konstruována vždy z aktuálního sensorového měření, které je následně převedeno na geometrickou reprezentaci. Pro úsporu paměťového prostoru může být aktuální sensorické měření zapomenuto vzhledem ke skutečnosti, že výše uvedený algoritmus pracuje v dalších krocích algoritmu pouze s geometrickou reprezentací. Naproti tomu u sekvenčního přístupu nedochází ke globálnímu pohledu na data

a dochází ke ztrátě vzájemné vazby mezi jednotlivými měřeními, která se může projevit rozložením jedné hrany na dvě úsečky nebo ke špatné detekci objektů. Tyto nedostatky se však dají odstranit dávkovým zpracováním dat, které vytváří geometrickou mapu s ohledem na všechna získaná sensorická data. V kapitole 6.2 byl uveden jeden z možných přístupů vytváření sensorové mapy reprezentované pomocí mřížek obsazenosti, vzniklé na základě integrace všech hrubých sensorických měření. V následující kapitole si uvedeme jeden z přístupů realizace geometrické mapy na základě sensorové mapy využívající Houghovy transformace. V práci [33] je uveden přístup aproximace množiny úseček za použití neuronových sítí, pracujících s hrubými sensorickými daty.

8.2 Realizace geometrické mapy na základě mřížek obsazenosti

V kapitole 6.2 jsme se zabývali realizací sensorické mapy reprezentované pomocí mřížek obsazenosti vzniklých buď na základě pravděpodobnostního nebo věrohodnostního přístupu. V této části práce se budeme věnovat dávkovému vytváření geometrického modelu prostředí z již zpracovaných sensorických měření, reprezentovaných pomocí mřížek obsazenosti.

Realizace geometrické mapy probíhá v těchto krocích:

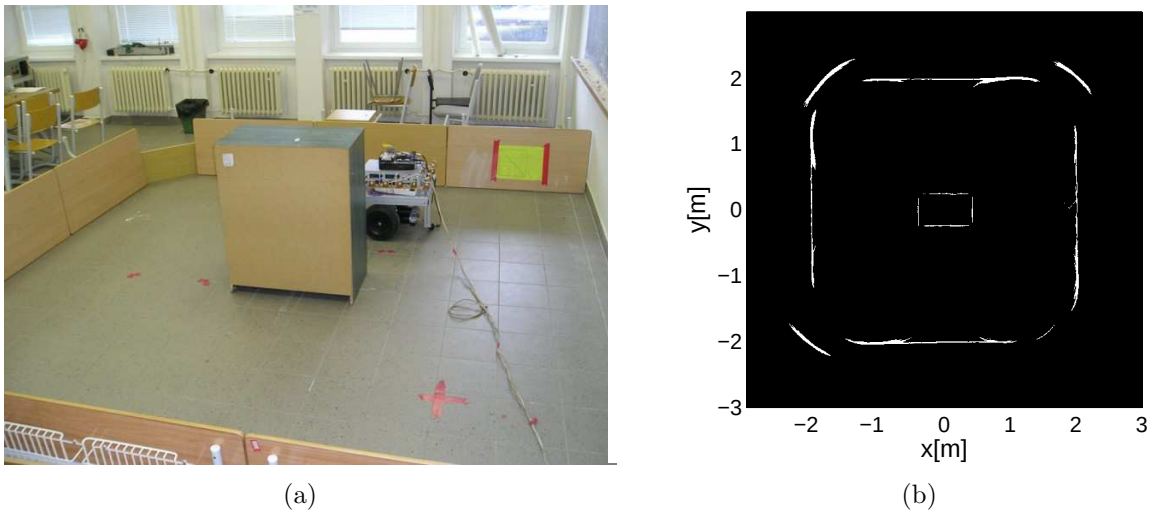
1. Vytvoření sensorické mapy pomocí mřížek obsazenosti ze všech získaných měření během jízdy robotu.
2. Segmentace mřížky obsazenosti.
3. Předzpracování mřížky obsazenosti.
4. Nalezení kostry objektů.
5. Identifikace objektů (přímek) pomocí Houghovy transformace.
6. Určení úseček z předchozího kroku.

V dalších kapitolách detailněji popíšeme výše uvedené kroky. Ukážeme výsledky jednotlivých algoritmů na zachyceném modelu prostředí, vzniklého v průběhu jízdy mobilního robotu v laboratoři inteligentních robotů, které je ukázáno na obrázku 8.1a. Při vytváření sensorické mapy se robot pohyboval po čtvercové trajektorii o rozměru 2×2 m rychlostí 10cm/s.

8.2.1 Segmentace mřížky obsazenosti

Předpokládejme pravděpodobnostní mřížku obsazenosti $O = \{O_{xy} | x, y \in \{1, \dots, n\}\}$ získanou na základě postupu uvedeného v kapitole 6.2. Segmentací mřížky obsazenosti získáme binární matici $O^b = \{O_{xy}^b | x, y \in \{1, \dots, n\}\}$, kde $O_{xy}^b = 1$ pokud buňka O_{xy} představuje hranici objektu. Ostatní prvky matice tvoří volný prostor a jsou představovány hodnotou nula.

S principem segmentace se lze setkat v oblasti zpracování obrazu, kde mezi základní přístupy patří prahování popsané vztahem



Obrázek 8.1: a) Reálné prostředí robotu v laboratoři inteligentních robotů. b) Model prostředí zachycený ultrazvukovým systémem při použití kombinovaného modelu snímače ($m=4$) s věrohodnostním způsobem slučování dat.

$$O_{xy}^b = 1 \equiv O_{xz} > P, \quad (8.1)$$

kde P je hodnota prahování.

Při generování mřížek obsazenosti laserovým snímačem se vyskytují tři skupiny hodnot. Jedná se o hodnoty v oblastech kolem 0, označující volný prostor, 0.5, označující neznámý nebo neprozkoumaný prostor a 1, označující obsazený prostor. V takovém případě je přístup prahování pro segmentaci postačující [33] a určení hodnoty P v (8.1) je snadné, protože malé změny této hodnoty vedou k malým změnám v segmentované mapě. Daný postup segmentace lze použít v případě laserových snímačů, kde se neobjevují problémy s vícenásobnými odrazy a šumy, jako v případě ultrazvukových snímačů.

Vícenásobné odrazy mohou ve výsledné mapě prostředí vytvořit překážku, která zde ve skutečnosti není. Práce [34] ukazuje, že v buňkách, kde se vyskytují vícenásobné odrazy jsou nižší velikosti gradientu než v případě reálných objektů. V takové situaci je postup segmentace vyjádřen na základě dvou hodnot prahů vztahem

$$O_{xy}^b = 1 \equiv O_{xz} > P \wedge |\nabla O_{xy}| > P_h, \quad (8.2)$$

kde $|\nabla O_{xy}|$ označuje velikost gradientu vypočtenou jako maximální rozdíl dané buňky a jejich sousedů v 8-okolí, P_h představuje hodnotu prahování hran stanovenou na základě experimentů.

V kapitole 7.3 je uveden kombinovaný model ultrazvukového snímače, který potlačuje vliv vícenásobných odrazů. V mapě prostředí, realizované pomocí mřížek obsazenosti, se nevyskytují hranice objektů vzniklých vícenásobnými odrazy. V našem případě tedy získáme binární matici mapy segmentací mřížek obsazenosti dle vztahu (8.1). Binární matice modelu prostředí při použití kombinovaného modelu snímače ($m=4$) s věrohodnostním způsobem slučování dat je na obrázku 8.1b.

