

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

LOKALIZACE MOBILNÍHO ROBOTY V NEZNÁMÉM TERÉNU

Bc. Jiří Král

Diplomová práce
2015

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Král**
Osobní číslo: **I13469**
Studijní program: **N2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Lokalizace mobilního robota v neznámém terénu**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je podrobný popis metod lokalizace pro mobilního robota, návrh a realizace zvoleného konstrukčního řešení lokalizační jednotky. V teoretické části práce bude proveden podrobný popis a srovnání lokalizačních technik (např. využití ZigBee modulů, ultrazvuku, IR senzorů, odometrie atd.), zpracování příslušných výstupních dat vybraných senzorů a způsobu jejich vyhodnocení pro potřeby lokalizace mobilního robota.

V praktické části bude proveden návrh a ověření vybrané metody lokalizace mobilního robota. Realizace hardware a software bude provedena s využitím vývojového modulu s mikropočítačem řady ATmega. Vývojový modul bude doplněn o potřebné hardwarové prostředky. Návrh elektronických obvodů bude proveden v CAD software "Eagle". Příslušný firmware mikropočítače a software osobního počítače bude realizován ve zvoleném programovacím jazyce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

WINKLER, Z. Robotika.cz [on-line]. 2005-12-05 [cit. 2014-10-10]. Odometrie.
URL: ; <http://robotika.cz/guide/odometry/cs>.

WINKLER, Z. Robotika.cz [on-line]. 2003-11-03 [cit. 2014-10-10]. Lokalizace.
URL: ; <http://robotika.cz/guide/localization/cs>.

EVERETT, H., R. Sensors for Mobile Robots, Theory and Applications. 1.vyd.
A.K.Peters, Ltd. ISBN 1-568811-048-2.

MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - 3. díl - edice uP
a praxe, 2. vydání, BEN-technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4.

ZÁHLAVA, V. Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN
978-80-7300-266-4.

NOVÁK, P. Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení, BEN-technická literatura,
Praha 2007, ISBN 80-7300-141-1.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Libor Havlíček, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

29. října 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

15. května 2015



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. listopadu 2014

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 26. 05. 2015

Bc. Jiří Král

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat osobám, které mi byly nápomocny v průběhu zpracování diplomové práce a které mne podporovaly během studia. Především bych chtěl poděkovat panu Ing. Liboru Havlíčkovi Ph.D a Ing. Danielu Honcovi Ph.D za ochotu a čas věnovaný odborným konzultacím.

V Pardubicích dne 26. 05. 2015

Bc. Jiří Král

ANOTACE

Práce je věnována problematice lokalizace mobilního robota v neznámém terénu. Byla provedena analýza lokalizačních technik, snímačů používaných pro lokalizaci a bylo navrženo řešení lokalizační jednotky využívající modul XBee 802.15.4 OEM RF. Pro ověření funkčnosti lokalizační jednotky byl vypracován simulační program ve výpočetním prostředí MATLAB. Na základě naměřených výsledků bylo rozhodnuto o vhodnosti použití metody.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lokalizace, XBee, trilaterace, senzor, robot.

TITLE

LOCALIZATION OF A MOBILE ROBOT IN UNKNOWN TERRAIN

ANNOTATION

The work is oriented to the issue of localization of the mobile robot in unknown terrain. The analysis of localization techniques, sensors used for localization was realized and it has been proposed localization units using XBee 802.15.4 OEM RF module. To verify the functionality of the localization unit was developed simulation software in MATLAB computing environment. Based on the measured results was decided on the suitability of using the method.

KEYWORDS

Localization, XBee, trilateration, sensor, robot.

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
SEZNAM ILUSTRACÍ	12
SEZNAM TABULEK	13
ÚVOD	14
1 LOKALIZACE	15
1.1 RELATIVNÍ LOKALIZACE	15
1.1.1 Odometrie	16
1.1.2 Inerciální určování polohy	18
1.2 ABSOLUTNÍ LOKALIZACE	19
1.2.1 Triangulace	19
1.2.2 Trilaterace	19
1.2.3 2D trilaterace	20
1.2.4 3D trilaterace	22
2 SNÍMAČE PRO LOKALIZACI	27
2.1 SNÍMAČE NATOČENÍ	27
2.1.1 Inkrementální	27
2.1.2 Absolutní	28
2.2 GYROSKOP	30
2.2.1 Mechanický gyroskop	30
2.2.2 Optický gyroskop	30
2.2.3 Piezoelektrický gyroskop	31
2.3 AKCELEROMETRY	32
2.3.1 Indukčnostní akcelerometry	33
2.3.2 Kapacitní akcelerometry	33
2.3.3 Tenzometrické akcelerometry	33
2.3.4 Piezoelektrické akcelerometry	34
2.4 ULTRAZVUKOVÝ SENZOR VZDÁLENOSTI	34
2.5 OPTICKÉ SENZORY	35
2.5.1 IR senzor	35
2.5.2 Laserový senzor	36
2.6 BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKAČNÍ MODULY	36

3 POPIS POUŽITÝCH NÁSTROJŮ	38
3.1 MODUL XBEE 802.15.4 OEM RF.....	38
3.1.1 IEEE 802.15.4.....	38
3.1.2 Sériová komunikace modulu	39
3.1.3 Pracovní módy XBee modulu.....	42
3.1.4 AT command mód	43
3.1.5 API operace.....	43
3.1.6 Vlastnosti XBee sítě.....	44
3.1.7 Závislost síly signálu na vzdálenosti	45
3.2 DESKA XBIB-R-DEV A XBIB-U-DEV	47
3.3 MATLAB.....	48
3.4 XCTU.....	49
3.5 SERIAL PORT MONITOR.....	49
3.6 AVR STUDIO	50
4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ LOKALIZACE	51
4.1 ROZHRANÍ PRO VZDÁLENÝ MODUL.....	51
4.1.1 Základní deska	51
4.1.2 Deska pro XBee	54
4.1.3 Firmware	55
4.2 ODHAD POLOHY	56
4.2.1 Měření směrových charakteristik.....	57
4.2.2 Měření závislosti RSSI na vzdálenosti	58
4.2.3 Algoritmus odhadu polohy	59
4.2.4 Program pro odhad polohy	61
5 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	63
5.1 KVALITA ODHADU POLOHY	66
6 ZÁVĚR	68

SEZNAM ZKRATEK

2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
API	Application Programming Interface
ASCII	americký standardní kód pro výměnu informací (American Standard Code for Information Interchange)
CR	návrat na začátek řádku (Carriage Return)
CTS	povolení k vysílání (Clear To Send)
DI	vstupující data (Data In), digitální vstup (Digital Input)
DO	výstupní data (Data Out), digitální výstup (Digital Out)
EEPROM	elektricky mazatelná nonvolatilní paměť (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
GPS	globální navigační systém (Global Positioning System)
ICSP	sériové programování v obvodu (In-Circuit Serial Programming)
IEEE	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IR	infračervený (Infra Red)
ISM	frekvenční pásmo pro průmysl vědu a medicínu (Industrial Scientific medicine)
LED	světlo emitující dioda (Light Emitting Diode)
LF	posun o řádek (Line Feed)
LPS	lokální navigační systém (Local Positioning System)
NaN	není číslo (Not a Number)
OZ	operační zesilovač
PAN	osobní síť (Personal Area Network)
RSSI	intenzita signálu (Received Signal Strength Indicator)
RTS	požadavek na odeslání (Request To Send)
RXD	přijátá data (Received Data)
TOF	čas mezi vysláním a příjmem signálu (Time Of Flight)
TXD	odeslaná data (Transmit Data)
USART	Univerzální synchronní/asynchronní sériové rozhraní (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter)
WPAN	bezdrátová osobní síť (Wireles Perosonal Area Network)

SEZNAM SYMBOLŮ

α	úhel posunutí, °
$\Delta u_{L/P,i}$	přírůstek vzdálenosti pro levé L a pravé P kolo, m
Δu_i	přírůstek posunu robota, m
$\Delta \alpha_i$	přírůstek natočení středu robota, °
a	zrychlení tělesa, m.s ⁻²
α_i	relativní natočení středu robota
α_{i-1}	relativní natočení středu robota v předchozím kroku
A	síla signálu ve vzdálenosti 1 m, dB
c	parametr kvadratického kritéria
c_k	konstanta odpovídající ujeté vzdálenosti na jeden krok snímače, m
C_n	počet rysek snímače na otáčku
C_0	počet kroků snímače na otáčku
d	vzdálenost, m
d_1	poloměr 1. kružnice, m
d_2	poloměr 2. kružnice, m
d_3	poloměr 3. kružnice, m
d_4	poloměr 4. kružnice, m
D_k	průměr kola, m
e_x	vektor ve směru osy x
e_y	vektor ve směru osy y
e_z	vektor ve směru osy z
f_{osc}	frekvence oscilátoru mikroprocesoru
F_s	setrvačná síla, N
k	libovolné celé číslo
K	hodnota kvadratického kritéria
m	hmotnost tělesa, kg
n	konstanta šíření signálu
η_p	převodový poměr převodovky pohonu
$N_{L/P,i}$	počet kroků snímače na levém L a na pravém P kole
RB1	souřadnice 1. referenčního bodu
RB2	souřadnice 2. referenčního bodu
RB3	souřadnice 3. referenčního bodu

$RSSI$ intenzita signálu, dB
 x, y souřadnice neznámé polohy
 x_1, y_1 známé souřadnice 1. referenčního bodu
 x_2, y_2 známé souřadnice 2. referenčního bodu
 x_3, y_3 známé souřadnice 3. referenčního bodu
 x_4, y_4 známé souřadnice 4. referenčního bodu
 x_i, y_i pozice středu robota v souřadnicích x a y
 x_{i-1}, y_{i-1} pozice středu robota v souřadnicích x a y , v předchozím kroku
 $xyz_{1,2}$ souřadnice hledaného bodu

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 - Princip 2D trilaterace	20
Obr. 1.2 - Princip 3D trilaterace s třemi referenčními body	24
Obr. 2.1 - Rotační enkodér s binárním kódováním.....	29
Obr. 2.2 - Rotační enkodér s Grayovým kódem	29
Obr. 2.3 - Piezoelektrický gyroskop využívající statických těles.....	32
Obr. 3.1 - Použité typy XBee modulů	38
Obr. 3.2 - Data posílaná sériovou linkou	40
Obr. 3.3 - Schéma toku dat uvnitř XBee modulu	41
Obr. 3.4 - Pracovní módy XBee modulu	42
Obr. 3.5 – Vliv kvantizačního šumu na měření RSSI a odhad polohy	47
Obr. 3.6 - Moduly XBIB-R-DEV a XBIB-U-DEV	48
Obr. 3.7 - Příklad odposlechu programem Serial Port Monitor.....	50
Obr. 4.1 - Napájecí obvod.....	51
Obr. 4.2 - Zapojení mikroprocesoru ATmega8	53
Obr. 4.3 - Plošný spoj základní desky	53
Obr. 4.4 - Zapojení desky pro XBee	54
Obr. 4.5 - Plošný spoj desky pro XBee.....	55
Obr. 4.6 - Struktura registrů UCSRB a UCSRC.....	55
Obr. 4.7 - Směrové charakteristiky modulu s integrovanou anténou	57
Obr. 4.8 - Směrové charakteristiky modulu s RPSMA anténou.....	57
Obr. 4.9 - Závislost RSSI na vzdálenosti 0 - 10 m	58
Obr. 4.10 - Závislost RSSI na vzdálenosti 0 - 5 m	59
Obr. 5.1 - 1. měření (3 referenční body, malá vzdálenost).....	64
Obr. 5.2 - 2. měření (4 referenční body, malá vzdálenost).....	64
Obr. 5.3 - 3. měření (3 referenční body, větší vzdálenost)	65
Obr. 5.4 - 4. měření (4 referenční body, větší vzdálenost)	65
Obr. 5.5 – Porovnání chyb 1. a 2. měření	66
Obr. 5.6 - Porovnání chyb 3. a 4. měření.....	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1- Hodnoty konstanty šíření signálu pro různá prostředí	46
Tab. 4.1 - Nastavení délky zprávy v registru UCSRC.....	56
Tab. 4.2 - Hodnoty registru UBRR pro $f_{osc} = 16$ MHz	56
Tab. 5.1 - Souřadnice referenčních bodů pro první a druhé měření	63
Tab. 5.2 - Souřadnice referenčních bodů pro třetí a čtvrté měření	63
Tab. 5.3 - Průměr a medián chyby měření.....	67

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá popisem lokalizačních technik a nástrojů umožňujících lokalizaci mobilního robota v neznámém terénu. Lokalizace je jedním z hlavních problémů mobilní robotiky a v dnešní době je jí věnována velká pozornost.

V teoretické části budou nejprve popsány jednotlivé metody lokalizace, a to metody pro lokalizaci relativní, tak i pro lokalizaci absolutní. Budou popsány jejich vlastnosti, výhody, nevýhody a způsob jakým umožňují určit odhad polohy. Teoretická část se také zabývá popisem snímačů, které se pro oba způsoby lokalizace využívají. V závěru této části budou popsány nástroje využívané v praktické části.

Praktická část práce se bude zabývat návrhem a ověřením vhodnosti navrhovaného řešení lokalizace. Bude zde popsán návrh hardware a firmware využívající mikroprocesor Atmel, řady ATmega. Dále bude v této části popsán algoritmus odhadu polohy a postup výpočtu polohy v prostředí MATLAB.

Závěr práce bude obsahovat několik experimentálních měření, pomocí kterých budou ověřovány některé předpoklady popsané v průběhu práce. Těmito předpoklady jsou zvyšování přesnosti odhadu polohy společně se stoupajícím počtem referenčních bodů a počtem opakování měření pro každou polohu. Na základě získaných výsledků bude provedeno zhodnocení.

Cílem práce je na základě získaných informací navrhnout a ověřit vhodnost vybrané metody lokalizace.

1 LOKALIZACE

Mezi základní problémy při návrhu pohybu mobilního robota patří způsob, jakým má být zjišťována jeho aktuální poloha, a jakým způsobem je určena cílová poloha, které má dosáhnout a způsob jakým se může na určité místo dostat. Právě zjišťováním polohy se zabývá lokalizace. Bez znalosti polohy dále není možné plánovat cíl cesty ani trasu, po které se má mobilní robot pohybovat.

Způsoby určování polohy se dají rozdělit dle různých kritérií například na metody lokální a globální. Prioritním úkolem lokální lokalizace je zamezení střetu s překážkami. To znamená, že zabezpečuje sledování okolí robota a udává informaci o přítomnosti překážky, její vzdálenosti a směru, ve kterém se nachází. Z toho důvodu je lokální lokalizace nadřazena lokalizaci globální. Globální metody pak zajišťují lokalizaci robota v určeném pracovním prostoru a umožňují mu dosáhnout požadované pozice po stanovené, optimální, trajektorii. Tyto metody se dají dále dělit na relativní a absolutní, ty budou popsány dále v textu práce. Každá z metod má své výhody a nevýhody, proto jsou ve většině aplikací využívány jejich kombinace [Novák, 2007].

1.1 RELATIVNÍ LOKALIZACE

Jak již sám název napovídá, tento způsob lokalizace je založen na výpočtu relativní změny polohy vůči poloze předchozí. To znamená, že se měří změna rotace a polohy, po případě rychlosti, nebo zrychlení, z kterých se dá změna polohy dopočítat. Výsledná poloha robota se potom skládá z dílčích změn od počátku měření.

Pro správné určení relativní polohy by bylo potřeba měřit změnu polohy v každém časovém okamžiku naprosto přesně. Toho lze v praxi jen velmi těžko dosáhnout a proto je výsledná odhadovaná poloha zatížena chybou, která se při každém měření změny polohy sčítá. Z toho důvodu není vhodné metody relativní lokalizace používat pro sledování polohy po dlouhý časový úsek.

Prostředkem relativní lokalizace je tzv. dead reckoning (odvozeno od deducated reckoning), což by se dalo přeložit jako lokalizace výpočtem. Je to jednoduchá matematická metoda pro výpočet aktuální polohy z polohy předchozí. Pro tento výpočet může být využita informace o zrychlení, rychlosti, směru, vzdálenosti a času. Nejjednodušší a nejčastěji využívanou metodou, patřící do této skupiny, je odometrie. Ta k odhadu polohy potřebuje pouze informaci o natočení kol a matematický model robota. Další metodou je inerciální navigace, která je nezávislá na okolním prostředí.

1.1.1 Odometrie

Slovo odometrie pochází z řečtiny, konkrétně ze spojení slov hodos (cestovat, cesta) a metron (měřit). Odometrie využívá rotačních enkodérů pro měření otáčení kol, přičemž tato rotace může probíhat ve více osách. Kromě informace o otočení kol je dále nutné znát matematický model robota. Odometrie má tu výhodu, že je zcela soběstačná a vždy dokáže podat informaci o odhadované relativní poloze. Další výhodou je poměrně jednoduchá a levná realizace [Winkler, 2005].

Pro správný odhad polohy je potřeba znát konstrukci robota a to z toho důvodu, že pro každý typ podvozku platí různé vztahy. Na druhou stranu všechny typy podvozků jsou zatíženy stejnými druhy chyb. Tyto chyby se dělí na systematické a náhodné.

Systematické chyby jsou takové, které mají při opakovaném měření stejnou velikost, nebo se jejich velikost předvídatelným způsobem mění. To znamená, že systematickou chybu lze odhadnout a alespoň částečně eliminovat korekcí.

U mobilních robotů jsou systematické chyby nejčastěji způsobeny následujícími vlastnostmi:

- rozdílné velikosti kol;
- nedokonalý kruhový tvar kol;
- rozdíl nominálního a skutečného rozměru kol;
- rozdíl nominálního a skutečného rozchodu kol;
- konečné rozlišení enkodéru;
- konečná vzorkovací frekvence enkodéru.

Proti tomu náhodné chyby odhadovat nelze. Při opakovaných měřeních se nepředvídatelně mění a nelze je tedy odstranit korekcí. Při lokalizaci vznikají náhodné chyby během následujících situací:

- jízda po nerovném povrchu;
- jízda přes nepředvídané předměty v cestě;
- deformace kol;
- prokluz kol z důvodu:
 - kluzkého povrchu;
 - příliš velké akcelerace nebo decelerace;
 - zatáčení;
 - vnější síly (náraz, posunutí);

- ztráta kontaktu kol s povrchem.

Pro popis výpočtu dráhy pohybu robota je nejjednodušší robot s podvozkem s dvěma diferenciálně řízenými koly umístěnými uprostřed. Kdy na ose každého kola je umístěn snímač natočení. Jak uvádí Novák [2007], každý snímač má určité rozlišení, je tedy potřeba určit konstantu c_k vyjadřující ujetou vzdálenost odpovídající jednomu kroku snímače

$$c_k = \frac{\pi D_k}{n_p C_O}, \quad (1.1)$$

kde D_k průměr kola,
 n_p převodový poměr převodovky pohonu,
 C_O počet kroků snímače na otáčku.

Nyní, když je známa ujetá vzdálenost pro jeden krok snímače, lze vypočítat přírůstek vzdálenosti pro N kroků na pravém N_P i levém N_L kole

$$\Delta u_{L/P,i} = c_k N_{L/P,i} \quad (1.2)$$

kde $\Delta u_{L/P,i}$ přírůstek vzdálenosti pro levé L a pravé P kolo,
 $N_{L/P,i}$ počet kroků snímače na levém L a na pravém P kole.

Dále může být vypočítán přírůstek posunu a natočení středu robota

$$\Delta u_i = \frac{\Delta u_{L,i} + \Delta u_{P,i}}{2}, \quad (1.3)$$

$$\Delta \alpha_i = \frac{\Delta u_{L,i} - \Delta u_{P,i}}{d}, \quad (1.4)$$

kde Δu_i přírůstek posunu robota,
 $\Delta \alpha_i$ přírůstek natočení středu robota.

