

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Sledování polohy mobilního robota
senzorovou sítí**

Praha, 2008

Autor: Luboš Jirák

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 30. 7. 2008

Luboš Jirouš
podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu práce ing. Jiřímu Trdličkovi za cenné připomínky a rady k této bakalářské práci. Dále bych chtěl poděkovat také rodičům a všem ostatním, kteří mě podporovali ve studiu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce obsahuje návrh a softwarovou implementaci systému pro určení polohy s využitím bezdrátové senzorové sítě. Pro určení polohy se využívá měření síly přijatého radiového signálu. Předpokládaná maximální vzdálenost mezi senzory je cca 30 cm. Senzorová část pro měření síly signálu je vytvořena v prostředí TinyOS a napsána v jazyce nesC. Program pro výpočet a grafické zobrazení dat v počítači je vytvořen v MS Visual Studio 2005, v programovacím jazyce C#.

Abstract

This bachelor thesis contains design and software implementation of system for object tracking with wireless sensor network. Position estimation is based on measuring of signal strength. Assumed maximal distance between sensors is 30 cm. Sensor program is built by using TinyOS operating environment and nesC language. A PC program for data processing and displaying is created by MS Visual Studio 2005 in C# language.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Luboš Jirák

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Sledování polohy mobilního robota senzorovou sítí**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou senzorových sítí, nesC a operačního systému TinyOs.
2. Navrhněte a implementujte program pro senzorovou část systému. (měření dat a jejich komunikace do PC)
3. Seznamte se s metodami pro určení polohy zdroje energetického signálu.
4. Navrhněte a implementujte několik metod pro výpočet polohy mobilního robota na základě změřených dat.
5. Navrhněte a implementujte uživatelské rozhraní pro vizualizaci a kontrolu systému.
6. Proveďte experimentální srovnání přesnosti jednotlivých metod výpočtu polohy mobilního robota.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Jiří Trdlička

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



v.z. M. Šebek
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
1 Úvod	1
1.1 Seznámení s problematikou	1
2 Popis použitého hardware a software	2
2.1 Bezdrátová senzorová síť	2
2.2 Telosb	2
2.2.1 CC2420	3
2.3 Software	4
2.3.1 TinyOs\nesC	4
3 Rozbor problému	5
3.1 Síla signálu	5
3.2 Anténa na telosb	5
3.3 Měření	6
3.3.1 Měření do 7,1 m	7
3.3.2 Měření do 1,4 m	9
3.4 Shrnutí zjištěných poznatků	11
4 Implementace	12
4.1 Senzory	12
4.1.1 Základna	12
4.1.2 Vysílač	13
4.1.3 Přijímač	13
4.2 C#	14

4.2.1	Zpracování zpráv	14
4.2.2	Implementované metody pro určení polohy	14
4.2.2.1	Těžišťová lokalizace	14
4.2.2.2	Váhovaná těžišťová lokalizace	15
4.2.2.3	Váhovaná těžišťová lokalizace s klouzavým průměrem . .	16
4.2.2.4	Váhovaná těžišťová lokalizace s mediánem	16
4.2.3	GUI	16
4.2.3.1	Graf	17
4.2.3.2	Nastavení senzorů	18
4.2.3.3	Ovládací tlačítka	18
5	Výsledky	19
5.1	Provedené experimenty	19
5.1.1	Těžišťová lokalizace	19
5.1.2	Váhovaná těžišťová lokalizace	20
5.1.3	Váhovaná těžišťová lokalizace s klouzavým průměrem a mediánem	21
6	Závěr	23
Literatura		25
A Obsah přiloženého CD		I

Seznam obrázků

2.1	Senzor telosb od firmy Crossbow včetně pouzdra pro baterie	3
2.2	Převod RSSI na sílu rádiového signálu	3
2.3	Diagram znázorňující propojení komponent v jednoduché aplikaci	4
3.1	Umístění komponent na telosb, anténa umístěna úplně vpravo (Internal Antenna), pohled shora	6
3.2	Orientace senzorů při měření, pohled shora	7
3.3	Graf závislosti RSSI na vzdálenosti, pro dvě nastavení síly signálu, měřeno na podlaze	7
3.4	Graf závislosti RSSI na vzdálenosti, pro pět nastavení síly signálu, měřeno na stole	8
3.5	Graf závislosti RSSI na vzdálenosti, kratší vzdálenost, pro čtyři nastavení síly signálu, senzor položený na bateriích	9
3.6	Orientace senzorů při natočení antén směrem vzhůru, pohled shora	10
3.7	Graf závislosti RSSI na vzdálenosti, kratší vzdálenost, pro čtyři nastavení síly signálu, senzor na boku, anténa natočená směrem vzhůru	10
3.8	Senzor tmote Sky s přídavnou anténou	11
4.1	Příklady grafů váhové funkce: (a) dolní práh -45 , má váhu 0, horní práh -20 , má váhu 1 (b) dolní práh -20 , má váhu 0,5 a horní práh 6, má váhu 2	15
4.2	Hlavní okno aplikace	17
4.3	Okno pro nastavení grafu	17
5.1	Těžišťová lokalizace: (a) možné pozice, (b) změřené chování pro nastavenou sílu signálu 1, měřítka os jsou v cm	19
5.2	Váhovaná těžišťová lokalizace: síla signálu 1, horní práh -20 , váha 1, dolní práh -45 , váha 0, měřítka os jsou v cm	20

5.3 Váhovaná těžišťová lokalizace: síla signálu 1, horní práh -20 , váha 1, dolní práh -45 , váha 0, měřítka os jsou v cm	21
5.4 Porovnání váhované těžišťové lokalizace s klouzavým průměrem (počet vzorků: 3), bez klouzavého průměru a skutečné dráhy, měřítka os jsou v cm	22

Seznam tabulek

4.1 Struktura zprávy, celková standardní délka 20 nebo 18 bajtů	13
---	----

Kapitola 1

Úvod

1.1 Seznámení s problematikou

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a implementovat systém pro určení polohy mobilního robota za pomoci senzorové sítě.

Při většině pohybů je dobré znát svojí aktuální polohu. Ať už pro orientaci v prostoru, nebo pro držení se zadané trajektorie. Dalším využitím může být určování pozic senzorů, které jsou součástí senzorové sítě.

Polohu lze v dnešní době určit mnoha způsoby. Hodně využívané pro určení polohy je GPS (Global Positioning System). Při malých vzdálenostech lze vypočítat současnou pozici i z počáteční pozice přičtením provedených pohybů, například měřením otáčení kol (odometrije). Poloha se dá také určit rotujícím laserovým paprskem a vhodným rozmístěním laserových odražečů. Dalšími možnostmi jak zjišťovat polohu je odhadování vzdálenosti na základě síly rádiového signálu nebo síly světelného signálu. Jelikož v této bakalářské práci je použit inteligentní senzor telosb, který obsahuje čip schopný určit sílu signálu a senzor citlivý na světlo, omezilo se určení polohy na tyto dvě možnosti. Určování polohy pomocí světelného senzoru bylo zpracováno například v diplomové práci [1]. Pro tuto bakalářskou práci tedy byla zvolena druhá možnost, tj. určení polohy s pomocí rádiového čipu. Rádiový čip na senzoru telosb je schopný změřit s jakou energií byla přijata příchozí zpráva a tuto informaci lze následně využít pro určení polohy. Výhody této metody jsou, že není nutné přidávat další zařízení, vystačíme si se senzory, je jednoduše aplikovatelná, funguje i v uzavřených prostorách na rozdíl od GPS a není zatížená akumulací chyb jako odometrije.