8.2.2 Zpracování mřížky obsazenosti

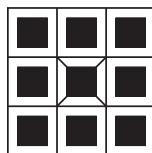
Při identifikaci objektů pomocí ultrazvukových snímačů se mohou v obraze objevit oddělené úsečky jedné hrany objektu, mezi nimiž chybí několik volných buněk mřížky obsazenosti, značící volný prostor. Daná skutečnost je způsobena částečně nepřesnostmi použitých sensorů, ale především špatným natočením ultrazvukového snímače vůči překážce. V okamžiku, kdy není dodržena podmínka kolmosti mezi překážkou a osou procházející středem úhlu vyzařování snímače je objekt identifikován jen částečně. Pro odstranění volných buněk mezi dvěma úsečkami lze použít morfologické operace. Nejprve zavedeme definici binární matice jako množiny bodů, která obsahuje souřadnice buněk mřížky s hodnotou 1, dle následujícího vztahu

$$Q = \{(x, y) : O_{xy}^b = 1\}. \quad (8.3)$$

Morfologická operace *dilatace* skládá body dvou množin pomocí vektorového součtu. Dilatace $Q \oplus B$ je bodovou množinou všech možných vektorových součtů pro dvojice bodů, vždy pro jeden z množiny Q a jeden z množiny B [44] a lze ji vyjádřit následujícím vztahem

$$Q \oplus B = \{p \in N^2 : p = q + b, \quad q \in Q, b \in B\}, \quad (8.4)$$

kde množina B se označuje strukturním elementem a může nabývat různých tvarů, N představuje množinu bodů nového binárního obrazu. Pokud použijeme isotropický strukturní element B_8 z obrázku 8.2, dojde k nárůstu objektů ve všech směrech a tím ke spojení oblastí buněk ležících těsně vedle sebe (odstranění prázdných buněk o velikosti dva). Při použití daného strukturního elementu však dojde ke zvětšení oblastí, což je pro další zpracování mřížky nevhodné.



Obrázek 8.2: Strukturní element B_8 . Čtverečky s černou barvou reprezentují body daného strukturního elementu. Křížek označuje reprezentativní bod elementu.

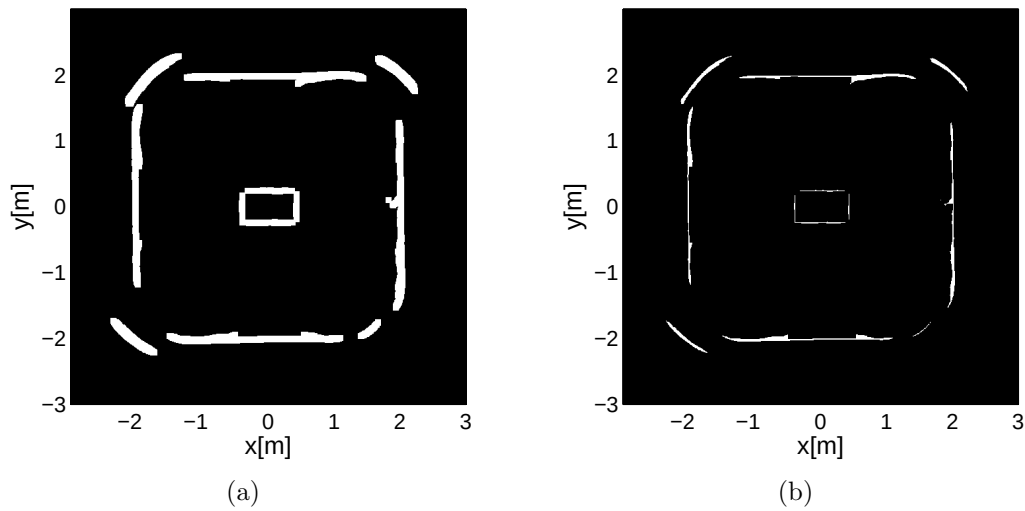
Proto aplikujeme duální morfologickou operaci k dilataci tj. *erozi*, která skládá dvě množiny podle vztahu

$$Q \ominus B = \{p \in N^2 : p + b \in Q \quad \forall b \in B\}. \quad (8.5)$$

Pro všechny body obrazu se kontroluje, zda pro všechna možná $p + b$ leží výsledek v množině Q . Pokud je tato podmínka splněna, zapíše se v reprezentativním bodě do výsledné mapy 1, jinak 0. Při použití strukturního elementu B_8 dojde k odstranění buněk z hranic objektů. Použití morfologických operací dilatace a následně eroze na danou mapu prostředí se označuje morfologickou transformací *uzavření*, popsanou vztahem

$$Q \bullet B = (Q \oplus B) \ominus B. \quad (8.6)$$

Na obrázku 8.3a je uvedena mapa prostředí získaná pomocí morfologické operace dilatace, která byla aplikována na binární matici z obrázku 8.1b. Obrázek 8.3b představuje mapu prostředí po použití operace eroze na matici z obrázku 8.3a.



Obrázek 8.3: a) Aplikace morfologické operace dilatace na binární matici prostředí. b) Použití morfologické operace eroze na matici získanou po operaci dilatace.

8.2.3 Nalezení kostry objektů

Po aplikaci morfologické operace uzavření zůstaly i nadále v mapě prostředí hranice objektů, které jsou příliš silné. Daná skutečnost je způsobena špatným určením polohy robotu a dále nepřesností ultrazvukových čidel. Skutečná hrana objektu se bude s největší pravděpodobností nacházet ve středu původní hranice objektu (silné), jelikož je rozložení chyby ultrazvukového snímače symetrické. Danému středu objektu říkáme kostra množiny bodů [45], kterou tvoří body, jejichž vzdálenost od alespoň dvou různých částí hranice množiny je stejná. Nevýhodou takto definované kostry je, že počet komponent kostry může být větší než u původní množiny bodů. Pokud však použijeme homotopickou definici kostry, dojde k zachování počtu komponent.

Algoritmus nalezení kostry vychází z transformace *tref* či *miň* (angl. hit or miss), popsanou následující rovnicí

$$Q \otimes B = (Q \ominus B_1) \cap (Q^c \ominus B_2), \quad (8.7)$$

kde $B = (B_1, B_2)$ je složený strukturní element, obsahující dva strukturní elementy, Q^c je doplněk k množině Q . Daná transformace indikuje shodu strukturního elementu a části obrazu. Strukturní element tvoří vzor vyhledávaný v obraze a lze jej použít například k detekci rohů, hranic objektů a ke zmiňovanému ztenčování objektů [44]. Ztenčování je definováno vztahem

$$Q \oslash B = Q \setminus (Q \otimes B), \quad (8.8)$$

kde $\setminus$ je operace jednostranného množinového rozdílu. Ztenčování lze použít opakovaně pomocí posloupnosti složených strukturních elementů $B_{(i)} = (B_{i_1}, B_{i_2})$, kde $i = 1, \dots, n$. Sekvenční ztenčování lze vyjádřit pomocí posloupnosti 8 strukturních elementů

$$Q \oslash \{B_{(i)}\} = (((Q \oslash B_{(1)}) \oslash B_{(2)}) \dots \oslash B_{(n)}). \quad (8.9)$$

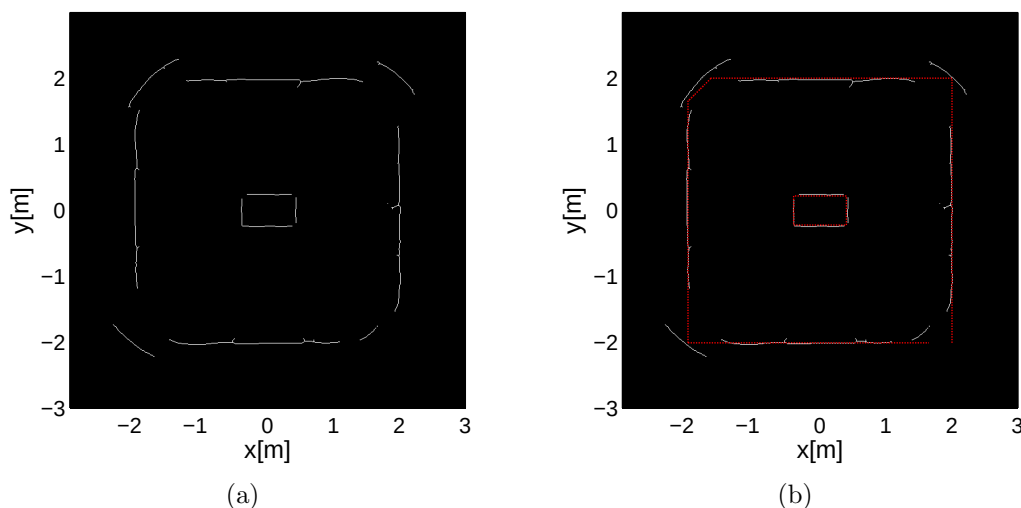
Ukazuje se, že určité druhy posloupností strukturních elementů $B_{(i)}$ jsou velmi užitečné z praktického hlediska. Například při ztenčování nedojde k porušení souvislosti objektu