Na závěr se určuje relativní natočení a pozice středu robota v souřadnicích x a y

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + \Delta \alpha_i, \quad (1.5)$$

kde α_i relativní natočení středu robota,
 α_{i-1} relativní natočení středu robota v předchozím kroku,

$$x_i = x_{i-1} + \Delta u_i \cos(\alpha_i), \quad (1.6)$$

$$y_i = y_{i-1} + \Delta u_i \sin(\alpha_i), \quad (1.7)$$

kde x_i, y_i pozice středu robota v souřadnicích x a y ,

x_{i-1}, y_{i-1} pozice středu robota v souřadnicích x a y , v předchozím kroku.

Výsledné relativní natočení robota je tedy výsledkem rozdílu celkového natočení levého a pravého kola.

1.1.2 Inerciální určování polohy

Tato metoda využívá gyroskopů a akcelerometrů pro měření rotačního a podélného zrychlení, jehož integrací se získá rychlost a další integrací ujetá vzdálenost.

Inerciální navigace má stejnou výhodu jako odometrie, je soběstačná a také u ní platí nárůst chyby v závislosti na čase měření. U inerciální navigace se vyskytuje několik chyb, se kterými jsme se u odometrie nesetkali, tyto chyby vychází z principu funkce gyroskopu a akcelerometru.

Vzhledem k tomu, že senzory mají určité rozlišení a citlivost, nastává problém při pomalých změnách pohybu, kdy měřené zrychlení je příliš malé. Toto zrychlení může mít podobnou velikost, jako šum způsobený nedokonalostí senzoru nebo šum způsobený pohybem po nerovném povrchu. Pak je chyba měření polohy poměrně velká [Skalka, 2011].

Další problém je způsoben tím, že gyroskop neudrží svou orientaci vůči zemi, ale pouze vůči sobě samému. Takže rotace země, nejen kolem své osy, ale také kolem slunce, zde působí jako rušení. S tím je potřeba při návrhu počítat. Dalším možným řešením je použití gyrokompasu [Skalka, 2011].

Potíže způsobuje též gravitační zrychlení. Akcelerometry totiž při svislé změně polohy nepodávají informaci pouze o zrychlení samotného robota. Výstupem snímače je součet zrychlení robota se zrychlením gravitačním. Proto se experimentálně zjistí jaká hodnota je na výstupu akcelerometru v klidu a ta se pak od zrychlení celkového odčítá.

Výhodou inerciální navigace je nezávislost na prostředí, ve kterém se robot pohybuje a odolnost proti rušení a vlivům okolí.

1.2 ABSOLUTNÍ LOKALIZACE

Absolutní lokalizace umožňuje určit absolutní polohu v pracovním prostoru robota, například v místnosti, budově, na celé planetě, atd. Lokalizace probíhá zcela nezávisle na předchozí poloze. To znamená, že zde nedochází ke sčítání chyby a ta tak nezávisí na čase. Chyba měření je tedy u absolutní lokalizace v konstantním rozmezí pro všechny naměřené polohy. Nejčastěji používané metody jsou triangulace a trilaterace.

1.2.1 Triangulace

Při triangulaci je k hledání neznámé polohy využito měření nejméně tří úhlů, mezi referenčními body se známou polohou v pracovní prostředí a robotem. Jako referenční body jsou často využívány vysílače infračerveného záření. Na robotovi pak bývá instalován rotační snímač, který získává informaci o úhlu mezi podélnou osou robota a právě viditelným vysílačem. Následně se pomocí vztahů platících v trojúhelníku určuje poloha robota a orientace robota v prostoru. Možnost určení orientace robota bez nutnosti použití dalších prostředků je jednou z výhod této metody [Everett, 1995].

V ideálním případě by byl použit všesměrový vysílač, ten je ale velmi energeticky náročný, především v případech kdy má být robot lokalizován v pracovním prostoru s velkou rozlohou. Proto se dává přednost vysílačům s kuželovitou vyzařovací charakteristikou. V důsledku toho nejsou referenční body v některých pracovních pozicích robota viditelné [Everett, 1995].

Existují i další možné realizace. Na příklad se používá rotační vysílač/přijímač na robotovi a tři nebo více reflexních ploch se známou polohou v jeho okolí. Další možností může být rotační vysílač na robotovi a přijímače se známou polohou v jeho okolí [Everett, 1995].

1.2.2 Trilaterace

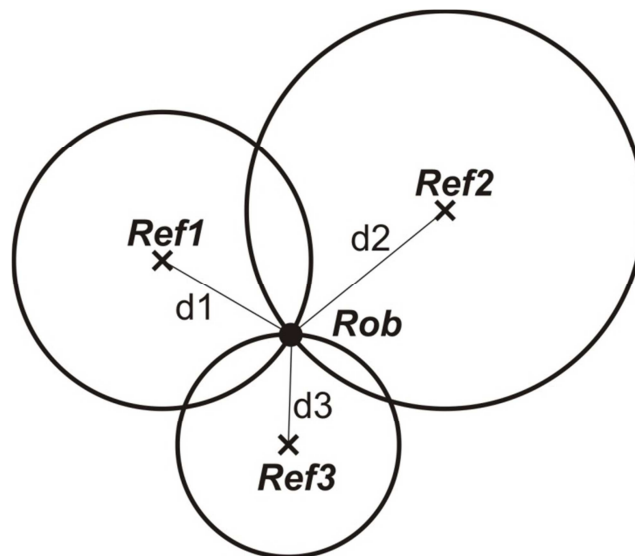
Trilaterace je metoda určování polohy na základě měření popřípadě výpočtu vzdálenosti mezi robotem a referenčními body. Stejně jako u triangulace jsou referenční body minimálně tři. Každý z nich je umístěn v pracovním prostoru robota na známé pozici. Opět je zde několik možností realizace, například referenční body jako vysílače a jeden přijímač na robotovi, nebo přijímače na známé pozici a jeden vysílač na robotovi. Výhodou použití přijímače na robotovi je možnost určování polohy více robotů v jeden časový okamžik [Everett, 1995].

Podle toho zda se poloha určuje v dvourozměrném nebo třírozměrném prostoru se rozlišuje 2D a 3D trilaterace.

1.2.3 2D trilaterace

Pro výpočet polohy metodou 2D trilaterace je potřeba určit tři vzdálenosti mezi referenčním bodem a robotem. Jak již bylo řečeno, jedná se o lokalizaci v dvourozměrném prostoru. Jsou tedy určovány pouze dvě souřadnice x a y , dávající informaci o poloze v pracovním prostoru robota. Vzhledem k tomu, že se určuje poloha pouze ve dvourozměrném prostoru, musí být referenční body a robot umístěny v jedné rovině.

Na obr. 1.1 je graficky znázorněn princip 2D trilaterace. Na tomto obrázku jsou referenční body označeny jako **Ref1**, **Ref2** a **Ref3**. Referenční body se nacházejí na souřadnicích (x_1, y_1) , (x_2, y_2) a (x_3, y_3) . Kolem každého bodu je vyznačena kružnice určená poloměry d_1 , d_2 a d_3 . Velikost poloměru je dána naměřenou, nebo vypočítanou vzdáleností od robota. V průsečíku kružnic se nachází vypočítaná poloha robota, který je na obrázku značen jako **Rob**, tento bod má souřadnice (x, y) .



Obr. 1.1 - Princip 2D trilaterace

Výpočet neznámé polohy probíhá tak, že je pro každou kružnici určena rovnice a řešením soustavy tří kvadratických rovnic o dvou neznámých se hledá průsečík těchto rovnic.

Tato soustava rovnic vypadá následovně:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2, \quad (1.8)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2, \quad (1.9)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2, \quad (1.10)$$

kde x, y souřadnice neznámé polohy,
 x_1, y_1 známé souřadnice 1. referenčního bodu,
 x_2, y_2 známé souřadnice 2. referenčního bodu,
 x_3, y_3 známé souřadnice 3. referenčního bodu,
 d_1 poloměr 1. kružnice,
 d_2 poloměr 2. kružnice,
 d_3 poloměr 3. Kružnice.

Substituce umožňuje kvadratickou soustavu zjednodušit na soustavu dvou lineárních rovnic. Na příklad může být dosazována rovnice (1.8) do rovnice (1.9) a (1.10)

$$2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2), \quad (1.11)$$

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2). \quad (1.12)$$

Pomocí Cramerova pravidla se následně najde obecné řešení soustavy. Řešením soustavy jsou souřadnice x a y hledaného průsečíku kružnic

$$x = \frac{\begin{vmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) & 2(y_2 - y_1) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}, \quad (1.13)$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ 2(x_3 - x_1) & (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}. \quad (1.14)$$

1.2.4 3D trilaterace

Pro výpočet polohy v trojrozměrném prostoru se využívá 3D trilaterace. Na jejím principu pracuje například globální navigační systém GPS. V porovnání s 2D trilaterací, která používá rovnice pro kruh je ve 3D trilateraci využíváno vztahů popisující kouli. Při použití tří referenčních bodů, v případě GPS družic, jsou možné dva správné výsledky. Jeden z nich ovšem vychází ve výšce nad družicemi a proto je tato poloha považována za nevhodnou a je z výpočtu vyloučena. Díky dalším referenčním bodům je možné druhé řešení soustavy rovnic vyloučit.

Výpočet probíhá velmi podobně jako u 2D trilaterace, s tím rozdílem, že každý referenční bod může být v rozdílné výšce. Jak bylo řečeno výše, není využíváno rovnic pro kruh, ale rovnic pro kouli a znovu bude hledán průsečík. Výpočet probíhá následovně:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2, \quad (1.15)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2, \quad (1.16)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = d_3^2, \quad (1.17)$$

$$(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = d_4^2, \quad (1.18)$$

Tato soustava kvadratických rovnic se dá zjednodušit na soustavu rovnic lineárních

$$2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y + 2(z_2 - z_1)z = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) - (z_1^2 - z_2^2), \quad (1.19)$$

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y + 2(z_3 - z_1)z = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) - (z_1^2 - z_3^2), \quad (1.20)$$

$$2(x_4 - x_1)x + 2(y_4 - y_1)y + 2(z_4 - z_1)z = (d_1^2 - d_4^2) - (x_1^2 - x_4^2) - (y_1^2 - y_4^2) - (z_1^2 - z_4^2). \quad (1.21)$$

Následně je pro výpočet souřadnic x , y a z , opět použito Cramerovo pravidlo

$$x = \frac{\begin{vmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) - (z_1^2 - z_2^2) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) - (z_1^2 - z_3^2) & 2(y_3 - y_1) & 2(z_3 - z_1) \\ (d_1^2 - d_4^2) - (x_1^2 - x_4^2) - (y_1^2 - y_4^2) - (z_1^2 - z_4^2) & 2(y_4 - y_1) & 2(z_4 - z_1) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) & 2(z_3 - z_1) \\ 2(x_4 - x_1) & 2(y_4 - y_1) & 2(z_4 - z_1) \end{vmatrix}}, \quad (1.22)$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) - (z_1^2 - z_2^2) & 2(z_2 - z_1) \\ 2(x_3 - x_1) & (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) - (z_1^2 - z_3^2) & 2(z_3 - z_1) \\ 2(x_4 - x_1) & (d_1^2 - d_4^2) - (x_1^2 - x_4^2) - (y_1^2 - y_4^2) - (z_1^2 - z_4^2) & 2(z_4 - z_1) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) & 2(z_3 - z_1) \\ 2(x_4 - x_1) & 2(y_4 - y_1) & 2(z_4 - z_1) \end{vmatrix}}, \quad (1.23)$$

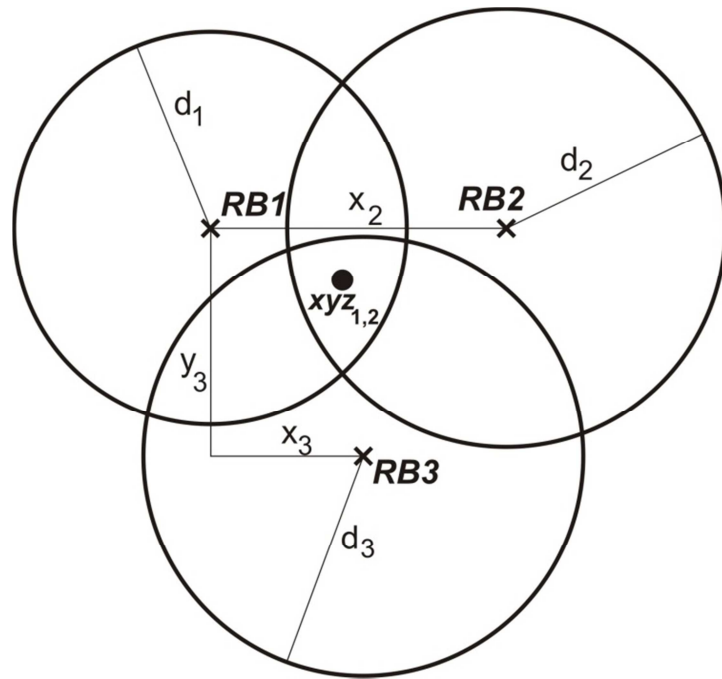
$$z = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) - (z_1^2 - z_2^2) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) & (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) - (z_1^2 - z_3^2) \\ 2(x_4 - x_1) & 2(y_4 - y_1) & (d_1^2 - d_4^2) - (x_1^2 - x_4^2) - (y_1^2 - y_4^2) - (z_1^2 - z_4^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) & 2(z_3 - z_1) \\ 2(x_4 - x_1) & 2(y_4 - y_1) & 2(z_4 - z_1) \end{vmatrix}}. \quad (1.24)$$

2D i 3D trilaterace mají stejné kladné i záporné stránky. V obou případech způsobí přidání dalších referenčních bodů zvýšení přesnosti výpočtu pozice robota. Nevýhodou je, že s rostoucím počtem referenčních bodů roste i náročnost výpočtu.

V případě, že jsou k dispozici pouze 3 referenční body **RB1**, **RB2** a **RB3**, bylo by analytické hledání pozice v absolutním souřadném systému pracovního prostoru robota poměrně složité. Z tohoto důvodu se používá transformace do souřadného systému vztaheného k referenčním bodům. Tato metoda je popisována na Wikipedii [2015].

Pro zjednodušení výpočtu se počítá s referenčními body umístěnými v jedné rovině. Dále se referenční bod **RB1** umísťuje do počátku souřadného systému, **RB2** je posunut pouze po ose x a třetí referenční bod **RB3** může být umístěn kdekoli na této rovině. Jediné omezení pro třetí referenční bod je takové, že nesmí být umístěn na jedné přímce s prvním a druhým referenčním bodem. Po dokončení výpočtu se získaná poloha převádí zpět do absolutních souřadnic v pracovním prostoru robota.

Na obr. 1.2 je zobrazen princip 3D trilaterace, s pomocí 3 referenčních bodů. Obrázek je z důvodu přehlednosti zjednodušen a ukazuje princip z pohledu z vrchu.



Obr. 1.2 - Princip 3D trilaterace s třemi referenčními body

Transformace z absolutního souřadného systému pracovního prostoru robota do souřadného systému vztaženého k referenčním bodům se řeší následovně. Referenční body **RB1**, **RB2** a **RB3** jsou využity pro definici vektorů umístěných do počátku souřadného systému. Tyto vektory e_x , e_y , a e_z jsou směnicemi os nového souřadného systému. První se určuje vektor e_x ve směru od **RB1** k **RB2**,

$$e_x = \frac{RB2 - RB1}{\|RB2 - RB1\|}, \quad (1.25)$$

kde **RB1** souřadnice 1. referenčního bodu,

RB2 souřadnice 2. referenčního bodu,

e_x vektor ve směru osy x .

Dále se určuje hodnota souřadnice x_3 referenčního bodu **RB3** v novém souřadném systému

$$x_3 = e_x \cdot (RB3 - RB1). \quad (1.26)$$

Bod x_3 se využívá při výpočtu vektoru e_y . Vektor e_y se vypočítá podle vztahu

$$e_y = \frac{RB3 - RB1 - x_3 e_x}{\|RB3 - RB1 - x_3 e_x\|}, \quad (1.27)$$

kde e_y vektor ve směru osy y .

Vektorovým součinem vektorů, které jsou dány vztahy (1.25) a (1.27), se vypočítá směrnice vektoru, který je k těmto dvěma vektorům kolmý. Vektor e_z je směrnicí osy z nového souřadného systému a vypočítá se podle vztahu

$$\mathbf{e}_z = \mathbf{e}_x \times \mathbf{e}_y, \quad (1.28)$$

kde \mathbf{e}_z vektor ve směru osy z .

Pro dokončení transformace je nutno dopočítat zbývající neznámou souřadnici x_2 referenčního bodu **RB2** a souřadnici y_3 referenčního bodu **RB3**. Tyto dvě souřadnice se vypočítají podle vztahu

$$x_2 = \|\mathbf{RB1} - \mathbf{RB2}\|, \quad (1.29)$$

$$y_3 = \mathbf{e}_y \cdot (\mathbf{RB3} - \mathbf{RB1}) \quad (1.30)$$

Vzhledem k tomu, že se pro určení polohy používají tři vzdálenosti od referenčních bodů, probíhá výpočet pomocí soustavy tří kvadratických rovnic pro tři neznámé. Tyto rovnice jsou odvozeny z toho, co bylo popsáno výše. Rovnice tedy vypadají následovně:

$$d_1^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad (1.31)$$

$$d_2^2 = (x - x_2)^2 + y^2 + z^2, \quad (1.32)$$

$$d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + z^2. \quad (1.33)$$

Je potřeba vypočítat tři souřadnice, budou tedy použity všechny tři rovnice. Odečtením rovnice (1.32) od rovnice (1.31) a následnou úpravou získáme vztah pro souřadnici x hledaného bodu

$$x = \frac{d_1^2 - d_2^2 + x_2^2}{2x_2}. \quad (1.34)$$

Za předpokladu, že se první dvě koule popsané rovnicemi (1.31) a (1.32) protínají ve více než jednom bodě. To znamená, že platí

$$x_2 - d_1 < d_2 < x_2 + d_1. \quad (1.35)$$

Dosazením vztahu (1.34) do rovnice (1.31) je získána rovnice pro průsečík prvních dvou koulí. Tímto průsečíkem je kruh popsaný rovnicí

$$y^2 + z^2 = d_1^2 - \frac{(d_1^2 - d_2^2 + x_2^2)}{4x_2^2}. \quad (1.36)$$

Vyjádřením z^2 z rovnice (1.31), následným dosazením do rovnice (1.33) a úpravou je získán vztah pro souřadnici y hledaného bodu

$$y = \frac{d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - 2xx_3}{2y_3}. \quad (1.37)$$

Jako poslední se určí souřadnice z z rovnice (1.31). Po vyjádření se tedy vypočítá souřadnice z podle vztahu

$$z = \pm \sqrt{d_1^2 - x^2 - y^2}. \quad (1.38)$$

Takto jsou určeny všechny tři souřadnice hledaného bodu v souřadném systému vztahenému k referenčním bodům. Protože je souřadnice z určena jako kladná nebo záporná odmocnina, existuje několik možných řešení. Řešení může být jedno, dvě, nebo také nemusí být žádné.

Poslední část výpočtu se dá znázornit jako hledání průsečíku třetí koule s kruhem popsaným rovnicí (1.36), který je průsečíkem první a druhé koule. Pokud tento kruh vychází mimo, nebo vně třetí kouli, byla by počítána odmocnina ze záporného čísla. Odmocnina ze záporného čísla v oboru reálných čísel neexistuje, výpočet tedy nemá reálné řešení. Pokud se koule dotýká kruhu pouze v jednom bodě je souřadnice z nulová, z toho vyplývá, že se hledaný bod nachází v rovině určené referenčními body. Poslední možností je, že koule protíná kruh ve dvou bodech, to znamená, že výsledkem bude kladná a záporná hodnota odmocniny z kladného čísla.

Na závěr je potřeba provést zpětnou transformaci do souřadného systému pracovního prostoru robota, ta se provede takto:

$$xyz_{1,2} = \mathbf{RBI} + xe_x + ye_y \pm ze_z, \quad (1.39)$$

kde $xyz_{1,2}$ souřadnice hledaného bodu.