Kapitola 2

Popis použitého hardware a software

2.1 Bezdrátová senzorová síť

Bezdrátová senzorová síť je síť senzorů, z nichž je každý schopný samostatné komunikace i vyhodnocování měřených údajů. Základním požadavkem je nízká spotřeba, protože obvykle jsou napájeny pouze z baterií. Dají se využít pro monitorování různých veličin, které lze měřit senzory, např. teploty, světla, vlhkosti, vesměs tam, kde je pokrytí kabely drahé nebo nevhodující. Předpokládá se nasazení většího množství těchto senzorů, tudíž velká flexibilita i v případě zničení či poškození některého senzoru.

2.2 Telosb

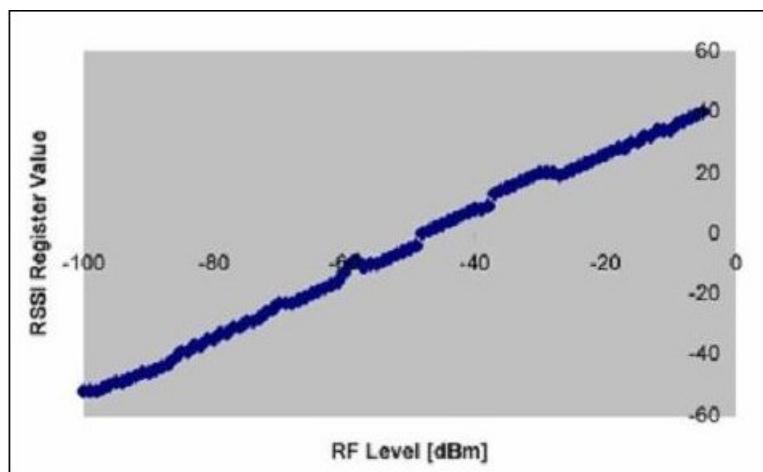
V této bakalářské práci byl použit inteligentní senzor telos v revizi b, vyrobený firmou Crossbow[2]. Telos je bezdrátový senzor, přizpůsobený pro použití v senzorové síti. Jedná se o plošný spoj osazený 16ti bitovým mikroprocesorem, dále obsahuje USB port, přes který se nahrávají programy do integrované flash paměti a zároveň slouží i pro komunikaci s počítačem. Neméně důležitý je také vysílač v pásmu 2,4 GHz, volitelné je osazení několika druhů senzorů světla, teploty a vlhkosti. Také obsahuje tři různobarevné ovladatelné diody a dvě neovladatelné, které slouží k signalizaci při propojení senzoru s počítačem. Napájení je realizováno buď přímo přes USB nebo pomocí dvou tužkových baterií.



Obrázek 2.1: Senzor telosb od firmy Crossbow včetně pouzdra pro baterie

2.2.1 CC2420

Zvláštní pozornost si zaslouží použitý rádiový čip typu CC2420 od firmy Chipcon[3]. Vysílací frekvence je 2,4 GHz, maximální přenosová rychlosť 250 kbps a také splňuje standard IEEE 802.15.4. Tento čip je schopný určit RSSI (Received Signal Strength Indication), což je bezrozměrná hodnota určující sílu přijatého signálu. Převod RSSI na dBm je udávaný výrobcem v [4] a je přibližně lineární viz. obr. 2.2. Z obrázku je patrný rozsah RSSI, který je zhruba -50 až $+40$. Lze také měnit vysílací výkon, dokonce je možné nastavit různý výkon pro každou odesílanou zprávu. Existuje celkem 32 diskrétních hladin výkonu v rozsahu 1–32 (implicitně je nastaveno maximum, tj. 32).



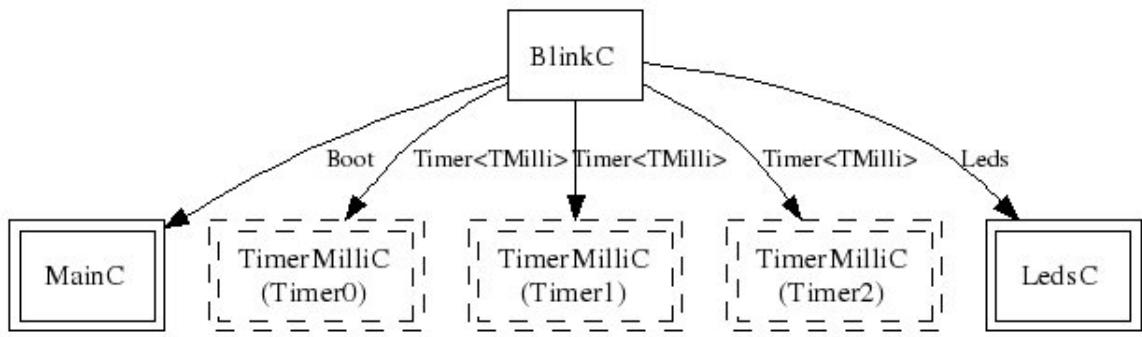
Obrázek 2.2: Převod RSSI na sílu rádiového signálu

Poznámka: V této práci se nikde nepřepočítává RSSI na dBm, protože převod je téměř lineární a pro použité metody určení polohy není zvolená jednotka důležitá. \square

2.3 Software

2.3.1 TinyOs\nesC

TinyOs[5] je open source operační systém řízený událostmi, vytvořený speciálně pro použití v bezdrátových senzorových sítích. TinyOs obsahuje velké množství komponent, ze kterých se pospojováním (angl. wiring) sestaví aplikace. Ukázka spojení komponent v jednoduché aplikaci, která pouze bliká diodami, je na obr. 2.3. Na tomto diagramu je vidět virtuální použití jednoho časovače, který se chová jako tři. Komponenty mohou být i abstraktní a lze je mezi sebou zaměňovat, pokud poskytují stejný interface. Příkladem může být záměna komponent pro měření údajů z čidel. TinyOs využívá vlastní jazyk nesC[6], což je dialekt jazyka C, rozšířený právě o komponenty. V této bakalářské práci byl využit virtuálně spouštěný systém s nainstalovaným TinyOs, popis pro jeho instalaci je popsán v [7].