[44]. Jednou z takových možných posloupností je Golayova abeceda, která provádí sekvenční ztenčování složeným strukturním elementem L následujících tvarů

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ * & 1 & * \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad L_2 = \begin{bmatrix} * & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 1 & * \end{bmatrix}, \quad L_3 = \begin{bmatrix} 1 & * & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & * & 0 \end{bmatrix}, \quad L_4 = \begin{bmatrix} * & 1 & * \\ 1 & 1 & 0 \\ * & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$L_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ * & 1 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad L_6 = \begin{bmatrix} * & 1 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & * \end{bmatrix}, \quad L_7 = \begin{bmatrix} 0 & * & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & * & 1 \end{bmatrix}, \quad L_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & * \\ 0 & 1 & 1 \\ * & 1 & * \end{bmatrix}$$

Kvůli zkrácení zápisu jednotlivých strukturních elementů je zavedeno následující označení. Hodnota 1 v maticích L_i znamená, že příslušný prvek patří strukturnímu elementu B_{i_1} , hodnota 0 označuje příslušnost prvku ke strukturnímu elementu B_{i_2} a hodnota * znamená, že příslušný prvek nikam nenáleží. Příslušná operace ztenčování je idempotentní, tj. po aplikaci této operace v několika krocích se mapa nebude již měnit a výsledný skelet se bude skládat z čar tloušťky 1 a izolovaných buněk.



Obrázek 8.4: a) Nalezená kostra objektů. b) Kostra objektů s naznačením reálných překážek.

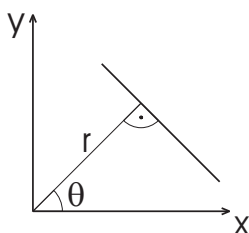
Výsledek ztenčování pomocí Golayovy abecedy použitý na matici hodnot z obrázku 8.3 je uveden na obrázku 8.4a. Na obrázku 8.4b je uvedena kostra objektů společně s naznačením skutečných překážek v prostředí robotu. Z obrázku je patrná přesnost zachyceného prostředí pomocí ultrazvuku, která se příliš neliší od reálného prostředí. V průběhu jízdy robotu se však nepodařilo přesněji zachytit některé rohy v prostředí.

8.2.4 Identifikace objektů pomocí Houghovy transformace

Houghova transformace je robustní a efektivní metoda, využívaná v počítačovém vidění, pro hledání základních geometrických tvarů - přímek, popřípadě kružnic, skládajících

cích se z množiny bodů. V práci [41] je například Houghova transformace použita k hledání úseček v aktuálním sensorickém měření, které jsou následně využity k lokalizaci mobilního robotu metodou line-to-line. Práce [51] a [52] aplikují Houghovu transformaci pro detekci různých velikostí kruhových objektů a různých barev. Houghova transformace je založena na parametrickém popisu objektů a její hlavní výhoda je určitá tolerance rozdílů rozpoznávaných objektů proti jejich parametrickému popisu a relativní odolnost proti zašumění vstupního obrázku [43]. V této práci se budeme zabývat pouze detekcí přímek v mapě prostředí. Rovnice přímky v normálovém tvaru je popsána dle vztahu

$$r = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta. \quad (8.10)$$



Obrázek 8.5: Přímka odpovídající rovnici (8.10).

Z obrázku 8.5 je zřejmé, že parametr r představuje vzdálenost přímky od počátku souřadnicového systému a úhel θ svírají osa x a kolmice vedené k přímce, procházející počátkem. Intervaly daných parametrů jsou omezené pro celou množinu všech přímek [42]. Pro úhel θ jsme zvolili interval v rozsahu $\langle 0; 360 \rangle$. Pak parametr r bude nabývat pouze kladných hodnot, teoreticky až do velikosti úhlopříčky obrázku. Před aplikací transformace se nejprve nadefinuje prostor, obsahující všechny možné hodnoty parametrů hledaného objektu, který se nazývá akumulátor. Tento prostor je reprezentován n - dimenzionální maticí, kde počet dimenzí n je určen počtem parametrů objektu. V případě úsečky jsou to samozřejmě parametry r a θ , které budou představovat souřadnice akumulátoru. Na počátku musí být všechny hodnoty akumulátoru shodné, obvykle se volí nula. Vstupem transformace je binární obrázek, u kterého pozadí odpovídá hodnotě nula a objekt odpovídá hodnotě jedna.

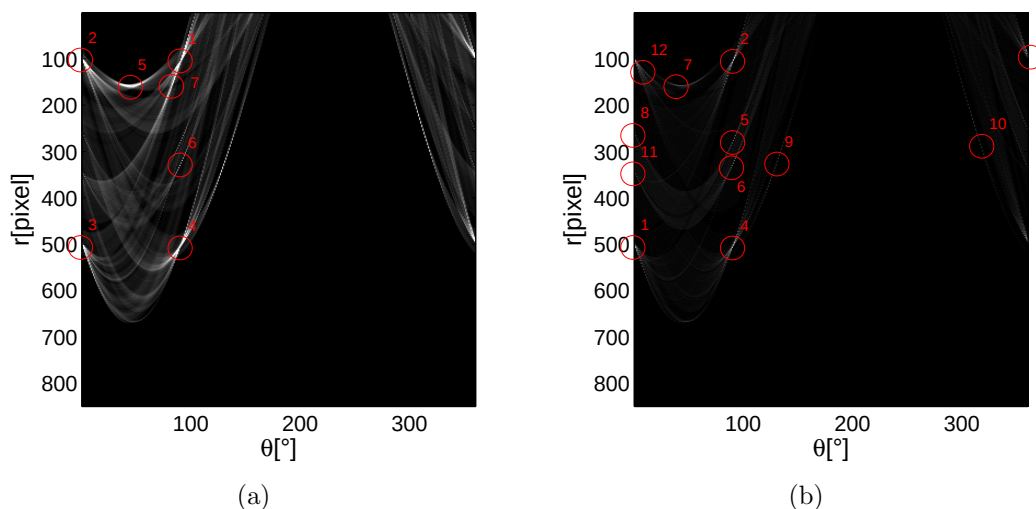
Princip transformace spočívá v systematickém procházení vstupního obrázku pixel po pixelu. Pokud je nalezen pixel objektu, jsou jeho souřadnice (x,y) dosazeny do rovnice (8.10). Za proměnnou θ se postupně dosazují všechny hodnoty jejího intervalu, vycházející z akumulátoru a hodnota r je vypočítána. Pro dvojici takto získaných hodnot (r, θ) se přičte konstanta, nejčastěji jednička, na příslušné místo do akumulátoru. Hodnoty se tedy akumulují, proto je matice parametrů nazvaná akumulátor.

Po projití celého obrázku se z akumulátoru vyberou lokální maxima, která definují jednotlivé objekty. Z toho vyplývá, že v případě obrázků s různými velikostmi objektů, tedy například úseček různých délek, mohou lokální maxima dosahovat různých hodnot. Zjednodušeně řečeno, lépe detekovány jsou vždy ty objekty, které jsou tvořeny nejvíce pixely, protože jim odpovídá větší maximum v akumulátoru. Zvláště v případě, kdy je rozdíl lokálních maxim výrazný, je důležité použít pro jejich detekci vhodný algoritmus popsáný dále.