Při měření vzdálenosti, mezi robotem a referenčními body, se projevuje chyba měření. To může nastat například, když jsou chybně určeny souřadnice referenčních bodů, nebo se mezi vysílačem a přijímačem vyskytuje nějaká překážka. Chyba měření způsobí že, měřená vzdálenost je příliš krátká nebo příliš dlouhá proti vzdálenosti skutečné. Kvůli této chybě bude výpočet odhadu polohy robota nepřesný.

2 SNÍMAČE PRO LOKALIZACI

Aby bylo možné některou z předchozích metod využít v praxi, je potřeba získat informace o pohybu robota. K tomu se používají různé snímače. Citlivou částí snímače je čidlo, to převádí jednu fyzikální veličinu na jinou, snadněji zpracovatelnou. V případě robotiky se většinou využívá převodu neelektrické veličiny na elektrickou. Díky tomu lze dosáhnout vysoké přesnosti měření s možností snadného přenosu naměřených dat, které lze následně snadno zpracovat. Dále bude popsáno několik vybraných snímačů, které mají přímou souvislost s výše popsány metodami.

2.1 SNÍMAČE NATOČENÍ

V robotice je velmi často potřeba snímat úhel natočení. Pomocí hodnot získaných snímači natočení umístěných přímo na kolech robota mohou být určeny některé údaje o jeho pohybu, tyto údaje se také využívají při odometrii. Úhel natočení pomáhá určit údaje, jako jsou na příklad:

- rychlost otáčení kol;
- rychlost pohybu celého robota;
- poloha robota proti výchozí pozici (nedochází-li k prokluzu kol);
- natočení robota proti výchozí pozici (nedochází-li k prokluzu kol).

Další možností využití této informace je při měření úhlu natočení, jiného senzoru např. ultrazvuku nebo infračerveného senzoru, proti podélné ose robota. Z informací ze snímače natočení a druhého snímače, jehož natočení je snímáno se následně určuje poloha překážek v okolí robota a při známé mapě pracovního prostoru je možné odhadnout i pozici robota.

Úhel natočení může být snímán snímači analogovými nebo digitálními. Analogové snímače mají omezený rozsah měření, proto jsou v robotice využívány jen minimálně. Častěji jsou využívány snímače digitální, ty lze dále dělit na inkrementální a absolutní.

2.1.1 Inkrementální

Pro popis principu inkrementálních snímačů natočení jsou nejvhodnější optoelektronické snímače. Optoelektronický inkrementální snímač natočení se skládá z následujících částí:

- pohyblivý kotouček;
- hřídel;

- nepohyblivé stínítko před snímači;
- zdroj světla;
- snímací prvek.

Pohyblivý kotouček je připevněn na hřídel, jejíž otáčky jsou snímány. Nepohyblivé stínítko se umísťuje před snímací prvek tak, aby docházelo k osvětlení snímacího prvku v požadovaných okamžicích. Snímacím prvkem bývá nejčastěji fototranzistor nebo fotodioda citlivá na světelné záření s vlnovou délkou shodou s vlnovou délkou světla emitovaného zdrojem světla. Jako zdroj světla se používají světlo emitující diody s různou vlnovou délkou, toto světlo prochází skrz pohyblivý kotouček a stínítko a dopadá na snímací prvek [Kráal, 2012].

Pohyblivý kotouček je konstruován tak, že po jeho obvodu jsou vytvořené průhledné a neprůhledné rysky. Rozestup rysek určuje citlivost snímače. Jako referenční bod určující právě jednu otáčku nebo nulovou pozici se používá další ryska, umístěná mimo kruh rysek popsaný výše, a zdroj světla se snímačem. Pro rozlišení směru otáčení, se využívá třetí pár zdroje světla a snímače. Světlo ze třetího zdroje světla prochází též skrz hlavní kruh rysek, ale je posunutý o úhel α proti prvnímu páru světelného zdroje a snímače. Úhel α , o který musí být posut druhý zdroj světla, umístěný na hlavním kruhu rysek, aby bylo umožněno rozpoznat směr otáčení, se vypočítá podle vztahu

$$\alpha = \left(k + \frac{1}{2} \right) \frac{2\pi}{C_n}, \quad (2.1)$$

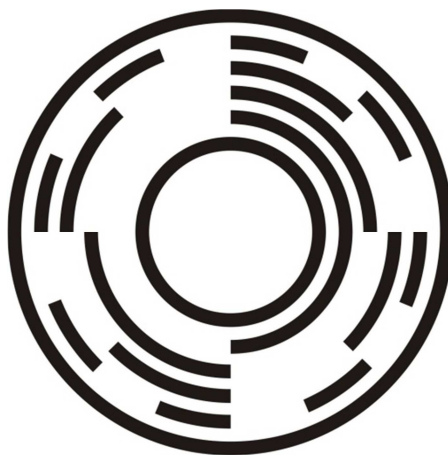
kde C_n počet rysek snímače na otáčku,
 k libovolné celé číslo.

2.1.2 Absolutní

Aby bylo možné snáze porovnat rozdíly mezi inkrementálním a absolutním snímačem natočení, budou absolutní snímače také popsány pomocí optoelektronického typu snímače. Jak již sám název napovídá, výstupem absolutního snímače je přímo informace o úhlu natočení. U inkrementálního typu snímače to byl sled pulzů, které se dále zpracovávají. Samotná konstrukce optoelektronického absolutního snímače natočení se velmi podobá inkrementálnímu snímači, ten se také skládá ze zdroje světla, pohyblivého kotoučku, stínítka a snímačů. Kromě počtu dvojic snímač a zdroj světla se oba typy liší především v konstrukci pohyblivého kotoučku. Po obvodu pohyblivého kotoučku není pouze jeden kruh rysek. Využívá se celá plocha kotoučku tak, že jsou zde umístěny průhledné a neprůhledné plošky.

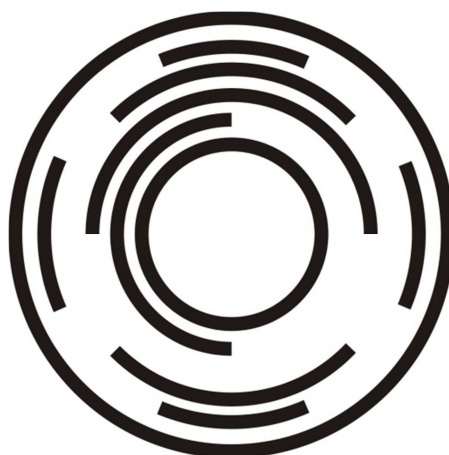
Právě v rozmístění těchto plošek je zakódována informace o úhlu natočení. Pro kódování úhlu se používá přímý binární kód nebo Grayův kód.

Při využití binárního kódu je snímán přímo úhel natočení bez nutnosti dalších úprav naměřených dat. Nevýhodou přímého binárního kódu je možnost vzniku chyby měření, při přechodu z jedné hodnoty na druhou, z důvodu změny hodnoty bitu v několika různých úrovních najednou. Příklad rotačního enkodéru s binárním kódem je na obr. 2.1.



Obr. 2.1 - Rotační enkodér s binárním kódováním

Pokud je použit snímač s Grayovým kódem, musí se naměřená data převést na skutečný úhel. Výhodou Grayova kódování je to, že se sousední hodnoty liší pouze v jednom bitu, tím se potlačuje možnost vzniku chyby při přechodu z jedné hodnoty na druhou. Příklad rotačního enkodéru s Grayovým kódem je na obr. 2.2.



Obr. 2.2 - Rotační enkodér s Grayovým kódem

Počet dvojic zdrojů záření a snímačů je roven velikosti rozlišení snímače. Je-li snímač čtyřbitový, stejně jako na obr. 2.1 a obr. 2.2, pak budou použity i čtyři zdroje záření a pro každý zdroj záření snímač.

2.2 GYROSKOP

Gyroskop je zařízení umožňující měřit orientaci v prostoru. Princip gyroskopu je znám již od počátku 18. století. Jméno mu dal francouzský fyzik Leon Foucault, který s jeho pomocí demonstroval rotaci země. Dnes se gyroskop nepoužívá jen pro měření úhlové rychlosti, ale také na příklad v letectví jako umělý horizont, pro navigaci balistických raket nebo torpéd, ke stabilizaci čoček ve fotoaparátech a podobně [Everett, 1995].

2.2.1 Mechanický gyroskop

Toto zařízení se skládá z rychle rotujícího disku, poháněného elektromotorem, s hřídelí upevněnou v ložiscích s minimálním třením. Ložiska jsou součástí vnitřního kardanového prstence. K zajištění nezávislosti na okolí je vnitřní kardanový prsteneček připevněn dalším párem ložisek k vnějšímu kardanovému prstenci, ten je třetím párem ložisek připevněn k měřenému objektu. Rotorem je setrvačnické kolo, u něž se většina hmotnosti nachází po obvodu. Rotující setrvačnické kolo má určitou hybnost, která ho udržuje ve stále stejné poloze nezávisle na okolí. S rostoucími otáčkami roste i hybnost. O tomto hovoří první Newtonův zákon, který říká, že těleso zůstává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud není nuceno vnějšími silami tento stav změnit.

Mechanické gyroskopy jsou vyráběny ve dvou základních typech. První z nich má na výstupu napětí nebo frekvenci úměrnou rychlosti otáčení. Druhý typ je schopný podávat informaci přímo o úhlu natočení. Tyto gyroskopy jsou schopné měřit pouze relativní změnu natočení. Pro určení absolutního natočení je potřeba použít dalších prostředků. [Everett, 1995].

2.2.2 Optický gyroskop

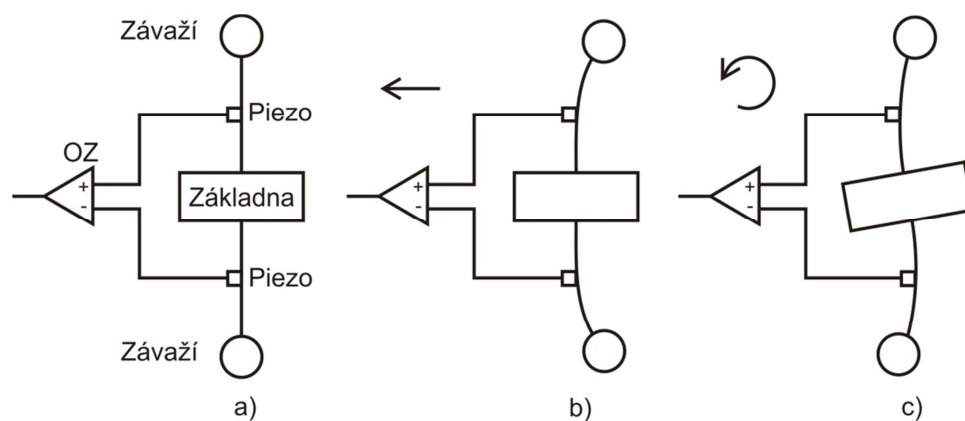
Princip optických gyroskopů je založen na Sagnacově efektu. Sagnacův efekt způsobuje, že se dva laserové paprsky vedené rotujícím rotorem gyroskopu, po stejné kruhové optické dráze, ale rozdílným směrem, jeden ve směru a druhý v protisměru otáčení, šíří různou rychlostí. To je způsobeno sčítáním rychlostí šíření paprsků a rychlosti otáčení. Důsledkem toho vznikne měřitelný fázový posuv. Světelné paprsky bývají vedeny například optickými vlákny uspořádanými do tvaru cívky. Tímto způsobem se dá rozlišit rychlost i směr rotace [Fejt, 2012].

2.2.3 Piezoelektrický gyroskop

Základem některých piezoelektrických gyroskopů je využití Coriolisovy síly, která umožňuje měřit rychlost rotace. „*Coriolisova síla je zdánlivá síla působící na pohybující se hmotný bod (těleso) v rotující soustavě. Uplatňuje se, je-li směr pohybu hmotného bodu jiný, než je směr osy rotace.*“ [Hrdlička, 2003]. Piezoelektrické gyroskopy se dají dělit na gyroskopy využívající setrvačnosti kmitavých těles a na gyroskopy využívající setrvačnosti těles statických.

Vibrační piezoelektrické gyroskopy využívají Coriolisovi síly tak, že se piezoelektrický element rozkmitá ve směru kolmém k ose rotace a Coriolisova síla jej vychyluje ve směru rovnoběžném se směrem rotace. Senzory zajišťují měření fázového posunu kmitů proti ustálené poloze a velikost napětí, měřeného na piezoelementu, které jsou úměrné rychlosti otáčení [Hrdlička, 2003].

Piezoelektrický gyroskop využívající setrvačnosti statických těles je znázorněn na obr. 2.3 a). Obr. 2.3 a) zobrazuje gyroskop setrvávající v klidové poloze. Skládá se ze základny, která je součástí pouzdra gyroskopu. Pohybuje se tedy shodně s objektem, ke kterému je gyroskop připevněn. K základně jsou přes pružné závěsy upevněna hmotná statická tělesa, též se dá použít označení závaží. Při změně pohybu gyroskopu se uplatňuje první Newtonův zákon a závaží tak způsobí deformaci pružných závěsů. Tato deformace působí na piezoelektrické elementy, na nichž se objeví měřitelné elektrické napětí, které je dále zpracováno pomocí operačního zesilovače OZ. Při pohybu gyroskopu v přímém směru se pružné závěsy deformují shodným směrem, jak je znázorněno na obr. 2.3 b). Na diferenciálních vstupech operačního zesilovače se tedy objeví shodné napětí a na výstupu operačního zesilovače nebude napětí žádné. Aby se nějaké napětí na výstupu objevilo, musí se změnit rychlost otáčení objektu, pak se pružné elementy budou ohýbat různými směry a na vstupech operačního zesilovače se objeví rozdílné napětí. Rotaci gyroskopu zobrazuje obr. 2.3 c) [Janko, 2012].



Obr. 2.3 - Piezoelektrický gyroskop využívající statických těles

Hlavními výhodami piezoelektrických gyroskopů je jejich poměrně nízká cena a malé rozměry. Celý gyroskop může být integrován do jednoho čipu společně s vyhodnocovacími obvody. Mezi nevýhody patří nižší přesnost oproti optickým nebo mechanickým gyroskopům.

2.3 AKCELEROMETRY

Akcelerometry využívají ke svoji činnosti také prvního Newtonova zákona. Je v nich tedy umístěno nějaké hmotné těleso, někdy nazývané jako seismická hmota, která je akcelerací vychylována z rovnovážné polohy. Toto vychýlení způsobené silou F_s je měřeno a následně převáděno na signál úměrný velikosti zrychlení. Síla F_s se vypočítá podle vztahu

$$F_s = ma, \quad (2.2)$$

kde m hmotnost tělesa,
 a zrychlení tělesa.

V ustálené poloze je hmotné těleso udržováno pružným elementem, tím může být pružina nebo tlumič. Některé typy akcelerometrů dokáží měřit i statické zrychlení, jako je na příklad zrychlení gravitační, díky tomu se dají snadno použít pro měření náklonu. Stejně jako u většiny jiných snímačů, je možno realizovat akcelerometry na několika rozdílných principech. Mezi jedny z dnes nejpoužívanějších typů patří piezoelektrické, tenzometrické, indukčnostní nebo na příklad kapacitní akcelerometry. Všechny typy akcelerometrů jsou zatíženy nízkým odstupem signál-šum pro malá zrychlení. Dalším problémem při měření zrychlení je citlivost na nerovnosti povrchu, po kterém se robot pohybuje.

Akcelerometry nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích. Kromě lokalizace se používají pro detekci pádu nebo nárazu, stabilizaci obrazu, sledování pohybu litosférických desek, sledování seismické činnosti a v mnoha dalších činnostech.

2.3.1 Indukčnostní akcelerometry

U indukčnostních akcelerometrů je hmotné těleso zhotoveno z feromagnetického materiálu. Hmotné těleso se umísťuje do blízkosti transformátoru, tak aby při působení síly, která vzniká při akceleraci, docházelo ke změně velikosti vzduchové mezery feromagnetického obvodu a tím se měnila indukčnost cívky. Může být použito i diferenční uspořádání, kdy je hmotné těleso umístěno mezi dva transformátory. V tomto případě je výstupem přímo napětí úměrné měřenému zrychlení. Hmotné těleso se upevňuje na pružné závěsy, ty vytvářejí mechanický odpor proti síle, která na hmotné těleso působí.

Tento typ akcelerometru se nejčastěji používá pro měření vibrací. Dokáže měřit frekvence od 0 Hz. Je tedy schopen měřit i statické zrychlení.

2.3.2 Kapacitní akcelerometry

Kapacitní akcelerometry mají umístěné hmotné těleso mezi dvě pevné desky vzduchového kondenzátoru, tímto vznikají dva proměnné kondenzátory. Na každé z desek je umístěna jedna statická elektroda a na hmotném tělese třetí pohyblivá elektroda, která je společná pro oba kondenzátory. Pohybem seismické hmoty, zavěšené na pružných elementech, se tedy mění kapacita. Poměrně často se používá hřebenového zapojení, kdy je paralelně spojeno více takovýchto proměnných kondenzátorů. Hřebenovým zapojením se zvyšuje linearita, citlivost a dynamický rozsah celého senzoru a eliminují se tak některé jeho nedostatky.

Stejně jako předchozí typ dokáže měřit i statické zesílení. Nevýhodou kapacitních akcelerometrů je nemožnost měření vysokých frekvencí a zrychlení, při kterých dochází k ohybu pohyblivé elektrody.

2.3.3 Tenzometrické akcelerometry

Tenzometrické akcelerometry jsou konstruovány tak, že se hmotné těleso připevňuje na pružný nosník, jehož deformace je snímána tenzometrem. Dnes se nejčastěji používá polovodičových tenzometrů. Deformace vzniká opět působením setrvačné síly na těleso během akcelerace. Výhodné je umístit dva tenzometry tak, aby při ohybu nosníku docházelo ke zkracování jednoho tenzometru a k prodlužování tenzometru druhého. Následným spojením dvou tenzometrů do můstkového zapojení se odstraňuje vliv teploty a odporu přívodů. Výsledné zrychlení je určeno jako druhá derivace změny odporu tenzometru.

Tenzometrický akcelerometr dokáže měřit frekvence od 0 Hz do 4 kHz, je tedy schopen měřit i statické zrychlení. Další výhodou je vysoká odolnost proti přetížení.

2.3.4 Piezoelektrické akcelerometry

Základem piezoelektrických akcelerometrů je piezoelektrický krystal, ke kterému je připevněna seismická hmota. Mechanickým předpětím je zajištěno namáhání krystalu pouze tlakem. Působením setrvačné síly se na krystalu generuje elektrický náboj, který je dále zesilován nábojovým zesilovačem, výsledkem toho je napěťový signál na výstupu akcelerometru.

Piezoelektrické akcelerometry se vyznačují velmi vysokým rozlišením a rozsahem, mají však problém zaznamenat nízkofrekvenční složky zrychlení. Nemohou tedy měřit statické zrychlení a dochází u nich k posunu nuly. Výhodou piezoelektrických akcelerometrů je jejich vysoká mechanická odolnost.

2.4 ULTRAZVUKOVÝ SENZOR VZDÁLENOSTI

Měření vzdálenosti ultrazvukovým senzorem pracuje tak, že se vyhodnocuje čas mezi vysláním ultrazvukového signálu vysílačem a jeho přijetím přijímačem. Čas mezi vysláním a příjmem signálu se, nejen u ultrazvukových senzorů, označuje TOF z anglického Time Of Flight. Výsledkem měření je tedy vzdálenost od nejbližší překážky, od které se signál odrazil zpět k přijímači. Vzhledem k poměrně pomalé rychlosti šíření akustického signálu vzduchem, lze dosáhnout přesných výsledků měření, aniž by byly kladeny vysoké nároky na vyhodnocovací obvody. Ultrazvukový signál je akustické vlnění o frekvenci vyšší, než je slyšitelný zvuk. Krátká perioda ultrazvuku způsobuje, že se šíří prostředím téměř přímočaře a platí zákon odrazu. Na rozdíl od zvuku je ultrazvuk ve vzduchu tlumen. Tlumení stoupá s rostoucí frekvencí ultrazvuku, to ovšem neplatí v kapalinách. Na příklad ve vodě, se ultrazvuk může šířit na značné vzdálenosti [Novák, 2007].