Obrázek 2.3: Diagram znázorňující propojení komponent v jednoduché aplikaci

Kapitola 3

Rozbor problému

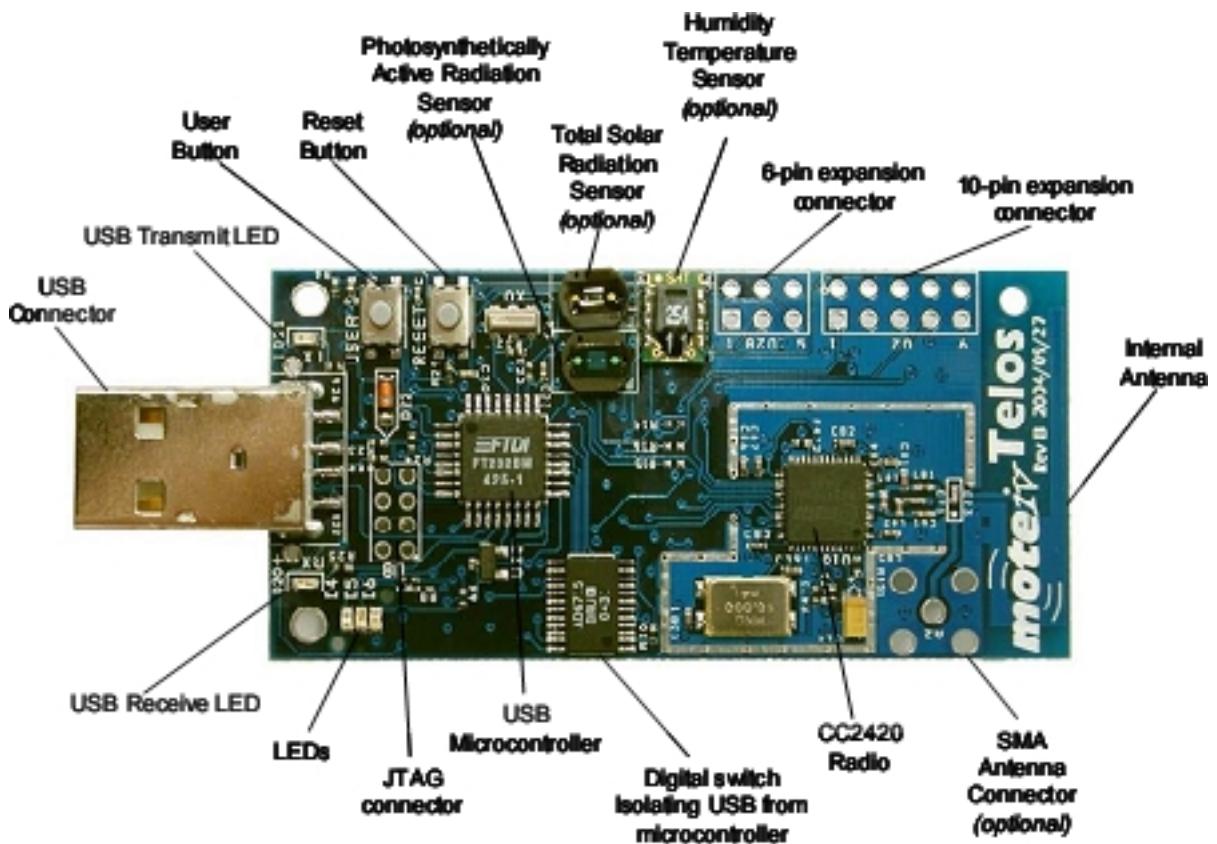
3.1 Síla signálu

Hlavním problémem při určování polohy bylo zjištění závislosti síly signálu na vzdálenosti. Z podstaty rádiového signálu je jasné, že závislost rozhodně nebude jednoduše popsatelná lineární funkcí. V práci [8] bylo zjištěno, že síla signálu je hodně závislá nejenom na vzdálenosti, ale zároveň na vzájemných polohách antén. Různá natočení či rozdílná poloha v prostoru citelně ovlivňují sílu signálu.

Nezanedbatelný je také vliv prostředí, hlavně větší překážky od kterých se signál odráží, mají vliv na sílu změřeného signálu. Dalším vlivem jsou vlastnosti prostředí, jako je teplota nebo vlhkost.

3.2 Anténa na telosb

Umístění antény v použitých senzorech telosb není příliš vhodné. Jak je vidět na obr. 3.1, anténa je naplocho vložená v tištěném spoji. Jelikož se telosb používá převážně v poloze při které leží na podložce bateriemi směrem dolů (viz obr. 2.1) je patrné, že i v případě kdy uvažujeme pouze umístění senzorů v jedné rovině, existuje několik možností vzájemného natočení antén a tím i různých výsledků.

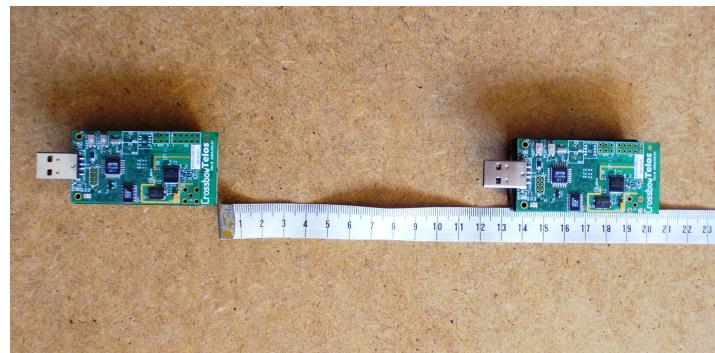


Obrázek 3.1: Umístění komponent na telosb, anténa umístěna úplně vpravo (Internal Antenna), pohled shora

3.3 Měření

Byly provedeny dvě měření, první se zaměřením na kratší vzdálenost a druhé se zaměřením na delší vzdálenosti. Účelem měření bylo zjistit chování síly signálu (respektive RSSI) v závislosti na vzdálenosti. Obě měření probíhala v uzavřeném prostoru s konstantní teplotou a vlhkostí.

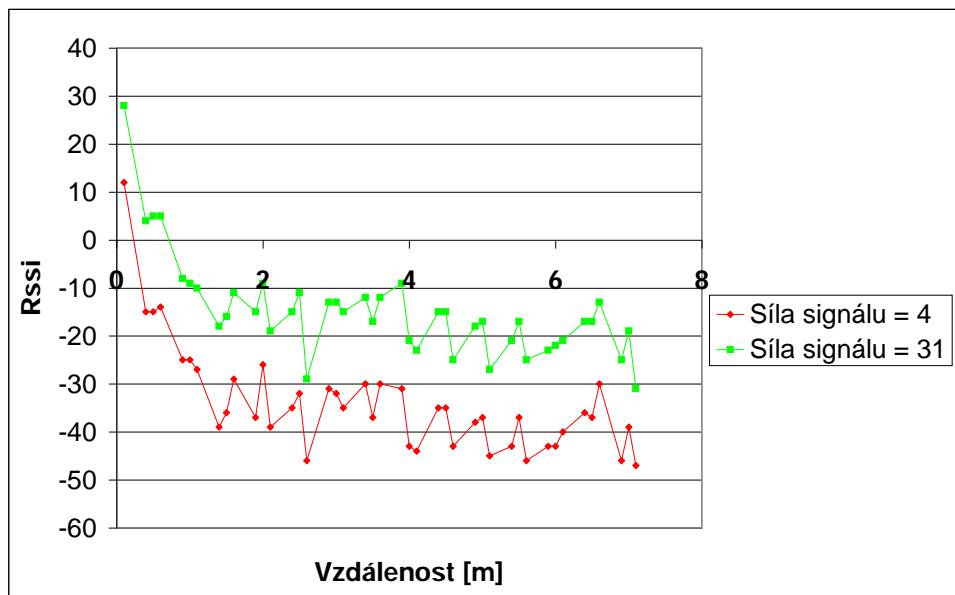
Při měření byly použity dva senzory telosb. Jeden byl umístěn trvale na značce 0 a druhý byl manuálně po každém měření posunován na měřící body v různých vzdálenostech. V každém měřícím bodě byl celkem 32krát odeslána testovací zpráva, pokaždé s jiným vysílacím výkonem. Mimo posledního měření, byly oba senzory položeny na bateriích a měly shodně orientované antény viz obr. 3.2. Z tohoto důvodu je první vzdálenost vždy nejméně 10 cm, kdy ještě nedochází k vzájemnému překrývání senzorů.