Nalezení jednotlivých lokálních maxim v akumulátoru:

1. Nastav proměnou *Shodné přímky* do nuly.
2. Najdi globální maximum v akumulátoru.
3. Zapamatuj si souřadnice akumulátoru, které odpovídají hledaným parametrům přímky.
4. V okolí ϵ nalezeného globálního maxima polož odpovídající prvky akumulátoru rovny 0.
5. Pomocí korespondenčního kritéria proved' srovnání nově nalezené přímky se seznamem již nalezených přímek.
6. V případě, že se jedná o novou přímku, ulož její parametry do seznamu nalezených přímek a vrať se do kroku 1. V opačném případě inkrementuj proměnou *Shodné přímky*.
7. Pokud je proměnná *Shodné přímky*=3 ukonči proces hledání lokálních maxim.

Jako korespondenční kritérium z kroku 5 jsme použili metodu popsanou v článku [40]. Dvě úsečky jsou označeny za odpovídající, pokud jsou téměř paralelní a jejich vzájemná vzdálenost není příliš velká.



Obrázek 8.6: a) Hodnoty matice akumulátoru, odpovídající nezpracovanému obrázku. b) Hodnoty matice akumulátoru, odpovídající zpracovanému obrázku s nalezenou kostrou objektů.

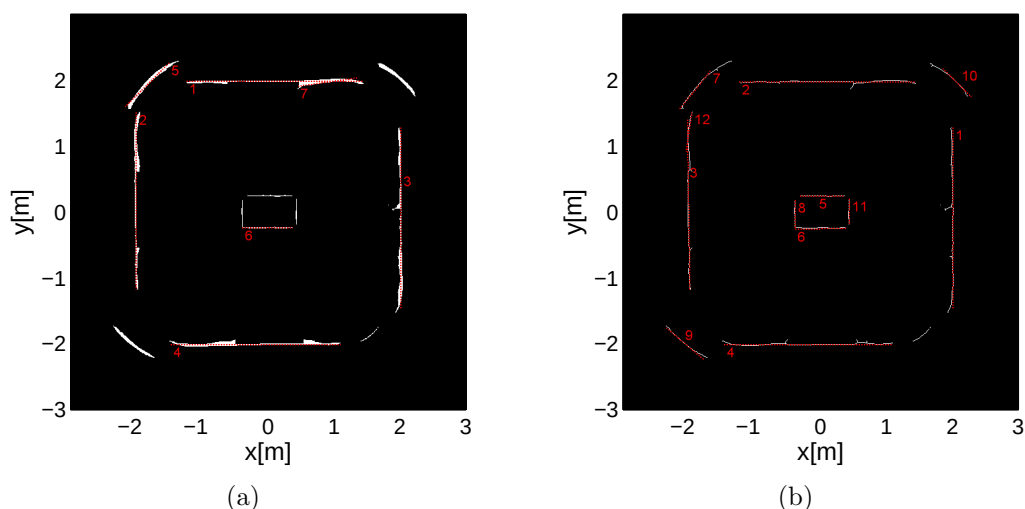
Nyní si ukážeme výsledky Houghovy transformace a objasníme si některé její problémy. Pokud použijeme danou transformaci přímo na nezpracovaný binární obrázek tj. bez aplikace morfologických operací a operace kostry dojde k situaci, kdy jednotlivá lokální maxima akumulátoru nejsou příliš ostrá, to je patrné z obrázku 8.6a. Pokud aplikujeme výše popsanou metodu hledání lokálních maxim, nebudeme příliš úspěšní. Podaří se nalézt pouze *výraznější* lokální maxima odpovídající delším úsečkám. Přímky odpovídající

krátkým úsečkám, které leží uprostřed scény se nepodaří objevit vůbec. Možným řešením je zvětšení okolí ϵ , kde dochází k nulování prvků akumulátoru. Tím však dojde ke zvýšení rizika odmazání některých z lokálních maxim, ležících blízko sebe. Lepších výsledků však docílíme při použití Houghovy transformace na zpracovaný model prostředí obsahující kostru objektů. Všechny lokální maxima jsou již daleko výraznější. Odpovídající matice akumulátoru je uvedena na obrázku 8.6b. Nyní se podařilo nalézt všechny přímky ve scéně pro relativně malé okolí $\epsilon = 10$ pixelů. Při použití mřížky o velikosti 1 cm může teoreticky nastat případ, kdy dojde k odstranění přímek ležících v blízkosti 5 cm.

Pokud použijeme Houghovu transformaci na kostru mapy prostředí, dojde k výraznější úspoře času vykonávání algoritmu transformace. Na druhou stranu však musíme připomenout, že úprava mapy prostředí spojená s nalezením kostry objektu zabere určité množství času.

8.2.5 Určení úseček pro přímky nalezené pomocí Houghovy transformace

Výsledkem Houghovy transformace je seznam nalezených přímek s odpovídajícími parametry (r, θ) . Hodnoty akumulátoru v nalezených lokálních maximech by v ideálním případě mohly přímo odpovídat délkám hledaných úseček. Tento předpoklad však platí pro nezvlněné přímky a proto ji v našem případě nelze použít.



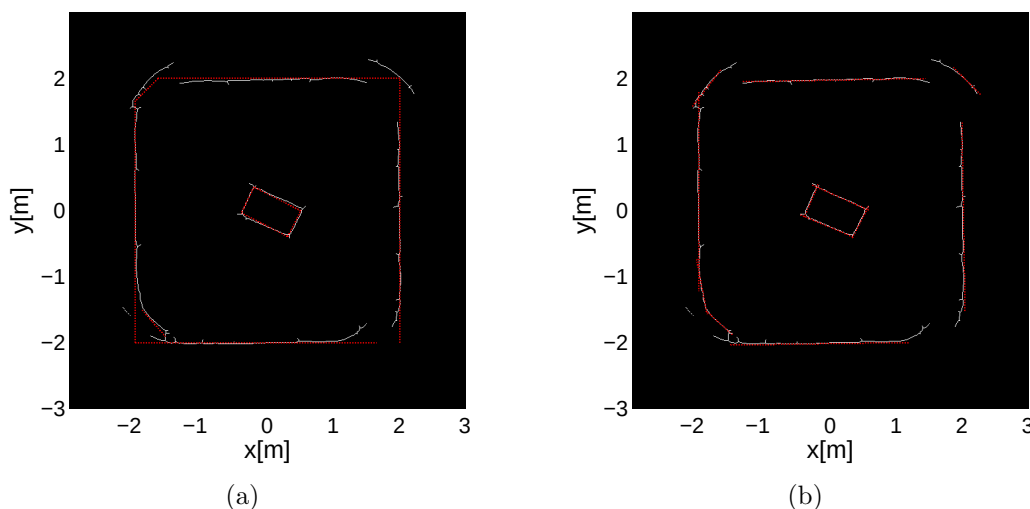
Obrázek 8.7: a) Nalezené úsečky v nezpracované mapě prostředí pomocí Houghovy transformace. Model prostředí byl zachycen při použití kombinovaného modelu snímáče ($m=4$), s využitím D-S teorie slučování dat. b) Nalezené úsečky ve zpracované mapě prostředí pomocí Houghovy transformace.

Určení úseček pro nalezené přímky z Houghovy transformace lze popsat následujícími kroky:

1. Ve směru přímky, která je určena na základě parametrů (r, θ) , hledáme první obsazenou buňku mřížky odpovídající počátku úsečky. První obsazená buňka je hledána v blízkém okolí δ tak, aby došlo k potlačení vlivu nerovností úsečky.

2. Nalezenou buňku označíme za počáteční souřadnici úsečky.
3. Ve stejném směru, taktéž v daném okolí δ , hledáme volné buňky mřížky obsazenosti.
4. Nalezenou buňku označíme za konečnou souřadnici úsečky.