Vysílače tohoto signálu využívají magnetostrikčního nebo piezoelektrického jevu. Magnetostrikčního jevu jsou schopny některé feromagnetické látky, které se vlivem průchodu střídavého proudu smršťují a roztahují. Piezoelektrického jevu se využívá například u krystalu křemene, nebo u levnějšího materiálu, keramiky. Piezoelektrickým krystalem se vytváří ultrazvuk díky průchodu střídavého napětí, které tento materiál deformuje.

Měření vzdálenosti ultrazvukem může vykazovat chyby z důvodu rozdílné rychlosti šíření vlnění při různé vlhkosti a teplotě vzduchu. Dalším zdrojem chyb může být

vícenásobný odraz signálu a odraz vlnění od materiálů, které pohlcují zvuk. Další nevýhodou ultrazvukového měření je vysoká prodleva mezi jednotlivými měřeními nebo nemožnost měření delších vzdáleností. Prodleva mezi jednotlivými měřeními by měla být vyšší, než je doba letu signálu k bodu maximálního dosahu senzoru [Novák, 2007].

2.5 OPTICKÉ SENZORY

Pro optickou detekci překážek a měření vzdálenosti se používají senzory přeměňující elektrickou energii na světlo, odražené světlo je následně znovu přeměněno na energii elektrickou. Světlem je chápáno elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou od ultrafialového záření, přes viditelné světlo až po infračervené záření. Dnes se jako zdroje záření používají infračervené diody, LED diody a laserové diody. Přijímači pak jsou například fotodiody nebo fototranzistory, jejich úkolem je převést přijatý optický signál na elektrickou energii. Kombinace přijímače a vysílače v jednom pouzdře umožňuje detekovat překážky a určit vzdálenost mezi nimi a senzorem.

2.5.1 IR senzor

Infračervené neboli IR senzory, se v robotice nejčastěji používají pro detekci překážek v blízkosti robotů, dají se však použít i pro měření vzdálenosti od překážek. Princip funkce infračervených senzorů je založen na detekování intenzity odraženého světla. Světelné záření, s vlnovou délkou delší než má světlo viditelné, se emituje IR LED diodou. Jako detektor se používají fototranzistory, nebo fotodiody citlivé na světlo s touto vlnovou délkou. Výstupem z přijímačů je informace, zda se světlo emitované IR LED diodou odráží zpět k přijímači či nikoliv. Jinak řečeno zda se v okolí robota nachází překážka, nebo v jeho okolí žádná překážka není. Pro základní rozlišení pozice překážky lze použít 2 vysílače a podle toho, od kterého z vysílačů pocházelo odražené světlo určit, zda se překážka nachází vlevo nebo vpravo. Intenzita odraženého světla je závislá na barvě povrchu, od kterého se světlo odráží. Této závislosti lze úspěšně využít u robotů sledující vodící čáru. Podle barvy čáry se mohou upravovat některé vlastnosti robota, nebo se pomocí barev definují různé cesty.

IR senzor umožňuje také měření vzdálenosti od překážek, k tomuto účelu se využívá proměnná intenzita vyzařovaného světla IR LED diodou nebo proměnná citlivost přijímače. Princip měření spočívá v tom, že se postupně mění intenzita emitovaného světla, nebo citlivost přijímače a v okamžiku, kdy je odražené světlo detekováno je možno prohlásit, že se překážka nachází ve vzdálenosti úměrné intenzitě světla nebo citlivosti přijímače.

Další možností měření vzdálenosti od překážek pomocí IR senzorů je princip triangulace. Tento princip spočívá v určení místa dopadu odraženého světla na speciální diodu. Výstupní napětí této diody je úměrné místu, které bylo osvětleno odraženým světlem. Z důvodu, aby nebyla osvětlena příliš velká část diody a bylo tak možné přesněji určit vzdálenost překážky, prochází odražené světlo skrz optickou čočku.

Při měření vzdálenosti infračervenými senzory se může vyskytovat chyba měření, pokud jsou v okolí robota překážky s tmavým povrchem, které dopadající záření pohltí, nebo překážky s lesklým povrchem, které záření odrazí jiným směrem než k přijímači. Intenzita odraženého světla je také závislá na tvaru a velikosti překážky.

2.5.2 Laserový senzor

Laserové senzory pracují na stejných principech jako senzory infračervené s tím rozdílem, že je používán jiný typ světelného zdroje. Jak již název napovídá, zdrojem světelného signálu je laserová dioda. Laserová dioda má větší intenzitu emitovaného světla než IR LED dioda, umožňuje tedy měření větších vzdáleností.

Laserové měření vzdálenosti je velmi přesné, ovšem také poměrně drahé. Velkou výhodou je možnost paralelního měření vzdálenosti v určitém intervalu úhlů. Paralelní měření probíhá tak, že je paprsek rozkmitán a přijaté informace jsou naráz vyhodnoceny, tímto měřením vzniká mapa okolí robota. V případě, že je robotovi mapa okolí známa, může naměřené informace použít pro určení své polohy.

2.6 BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKAČNÍ MODULY

Na trhu je nabízena celá řada bezdrátových modulů, pracujících na různých principech, každý princip má své výhody. Tyto moduly jsou primárně určeny k bezdrátovému přenosu informací. Některé z nich jsou však schopny měřit sílu signálu přijaté informace. Informace o síle signálu, tzv. RSSI (Received Signal Strength Indicator) se úspěšně využívá pro učení vzdálenosti mezi dvěma moduly. Moduly pracující na standardu ZigBee jsou schopny měřit sílu signálu pro každý přenesený paket. Pokud je použito více modulů, lze pomocí RSSI informace určit polohu modulu v pracovním prostoru. Tento způsob lokalizace probíhá následovně: modul s neznámou polohou vyšle zprávu, kterou přijme modul se známou polohou. Modul se známou polohou změří sílu signálu přijaté zprávy. Tato změřená síla signálu slouží jako vstupní parametr do algoritmu lokalizace [Farahani, 2008].

Systémy pro lokální navigaci, převážně pracující s moduly určenými pro lokální bezdrátové sítě s malým dosahem jsou někdy označovány zkratkou LPS z anglického Local Positioning System. LPS systémy využívají pro přenos dat, mezi referenčním bodem a bodem s neznámou pozicí, signál s rádiovou frekvencí. Tyto jednoduché a levné lokalizační systémy, založené na protokolech bezdrátových sítí s nízkým dosahem, jako je na příklad ZigBee, nejsou vhodné pro přesné určování polohy, ale umožňují určit přibližnou polohu v pracovním prostoru robota. Přibližné určení polohy je v mnoha aplikacích dostačující. Výhodou je snadná realizovatelnost bez nutnosti úprav zařízení [Farahani, 2008].

Pro přesnost určování polohy je také důležitá doba, za kterou je dostupná informace o vzdálenosti jednotlivých uzlů. Například ZigBee uzel, může několikrát žádat o přístup ke kanálu, než mu je přístup přidělen. Pokud se objekt pohybuje pomalu, nemusí tato prodleva pro určování polohy příliš vadit [Farahani, 2008].

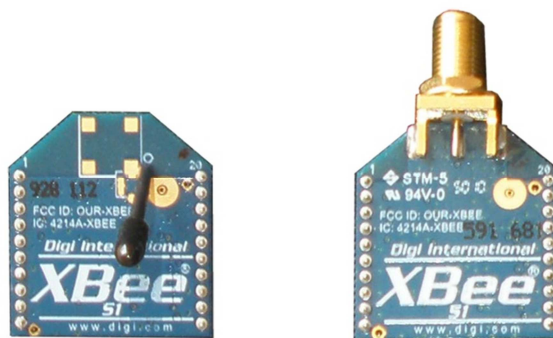
3 POPIS POUŽITÝCH NÁSTROJŮ

Pro realizaci lokalizačního systému robota v neznámém terénu byl zvolen bezdrátový komunikační modul XBee 802.15.4 Series 1. Pomocí bezdrátového komunikačního modulu se měří síla signálu přenesené informace tzv. RSSI. Hodnota RSSI je přečtena z bezdrátového modulu a uložena ve výpočetním prostředí MATLAB. MATLAB se kromě komunikace po sériové lince a čtení potřebných hodnot z modulu stará o výpočet vzdálenosti z RSSI a následně o odhad polohy robota.

3.1 MODUL XBEE 802.15.4 OEM RF

XBee RF moduly, firmy Digi International, byly vyvinuty s cílem využít normu IEEE 802.15.4 pro bezdrátové senzorové sítě s ohledem na nízkou cenu a energetickou náročnost. Moduly tedy mají nízkou spotřebu elektrické energie a poskytují spolehlivý přenos dat mezi zařízeními. Moduly pracují v nelicencovaném frekvenčním pásmu ISM s frekvencí 2,4 GHz. Vysílání a přenos dat v ISM pásmu je pro schválená zařízení umožněn bez licenčních poplatků, ovšem bez garantované ochrany proti rušení [Digi International, 2015].

Během práce byly využity XBee 802.15.4 OEM RF moduly s dvěma druhy antén, ale se stejnými možnostmi nastavení. Na desce jednoho z modulů je anténa integrována, ke druhému se anténa připojuje prostřednictvím RPSMA konektoru. Oba moduly jsou zobrazeny na obr. 3.1.



Obr. 3.1 - Použité typy XBee modulů

3.1.1 IEEE 802.15.4

Norma 802.15.4 patří do skupiny bezdrátových komunikačních systémů, definovaných neziskovou organizací IEEE. Tato norma je určena především pro takzvané WPAN Low Rate sítě využívané v automatizaci. WPAN Low Rate sítě jsou bezdrátové sítě místního rozsahu

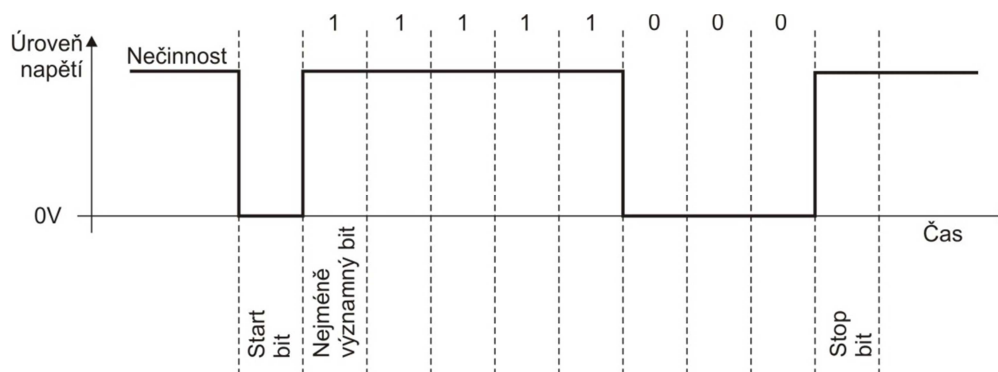
s nízkou komunikační rychlostí, řádově desítky až stovky bitů za sekundu, s minimální energetickou spotřebou a snadnou implementací. Norma IEEE 8015.4 popisuje fyzickou a linkovou vrstvu komunikačního modelu [Hynčica, 2011].

Fyzická vrstva je první vrstvou v komunikačním OSI modelu, která se stará o definici fyzické komunikační cesty. Definuje tedy fyzikální, elektrické, mechanické a funkční vlastnosti modulu, jako jsou například rozložení pinů konektoru, napěťové úrovně, způsob přenosu jednotlivých bitů zprávy. Fyzická vrstva se také stará o navazování a ukončování komunikace.

Linková vrstva je druhou vrstvou v komunikačním OSI modelu. Jejím hlavním úkolem je poskytnout spojení a přenos dat z jednoho uzlu sítě na druhý, uspořádat data z fyzické vrstvy do rámců, následné řazení rámců a v neposlední řadě o nastavení vlastností přenosu.

3.1.2 Sériová komunikace modulu

Před navázáním sériové komunikace je potřeba nastavit několik parametrů, těmito parametry jsou komunikační rychlost, tzv. baud rate, parita, počet bitů zprávy, stop bit a kontrola přetečení. Shodné nastavení musí mít všechny zařízení v síti. V případě XBee 802.15.4 modulu je defaultně nastavena rychlost komunikace na 9600 Baud, paritní bit se nepoužívá, počet bitů zprávy je nastaven na 8, stop bit na 1 a kontrola přetečení se používá hardwarová. Kromě 8 datových bitů a stop bitu je navíc před každou zprávou odeslán start bit. V době, kdy nejsou odesílány žádná data, je na pinu DI vysoká logická úroveň, aby bylo možné rozeznat začátek zprávy je tedy start bit roven nízké logické úrovni. Hned po start bitu je odeslán nejméně významný bit zprávy. Celý paket posílaný sériovou linkou je zobrazen na obr. 3.2. Na tomto obrázku je znázorněn přenos dekadického čísla 31 [Digi International, 2015].



Obr. 3.2 - Data posílaná sériovou linkou

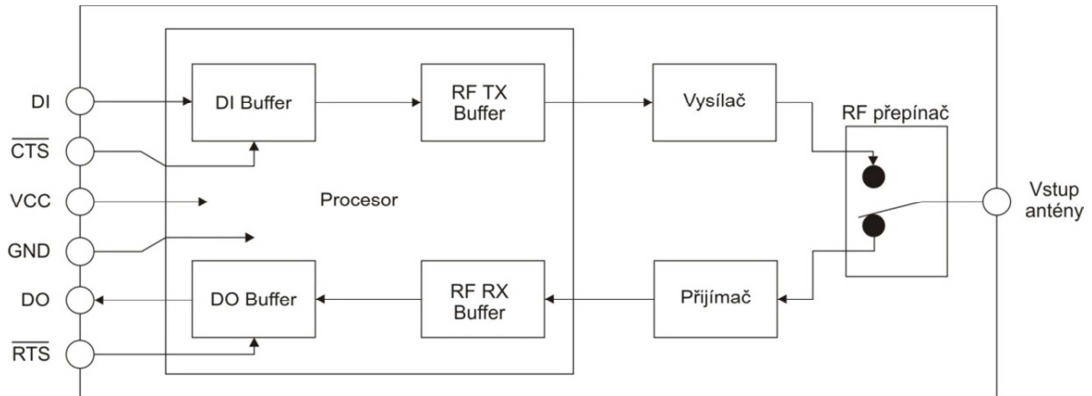
Ve výchozím nastavení pracují XBee moduly v transparentním módu. To znamená, že moduly slouží jako bezdrátová náhrada sériové linky. V transparentním módu probíhá odesílání dat tak, že na pin DI jsou přivedena data, která mají být odeslána. Data, která se objeví na pinu DI, jsou následně řazena do fronty ve vyrovnávací paměti pro vstupní data, takzvaného DI bufferu, kde vyčkávají do doby, než nastane některá z následujících událostí:

- nejsou přijímána žádná data;
- je přijat maximální počet znaků, který se vejde do RF paketu (100 znaků) ;
- je přijata sekvence pro vstup do command módu.

Pokud je některá z předchozích událostí zaznamenána, je záznam z bufferu okamžitě předán vysílači, v opačném případě jsou data řazena do fronty a vyčkávají na uvolnění komunikační cesty. Pokud se data řadí do DI bufferu, je potřeba zabránit jeho přetečení, toho lze dosáhnout hardwarově nebo softwarově. Hardwarová ochrana proti přetečení probíhá tak, že v případě menšího místa v bufferu, než je 17 bytů, začne být signalizováno nebezpečí přetečení prostřednictvím vysoké logické úrovně na $\overline{\text{CTS}}$ pinu. Stav pinu $\overline{\text{CTS}}$ tedy musí být kontrolován a v případě signalizace plné vyrovnávací paměti by se mělo přerušit odesílání dat do modulu, jinak by docházelo k jejich ztrátě. Změna logické úrovně na pinu $\overline{\text{CTS}}$, zpět do původního stavu, nastane v okamžiku, kdy je ve vyrovnávací paměti místo alespoň pro 34 bytů [Digi International, 2015].

Při příjmu dat se všechna přijatá data ukládají do vyrovnávací paměti výstupních dat, takzvaného DO bufferu. Pokud není $\overline{\text{RTS}}$ nastaveno pro kontrolu přetečení, jsou data z DO bufferu okamžitě odeslána na pin DO. V opačném případě, je-li $\overline{\text{RTS}}$ nastaveno, nebudou data odeslána z bufferu, dokud se tento stav nezmění. K přetečení bufferu může dojít ve dvou případech. Prvním z nich je, chybně nastavená komunikace mezi modulem a hostitelským zařízením, kdy jsou data modulem přijímána rychleji, než je hostitelské zařízení čte. Druhým

případem je, pokud hostitelské zařízení neumožňuje modulu odeslat data z DO bufferu, protože mu tuto možnost zakazuje prostřednictvím softwarové nebo hardwarové kontroly přetečení. Schéma toku dat během sériové komunikace uvnitř XBee modulu je zobrazeno na obr. 3.3 [Digi International, 2015].



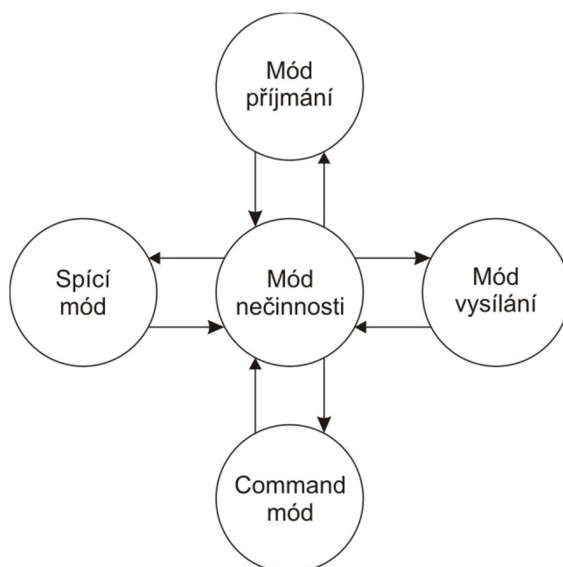
Obr. 3.3 - Schéma toku dat uvnitř XBee modulu

Alternativou k transparentnímu sériovému rozhraní je API sériové rozhraní, které rozšiřuje možnosti aplikace v síti. Při využití API jsou data přenášena v rámcích, které obsahují informace o událostech a operacích probíhajících uvnitř modulu. Rámec, který má být modulem odeslán se skládá z datové a příkazové části. V příkazové části jsou obsaženy příkazy sloužící k nastavení modulu. Odpověď na tuto zprávu obsahuje kromě datové a příkazové části navíc informaci o událostech uvnitř modulu. Na rozdíl od rámce dat odesílaných se v příkazové části rámce dat přijímaných nevyskytují příkazy, ale odpovědi na příkazy, které byly zaslány modulu, jež data odesílal [Digi International, 2015].

API mód má proti transparentnímu módu několik výhod, je jím na příklad možnost odesílání dat více příjemcům bez nutnosti vstupování do command módu a možnost identifikace odesílatele dat [Digi International, 2015].

3.1.3 Pracovní módy XBee modulu

XBee modul může pracovat v několika různých módech, jejich schématické znázornění a možnosti přechodu mezi jednotlivými módy je zobrazeno na obr 3.4.



Obr. 3.4 - Pracovní módy XBee modulu

V módu nečinnosti modul setrvává do okamžiku, kdy nejsou přijímána nebo odesílána žádná data. Pro přepnutí do jiného módu musí nastat některá z následujících situací:

- mód vysílání – v DI bufferu se objeví data;
- mód přijímání – anténou jsou přijata platná data;
- spící mód – je splněna podmínka přechodu do spícího módu;
- command mód – je přijata sekvence pro přechod do command módu.

Mód vysílání umožňuje dva způsoby přenosu dat a to přímý a nepřímý přenos. Během přímého přenosu jsou data přenesena přímo na cílovou adresu. Na rozdíl od toho u nepřímého přenosu jsou data uložena a odeslána pouze v případě, že vzdálený modul data požaduje. K nepřímému přenosu může dojít pouze v případě, že je jeden z modulů nastaven jako koordinátor. Nepřímých přenosů se využívá například při odesílání dat na spící modul s tím, že koordinátor je schopen uložit dvě zprávy [Digi International, 2015].