Obrázek 3.2: Orientace senzorů při měření, pohled shora

3.3.1 Měření do 7,1 m

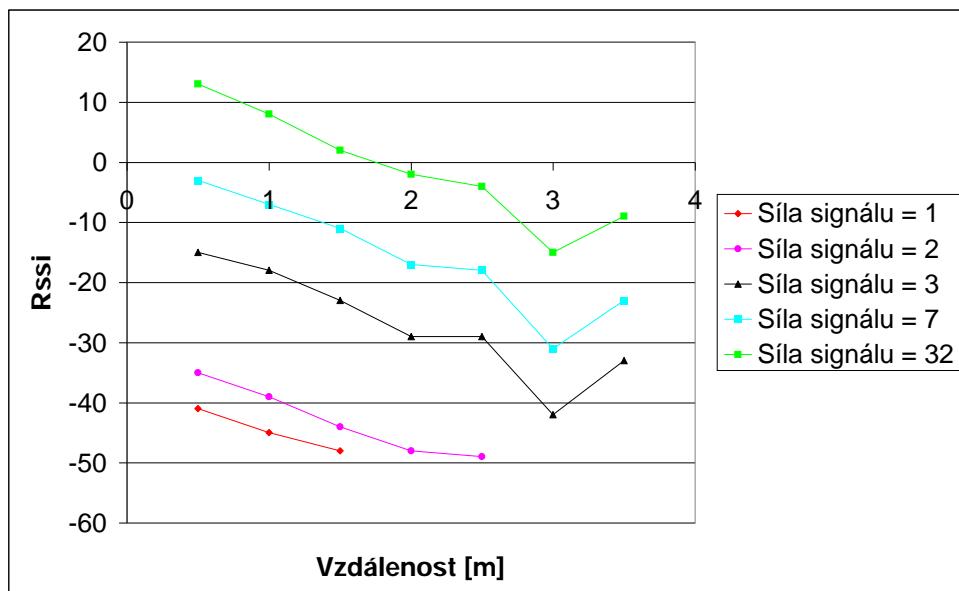
Měření probíhalo na podlaze pokryté nízkým kobercem, vzdálenost od stěn místnosti a nejbližších překážek byla minimálně 1,5 m. Výsledky měření je jsou vidět na obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Graf závislosti RSSI na vzdálenosti, pro dvě nastavení síly signálu, měřeno na podlaze

Do grafu na obr. 3.3 byly z důvodu přehlednosti vyneseny pouze dvě nastavení vysílacích výkonů, nejvyšší a nejnižší nastavení při kterém byly doručeny všechny zprávy v daném měřícím bodě. Při nižším vysílacím výkonu docházelo ke ztrátám zprávy. Z grafu je vidět, že obě dvě křivky mají hodně podobný průběh, pouze jsou vůči sobě posunuté o konstantní hodnotu v ose y. Ostatní nezobrazené křivky mají obdobný tvar a byly by rozmístěny mezi těmito dvěma. Při měření bylo dále zjištěno, že se hodnota RSSI v čase nemění, měření je opakovatelné se stejnými výsledky.

Další měření bylo provedeno s tím rozdílem, že senzory byly umístěny na dřevěném stole asi 0,7 m nad zemí. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 3.4.

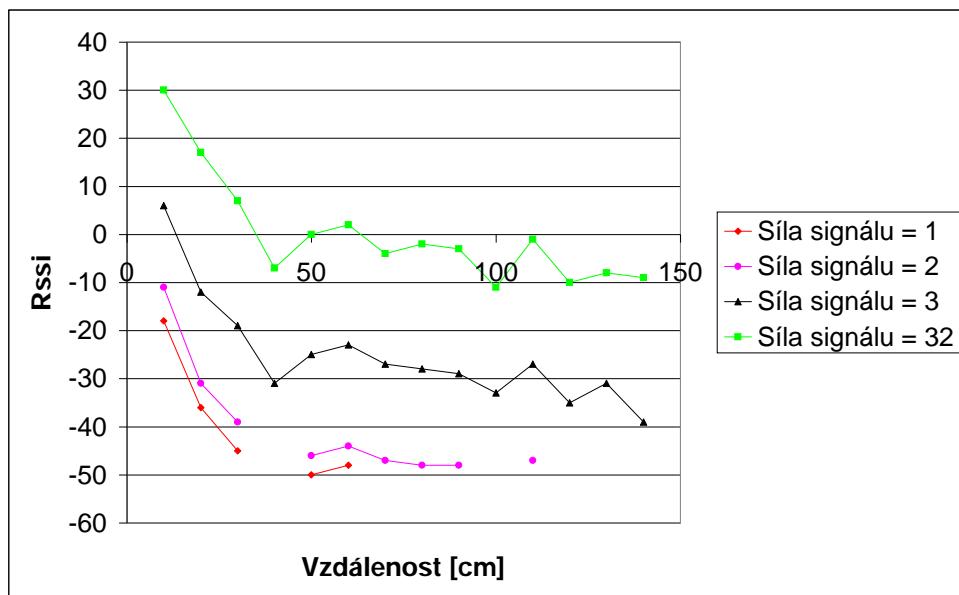


Obrázek 3.4: Graf závislosti RSSI na vzdálenosti, pro pět nastavení síly signálu, měřeno na stole

Jak je vidět v grafu na obr. 3.4 měření prováděná na stole dávají mnohem lepší výsledky, ve kterých je možné pozorovat očekávaný klesající trend. Zároveň se ale potvrdily závěry z [8], a to že se v hodnotách RSSI vyskytují neodstranitelná lokální maxima a minima, která komplikují přesné určení vzdálenosti.

3.3.2 Měření do 1,4 m

Měření v kratších vzdálenostech byla prováděna na rovné dřevěné ploše 0,4 m nad zemí. Výsledky jsou zobrazeny v grafu na obr. 3.5.



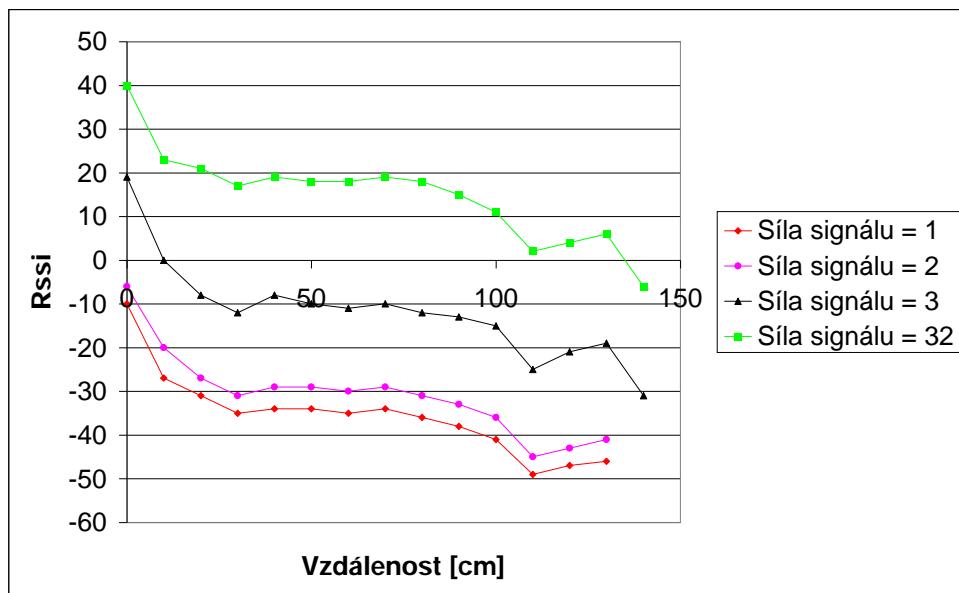
Obrázek 3.5: Graf závislosti RSSI na vzdálenosti, kratší vzdálenost, pro čtyři nastavení síly signálu, senzor položený na bateriích

V obr. 3.5 lze pozorovat, že funkce závislosti RSSI na vzdálenosti je lineární na intervalu 10–30 cm. Při větším oddálení senzorů opět dochází ke kolísání, jak již bylo zjištěno dříve.