Na obrázku 8.7a jsou znázorněny nalezené úsečky z nezpracované mapy prostředí pomocí Houghovy transformace. Z daného obrázku je patrné, že nalezené úsečky přesně vystihují detekované objekty ultrazvukem. Vlivem nevýrazných lokálních maxim u odpovídajícího akumulátoru z obrázku 8.6a došlo k nalezení pouze sedmi úseček. Na obrázku 8.7b vidíme nalezené úsečky v upravené mapě prostředí pomocí operace kostry, kde se podařilo nalézt všech jedenáct úseček představujících hranice objektů. Úsečka s číslem dvanáct byla vyhodnocena korespondenčním kritériem za totožnou s úsečkou označenou číslem tři.



Obrázek 8.8: a) Model prostředí zachycený ultrazvukovým systémem při použití kombinovaného modelu snímače ($m=4$) a zdvojením čidel s pravděpodobnostním způsobem slučování dat, s naznačením reálných překážek. b) Nalezené úsečky v modelu prostředí pomocí Houghovy transformace.

Na obrázku 8.8a vidíme zachycené prostředí mobilního robotu při použití kombinovaného modelu snímače ($m=4$) s pravděpodobnostním způsobem slučování dat. Pro ještě větší potlačení vlivu vícenásobných odrazů byly ultrazvukové snímače zdvojeny, jak je popsáno v kapitole 7.4. Červenou barvou jsou zde naznačeny reálné překážky. Prostředí bylo zachyceno průjezdem robotu po čtvercové trajektorii o rozměru 2×2 m. Překážka uprostřed scény byla záměrně pootočená tak, aby nebylo dosaženo její kolmosti s vysílaným signálem z ultrazvukového snímače. Díky širokému vyzařovacímu úhlu čidla a volbě daného modelu snímače bylo dosaženo dobrých výsledků. Na obrázku 8.8b jsou zobrazeny detekované úsečky pomocí Houghovy transformace, která byla aplikována na nalezenou kostru zachycené scény.

8.2.6 Zhodnocení dosažených výsledků

V této kapitole jsme uvedli výsledky dávkového zpracování dat vzniklých na základě integrace všech hrubých sensorických měření během jízdy robotu. Pomocí Houghovy transformace a morfologických operací se v realizované mapě podařilo přesně popsat skutečnou polohu překážek pomocí detekovaných úseček. Některé části scény se nepodařilo zachytit úplně, jednalo se zejména o rohy místností, kde se projevoval nejvíce vliv vícenásobných odrazů. K určení skutečné polohy robotu byla použita pouze odometrie robotu bez další lokalizační metody. Z výsledků je patrné, že chyba polohy robotu vzniklá během jeho jízdy je velmi malá a nemá vliv na realizovanou mapu prostředí. Vzhledem k uvedeným rozměrům místnosti 6×6 m musíme spíše hovořit o lokální sensorické mapě prostředí.

Díky uvedeným přístupům se podařilo získat geometrickou reprezentaci prostředí robotu, kterou lze následně využít k plánování cesty pohybu robotu, jak bude ukázáno v další kapitole 9.

9 Plánování cesty pohybu robotu

Mezi základní činnosti mobilního robotu patří plánování jeho cesty z výchozí polohy do cílového bodu. Pro vykonání takového úkolu potřebuje znát přesný model prostředí, ve kterém se pohybuje. Daný model může být znám předem, například zadáním geometrické mapy do řídicího systému robotu. Většinou však tomu tak není a robot nejprve zjistí aktuální podobu scény pomocí sensorického systému a následně provede plánovanou činnost pohybu. Metody pro plánování cesty jsou závislé na reprezentaci prostředí okolí mobilního robotu, které byly uvedeny v kapitole 6.

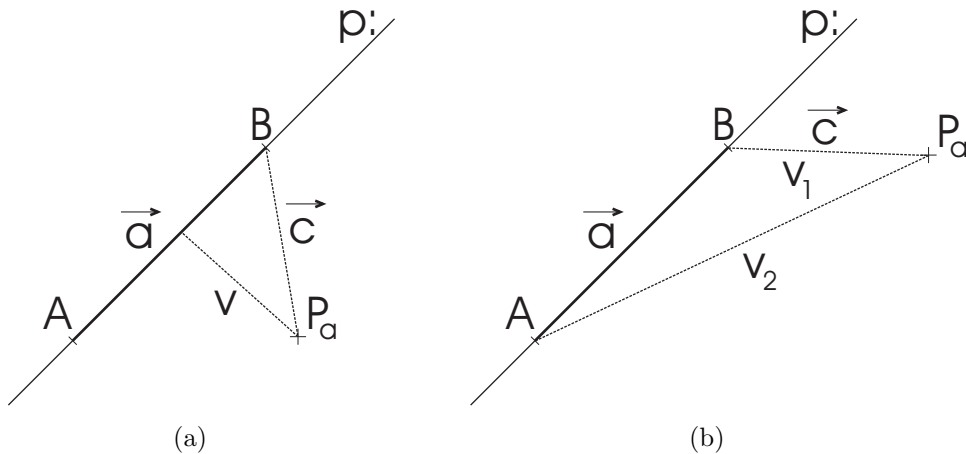
Geometrické mapy používají například algoritmy pro hledání nejkratší cesty v grafu, kde uzly grafu tvoří jednotlivé části prostoru a ohodnocení hran může představovat vzdálenost, nebo pravděpodobnost možnosti průjezdu [32]. Většina řídicích systémů robotů, které obsahují sensorický podsystém pro detekci překážek používají metody plánování založené na potencionálním poli. Například sensorické mapy založené na mřížkách obsazenosti používají harmonické potencionální pole [46]. V potenciálním poli působí na částici známé síly, které udávají částici pohyb.

Nyní si zavedeme dva druhy sil používané pro plánování pohybu robotu. Jedná se o *přitažlivou* sílu směrem k cíli a *odpudivou* sílu kolmo od překážky. Celkové potenciální pole lze tedy vyjádřit vztahem

$$V(x, y) = V_C(x, y) + \sum_{i \in P} V_{O_i}(x, y), \quad (9.1)$$

kde $V_C(x, y)$ je potenciální pole směrem k cíli a $V_{O_i}(x, y)$ je potenciální pole od jednotlivých překážek z celkového počtu P . Síla $F(x, y)$, podle které se plánuje pohyb robotu je dána vztahem

$$F(x, y) = -\nabla V(x, y) = - \left(\begin{array}{c} \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \end{array} \right). \quad (9.2)$$



Obrázek 9.1: a) Poloha robotu k úsečce v případě, kdy platí $\vec{a} \cdot \vec{c} \geq 0$. b) Poloha robotu k úsečce v případě, kdy platí $\vec{a} \cdot \vec{c} < 0$.

V dalším textu se budeme zabývat plánováním cesty pohybu robotu na základě geometrické mapy. Pro výpočet vztahů $V_C(x, y)$ a $V_{O_i}(x, y)$ potenciálního pole zavedeme následující označení. Souřadnice aktuální pozice robotu označíme $P_a = [x_a, y_a]$ a jeho koncové souřadnice $P_c = [x_c, y_c]$, pak potenciální pole směrem k cíli vypočteme dle vztahu

$$V_C(x, y) = \alpha \cdot ((x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2)^k, \quad (9.3)$$

kde koeficient α určuje velikost síly a koeficient k určuje tvar funkce k cíli.

Při výpočtu potencionálního pole od překážek daných úsečkou budeme uvažovat celkem tři případy, které lze rozdělit na základě následujících podmínek:

- I) $\vec{a} \cdot \vec{c} \geq 0$
- II) $\vec{a} \cdot \vec{c} < 0 \wedge |v_1| \leq |v_2|$
- III) $\vec{a} \cdot \vec{c} < 0 \wedge |v_1| > |v_2|$.