Spící mód umožňuje modulu přejít do stavu s velmi nízkou spotřebou, v tomto stavu modul nepřijímá ani neodesílá žádná data. Do spícího módu se může modul přepnout v případě, že je předem určenou dobu v nečinnosti, nebo v případě, že na pin 9 modulu přišel požadavek na vstup do spícího módu, tímto požadavkem je vysoká logická úroveň. Probuzení modulu nastává po uplynutí přednastaveného času, nebo při změně na pinu 9 z vysoké logické úrovně na nízkou. Čas, po který modul spí, se nastavuje parametrem SP (Cyclic Sleep

Period). Nastavení spícího módu a události, která způsobí přechod do spícího módu, probíhá parametrem SM (Sleep Mode) [Digi International, 2015].

Pro nastavení a čtení parametrů modulu musí modul nejdříve vstoupit do command módu. V command módu jsou příchozí znaky chápány jako příkazy. Nastavení a čtení parametrů modulu je umožněno dvěma různými způsoby, jedním je AT command mód a druhým API operace [Digi International, 2015].

3.1.4 AT command mód

Pro vstup do AT command módu musí modul přijmout určitou sekvenci dat. V základním nastavení je touto sekvencí „+++“, před ani za touto sekvencí nesmí být po určitý ochranný čas, takzvaný Guard time, posílána žádná data. Guard time slouží jako ochrana proti nechtěnému vstupu do command módu. Sekvence pro vstup do command módu i ochranný čas, mohou být nastaveny podle požadavků uživatele. Po vstupu do command módu mohou být do modulu odesílány jednotlivé AT příkazy. AT příkazy mají například následující strukturu ATDL 1F<CR>. Tento příklad se skládá z následujících částí:

- předpona AT;
- ASCII příkaz, např. DL (Destination Address Low);
- mezera (pouze u některých příkazů);
- HEX parametr, např. 1F (pouze u některých příkazů);
- znak Carriage Return <CR>.

Opuštění command módu je umožněno dvěma způsoby. Prvním způsobem je odeslání příkazu ATCN<CR> (Exit Command Mode), který command mód okamžitě ukončí. Druhá situace, kdy je ukončen command mód nastane v případě, že není přijat žádný platný AT příkaz po dobu určenou parametrem CT (Command Mode Timeout), pak modul přejde zpět do stavu nečinnosti.

Po každém odeslání AT příkazu, stejně tak i po sekvenci dat sloužící ke vstupu do command módu následuje odpověď systému. V případě, že je příkaz správně proveden, vrátí systém odpověď „OK“. V opačném případě, kdy příkaz způsobí chybu, vrátí systém odpověď „ERROR“ [Digi International, 2015].

3.1.5 API operace

V základním nastavení pracuje XBee modul jako náhrada sériové linky, to znamená, že v přijímaných ani odesílaných datech není žádná informace navíc. Jak bylo řečeno dříve

API komunikace má definovanou strukturu. Všechna přenášená data jsou uspořádána do rámců. Rámec, který má být odeslán se skládá z datové a příkazové části, která obsahuje příkazy pro přijímající modul a odpověď na tuto zprávu se skládá z datové části, odpovědí na příkazy a událostech uvnitř modulu. Nastavení modulu pro funkci s API operacemi probíhá parametrem AP (API Enable) [Digi International, 2015].

API operace, na rozdíl od AT příkazů, umožňují nastavování a čtení parametrů vzdálených modulů. Ta probíhá tak, že se zpráva posílá na konkrétní adresu modulu. Používané adresy mají délku 16 bitů nebo 64 bitů. Pokud má být použita 64 bitová adresa musí být pole pro 16 bitovou adresu naplněno hodnotou 0XFFFE, pokud je toto pole naplněno jinou hodnotou, je 64 bitová adresa ignorována a používá se adresa 16 bitová.

Pouhé odeslání API rámce pro změnu parametrů vzdáleného modulu nestačí. Po přijetí zprávy vzdáleným modulem musí být nastavení ještě použito. Použití toho nastavení se docílí jedním ze tří způsobů. Jedním z nich je nastavení bitu, starajícího se o použití nastavení, do logické 1. Další možností je odeslání příkazu AC (Apply Changes) pro použití změn, tyto změny jsou použity jen do doby, než je odpojeno napájení. Po odpojení napájení modul opět pracuje s původním nastavením. Třetí způsob je uložení nastavení do nonvolatilní paměti příkazem WR (Write Command) a reset modulu příkazem FR (Software Reset). Bez resetu by modul stále pracoval s původním nastavením [Digi International, 2015].

V případě, že je očekávána odpověď měla by mít hodnota ID rámce nenulovou hodnotu. Odpověď obsahuje status příkazu, tedy úspěch nebo důvod neúspěchu a v případě dotazu na stav i hodnotu daného registru. Pokud je ID nastaveno na nulovou hodnotu, nebo není cílový modul nalezen, žádná odpověď se nevrátí [Digi International, 2015].

3.1.6 Vlastnosti XBee sítě

V základním nastavení jsou XBee moduly nastaveny pro práci v peer-to-peer sítích, všechny uzly v síti jsou si tedy rovny. V peer-to-peer sítích tedy neexistuje žádný master nebo slave modul. To znamená, že se moduly mezi sebou synchronizují samostatně a obě funkce master i slave obstarává každý modul. Architektura peer-to-peer společnosti Digi International nabízí rychlé časy synchronizace a startu komunikace. Tato výchozí konfigurace postačuje pro velké množství aplikací [Digi International, 2015].

Další možností realizace sítě s XBee moduly jsou takzvané NonBeacon sítě s koordinátorem. Každá síť obsahující koordinátor a alespoň jeden koncový uzel vytváří PAN síť. Nastavení modulu, pro práci jako koordinátor se provádí příkazem CE (Coordinator

Enable), zapnutí koordinátora pak nastane po zaslání příkazu A2 (Coordinator Association). V systémech s koordinátorem může koordinátor odesílat data přímo nebo nepřímo. Pokud je parametr SP (Cyclic Sleep Period) nastaven na 0, odešle koordinátor data okamžitě. V opačném případě určuje parametr SP dobu, jakou koordinátor data uchovává, než je zahodí. Z toho důvodu by měli být parametry SP a ST (Time Before Sleep) nastaveny tak, aby odpovídaly koncovým zařízením [Digi International, 2015].

Uvnitř sítí s koordinátorem, ve kterých je potřeba přeposílat zprávy nebo shromažďovat data od několika koncových zařízení bývá potřeba určit vztahy právě mezi koordinátorem a koncovými uzly, k tomu slouží asociace. Asociací se přiřazuje kanál nebo takzvané PAN ID. PAN ID musí být v celé síti unikátní, aby nedocházelo ke kolizím během komunikace [Digi International, 2015].

Koncové zařízení se může asociovat s koordinátorem, aniž by znalo jeho adresu, kanál nebo PAN ID. Parametr A1 (End Device Association) určuje flexibilitu koncového zařízení během asociace, může být použit během asociace pro dynamické určení adresy cíle, kanálu anebo jeho PAN ID [Digi International, 2015].

3.1.7 Závislost síly signálu na vzdálenosti

Závislost síly signálu na vzdálenosti u modulů XBee 802.15.4 Series 1 od firmy Digi International., lze měřit pro každý přenesený paket, a jak uvádí Chuenurajit [2012] je dána vztahem

$$RSSI = -10n \log_{10} d + A, \quad (3.1)$$

kde $RSSI$ síla signálu,
 n konstanta šíření signálu,
 d vzdálenost,
 A síla signálu ve vzdálenosti 1 m.

Konstanta šíření signálu se určuje experimentálně. Hodnota konstanty je pro každé prostředí různá. Rozsah pro n je od 2 ve volném prostoru, tedy v prostoru, kde mezi vysílačem a přijímačem nejsou žádné překážky, až do 4 ve členitém prostředí s množstvím překážek. Hodnoty n pro různá prostředí jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1- Hodnoty konstanty šíření signálu pro různá prostředí [Farahani, 2008]

n	Druh prostředí
2,0	Volný prostor
1,6 až 1,8	Uvnitř budov, přímá viditelnost
1,8	Obchod s potravinami
1,8	Tovární budova na výrobu papíru nebo zpracování obilovin
2,09	Typická 15 m x 7,6 m konferenční místnost s židlemi a stoly
2,2	Maloobchod
2 až 3	Továrny, bez přímé viditelnosti
2,8	Obytná místnost
2,7 až 4,3	Typické kancelářské místnosti, bez přímé viditelnosti

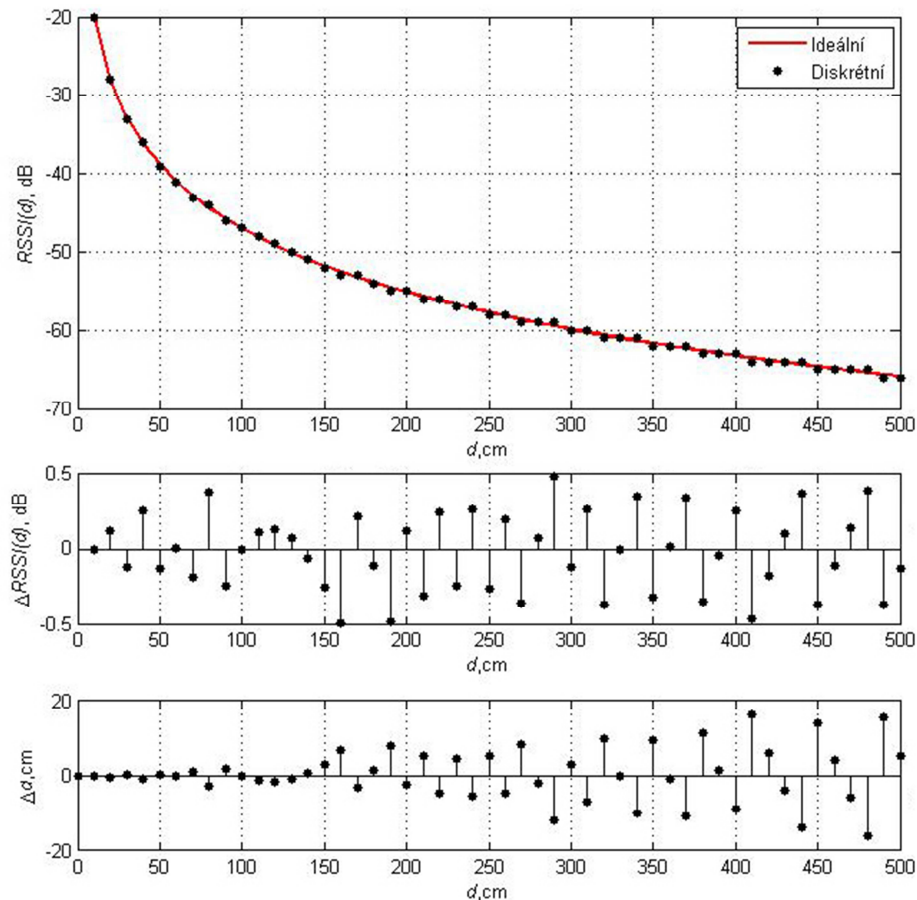
S pojmem RSSI jsou svázány následující 4 parametry:

- dynamický rozsah;
- přesnost;
- linearita;
- doba průměrování.

Dynamický rozsah je měřen v decibelech a udává minimální a maximální energii přeneseného paketu, kterou přijímač dokáže měřit. Na příklad, pokud je pro RSSI udáván dynamický rozsah 92 dB, může být minimální přijímačem měřitelná energie -88 dB a maximální 4 dB. To také znamená, že maximální hodnota RSSI, je v tomto případě 4 dB. Přesnost RSSI podává informaci o chybě měření spojenou s každým určením síly signálu. U dnes dostupných vysílačů se očekává přesnost pro RSSI ± 4 dB. Linearita udává maximální odchylku od přímky pro skutečně změřenou hodnotu síly signálu. Porovnání linearity se provádí v logaritmickém měřítku. Vzhledem k tomu, že tyto moduly většinou nemají příliš velkou paměť a není tedy možné ukládat všechny naměřené hodnoty síly signálu, používá se průměrování. Průměrují se hodnoty naměřené během určitého časového intervalu a tento průměr dává informaci o RSSI.

Přesnost měření síly signálu je ovlivňována množstvím parametrů, které se projevují jako chyby systematické i jako chyby náhodné. Náhodná chyba měření není dána pouze vlastnostmi prostředí, v kterém měření probíhá, je také závislá na vlastnostech měřicího přístroje. Mezi jednu z vlastností XBee modulu, která způsobuje náhodnou chybu měření je proces diskretizace naměřených hodnot síly signálu. To je proces, kdy je naměřené úrovní signálu přiřazena konkrétní kvantizační úroveň. V případě XBee modulu jsou kvantizační úrovně rovny celým číslům, z toho vyplývá, že kvantizační chyba měření intenzity signálu je chybou aditivní s velikostí $\pm 0,5$ dB. Vzhledem k tomu, že intenzita signálu není lineárně závislá na vzdálenosti, nezůstává velikost chyby odhadu v konstantním intervalu, ale velikost

intervalu se mění s rostoucí vzdáleností. Velikost maximální chyby odhadu polohy tedy roste společně se skutečnou vzdáleností. Porovnání chyby měření intenzity signálu a odhadu polohy způsobené kvantováním je zobrazeno na obr. 3.5.



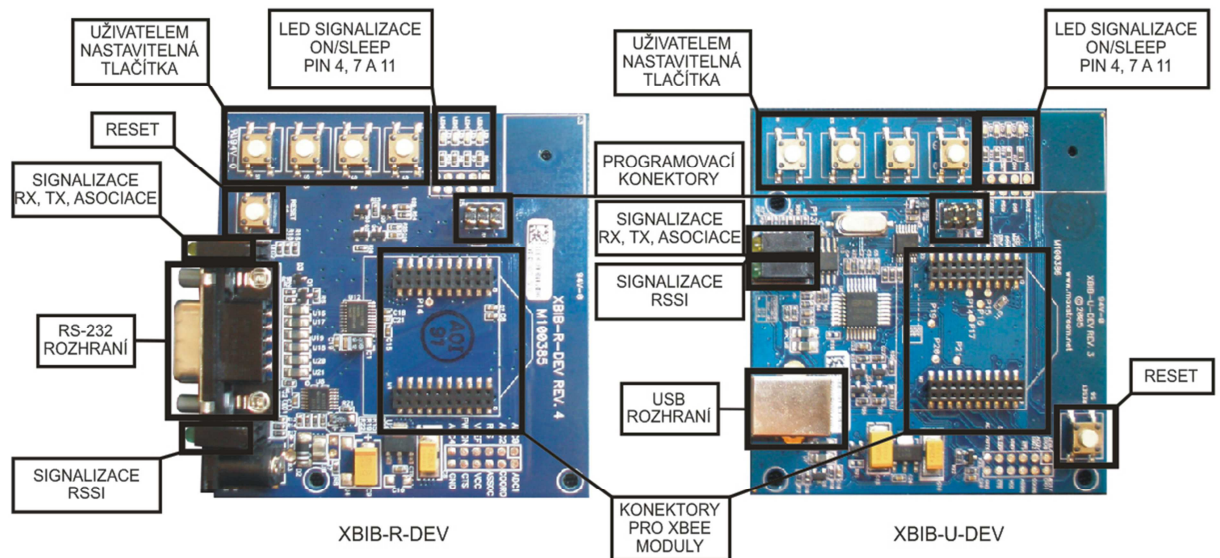
Obr. 3.5 – Vliv kvantizačního šumu na měření RSSI a odhad polohy

3.2 DESKA XBIB-R-DEV A XBIB-U-DEV

XBIB-R-DEV je deska s rozhraním RS-232 pro XBee moduly. Vzhledem k tomu, že XBee moduly pracují při napětí 3,3 V a komunikace po sériovém rozhraní RS-232 probíhá při 5 V, je nutno zajistit konverzi napěťové úrovně signálu. Obvod pro napěťovou konverzi je na desce přítomen. Tato deska kromě komunikačního rozhraní obsahuje napájecí obvod. Napájení je umožněno z klasické 9V baterie. Deska dále obsahuje tlačítko reset a čtyři programovatelná tlačítka. Pro orientační kontrolu stavu komunikace a XBee modulu, je na desce umístěno několik LED diod. Tři zelené LED diody, vpravo od konektoru pro RS-232, zobrazují velikost identifikátoru síly signálu RSSI. Vlevo vedle téhož konektoru jsou další tři různě barevné LED diody. Žlutá LED dioda dává informaci o právě probíhajícím odesílání dat, zelená pak informuje o přijímání dat a červená o probíhající asociaci. Na desce jsou dále

osazeny čtyři SMD LED diody, z nichž jedna signalizuje, zda je modul zapnut nebo ve spícím režimu. Tři zbývající diody informují o stavu pinů 4 (DO8), 7 (PWMI) a 11 (AD4/DIO4) XBee modulu. Na desce je dále konektor umožňující programování programovatelných XBee modulů a konektor pro připojení samotného XBee modulu. Aby mohla být deska XBIB-R-DEV použita pro vzdálený modul s neznámou polohou, musí k ní být připojen konektor sloužící jako zpětná smyčka pro komunikaci. Zpětnovazební konektor je poměrně rozměrný a brání praktickému využití této desky. Z tohoto důvodu byla vyvinuta deska vlastní. Pro návrh zapojení obvodů nahrazujících desku XBIB-R-DEV byl použit software Eagle od společnosti CadSoft

Druhý typ desky XBIB-U-DEV nabízí podobné funkce jako předchozí. Největším rozdílem je rozhraní USB místo RS-232 a k tomu přidružený obvod starající se o převod ze sériové komunikace na komunikaci prostřednictvím USB. Tato deska umožňuje propojení XBee modulu s počítačem odkud je možno modul ovládat, nastavovat a prostřednictvím modulu odesílat nebo přijímat data.



Obr. 3.6 - Moduly XBIB-R-DEV a XBIB-U-DEV

3.3 MATLAB

V práci je pro navázání a udržení komunikace po sériové lince, výpočty a vykreslování výsledků použito výpočetní prostředí MATLAB od společnosti Humusoft. MATLAB je výpočetní prostředí postavené na práci s maticemi reálných a komplexních čísel. Kromě matic

a tradičních datových typů, umí MATLAB pracovat i s celou řadou dalších jako jsou například vícerozměrná pole a pole buněk, také umožňuje vytvářet různé datové struktury.

Pro zobrazení získaných výsledků se využívá grafického subsystému, který umožňuje vykreslovat různé typy grafů. Každý graf lze téměř libovolně upravit tak, aby byly výsledky k dispozici v přehledné formě.

Díky vestavěnému editoru umožňuje MATLAB psaní různých funkcí a skriptů umožňující realizaci rozsáhlého množství úloh.