Při proměřování kratších vzdáleností byl také zkoumán vliv natočení antén. Různé natáčení ukázalo vždy výraznou linearitu do 30 cm a změny velikosti RSSI oproti orientaci na obr. 3.2 byly, na této krátké vzdálenosti, v řádu jednotek. Na obr. 3.7 je vidět graf RSSI pro nejzajímavější vzájemné natočení antén a to směrem vzhůru viz obr. 3.6.



Obrázek 3.6: Orientace senzorů při natočení antén směrem vzhůru, pohled shora



Obrázek 3.7: Graf závislosti RSSI na vzdálenosti, kratší vzdálenost, pro čtyři nastavení síly signálu, senzor na boku, anténa natočená směrem vzhůru

Z grafu na obr. 3.7 je lze vidět, že nejideálnější by bylo používat senzory v poloze s anténou vzhůru, funkce nevykazuje tolik extrémů jako v předchozích případech a trend postupného snižování je dobře pozorovatelný. Opět se prokázalo, že se nedá úplně zbavit

lokálních minim. Poloha s anténou vzhůru je sice výhodná, ale velmi nepraktická, protože senzory nebyly na tuto pozici navrženy a nejsou v ní příliš stabilní, hrozí i jejich poškození. Situaci by vyřešilo použití přídavné antény, viz obr. 3.8. Tato přídavná anténa směruje směrem vzhůru a navíc není příliš ovlivněna okolním plošným spojem jako v případě vestavěné antény.



Obrázek 3.8: Senzor tmote Sky s přídavnou anténou

3.4 Shrnutí zjištěných poznatků

Změřené údaje prokázaly, že síla signálu je na vzdálenostech větších než cca 30 cm velmi proměnlivá a ovlivněná prostředím. Při měření na vzdálenostech větších než 30 cm se většinou ani neprokázal klesající trend, jak by se dalo předpokládat. Z těchto důvodů a z důvodu výskytu přibližně lineárně klesající křivky při vzdálenostech do 30 cm bylo rozhodnuto zabývat se určováním polohy v malých vzdálenostech.

Kapitola 4

Implementace

4.1 Senzory

Implementace na senzorech využívá TinyOS a je napsaná v jazyce nesC. Z hlediska funkce se v této implementaci rozlišují tři druhy senzorů:

1. Základna

Zprostředkovává přenos dat mezi senzory a počítačem.

2. Vysílač

Senzor, jehož polohu se snažíme zjistit.

3. Přijímač

Senzory se známou polohou, podle kterých se odvozuje pozice vysílače.

4.1.1 Základna

Základna je jediný senzor trvale připojený přes USB k počítači a umožňuje přenos dat ze senzorů do počítače. Nejprve přijme zprávu z rádia. Po přijetí zprávy určí jestli je od Vysílače nebo Přijímače. Určení zasilatele zprávy je uděláno porovnáním délky zprávy se dvěma možnými délkami. Struktura zprávy viz tabulka 4.1. Tabulka zachycuje pořadí složek ve zprávě a kolik bajtů zabírají, součtem těchto bajtů se získa délka zprávy. Standardní délka zprávy od Vysílače je 18 bajtů, od Přijímače 20 bajtů. V závislosti na tom od koho zpráva přišla, základna bud' okamžitě přepošle zprávu beze změny na port USB, nebo změří sílu signálu a odešle po USB portu svojí vlastní zprávu, do které přidá změřený údaj, údaje z přijaté zprávy (časovač, vysílací výkon) a svojí identifikaci.

Tabulka 4.1: Struktura zprávy, celková standardní délka 20 nebo 18 bajtů

1 B	2 B	2 B	2 B	1 B	1 B	1 B	5 a 7 B	2 B	1 B
synch. bajt	typ zprávy	cílová adresa	zdrojová adresa	délka zprávy	číslo skupiny	typ obsluhy	data	CRC	synch. bajt

4.1.2 Vysílač

V předem nastaveném časovém intervalu periodicky odesílá rádiem zprávy. Zpráva obsahuje údaj z časovače, který se po každé odeslané zprávě zvýší o jedna, nastavený vysílací výkon rádia při odesílání (s rozsahem 1–32) a identifikační číslo senzoru.

V hlavičkovém souboru lze nastavit periodicitu odesílání zpráv, případně také počáteční zpoždění vysílání, jinak senzor začne vysílat okamžitě po zapnutí. Dále lze nastavit vysílací výkon rádia jako pole hodnot, které se budou stále dokola opakovat.

4.1.3 Přijímač

Jelikož Přijímačů může být více, a z důvodu vzájemného rušení nemohou vysílat všichni najednou, bylo implementováno časové zpoždění. Délka zpoždění se liší podle identifikačního čísla senzoru a je určováno vzorcem:

$$t_i = (T \cdot (i - 1)), \quad (4.1)$$

kde t_i je délka zpoždění pro senzor i , T je velikost časového okna vyhrazeného pro vysílání jednoho senzoru a i je identifikační číslo senzoru. Ze vzorce vyplývá, že senzor s identifikačním číslem 1 vysílá okamžitě, což je chování základny, a proto je číslo 1 rezervováno pro základnu.

Po zapnutí Přijímač čeká na zprávy z rádia. Přijaté zprávy zpracovává podobně jako Základna, na základě délky určí zda pochází od Vysílače nebo od Přijímače. Zprávy od Přijímače ignoruje a zahodí je. U zpráv od Vysílače změří sílu signálu a načte z ní údaje o časovači a vysílacím výkonu. Poté spustí svůj vlastní časovač se zpožděním nastaveným podle výše uvedeného vzorce. Po vypršení časovače odešle zprávu obsahující jeho identifikační číslo, změřenou sílu signálu a načtené hodnoty o časovači a vysílacím výkonu. Velikost časového okna lze nastavit v hlavičkovém souboru.

4.2 C#

Program zpracovávající data v počítači je napsán v jazyce C#. Přenos dat mezi programem a senzory připojenými v USB je řešen emulací seriového portu a C# knihovnami určenými pro práci se seriovým portem. Pro vykreslování grafické reprezentace polohy senzorů program využívá open source knihovnu ZedGraph[9].

4.2.1 Zpracování zpráv

Zprávy posílané po USB, mají pevně definovanou strukturu viz tabulka 4.1. Důležité je, že každý začíná a končí synchronizačním bajtem 0x7E, délka zprávy je dána součtem délky pevně daných byteů, jako je například cílová adresa, a vlastních dat, která chceme přenést do počítače. V našem případě má zpráva bez synchronizačních bajtů délku 20 bajtů. Tato zpráva ale může být i delší, toto nastává pokud je potřeba přenést rezervovanou hodnotu, např. 0x7E. V takovém případě se provede exkluzivní OR s 0x20 a před tuto hodnotu se předřadí bajt 0x7D.

Původní předpoklad pro zpracování zpráv byl, že při zpracování se nejprve každá zpráva načte do bajtového pole, poté budou ořezány synchronizační a předřazené bajty a jelikož struktura zprávy je známá a neměnná, rozšifrování proběhne přečtením požadované pozice v bajtovém poli, například číslo odesílacího senzoru má ve zprávě pozici 11. Tento předpoklad musel být nahrazen složitější strukturou zpracování, protože načítané zprávy se často rozdělily na dva i více dílů a tedy zpráva délky 22 byla přijata ve dvou a více menších. Provedené testování ukázalo, že naštěstí nedochází ke ztrátě dat. Aby se předešlo chybnému zpracování musela být každá načítaná zpráva prozkoumána na přítomnost synchronizačních bajtů, případně pospojována z více menších, ořezána a porovnána se standartní délkou.