Dále si jednotlivé případy popíšeme detailněji a pro každý z nich určíme vztah pro výpočet potencionálního pole. První z případů je uveden na obrázku 9.1a, kdy vektory $\vec{a}$ a $\vec{c}$ svírají tupý úhel a pro jejich skalární součin platí následující podmínka $\vec{a} \cdot \vec{c} \geq 0$. Pak vzdálenost v k dané přímce $p: ax + by + c = 0$ se vypočte dle vztahu

$$v = \frac{|ax_a + by_a + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad (9.4)$$

kde parametry přímky a, b, c určíme z bodů A, C ležících na přímce p . Potenciální pole pro danou vzdálenost v určíme na základě vztahu

$$V_{O_{iI}} = \frac{\beta}{v_1 + \epsilon}, \quad (9.5)$$

kde parametr β určuje velikost síly a koeficient ϵ omezuje růst daného potenciálu do nekonečna pro $v \ll 0$. Druhý z možných případů je uveden na obrázku 9.1b, kdy vektory $\vec{a}$ a $\vec{c}$ svírají ostrý úhel a pro jejich skalární součin platí následující podmínka $\vec{a} \cdot \vec{c} < 0$. Dále platí podmínka pro vzdálenosti $|v_1| \leq |v_2|$, kdy aktuální poloha robotu je blíže k bodu $B = [x_B, y_B]$. Potenciální pole pro danou vzdálenost v_1 určíme na základě vztahu

$$V_{O_{iII}} = \frac{\beta}{v_1 + \epsilon} = \frac{\beta}{\sqrt{(x_a - x_B)^2 + (y_a - y_B)^2} + \epsilon}. \quad (9.6)$$

Poslední z možných případů nastává, pokud je taktéž skalární součin $\vec{a} \cdot \vec{c} < 0$, ale pro vzdálenosti platí podmínka $|v_1| > |v_2|$. Pak potenciální pole pro danou vzdálenost v_2 k bodu $A = [x_A, y_A]$ určíme na základě vztahu

$$V_{O_{iIII}} = \frac{\beta}{v_2 + \epsilon} = \frac{\beta}{\sqrt{(x_a - x_A)^2 + (y_a - y_A)^2} + \epsilon}. \quad (9.7)$$

Při výpočtu potenciálního pole od konkrétní překážky se vybere pouze jeden z výše uvedených případů, který se následně dosadí do rovnice (9.1).

Při výpočtu plánované cesty robotu k cílovému bodu P_c vyjdeme ze vztahu (9.2) pro výpočet síly. Nové souřadnice polohy robotu $\vec{X}_{n+1} = (x, y)$ určíme ze vztahu

$$\vec{X}_{n+1} = \vec{X}_n - \lambda \cdot \nabla V(x, y), \quad (9.8)$$

kde parametr λ určuje velikost kroku konvergence. Tento vztah lze vyjádřit v souřadnicích (x, y) robotu dle vztahu

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} - \lambda \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \end{pmatrix}. \quad (9.9)$$

Príslušné parciální derivace z předchozí rovnice vypočteme dle vztahů

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V(x + \Delta x, y) - V(x, y)}{\Delta x} \quad (9.10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{V(x, y + \Delta y) - V(x, y)}{\Delta y}. \quad (9.11)$$

Jak již bylo řečeno, předpokládáme geometrickou reprezentaci prostředí zachycenou daným ultrazvukovým systémem. Všechny objekty jsou popsány pomocí geometrických primitiv, tj. úseček. Při vlastním výpočtu potenciálního pole $V(x, y)$ od daných překážek je nutné zahrnout šířku mobilního robotu tak, aby při průjezdu prostředím nedošlo ke kolizi s překážkami. Z tohoto důvodu rozšíříme všechny hranice objektů o šířku mobilního robotu a při výpočtu potenciálního pole budeme pracovat pouze s těmito úsečkami.

Bohužel výše popsaný způsob vytváření potencionálního pole přináší úskalí možného vzniku lokálních minim. Takový *modelový případ* je nastíněn na obrázku 9.2a, kdy robot uvízne v daném lokálním minimu a není schopen se dostat do cílového bodu. Na daném obrázku jsou dále uvedeny skutečné hranice objektu geometrické mapy, které byly detekovány v průběhu jízdy mobilního robotu ultrazvukovým systémem a odpovídající rozšířené hranice objektů. Odpovídající potenciální pole je uvedeno na obrázku 9.2b.

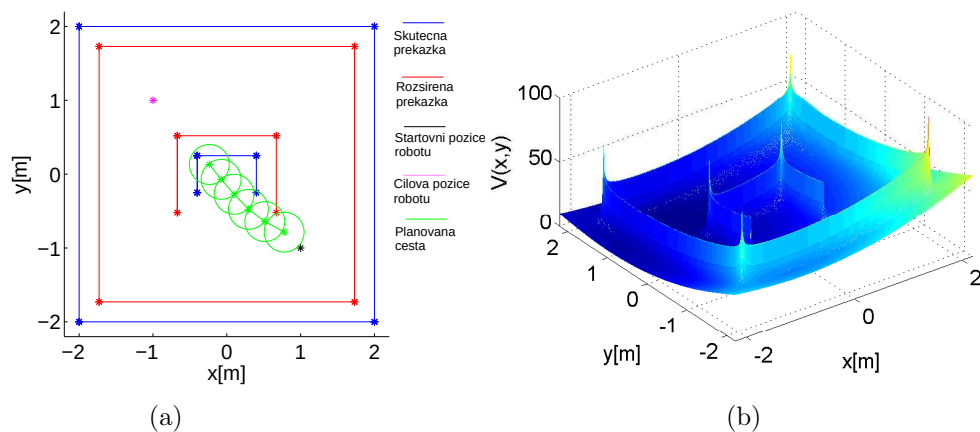
Vzniku lokálních minim lze zabránit doplněním prostředí o fiktivní překážky, které uzavřou nekonvexní útvary na konvexní.

9.1 Ověření plánování cesty pohybu robotu na reálném systému

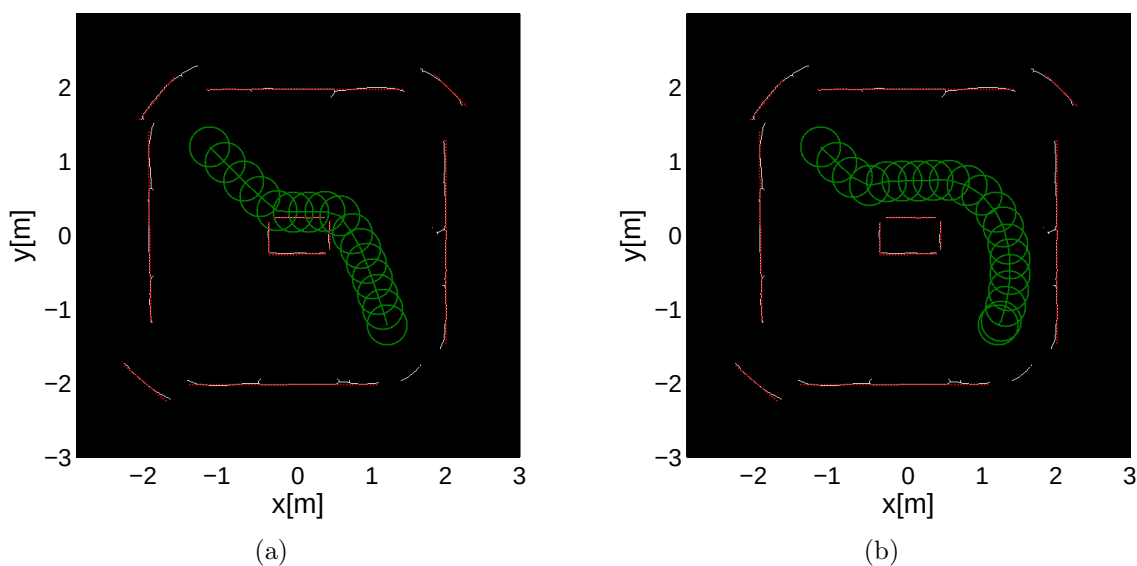
Při ověření výsledků metody pro plánování cesty pohybu robotu na reálném systému, uvedené v předchozí kapitole, budeme uvažovat dva případy.