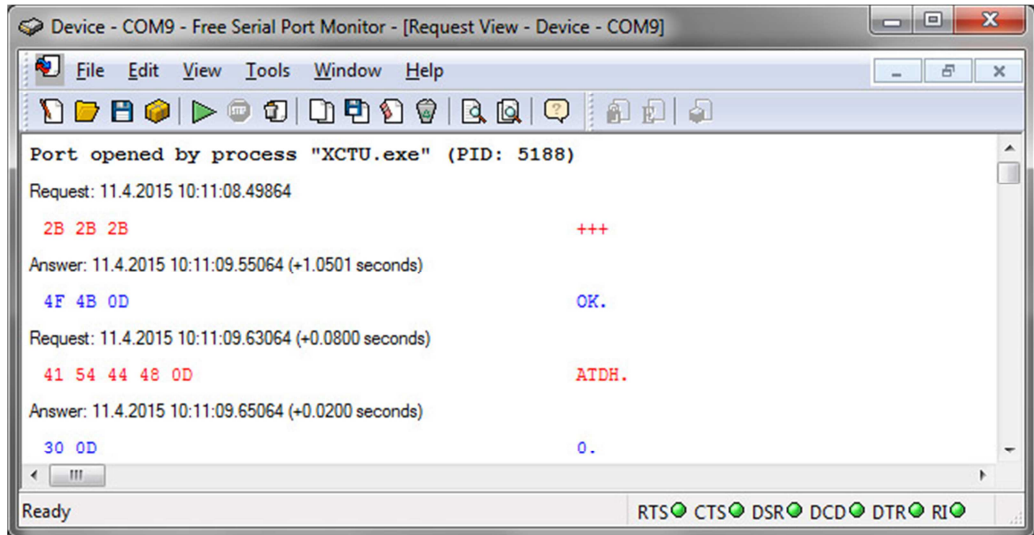
3.4 XCTU

XCTU je volně dostupná aplikace určená pro nastavování, konfiguraci a testování XBee modulů s přehledným a poměrně intuitivním grafickým prostředím. Aplikace obsahuje veškeré nástroje potřebné pro práci s XBee moduly. Těmito nástroji jsou například grafické zobrazení sítě sestavené z XBee modulů včetně síly signálu mezi jednotlivými uzly, editor API rámců umožňující jejich snadné sestavení, použití a dekodování. Dalšími možnostmi aplikace jsou zobrazení a nastavování vlastností jak místních, tak vzdálených XBee modulů, aktualizace firmwaru i v případě již chybně instalovaného nebo poškozeného firmware, dvě různé konzole pro AT a API režim, test dosahu a průvodce verzemi firmwaru. Test dosahu umožňuje zobrazovat počet odeslaných a přijatých zpráv a procentuální úspěšnost jejich doručování. Další možností tohoto nástroje je sledování identifikátoru kvality spojení RSSI. Součástí instalace XCTU je dokumentace k celé řadě modulů.

3.5 SERIAL PORT MONITOR

Vzhledem k tomu, že dokumentace k XBee modulům a některým funkcím MATLABu není vždy dostačující, byl pro odposlech komunikace mezi moduly požit software Serial Port Monitor společnosti HHD Software. Tento nástroj umožňuje, ihned po nastavení parametrů komunikace na příslušném portu, tuto komunikaci odposlouchávat. Při zahájení komunikace je vždy zobrazena informace o aplikaci, která tuto komunikaci zahájila. Veškerá přenášená data jsou přehledně zobrazována a barevně rozlišena. Červená barva označuje zprávu odesílanou a modrá odpověď na tuto zprávu nebo data přijímaná. Stejná informace, zda se jedná o zprávu odesílanou nebo přijímanou je zobrazena v řádku nad daty. Informační řádek dále podává informaci o aktuálním datu, času a době přenosu. Přenášená data jsou zobrazena v šestnáctkové číselné soustavě a v řetězci složeného z ASCII znaků, jejichž pozice v ASCII tabulce odpovídá právě hodnotě dat zobrazených jako šestnáctková čísla.

Na obr. 3.7 je vidět odposlech komunikace mezi XBee modulem a aplikací XCTU. Jako první je zde vidět vstup do command módu příkazem +++ s následnou odpovědí „OK“. Dále je odeslán dotaz na hodnotu horní části adresy cílového modul AT příkazem „DH“ (Destination Address High), odpověď na tento příkaz je „0“, tedy defaultní hodnota tohoto parametru.



Obr. 3.7 - Příklad odposlechu programem Serial Port Monitor

3.6 AVR STUDIO

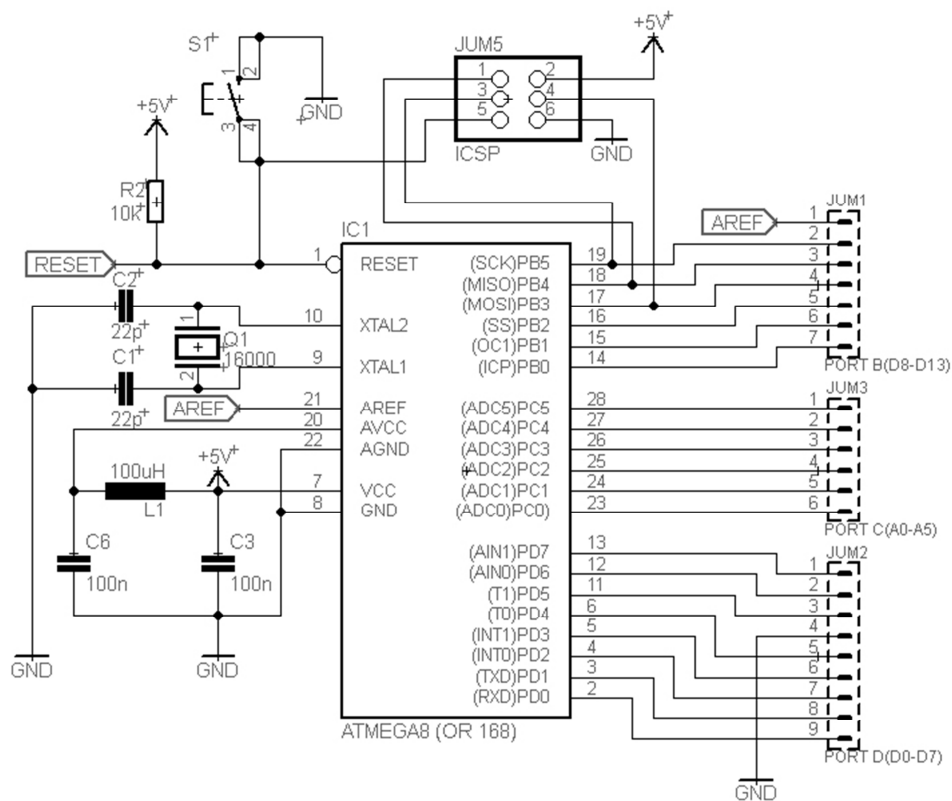
Pro mikroprocesor ATmega8 v zapojení nahrazující desku XBIB-R-DEV bylo potřeba navrhnout firmware obstarávající zpětnou vazbu pro komunikaci. K tomu bylo využito AVR Studio 4, které je poskytnuté zdarma přímo výrobcem mikroprocesoru. Tento program obsahuje v základní instalaci pouze nástroje pro programování v assembleru. Pro umožnění programování v jazyce C a C++ je potřeba doinstalovat nadstavbu WinAVR, která obsahuje sadu nástrojů právě pro práci s těmito programovacími jazyky.

Řídící jednotkou obvodu je 8 bitový mikroprocesor ATmega8 od společnosti Atmel AVR. Jak je uvedeno v dokumentaci k tomuto mikroprocesoru [Atmel, 2013], přímo výrobcem má tento mikroprocesor následující vlastnosti:

- 8 KB programovatelné flash paměti;
- 512 B EEPROM;
- 1 KB integrované RAM paměti;
- dva 8 bitové čítače/časovače;
- jeden 16 bitový čítač/časovač;
- tři PWM kanály;
- programovatelný USART;
- 28 programovatelných I/O portů.

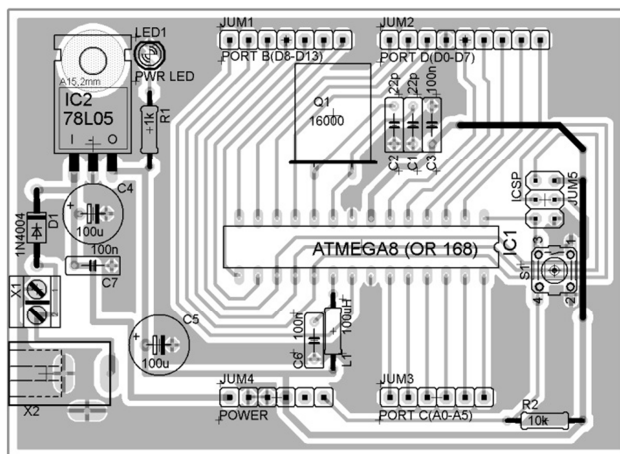
Výše uvedené vlastnosti jsou pro tuto aplikaci více než dostačující a nabízí dostatek prostoru pro návrh dalších funkcí.

Pro funkci mikroprocesoru jsou kromě napájení potřeba i další obvody, jako jsou například externí oscilátor, dolnoproustní LC filtr, reset a konektor umožňující programování. Zapojení mikroprocesoru a dalších potřebných obvodů je zobrazeno na obr. 4.2. ATmega8 má integrovaný oscilátor s kmitočtem 8 MHz, pro dosažení vyšší pracovní frekvence je ovšem použit externí krystalový oscilátor Q1 s frekvencí 16Mhz. Zda bude mikroprocesor pracovat při frekvenci interního nebo externího oscilátoru lze ovlivnit během programování. Dolnoproustní LC filtr slouží pro odstranění šumového signálu s vysokou frekvencí na vstupu AVCC. Napětí na AVCC je použito jako napájení pro interní A/D převodník. Pro programování mikroprocesoru přímo v obvodu bez nutnosti jeho vyjmutí je použit konektor JUM5. Konektor JUM5 realizuje ICSP rozhraní. Veškeré vývody mikroprocesoru jsou vyvedeny na konektory JUM1, JUM2 a JUM3 a dělají tak ze základní desky modulární systém umožňující snadné rozšíření.



Obr. 4.2 - Zapojení mikroprocesoru ATmega8

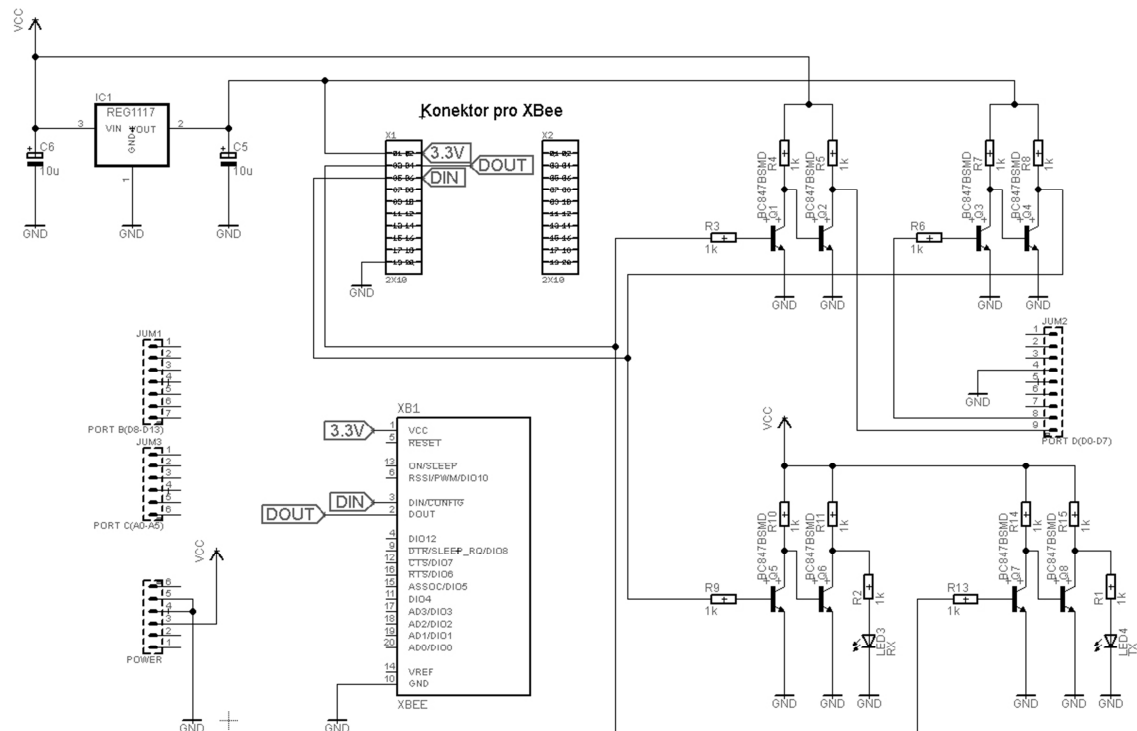
Celé zapojení bylo následně navrženo na jednostrannou desku plošného spoje s takovým rozmístěním konektorů JUM1, JUM2, JUM3 a JUM4 pro rozšíření, aby zajišťovaly maximální stabilitu dalších připojovaných desek. Návrh plošného spoje a rozložení součástek je zobrazeno na obr. 4.3.



Obr. 4.3 - Plošný spoj základní desky

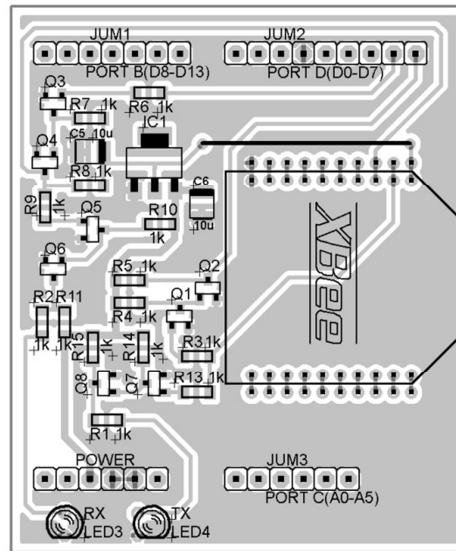
4.1.2 Deska pro XBee

Deska sloužící pro připojení XBee modulu obsahuje obvod upravující napětí z 5 V na 3,3 V potřebných pro napájení modulu a úpravu napěťové úrovně komunikace. Napětí 5 V je přiváděno ze základní desky a dále upravováno stabilizátorem napětí REG1117, který je ve schématu zobrazeném na obr. 4.4 označen jako IC1. Deska dále obsahuje obvod pro napěťovou konverzi z 5 V na 3,3 V pro data, která mají být vysílána XBee modulem, a z 3,3 V na 5 V pro data modulem přijímaná. Dále jsou zde dvě LED diody zobrazující příjem a odesílání dat. XBee modul je připojován přes konektory X1 a X2.



Obr. 4.4 - Zapojení desky pro XBee

Návrh zapojení, zobrazený na obr. 4.5, byl uskutečněn na jednostrannou desku plošného spoje s použitím SMD součástek. SMD součástky byly zvoleny z důvodu úspory místa.



Obr. 4.5 - Plošný spoj desky pro XBee

4.1.3 Firmware

Program v mikroprocesoru se stará o nastavení používání externího oscilátoru a příjem a opětovné odeslání přijaté informace. Komunikace je realizována pomocí dvou vodičů RXD a TXD. Po vodiči RXD putují data přijímaná mikroprocesorem přes pin PD0, po vodiči TXD pak data odesílaná mikroprocesorem přes pin PD1. Pro správnou funkci komunikace musí být nastaveny registry obsluhující USART.

```
// nastavení USART
UCSRB |= (1<<RXEN) | (1<<TXEN); // povolení zápisu a vysílání
UCSRC |= (1<<UCSZ0) | (1<<UCSZ1); // nastavení délky znaku na 8b
UBRRH = 0;
UBRRL = 103; // UBRR nastavení baudrate na UBRR=103 -> 9600 bps
```

Nastavení komunikace je provedeno podle datasheetu [Atmel, 2013]. Je tedy nastaven registr UCSRB a UCSRC, jejich strukturu zobrazuje obr 4.6. V registru UCSRB je povoleno čtení a zápis, tedy bity RXEN a TXEN jsou nastaveny na log. 1, v registru UCSRC nastavena délka zprávy na 8 bitů podle tab. 4.1.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	RXCIE	TXCIE	UDRIE	RXEN	TXEN	UCSZ2	RXB8	TXB8	UCSRB
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	URSEL	UMSEL	UPM1	UPM0	USBS	UCSZ1	UCSZ0	UCPOL	UCSRC
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	1	0	0	0	0	1	1	0	

Obr. 4.6 - Struktura registrů UCSRB a UCSRC [Atmel, 2013]

Tab. 4.1 - Nastavení délky zprávy v registru UCSRC [Atmel, 2013]

UCSZ2	UCSZ1	UCSZ0	Délka zprávy
0	0	0	5-bitů
0	0	1	6-bitů
0	1	0	7-bitů
0	1	1	8-bitů
1	0	0	Rezervováno
1	0	1	Rezervováno
1	1	0	Rezervováno
1	1	1	9-bitů

Pro komunikaci je také potřeba nastavit modulační rychlost, takzvaný baud rate. XBee moduly mají baud rate nastaven na 9600 bps. V tab. 4.2 tedy byla vybrána hodnota pro registr UBRR odpovídající této modulační rychlosti při frekvenci 16 MHz externího oscilátoru.

Tab. 4.2 - Hodnoty registru UBRR pro $f_{osc} = 16$ MHz

Baud Rate (bps)	$f_{osc} = 16$ MHz	
	UBRR	Error
2400	416	-0,1%
4800	207	-0,2%
9600	103	-0,2%
14,4 k	68	-0,6%
19,2 k	51	-0,2%
28,8 k	34	-0,8%
38,4 k	25	-0,2%
57,6 k	16	-2,1%
76,6 k	12	-0,2%
115,2 k	8	-3,5%
230,4 k	3	8,5%
250 k	3	-0,0%
0,5 M	1	0,0%
1 M	0	0,0%
Max	1 Mbps (UBRR = 0, Error = 0.0%)	

4.2 ODHAD POLOHY

K určení, zda jsou XBee 802.15.4 OEM RF moduly vhodné pro lokalizaci je potřeba znát jejich směrové charakteristiky. Další potřebnou informací je míra shody předpokládané závislosti velikosti RSSI na vzdálenosti se skutečnou závislostí. Z tohoto důvodu byla provedena měření, která tyto vlastnosti ověřují.

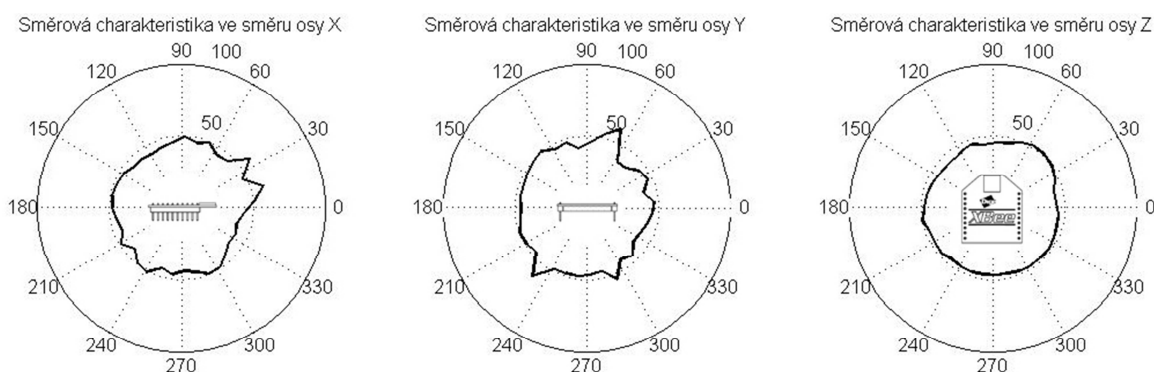
Veškerá měření, s výjimkou prvního měření závislosti RSSI na vzdálenosti, byla uskutečněna v místnosti o rozměrech 5 m × 5 m × 2,3 m. Měření pro každý bod se 13×

opakovalo a z naměřených hodnot byl následně vypočítán medián. Z důvodu přehlednosti je místo všech naměřených hodnot vynášen do grafu pouze medián.