4.2.2 Implementované metody pro určení polohy

4.2.2.1 Těžišťová lokalizace

Těžišťová lokalizace (Centroid localization, viz [10]) je nejjednodušší, nevyužívá sílu signálu. Rozlišuje pouze mezi stavy je signál nebo není signál. Aktuální pozice je určená podle vzorce:

$$P(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n S_i(x, y), \quad (4.2)$$

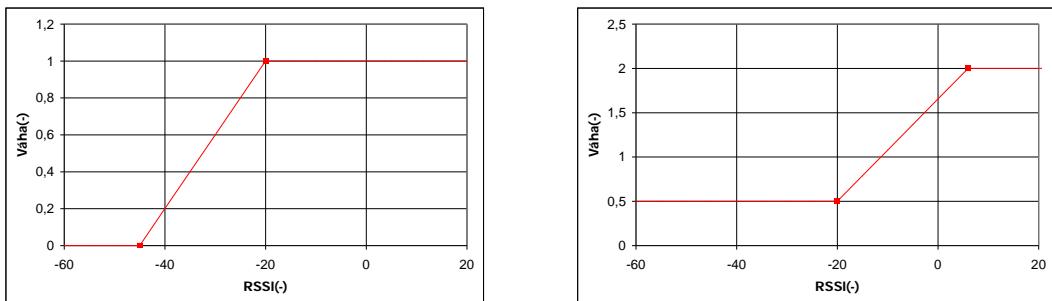
kde $P(x, y)$ je vypočtená aktuální pozice, $S_i(x, y)$ je pozice známého senzoru v dosahu signálu a n je celkový počet senzorů které jsou v dosahu signálu. Maximální počet možných pozic, které může tato metoda vrátit je roven součtu 1 až n prvkových kombinací, které lze vytvořit z použitých senzorů. Ve skutečnosti bude pozic méně, některé kombinace totiž nemohou nastat z důvodu prostorového uspořádání senzorů.

4.2.2.2 Váhovaná téžišťová lokalizace

Váhovaná téžišťová lokalizace (Weighted centroid localization, [11]) je vylepšení předchozí metody o váhování podle síly signálu. Vychází z výše ověřeného předpokladu, že síla signálu, respektive hodnota RSSI, ve vzdálenostech 10–30 cm klesá lineárně. Aktuální pozice se vypočítá podle vzorce:

$$P(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^n (v_i \cdot S_i(x, y))}{\sum_{i=0}^n v_i}, \quad (4.3)$$

kde $P(x, y)$ je vypočtená aktuální pozice, $S_i(x, y)$ je pozice známého senzoru od kterého byl obdržen údaj se silou signálu a v_i je hodnota váhové funkce pro obdrženou sílu signálu od senzoru S_i . Váhovou funkci je nutné nastavit podle aktuálního nastavení senzorů a také podle prostředí. Průběh váhové funkce lze měnit v hlavním okně programu hodnotami horního prahu (Max Threshold), dolního prahu (Min Threshold) a váhou (Weight) v místech prahů. Příklady váhových funkcí jsou na obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Příklady grafů váhové funkce: (a) dolní práh -45 , má váhu 0 , horní práh -20 , má váhu 1 (b) dolní práh -20 , má váhu $0,5$ a horní práh 6 , má váhu 2

Váhová funkce na obr. 4.1(a) je příkladem nastavení podle dříve změřené charakteristiky v obr. 3.5, pro sílu signálu 1. Ve vzdálenosti 10 cm je síla signálu maximální, tj. -20 ,

a ve vzdálenosti 30 cm je síla signálu -45 . Před každým použitím Váhované těžišťové lokalizace je vhodné provést kalibraci váhové funkce tak, že nejprve se přiblíží senzory nejblíže k sobě, změří se hodnota horního prahu a ta se nastaví do Max Threshold. Hodnota dolního prahu se změří po oddálení senzorů do vzdálenosti přibližně 30 cm, a tato hodnota se nastaví do Min Threshold. Nastavení váhy (Weight) v horním a dolním prahu je přednastaveno na 0 a 1, ale pokud se signál na delší vzdálenost úplně ztrácí, např. síla signálu 1 v grafu na obr. 3.5, je možné váhu v dolním prahu zvýšit.

4.2.2.3 Váhovaná těžišťová lokalizace s klouzavým průměrem

Váhovaná těžišťová lokalizace s klouzavým průměrem (Weighted centroid localization moving average) vznikla obohacení Váhované těžišťové lokalizace o klouzavý průměr s exponenciálním zapomínáním. Výpočet probíhá podle vzorce:

$$P_t(x, y) = \frac{(n - 1) \cdot P_{t-1}(x, y) + P(x, y)}{n}, \quad (4.4)$$

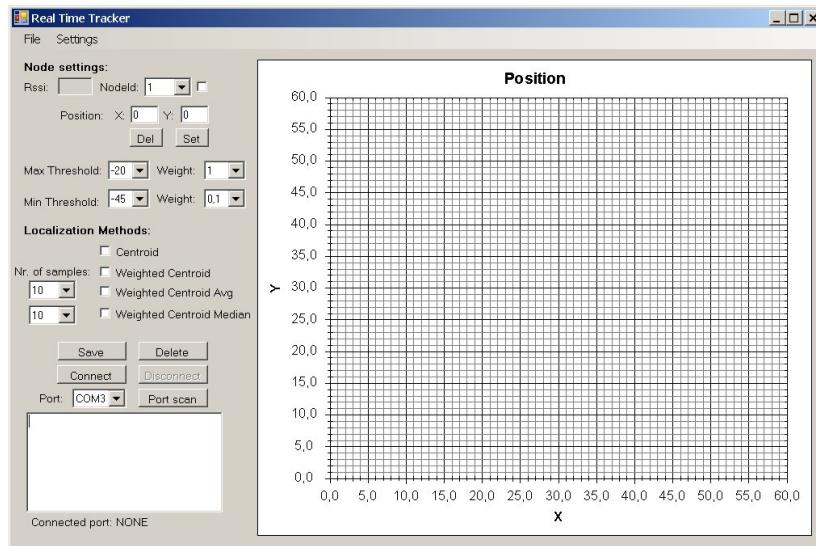
kde $P_t(x, y)$ je aktuální vypočtená pozice, $P_{t-1}(x, y)$ je předcházející vypočtená pozice, $P(x, y)$ je pozice vypočtená dle (4.3) a n je počet vzorků, který lze nastavit v Nr. of samples.

4.2.2.4 Váhovaná těžišťová lokalizace s mediánem

Ve Váhované těžišťové lokalizaci s mediánem (Weighted centroid localization median) se aktuální pozice počítá jako medián z několika posledních vypočtených poloh Váhované těžišťové lokalizace, počítané podle vzorce (4.3). Počet posledních vypočtených poloh, ze kterých je počítán medián, lze nastavit v Nr. of samples.

4.2.3 GUI

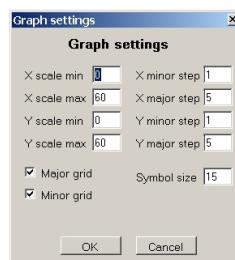
Hlavní okno na obr. 4.2 se skládá z nastavitelných údajů, které jsou v levé části, a z okna grafu zobrazují polohu senzorů v pravé části.