Znamé 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 popsané v kapitole 2.2.4. 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.



Obrázek 9.2: a) Plánovaná cesta pohybu robotu při vzniku lokálního minima. b) Celkový potenciál při plánování cesty z aktuální polohy $P_a = [1, -1]$ do cílové polohy $P_c = [-1, 1]$ robotu.



Obrázek 9.3: a) Plánovaná cesta pohybu robotu bez rozšíření hranic překážek. b) Plánovaná cesta pohybu robotu s rozšířením hranic překážek.

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 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.

9.1.1 Plánování cesty pohybu robotu ve známém prostředí

Při ověření metody plánování pohybu robotu uvažujeme známou geometrickou mapu prostředí uvedenou na obrázku 8.7b v kapitole 8.2.5. Zachycené prostředí nemusíme doplňovat o fiktivní překážky, jelikož se ve scéně nenacházejí konvexní objekty. Na obrázku 9.3a 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 9.3b 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 úseček 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 4.5. 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. Parametry metody plánování pohybu robotu jsou uvedeny v tabulce 9.1.

9.1.2 Plánování cesty pohybu robotu v neznámém prostředí

Uvedený přístup předpokládá neznámé prostředí okolí robotu. Uživatel prostřednictvím klientské aplikace, popsané v kapitole 2.2.4, zadá požadovaný cílový bod pohybu robotu. Vyhodnocení okolního prostředí probíhá tzv. sekvenčním zpracováním sensorických dat, jehož přesný popis byl uveden v kapitole 8.1. 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, jehož základní popis byl uveden v kapitole 4.



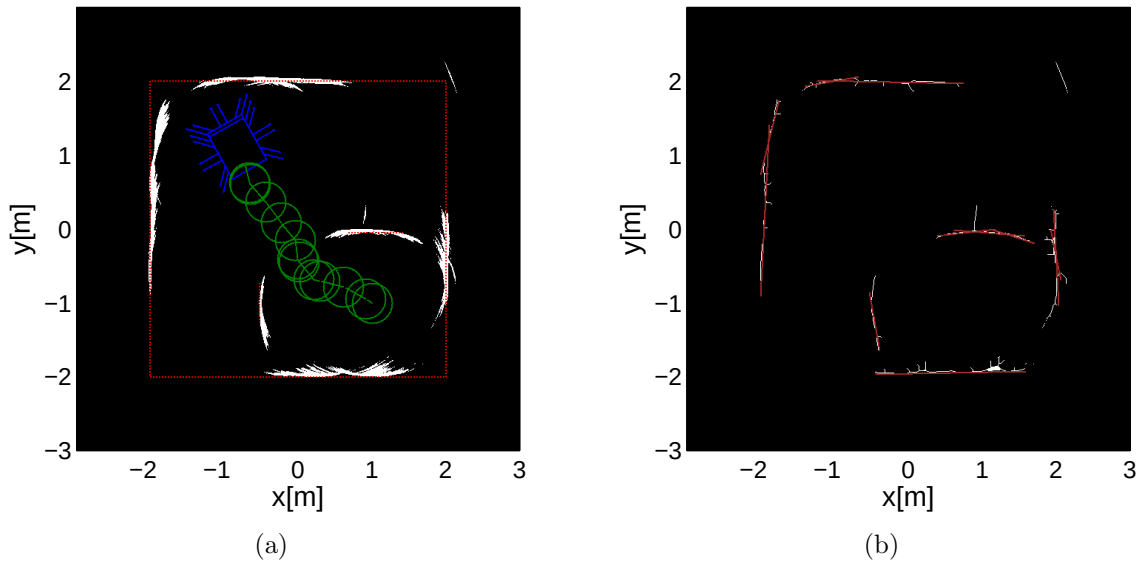
(a)



(b)

Obrázek 9.4: Skutečné prostředí mobilního robotu a) scéna I, b) scéna II.

Nyní uvedeme výsledky plánování pohybu robotu na dvou odlišných prostředích z obrázku 9.4. Následující parametry platí shodně pro obě scény.



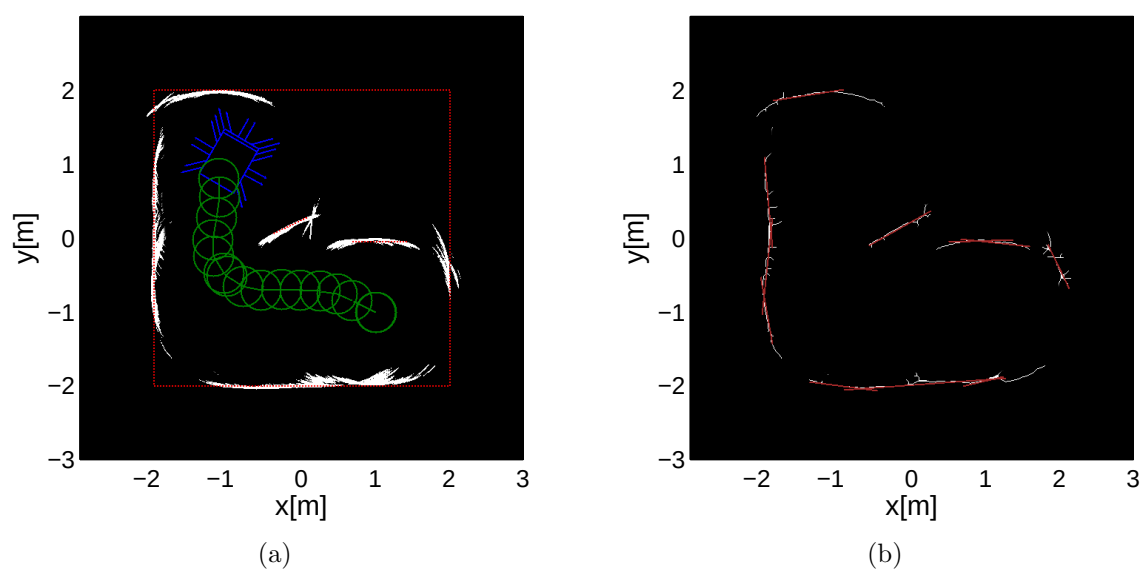
Obrázek 9.5: Plánovaná cesta robotu v neznámém prostředí a) reálné překážky a cesta pohybu robotu, b) detekované překážky pomocí Houghovy transformace - Scéna I.

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. Parametry metody plánování pohybu robotu jsou uvedeny v tabulce 9.1.

parametry	hodnoty
α	1
ϵ	$10 \cdot e^{-5}$
β	0.02
λ	0.015

Tabulka 9.1: Parametry metody plánování pohybu robotu.

Na obrázku 9.5a 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 9.5b 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 9.6 jsou uvedeny výsledky pro druhé prostředí robotu. Zde bylo dosaženo velmi podobných výsledků, jako u první scény.



Obrázek 9.6: Plánovaná cesta robotu v neznámém prostředí a) reálné překážky a cesta pohybu robotu, b) detekované překážky pomocí Houghovy transformace - Scéna II.

10 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.

10.1 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:

- V kapitole 4 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 v kapitole 4 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.

10.2 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 kapitole 6.3 je definován 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.
- V kapitole 7.4 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.

10.3 Plánování pohybu robotu

V této části práce byly ověřeny námi navržené metody uvedené v kapitolách 10.1 a 10.2. 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.

10.4 Dosažené cíle práce, porovnání se stanovenými cíli

V této kapitole uvedeme závěrečné zhodnocení dosažených cílů s ohledem k jejich zadání z úvodu kapitoly 1.2.