4.2.1 Měření směrových charakteristik

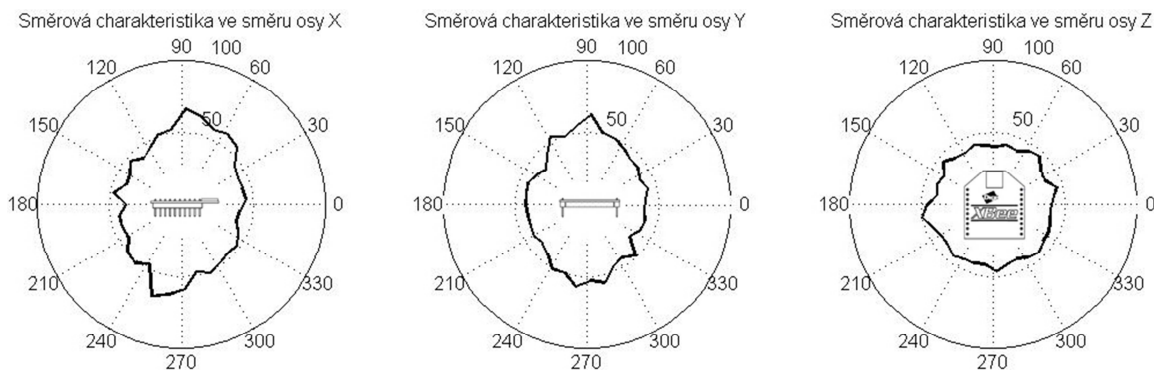
Pro určování polohy je nejvhodnější kulová vyzařovací charakteristika. Vzhledem k náročnosti takového měření bylo postupně provedeno měření při otáčení modulu podél osy x , y a následně i osy z . Moduly byly během měření umístěny ve vzdálenosti 1 m.

Směrová charakteristika modulu s integrovanou anténou je na obr. 4.7. Jak je vidět směrová charakteristika tohoto modulu je při otáčení podél všech os přibližně kruhová. Modul tedy splňuje předpoklad a pro použití při lokalizaci je vhodný.



Obr. 4.7 - Směrové charakteristiky modulu s integrovanou anténou

U druhého používaného typu modulu, tedy u modulu s RPSMA anténou, nevychází směrová charakteristika tak dobře jako u modulu s integrovanou anténou. Ovšem odchylka od ideální kulové vyzařovací charakteristiky není natolik výrazná, aby bránila v použití modulu pro lokalizaci. Pouze je potřeba počítat s chybou odhadu polohy. Směrová charakteristika modulu s RPSMA anténou je zobrazena na obr 4.8.

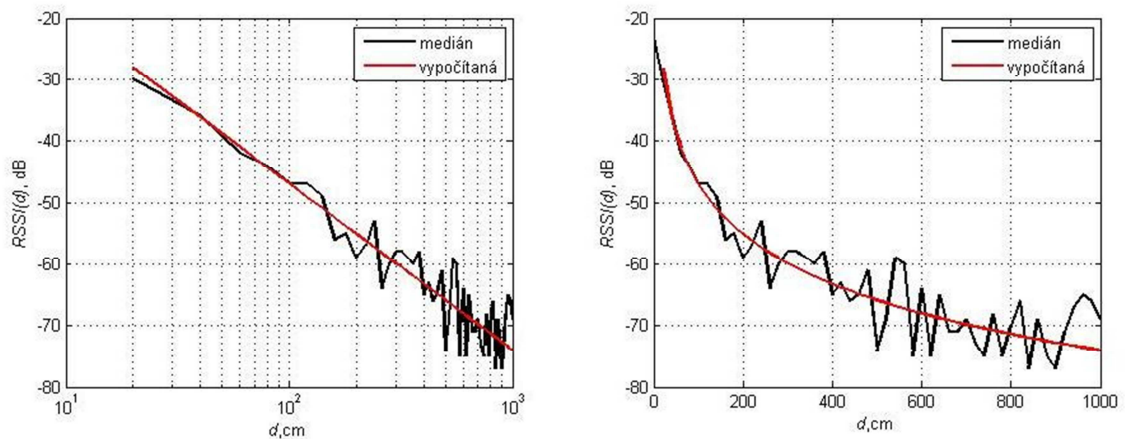


Obr. 4.8 - Směrové charakteristiky modulu s RPSMA anténou

4.2.2 Měření závislosti RSSI na vzdálenosti

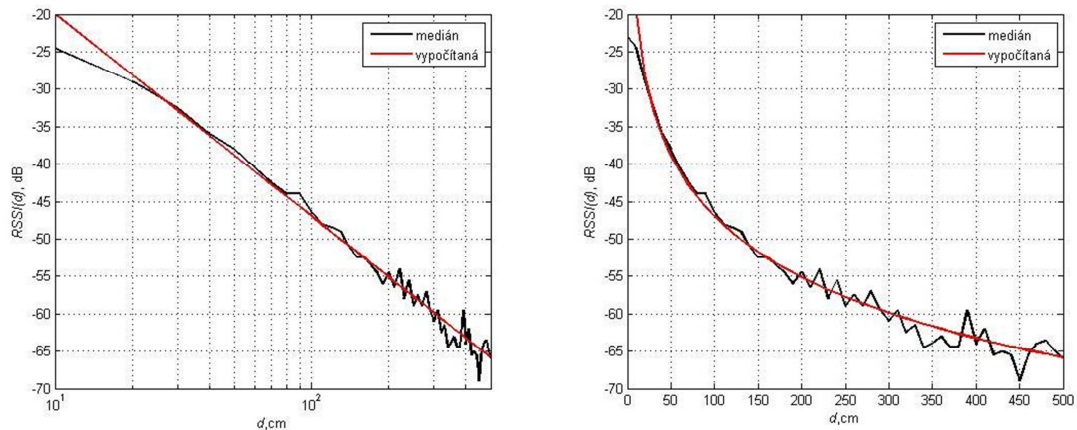
Pro ověření platnosti vztahu (3.1) určujícího závislost RSSI na vzdálenosti a určení míry shody se závislostí skutečnou, byla tato závislost měřena. Pomocí naměřených dat lze také ověřit linearitu v logaritmickém měřítku. Měření bylo uskutečněno na vzdálenost 10 m se změnou vzdálenosti, mezi jednotlivými body měření 0,2 m.

Obr. 4.9 zobrazuje porovnání mediánu vypočítaného z naměřených hodnot s vypočítanou závislostí. Do vztahu (3.1) byla dosazována hodnota pro sílu signálu ve vzdálenosti 1 m $A = -47$ dB, která byla zjištěna experimentálně a hodnota konstanty šíření signálu $n = 2,7$, získaná pomocí kvadratického kritéria. Největší shoda je v části od 0 do zhruba 5 m. Z toho vyplývá, že na delší vzdálenosti by byla chyba odhadu polohy poměrně velká. Linearita dat je v logaritmickém zobrazení dobrá.



Obr. 4.9 - Závislost RSSI na vzdálenosti 0 - 10 m

Pro ověření vhodnosti měření na vzdálenost 5 m, bylo měření opakováno. Při tomto měření byla změna polohy mezi jednotlivými body měření 0,1 m a maximální vzdálenost mezi moduly právě 5 m. Výsledky měření jsou zobrazeny na obr. 4.10. Na obr. 4.10 je vidět, že medián naměřených dat dobře odpovídá vypočítané hodnotě RSSI a předpoklad je tedy splněn.



Obr. 4.10 - Závislost RSSI na vzdálenosti 0 - 5 m

4.2.3 Algoritmus odhadu polohy

Základem pro algoritmus odhadu polohy je metoda popsaná v kapitole 1.2.4, kde je popsáno analytické řešení soustavy čtyř kvadratických rovnic (1.15) až (1.18). Každá z těchto rovnic popisuje kouli s určitým poloměrem a umístěním v prostoru, řešením soustavy je tedy průsečík těchto koulí.

V algoritmu je tedy využito následující kvadratické rovnice popisující kouli:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2 \quad (4.1)$$

V této rovnici index i určuje pořadové číslo referenčního bodu. Odhad polohy probíhá numerickými metodami. Aby bylo možné provést posouzení kvality odhadu polohy bylo nutné zavést nějaké kritérium. Bylo zvoleno kritérium kvadratické. Pro jeho výpočet slouží parametr c , který vychází z předpokladu, že při nalezení správných souřadnic bude jeho velikost nulová. Parametr c se vypočítá následovně:

$$c = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - d_i^2, \quad (4.2)$$

kde c parametr kvadratického kritéria.

Pomocí parametru c je následně určena hodnota kvadratického kritéria

$$K = \sum_1^i c^2. \quad (4.3)$$

V případě výpočtu s třemi referenční body, je možné několik různých řešení. První řešení nastane v případě, že se koule kolem těchto bodů protínají tak, že průsečíkem dvou koulí je kruh a průsečíky třetí koule s tímto kruhem jsou dva různé body. Tyto body mají

stejnou hodnotu kvadratického kritéria, ale jeden z těchto bodů se nachází v reálném pracovním prostoru robota a druhý se „vznáší“ v prostoru nad referenčními body, ten je zanedbáván. Druhým možným řešením je případ, kdy se všechny tři koule navzájem dotýkají pouze v jednom bodě. Pak je řešení jedno, ve stejné rovině s referenčními body a s minimální hodnotou kvadratického kritéria. Neznámý bod bude vycházet ve stejné rovině s referenčními body i v případě, že průsečík dvou koulí tvoří kruh, a třetí koule tento kruh neprotíná, nebo se dvě koule dotýkají v jednom bodě, a třetí koule tento bod neprotíná anebo v případě, že neexistuje žádný průsečík koulí. Odhadovaná poloha pak vychází v místě s nejnižší hodnotou kvadratického kritéria. Při výpočtu s vyšším počtem referenčních bodů, při jejich vhodném umístění v prostoru, odpadá možnost vzniku prvního případu s více body s minimálním kvadratickým kritériem, všechny ostatní nastat mohou.

Výpočetní prostředí MATLAB nabízí řadu nástrojů pro numerické řešení rovnic jedné i více proměnných. Právě nástroje pro řešení rovnic s více proměnnými lze využít pro numerické řešení soustavy kvadratických rovnic (4.1). Numerické řešení v prostředí MATLAB umožňuje zobecnění problému odhadu polohy pro libovolný počet referenčních bodů, přičemž minimální počet referenčních bodů je omezen na hodnotě 3 a z důvodu stoupající náročnosti výpočtu pro více referenčních bodů je omezeno i maximum na 10 referenčních bodů.

Pro výpočet trilaterace byla vytvořena funkce pojmenovaná „Trilaterace“ jejímiž vstupními parametry jsou:

- ***RB*** – matice o i řádcích a 4 sloupcích, kde první tři sloupce obsahují souřadnice referenčních bodů a čtvrtý sloupec hodnoty vzdáleností referenčních bodů od bodu neznámého;
- ***nRB*** – počet referenčních bodů;
- ***pp*** – počáteční podmínky;
- ***nastaveni*** – nastavení pro funkci *fminunc*;

Tato funkce má i několik výstupních parametrů a jsou jimi:

- ***xyz*** – souřadnice hledaného bodu;
- ***fval*** – hodnota K v bodě ***xyz***;
- ***exitflag*** – číslo označující důvod ukončení funkce *fminunc*;
- ***output*** – struktura obsahující informace o optimalizaci;

Samotná funkce *Trilaterace* slouží především pro vstup a výstup jednotlivých parametrů, o samotný výpočet odhadu polohy se stará až funkce *Tril*, která je funkcí vnořenou do funkce

Trilaterace a je volána funkcí *fminunc*. Funkce *fminunc* umožňuje hledání mimá neomezené funkce s více proměnnými tak, že postupně mění hodnoty *xyz*, od počátečních podmínek až do doby než dosáhne minima hodnoty *K*. Celý kód funkce *Trilaterace* je uveden níže.

```
function [xyz,fval,exitflag,output] = Trilaterace(RB, nRB, pp, nastaveni)
[xyz,fval,exitflag,output]=fminunc(@tril,pp,nastaveni);
function K=Tril(xyz)
K=0;
for i=1:nRB           % Od 1 do počtu referencnich bodu
c=(RB(i,1)-xyz(1))^2+(RB(i,2)-xyz(2))^2+(RB(i,3)-xyz(3))^2-RB(i,4)^2;
K=K+c^2;           % Kvadraticke kriterium
end
end
end
```

4.2.4 Program pro odhad polohy

Pro odhad polohy je ve výpočetním prostředí MATLAB vytvořen skript. Jak bylo řečeno, výše uvedený skript je navržen jako obecné řešení algoritmu odhadu polohy pro 3 až 10 referenčních bodů. V první řadě jsou zadávány vlastnosti referenčních bodů, to znamená jejich počet, souřadnice a COM port, ke kterému je referenční bod připojen. Dále je každý COM port nastaven a je otevřen komunikační kanál. Veškeré nastavení je možné uložit a při příštím spuštění vyvolat, není tedy nutné nastavení provádět znovu při každém spuštění programu.

Po nastavení a navázání komunikace je zkontrolováno a popřípadě upraveno nastavení XBee modulů. Jak bylo uvedeno v kapitole 3.1.3 pro nastavování XBee modulů se používají AT příkazy. Za každým AT příkazem očekává modul znak CR (ASCII 13). Vzhledem k tomu, že MATLAB posílá za správou odeslanou příkazem *fprintf* znak, který je závislý na operačním systému, v případě Windows znak LF (ASCII 10), není tento příkaz pro odesílání zprávy vhodný. Z toho důvodu je použit příkaz *fwrite*, který odesílá data v binárním formátu bez jakéhokoliv přidaného znaku. Znak CR je následně přidáván převodem jeho ASCII hodnoty na znak. Například příkaz na zjištění guard time modulu, po vstoupení do command módu, vypadá následovně:

```
prikaz=['ATGT' char(13)];
```

Odesílání a přijímání dat je řešeno ve funkci *xbprikaz*. Vstupními parametry této funkce jsou :

- *s* – označení COM portu v programu;
- *prikaz* – textový řetězec obsahující AT příkaz nebo jinou zprávu;
- *paus* – velikost guardtime, ovlivňuje dobu běhu programu;

Výstupním parametrem funkce *xbprikaz* je odpověď na odesílanou zprávu.

V tomto okamžiku je vše připraveno pro měření RSSI, přepočítání RSSI na vzdálenost od jednotlivých referenčních bodů a následný odhad polohy. Měření probíhá prostřednictvím odeslání příkazů s následujícím pořadím:

- Odeslání zprávy „Kde jsi?“;
- Vstup do command módu – příkaz +++;
- Čtení RSSI – příkaz ATDB;
- Opuštění command módu – příkaz ATCN;

Zprávu „Kde jsi?“ odesílá pouze jeden z referenčních bodů, tato zpráva je následně vrácena modulem s neznámou polohou. Vrácenou zprávu přijme každý z referenčních bodů a uchová si informaci o jejím RSSI až do doby než je přečtena. Hodnota RSSI se z modulu získává příkazem ATDB a ukládá se do proměnné jako řetězec znaků. Tento řetězec obsahuje hodnotu RSSI v šestnáctkové soustavě. Z toho důvodu probíhá kontrola, zda řetězec neobsahuje nežádoucí znaky, které do hexadecimální číselné soustavy nepatří. Nežádoucí znaky se v některých případech objeví z důvodu chyby komunikace. Zkontrolovaný, popřípadě upravený řetězec znaků je dále převeden na dekadické číslo, z něž se vypočítává vzdálenost neznámého bodu od konkrétního referenčního bodu podle vztahu (4.4):

$$d = 10^{\frac{-RSSI+A}{10n}} . \quad (4.4)$$

Vztah (4.4) je odvozen ze vztahu (3.1) popisujícího závislost RSSI na vzdálenosti. V případě, že byla přijata chybná hodnota RSSI, je tato hodnota nastavena na nulu. Nulová zůstává tedy i hodnota vzdálenosti jednotlivých referenčních bodů od bodu neznámého. V případě, že je k dispozici dostatečný počet referenčních bodů, bod s nulovou vzdáleností z výpočtu polohy neznámého bodu vypadává. V případě, že jsou k dispozici pouze 3 referenční body a jedna ze vzdáleností vychází nulová, odhad polohy neprobíhá, ale jeho poloha se nastavuje na NaN.

Veškerá neměřená a vypočítaná data jsou ukládána do matic. Na závěr programu jsou do grafu vykresleny referenční body společně s odhady jednotlivých poloh.

5 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Stejně jako v předchozích případech, kdy byly měřeny směrové charakteristiky a závislost síly signálu na vzdálenosti na 5 m, bylo i toto měření uskutečněno v místnosti s rozměry 5 m × 5 m × 2,3 m. Tedy i pro výpočet vzdálenosti od jednotlivých referenčních bodů, podle vztahu (3.1) byly použity stejné hodnoty pro sílu signálu ve vzdálenosti 1 m $A = -47$ dB a konstantu šíření signálu $n = 2,7$. Pro každý bod měření bylo provedeno 13 opakování a z naměřených hodnot následně vypočítán medián.

Rozmístění referenčních bodů pro první a druhé měření je popsáno v tab. 5.1. V prvním měření jsou používány pouze první tři referenční body a ve druhém měření je k těmto třem bodům přidán referenční bod čtvrtý. Čtvrtý bod se nachází v rozdílné výšce z toho důvodu, aby odpadla možnost dvou „správných“ výsledků.

Tab. 5.1 - Souřadnice referenčních bodů pro první a druhé měření

Označení referenčního bodu	Umístění na ose		
	x	y	z
RB1	0 m	0 m	1,6 m
RB2	0 m	2 m	1,6 m
RB3	2,5 m	0 m	1,6 m
RB4	2,5 m	2 m	1 m

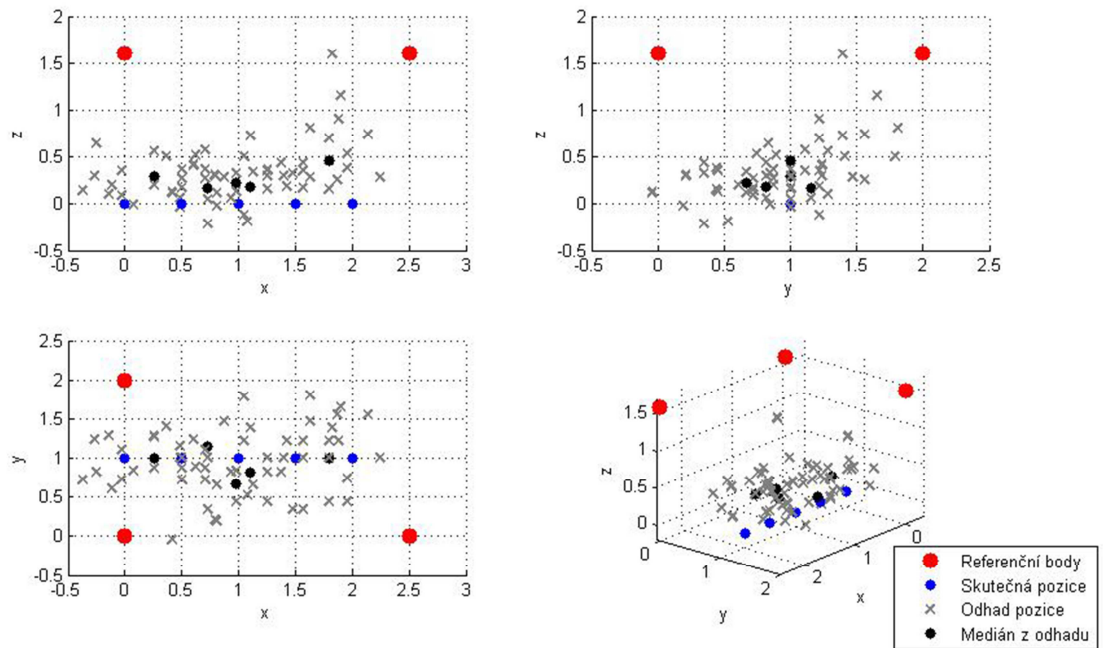
Rozmístění referenčních bodů pro třetí a čtvrté měření je popsáno v tab. 5.2. Stejně jako u prvního a druhého měření jsou i zde použity nejdříve referenční body tři a u posledního měření je přidán bod čtvrtý, který je také v rozdílné výšce. Třetí a čtvrté měření probíhalo na větší vzdálenost než první dvě.