Obrázek 4.2: Hlavní okno aplikace

4.2.3.1 Graf

V grafu se zobrazují umístěně senzory a pokud je aktivní nějaká metoda pro určování polohy, tak se také zobrazí vypočtená poloha. V horní nabídce lze v Settings > Graph Settings otevřít okno s nastaveními grafu, které je vidět na obr. 4.3. V tomto okně lze nastavit maximální a minimální hodnoty os, měřítka os, zda se budou zobrazovat mřížky a jakou velikost budou mít symboly zobrazované v grafu. Senzor, který je vybrán v comboboxu NodeId, lze umístit nebo přemístit přímým zadáním souřadnic nebo klikáním myší.



Obrázek 4.3: Okno pro nastavení grafu

4.2.3.2 Nastavení senzorů

V levé horní části se nachází několik prvků pro nastavování senzorů. Z klávesnice lze zadat pozici umístěných senzorů a pokud je senzor s daným číslem aktivní zobrazuje se také aktuální hodnota RSSI. Dále se dají nastavit hodnotové prahy a jejich váha při určování polohy.

4.2.3.3 Ovládací tlačítka

V dolní části jsou umístěna ovládací tlačítka pro připojení a odpojení senzoru. Tlačítko označené Port scan slouží ke zjištění aktivních seriových portů pro rychlé určení portu ve kterém je připojen senzor. Dále lze tlačítkem označeným Save také ukládat údaje přečtené ze senzorů do souboru typu txt. Údaje se ukládají pouze pro aktivní senzory, tj. ty které jsou zobrazeny v grafu. Pro vymazání zaznamenaných údajů slouží tlačítko Delete.

Kapitola 5

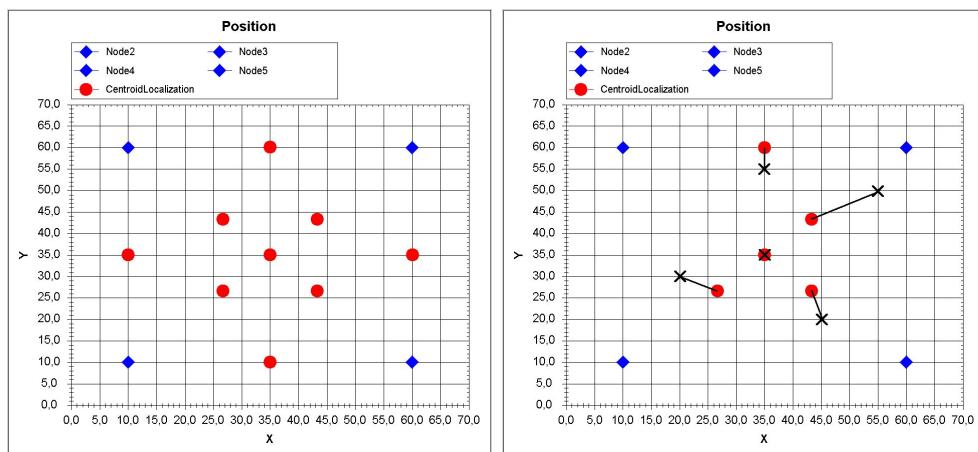
Výsledky

5.1 Provedené experimenty

Při všech experimentech byly všechny senzory orientovány jako na obr. 3.2 a mezi senzory se nevyskytoval žádný rušící prvek (např. ruka), pokud není uvedeno jinak.

5.1.1 Těžišťová lokalizace

Jak bylo popsáno dříve, tato metoda má předem omezenou množinu pozic, které může vrátit. Tyto pozice jsou zobrazeny na obr. 5.1(a) jako červené a modré symboly. Při tomto měření byla mezi senzory zvolena vzdálenost 50 cm a síla signálu byla nejmenší možná, tj. 1. Proměření několika bodů je na obr. 5.1(b), kde je krížkem označena skutečná pozice.

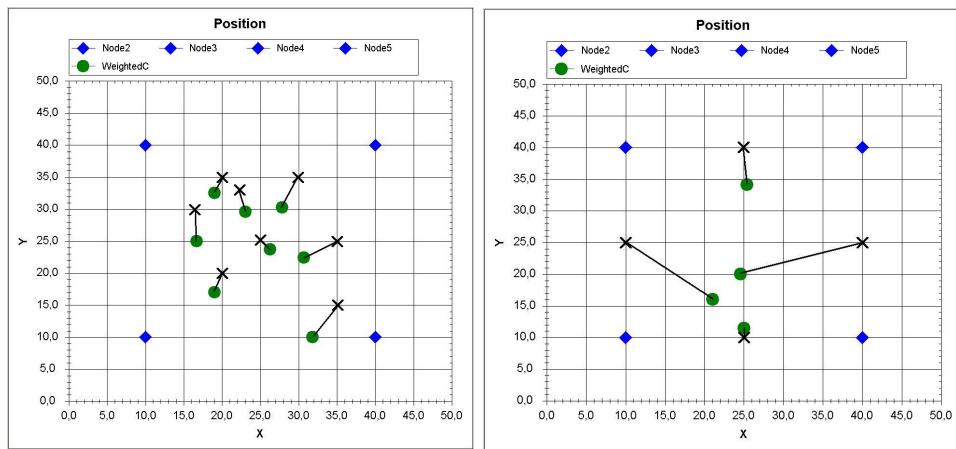


Obrázek 5.1: Těžišťová lokalizace: (a) možné pozice, (b) změřené chování pro nastavenou sílu signálu 1, měřítka os jsou v cm

Provedené měření ukázalo, že tato metoda je vhodná pouze pro určení plochy výskytu senzoru, kde každá plocha je reprezentována bodem zobrazeným na obr. 5.1(a).

5.1.2 Váhovaná těžišťová lokalizace

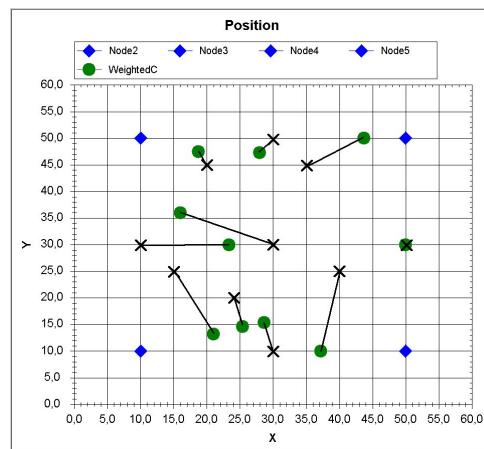
Tato metoda byla navržena pro fungování na vzdálenost 30 cm, při prvním měření byla proto zvolena čtvercová konfigurace s hranou délky 30 cm. V obr. 5.2 jsou zobrazeny výsledky měření s vyznačením skutečných pozic.



Obrázek 5.2: Váhovaná těžišťová lokalizace: síla signálu 1, horní práh -20 , váha 1, dolní práh -45 , váha 0, měřítka os jsou v cm

Na obr. 5.2(a) je vidět že měření blíže středu vykazují větší přesnost zjištěné polohy. Na obr. 5.2(b) lze pozorovat různou přesnost v krajních bodech, které jsou umístěny symetricky a vzdálenosti k senzorům mají stejné. Tato nežádoucí vlastnost je pravděpodobně způsobená vzájemnou orientací antén senzorů.

Při druhém měření byla zvolena čtvercová konfigurace s hranou délky 40 cm, cílem tohoto měření bylo vyzkoušet spolehlivost při větším oddálení senzorů. Výsledek měření je zobrazen na obr. 5.3.