1. V kapitolách 4.4 a 4.5 jsou uvedeny dva základní přístupy řízení mobilního robotu. Metoda pro optimální nastavení parametrů regulátoru, která vychází z modelu robotu je uvedena v kapitole 4.8. Navržený přístup umožňuje optimální nastavení

parametrů regulátoru s požadavkem na předepsanou přesnost polohy a rychlosti robotu.

2. V kapitole 7.3 byl navržen kombinovaný model ultrazvukového snímače, který eliminuje vliv vícenásobných odrazů. Vztah pro ohodnocení kvality prostředí byl navržen v kapitole 6.3. Dále byla v kapitole 7.4 navržena metoda zdvojování čidel potlačující nežádoucí vliv vícenásobných odrazů, která úzce souvisí s návrhem sensorického subsystému uvedeného v kapitole 5.2.
3. V kapitole 8.2 je 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.

11 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 10. 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 10.4. Veškeré vytčené cíle z kapitoly 1.2 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] Borenstein, J.; Everett, H. R.; Feng, L. *"Where am I?" Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. University of Michigan (1996).
- [2] Havel, M. *Robotika – Úvod do teorie kognitivních robotů*. SNTL, Praha (1980).
- [3] Internetové stránky firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. [online].
Dostupné na < [http : //www.atas.cz](http://www.atas.cz) >.
- [4] Internetové stránky firmy STM S.p.A. [online].
Dostupné na < [http : //www.stmspa.com/eng/start.htm](http://www.stmspa.com/eng/start.htm) >.
- [5] Agilent Technologies: Two and Three Channel Codewheels for use with Agilent Optical Encoder Modules. Technical Data, (1999).
Dostupné na < [http : //www.semiconductor.agilent.com](http://www.semiconductor.agilent.com) >.
- [6] Everett, H. R. *Sensors for Mobile Robots: Theory and Application.*, USA, ISBN:1-56881-048-2 (1995).
- [7] Borenstein, J.; Feng, L. *Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots*. Accepted for Publication in the IEEE Journal of Robotics and Automation (1995).
- [8] 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).
- [9] Chong, K. S.; Kleeman, L. *Accurate Odometry and Error Modelling for a Mobile Robot*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, USA, 2783-2788 (1997).
- [10] Wang, Ch. Ch. *Simultaneous Localization, Mapping and Moving Object Tracking*. Pittsburgh USA (2004).
- [11] Dudek, G.; Romanik, K.; Whitesides, S. *Localizing a Robot with Minimum Travel*. ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (A Conference on Theoretical and Experimental Analysis of Discrete Algorithms). Proceeding of the 6th SODA, San Francisco, California, USA. 437-446 (1995).
- [12] Thrun, S.; Fox, D.; Burgard, W.; Dellaert, F. *Robust Monte Carlo Localization for Mobile Robots*. Artificial Intelligence (2001).
- [13] Carrasco, A. *"Queen Bee" Genetic Optimization of an Heuristic Based Fuzzy Control Schema for a Mobile Robot*. IEEE Robotics and Automation, USA (2003).
- [14] d'Andréa-Novet, 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).

- [15] De Luca, A.; Di Benedetto, M. D. *Control of Nonholonomic Systems Via Dynamic Compensation*. Kybernetika 29(6), 593–608 (1993).
- [16] De Luca, A.; Oriolo, G.; Vendittelli, M. *Control of Wheeled Mobile Robots: An Experimental Overview* (2001).
- [17] 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).
- [18] Samson, C. *Time-varying Feedback Stabilization of Car-like Wheeled Mobile Robots*. International Journal of Robotics Research 12(1), 55–64 (1993).
- [19] Canudas de Wit, C.; Khenrouf, 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).
- [20] Isidori, A. *Nonlinear Control Systems*. Springer(3rd ed), London (1995).
- [21] Carrasco, R.; Cipriano, A.; Carelli, R. *Nonlinear State Estimation in Mobile Robots Using a Fuzzy Observer*. IFAC (2005).
- [22] Carrasco, R.; Cipriano, A. *Fuzzy Logic Based Nonlinear Kalman Filter Applied to Mobile Robots Modelling*. (2004).
- [23] Záda, V.; Zádová, V. *Global Optimisation with Spline-interpolation*. Proceedings of the Mathematical Method in Economics - MME'97: International Scientific Conference on the Occasion of the 20th Anniversary of Foundation of the Faculty, Ostrava, Czech Republic, 198-202 (1997).
- [24] Price, W. L. *A Controlled Random Search Procedure for Global Optimisation*. Computer Journal, 20(4), 367-370 (1996).
- [25] Reiner, H.; Tuy, H. *Global Optimisation*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1990).
- [26] *Handbook of Global Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands (1995).
- [27] Bank, D. *Map Building for Mobile Robots by High-Resolution Ultrasonic Sensing*., ICAR, Portugal (2003).
- [28] Bank, D. *A Novel Ultrasonic Sensing System for Autonomous Mobile Systems*., IEEE sensors journal, ISSN 1530-437X, vol. 2, pp. 597-606 (2002).
- [29] 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).
- [30] Thrun, S.; Beetz, M. *Probabilistic Algorithms and the Interactive Museum Tour-guide Robot Minerva*. International Journal of Robotics Research, 972-999 (2000).

- [31] Yamauchi, B.; Langley, P. *Place Recognition in Dynamic Environments*. Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots. Institute for the Study of Learning and Expertise (1997).
- [32] Štěpán, P. *Vnitřní reprezentace prostředí pro autonomní mobilní roboty*. Disertační práce. ČVUT Praha (2001).
- [33] Kulich, M. *Lokalizace a tvorba modelu prostředí v inteligentní robotice*. Disertační práce. ČVUT Praha (2003).
- [34] Kulich, M.; Štěpán, P.; Přeučil, L. *Feature Detection and Map Building Using Ranging Sensors*. International Conference on Intelligent Transportation Systems. Proceeding of the 1999/IEEJ/JSAI, The Institute of Electrical Engineers of Japan, Tokyo, Japan. 201-206. ISBN 0-7803-4975-X (1999).
- [35] Wulschleger, H.; Arras, O.; Vestli J. *A Flexible Exploration Framework for Map Building*. (1999).
- [36] 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).
- [37] Guivant, E. *Efficient Simultaneous Localization and Mapping in Large Environments*. PhD. Thesis, Australian Centre for Field Robotics Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, The University of Sydney, Sydney (2002).
- [38] Grisetti, G. *Simultaneous Localization and Mapping*. Towards a PhD. (2004).
- [39] 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).
- [40] Dudek, G.; Freedman, P.; Rekleitis, I. *Just-in-time Sensing: Efficiently Combining Sonar and Laser Range Data for Exploring Unknown Worlds*. Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation. Vol. 1., 667-672 (1996).
- [41] 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).
- [42] *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).
- [43] Horčíčka, J. *Počítačové zpracování digitálních obrázků – Houghova transformace*. K7 – vědecko populární časopis Fakulty mechatroniky TU v Liberci, 01/2005, ISSN 1214-7370 (2005).
- [44] Hlaváč, V.; Sedláček, M. *Zpracování signálů a obrazů*. ČVUT, Praha, ISBN 80-01-02114-9 (2002).

- [45] Sonka, M.; Hlavac, V.; Boyle, R. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. PWS, Boston (1999).
- [46] Connolly, C.; Grupen, C. *The Application of Harmonic Functions to Robotics*. Journal of Robotic Systems, 931-946 (1993).

Seznam vlastních publikovaných prací

- [47] Záda, V.; Pirk, P. *Optimization Method for Parameters Setting of Feedback Controller of Mobile Robot*. In: ECMS2005 (2005).
- [48] 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).
- [49] 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).
- [50] 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).
- [51] 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).
- [52] 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).
- [53] Špánek, R.; Pirk, P.; Kovář, P. *The BlueGame Project: Ad-hoc Multilayer 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).
- [54] Špánek, R.; Pirk, P. *Supporting Secure Communication in Distributed Environments*. Konference o informačních (inteligentních) technologiích - aplikace a teorie (ITAT 2007), Slovakia (2007).