Tab. 5.2 - Souřadnice referenčních bodů pro třetí a čtvrté měření

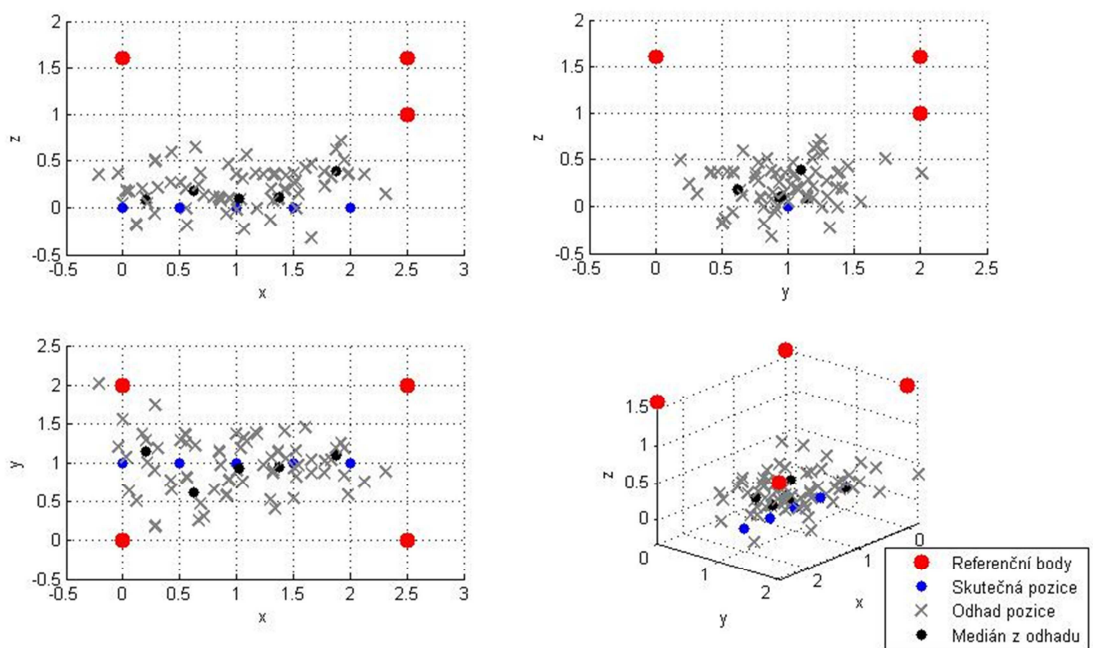
Označení referenčního bodu	Umístění na ose		
	x	y	z
RB1	0 m	0 m	1,6 m
RB2	0 m	4 m	1,6 m
RB3	4,5 m	0 m	1,6 m
RB4	4,5 m	4 m	1 m

Výsledky měření jsou znázorněny na obr. 5.1, obr. 5.2, obr. 5.3 a obr. 5.4. Na těchto obrázcích jsou vždy zobrazeny odhady pozice robota, medián vypočítaný z těchto odhadů, jeho skutečná pozice a pozice referenčních bodů. Pro lepší představu o naměřených výsledcích je každá situace zobrazena ze čtyř různých pohledů a to z pohledu všech tří os a čtvrtý pohled zobrazuje výsledky v prostoru.

Z obrázků je zřejmé, jaký má vliv na měření vzdálenost robota od referenčních bodů, kdy je pro měření na kratší vzdálenost mrak odhadů pozice malý a v okolí správné pozice. Na rozdíl od měření na větší vzdálenost, kdy jsou odhady pozice více rozptýleny v prostoru. Z toho důvodu vychází i mediány z naměřených hodnot na kratší vzdálenost blíže skutečné pozici.

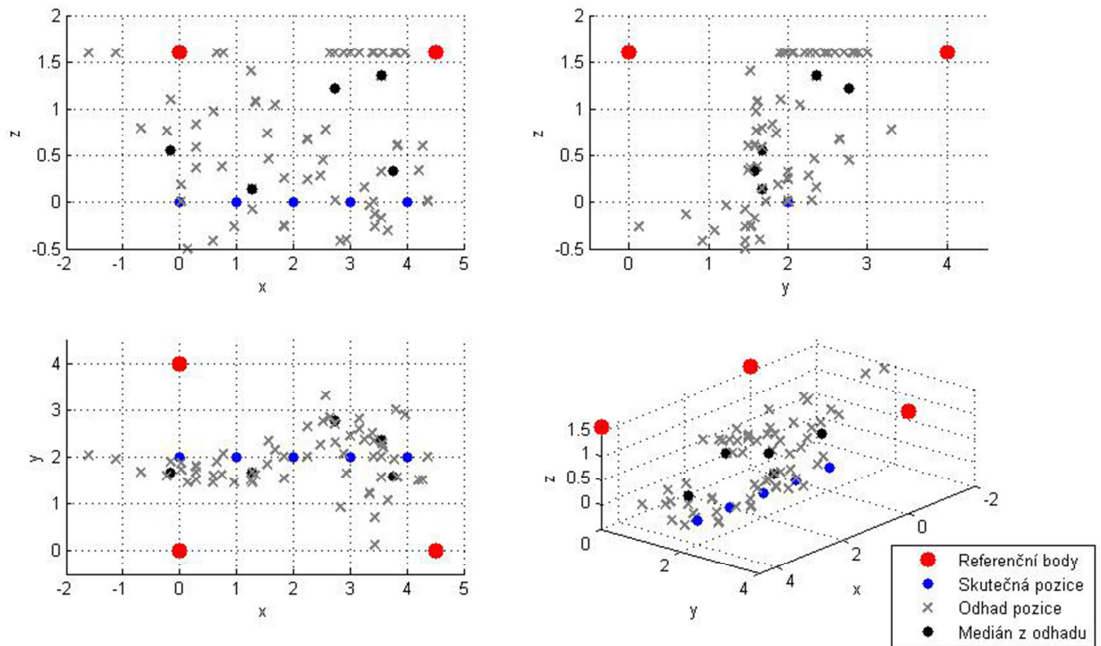


Obr. 5.1 - 1. měření (3 referenční body, malá vzdálenost)

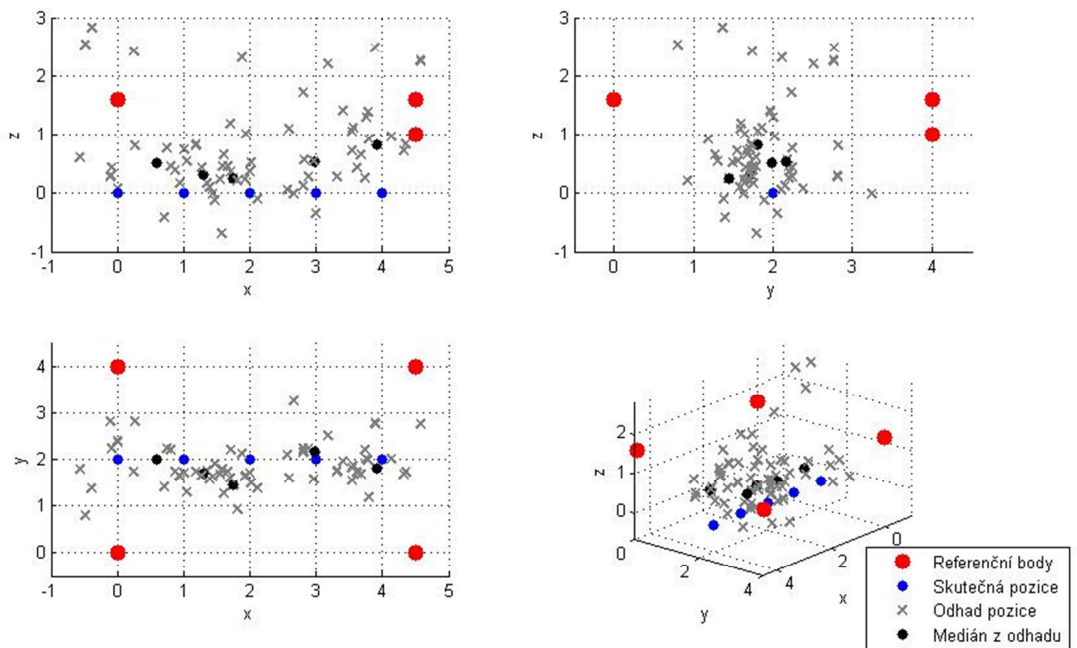


Obr. 5.2 - 2. měření (4 referenční body, malá vzdálenost)

Na obr. 5.3 je vidět několik zajímavých bodů, které se nacházejí v rovině s referenčními body a velmi ovlivňují výslednou hodnotu mediánu odhadu pozice pro konkrétní část měření. Tyto body vznikly chybou měření, kdy některé z pomyslných koulí kolem referenčních bodů měly příliš malý nebo velký poloměr a nemají tedy žádný společný průsečík.



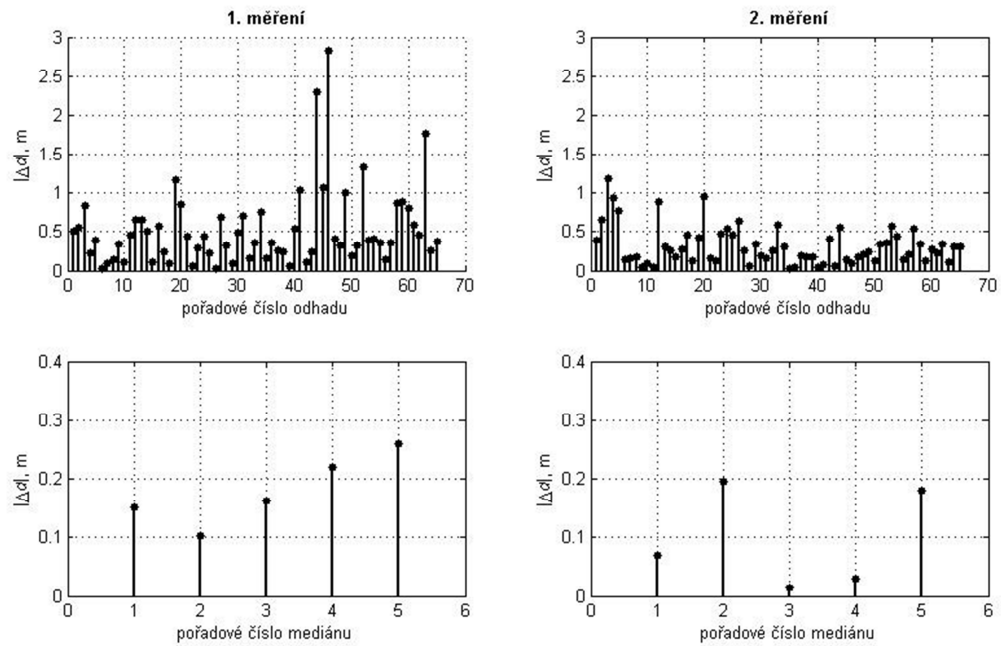
Obr. 5.3 - 3. měření (3 referenční body, větší vzdálenost)



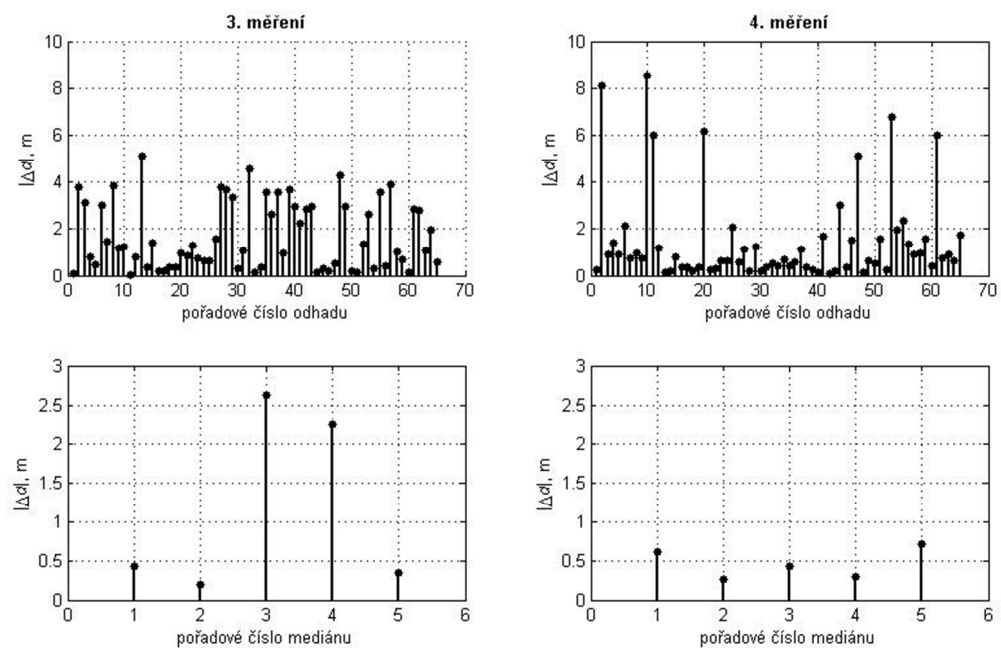
Obr. 5.4 - 4. měření (4 referenční body, větší vzdálenost)

5.1 KVALITA ODHADU POLOHY

Pro každý z odhadů polohy a pro medián z těchto odhadů byla počítána vzdálenost od skutečné polohy robota. Tato vzdálenost reprezentuje chybu měření. Chyby měření pro všechny čtyři případy popsané výše jsou zobrazeny na obr. 5.5 a obr. 5.6. Případy, které se liší pouze v počtu referenčních bodů, jsou pro snadnější porovnání umístěny vedle sebe.



Obr. 5.5 – Porovnání chyb 1. a 2. měření



Obr. 5.6 - Porovnání chyb 3. a 4. měření

Na obr. 5.5 a obr. 5.6, je dobře viditelné, že při měřeních se čtyřmi referenčními body vychází chyba odhadu menší než v případech se třemi referenčními body. Toto potvrzují i hodnoty průměru a mediánu, vypočítané ze všech chyb odhadů polohy. Medián i průměr jsou v obou případech menší pro měření s více referenčními body. Hodnoty průměrů a mediánů jsou uvedeny v tab. 5.3.

Tab. 5.3 - Průměr a medián chyby měření

	Medián Δd , m	Průměr Δd , m
1. měření	0,3821	0,5229
2. měření	0,2587	0,3113
3. měření	1,0638	1,6815
4. měření	0,7247	1,4451

Vzhledem k tomu, že jednotlivé odhady polohy mají poměrně velký rozptyl, ale jejich medián se blíží ke správné hodnotě, dá se předpokládat, že chyba odhadu má přibližně Gaussovo rozložení. Se stoupajícím počtem měření se tedy chyba odhadu pro medián zmenšuje. Výhody výpočtu mediánu se dá ovšem použít pouze u robota, který setrvává po určitou dobu v klidu.

6 ZÁVĚR

V teoretické části této diplomové práce byly popsány jednotlivé metody lokalizace, jejich vlastnosti, výhody, nevýhody a způsob jakým umožňují určit odhad polohy. Dále byly popsány snímače využívané pro lokalizaci.

V rámci praktické části práce, bylo navrženo vlastní řešení lokalizace mobilního robota v neznámém terénu. Z experimentu uskutečněného v závěru práce vyplývá, že navržené řešení je vhodné pro několik způsobů praktického použití. Jedním z nich je možnost použití lokalizační jednotky pro odhad polohy v rámci malého pracovního prostoru robota. Další z možností je použití jednotky pro přibližné určování pozice robota ve větším pracovním prostoru. Vzhledem k tomu, že bylo dosaženo maximální rychlosti měření jedné hodnoty *RSSI* přibližně 0,3 s, není tato metoda příliš vhodná pro rychle se pohybující roboty. Při pokusu o vyšší takt docházelo k častému přijímání chybných hodnot. Vzhledem k vyšší chybovosti pak snaha o zvyšování rychlosti získávání hodnot *RSSI* ztrácí smysl.

Jako další vhodný krok pro vývoj této lokalizační jednotky by mohlo být rozšíření algoritmu o možnost identifikace jednotlivých referenčních bodů a v závislosti na této informaci zvýšit přesnost odhadu polohy, kdy by nejméně vhodné referenční body byly z odhadu polohy vyřazovány. Další možností pro zvyšování přesnosti odhadu polohy je kombinace s některou z metod relativní lokalizace.

LITERATURA

- ATMEL. 2013. *Datasheet ATmega8*. [online]. [cit. 30. 4. 2015.] Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf
- CHUENURAJIT, T.; SUROSO, D.; CHERNTANOMWONG, P. 2012. Implementation of RSSI-Based 3D Indoor Localization using Wireless Sensor Networks Based on ZigBee Standard. [online]. *Journal of Information Science and Technology*. 2/2012, Bangkok, ISSN 1906-9553. [cit. 12. 4. 2015]. Dostupné z: http://ist-journal.mut.ac.th/Journal/vol3-2/Vol32_PP_1_6.pdf
- DIGI INTERNATIONAL. 2015. *Product Manual: XBee / XBee-PRO 802.15.4 RF Modules*. [online]. [cit. 7. 4. 2015]. Dostupné z: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_S.pdf
- EVERETT, H. R. 1995. *Sensors for mobile robots: theory and application*. Wellesley, Mass.: A.K. Peters, 528 p. ISBN 1-56881-048-2.
- FARAHANI, S. 2008. *ZigBee wireless networks and transceivers*. Boston: Newnes/Elsevier, 339 p. ISBN 978-7506-8393-7.
- FEJT, R. 2012. Optický vláknový gyroskop. In: *Senzory* [online]. [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: <http://senzory.aspone.cz/ovg.htm>
- HRDLIČKA, I. 2003. Bezgardanový systém orientace pro bezpilotní letoun. In: *Laboratoř konstrukce a architektury číslicových systémů* [online]. [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: <http://1202.fi.muni.cz/?tpl=doc/project3&lang=cs#top>
- HYNČICA, O.; PAVLATA, K. 2011. Bezdrátové komunikační systémy založené na IEEE 802.15.4 v procesní automatizaci (1. část). *AUTOMA*. 4/2011, Praha: FCC Public, s. r. o., Praha. s. 24 – 25. ISSN 1210-9592.
- JANKO, O. 2012. Ako funguje Piezo-Gyro?. In: *Realistické RC modely* [online], 14. 2. 2012 [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: <http://rcmodely.cevaro.sk/index.php?id=87>
- KRÁL, J. 2012. *Elektronická řídicí jednotka pohonu podvozku mobilního robota*. Bakalářská práce. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/51979>. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra řízení procesů.
- NOVÁK, P. 2007. *Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení*, BEN-technická literatura, Praha, ISBN 80-7300-141-1
- SKALKA, M. 2011. *Srovnání lokalizačních technik*. Diplomová práce. Praha: Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra softwarového inženýrství.
- Trilateration. *Wikipedia* [online]. 3. 2. 2015 [cit. 12. 4. 2015]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration>
- WINKLER, Z. 2005. Robotika.cz. In: *Odometrie*. [on-line]. 5. 12. 2005 [cit. 28. 2. 2015]. Dostupné z: <http://robotika.cz/guide/odometry/cs>

PŘÍLOHY

A - CD s programem a naměřenými daty

Příloha k diplomové práci

Lokalizace mobilního robota v neznámém terénu

Bc. Jiří Král

CD

OBSAH CD

Příložené CD obsahuje následující soubory a složky:

- KralJ_LokalizaceMobilniho_LH_2015.pdf - plný text práce
- Priloha_A.pdf - Příloha k diplomové práci
- složka Firmware - projekt pro AVRStudio 4 psaný v jazyce C
- složka MATLAB - Skript a funkce pro lokalizaci
 - jeHEX - funkce ověřující zda je číslo v hexadecimální soustavě
 - Lokalizace - hlavní skript
 - Trilaterace - funkce vypočítávající polohu v prostoru
 - xbprikaz - funkce posílající a přijímající zprávy od XBee modulu
- složka Namerena_data - data naměřená během vypracovávání práce
 - Chyby_mereni - chyby vypočítané z odhadů pozice a mediánu odhadů
 - Mereni-odhad_polohy - síla signálu od jednotlivých referenčních bodů
 - Smerove_charakteristiky - síla signálu ve vzdálenosti 1 m
 - Zavislost_na_vzdalenosti - síla signálu z měření závislosti *RSSI* na vzdálenosti
- Složka Navrh - soubory se schémata navržených v programu Eagle
 - Deska_pro_XBee - návrh zapojení a desky plošného spoje pro připojení XBee
 - Zakladni_deska - návrh zapojení a desky plošného spoje pro základní desku