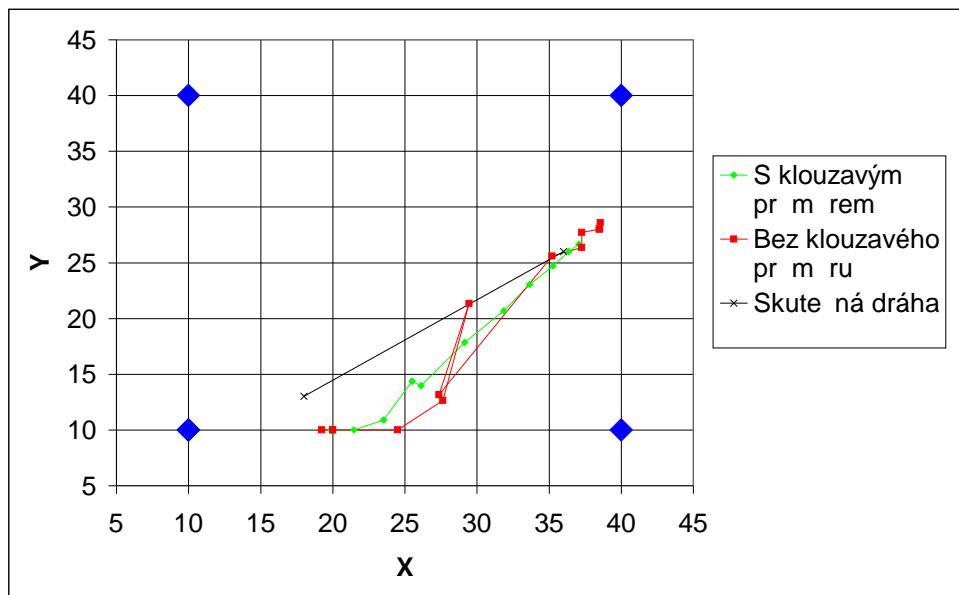
Obrázek 5.3: Váhovaná těžišťová lokalizace: síla signálu 1, horní práh -20 , váha 1, dolní práh -45 , váha 0, měřítka os jsou v cm

V obr. 5.3 je pozorovatelné snížení přesnosti oproti prvnímu měření. Ke zvýšení přesnosti v této vzdálenosti nepomáhaly ani pokusy se snížením dolního prahu až na -50 a zvyšování jeho váhy z 0 na 0,2.

5.1.3 Váhovaná těžišťová lokalizace s klouzavým průměrem a mediánem

Metoda s mediánem se osvědčila v použití při statických měřeních, protože dobře odfiltruje občasné výchylky v síle signálu, nebo když náhodou dojde ke ztrátě zprávy.

Metoda s klouzavým průměrem byla testována s pohybujícím se senzorem. Cílem bylo ověřit vhodnost pro zaznamenávání stopy. Bohužel manipulace se senzorem byla možná pouze rukou, která působila jako výrazně rušivý prvek. Při nízkém nastavení počtu vzorků (2 nebo 3) lze sledovat zaoblenější stopu než bez použití klouzavého průměru, jak je vidět na obr. 5.4. Nevýhodou je pomalá reakce na rychlou změnu směru a také odchylka od skutečné dráhy.



Obrázek 5.4: Porovnání váhované těžišťové lokalizace s klouzavým průměrem (počet vzorků: 3), bez klouzavého průměru a skutečné dráhy, měřítka os jsou v cm

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce byl návrh a implementace metod pro určení polohy v senzorové síti.

Protože byl použit hardware Crossbow telosb, využila se jeho hardwarová schopnost měřit RSSI. Hodnota RSSI posloužila jako ukazatel sily rádiového signálu. V kapitole 2 byla proměřena síla signálu pro různé orientace a vzdálenosti mezi senzory. Na základě změřených dat bylo rozhodnuto zaměřit se na kratší vzdálenosti, tj. 30 cm mezi senzory. V kapitole 3 byl navržen systém pro sběr dat ze senzorů, jejich vyhodnocování a grafické zobrazování v počítači. Pro vyhodnocování byly implementovány metody zjištěné z literatury, upravené pro použití na kratších vzdálenostech. Experimenty v kapitole 4 ukázaly, že žádnou z implementovaných metod se na krátkých vzdálenostech nedá dosáhnout vysoké přesnosti, hlavní omezení je pravděpodobně způsobeno nepříliš kvalitní integrovánou anténou. Vylepšení stávajícího Crossbow telosb o externí anténu by mohlo pomoci k přesnějšímu určení polohy.

Jako pokračování této práce by bylo vhodné pokusit se o určování polohy na velké vzdálenosti, řádově desítky metrů, nebo o lokalizaci uvnitř budov. Stávající systém by stačilo pouze rozšířit o nové metody.

Literatura

- [1] SINGH, I. *Real-time Object Tracking with Wireless Sensor Networks*. Luleå University Of Technology, Kiruna, Master thesis, 2007.
- [2] CROSSBOW TECHNOLOGIES. <http://www.xbow.com>.
- [3] CHIPCON. <http://http://www.chipcon.com/>.
- [4] MOTEIV CORPORATION. *Telos (rev B):PRELIMINARY Datasheet*. 2004.
- [5] TINYOS. <http://www.tinyos.net>.
- [6] NESC: A PROGRAMMING LANGUAGE FOR DEEPLY NETWORKED SYSTEMS. <http://nesc.sourceforge.net/>.
- [7] TINYOS DOCUMENTATION WIKI. <http://docs.tinyos.net/index.php/>.
- [8] LYMBEROPoulos, D., LINDSEY, Q., and SAVVIDES, A. *An Empirical Characterization of Radio Signal Strength Variability in 3-D IEEE 802.15.4 Networks Using Monopole Antennas*. 2005.
- [9] ZED GRAPH. <http://www.zedgraph.org>.
- [10] BULUSU, N., HEIDEMANN, J., and ESTRIN, D. *GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices*. 2000.
- [11] BLUMENTHAL, J., GROSSMANN, R., GOLATOWSKI, F., and TIMMERMANN, D. *Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks*. 2007.
- [12] AUERSVALD, M. *Wireless sensor network for monitoring patients with Parkinson's disease*. Czech Technical University in Prague, Diploma thesis, 2008.

- [13] SEVERINO, R. and ALVES, M. *Engineering a Search and Rescue Application with a Wireless Sensor Network - based Localization Mechanism*. Polytechnic Institute of Porto, School of Engineering (ISEP/IPP), 2006.
- [14] THOM, J. *Deciphering TinyOS Serial Packets*. Octave Technology, 2005.
- [15] WHITEHOUSE, K., KARLOF, C., and CULLER, D. *A Practical Evaluation of Radio Signal Strength for Ranging-based Localization*. 2007.
- [16] YUN, S., LEE, J., CHUNG, W., and KIM, E. *Centroid Localization Method in Wireless Sensor Networks using TSK Fuzzy Modeling*. Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, 2007.
- [17] GAY, D., LEVIS, P., CULLER, D., and BREWER, E. *nesC 1.1 Language Reference Manual*. 2003.

Příloha A

Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy, zkompilovaný program v jazyce C# a tato práce ve formátu pdf.

- \Dokumentace\: Bakalářská práce ve formátu pdf.
- \Senzory\: Zdrojové kódy implementace na senzorech.
- \C#\: Počítačový program jako projekt pro MS Visual Studio 2005, zdrojové kódy.