České Vysoké Učení Technické v Praze
Fakulta Elektrotechnická

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Lenka Mudrová

## Systémy lokalizace mobilního robotu

**Katedra kybernetiky**
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Faigl**

Praha, 2010

## Prohlášení

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

V Praze dne 27.5.2010 ..... Mrázová Z.

podpis

**Katedra kybernetiky**

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student:** Lenka M u d r o v á

**Studijní program:** Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný

**Obor:** Kybernetika a měření

**Název tématu:** Systémy lokalizace mobilního robotu

**Pokyny pro vypracování:**

1. Seznamte s úlohou "dead-reckoning" a přístupy řešení založené na optické myši.
2. Seznamte s úlohou majákové lokalizace mobilního robotu.
3. Navrhněte a realizujte systém lokalizace "dead-reckoning.
4. Navrhněte a realizujte systém lokalizace s majáky.
5. Oba přístupy porovnejte.

**Seznam odborné literatury:**


[1] Sekimori, D. and Miyazaki, F.: Self-localization for indoor mobile robots based on optical mouse sensor values and simple global camera information. In Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2005 IEEE International Conference on, pages 605-610, 0-0 2005.

[2] Palacin, J., Valgaon, I. and Pernia, R.: The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement. Sensors and Actuators A: Physical, 126(1):141 - 147, 2006.

[3] Sekimori, D. and Miyazaki, F.: Precise dead-reckoning for mobile robots using multiple optical mouse sensors. In Informatics in Control, Automation and Robotics II, pages 145-151, 2007.


**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Jan Faigl

**Platnost zadání:** do konce zimního semestru 2010/2011

L.S.

prof. Ing. Vladimír Mařík, DrSc.
**vedoucí katedry**

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
**děkan**

**V Praze dne** 30. 11. 2009

*Abstrakt*

Bakalářská práce se zabývá problémem lokalizace mobilního robota, který je motivován řešením tohoto problému v rámci studentské soutěže Eurobot. Tento problém je řešen dvěma základními přístupy. V prvním přístupu je problém formulován jako úloha dead-reckoning, která pro odhad pozice robota používá data vyčtená z optických myší. Druhým přístup reprezentuje metodu založenou na využití externí lokalizační infrastruktury a problém je formulován jako úloha trilaterace, která pro odhad pozice robota používá tři vzdálenosti mezi robotem a externími majáky. Tyto dvě metody byly vybrány právě proto, že představují základní možné přístupy lokalizace mobilního robota, které mohou být použity v soutěži Eurobot. V práci je popsán základní princip metod a konkrétní řešení odhadu pozice mobilního robota v pracovním prostoru. Dále je poukázáno na několik praktických problémů, jako je například mechanické provedení systémů nebo vyčítání dat přenosným počítačem, které je nutné vyřešit pro správnou funkci použitých lokalizačních systémů. Zvolené metody lokalizace byly experimentálně ověřeny v řadě reálných experimentů blízkých reálnému pohybu robota v podmínkách soutěže Eurobot.

*Abstract*

The bachelor thesis deals with a problem of mobile robot localization that is motivated by the practical requirement of the localization system for the Eurobot competition. Two approaches are considered in order to solved the problem. At first, the dead-reckoning method is used to estimate pose of the mobile robot from a set of optical mouses. The second approaches is based on the trilateration method using three distances between the robot and three external beacons. These two methods have been chosen mainly due to the fact that they represent basic already used methods for localization in the Eurobot competition. A description of principles and particular solutions of the methods is presented in the thesis. Besides, several practical issues, such as mechanical design of both systems, reading data from systems using a laptop, are described. A proper solution of these issues is required in order to have proper function of the used localization systems. The selected methods have been experimentally verified in a set of practical experiments with a real robot and testing scenarios that are close to real conditions of the Eurobot competition.

Velice děkuji Ing. Janu Faiglovi za trpělivost, ochotu a cenné rady, jak k obsahu práce, tak správnému psaní technického textu. Dále mu děkuji za všechen čas, který mi při konzultacích věnoval, za jeho zapálení do problematiky a především za to, že po mě vyžadoval pracovat systematicky.

Dále bych chtěla poděkovat bratrovi za to, že mi pomohl vytvořit některé obrázky, Jaroslavu Halgašíkovi za podporu a výrobu mechanické konstrukce pro uchycení myší, studentskému robotickému týmu FELaaCZech za inspiraci pro téma bakalářské práce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat rodičům za psychickou oporu.

# Obsah


Úvod . . . . . 1

**1 Definice úlohy** **3**
1.1 Úloha dead-reckoning . . . . . 3
1.1.1 Přístup k řešení na základě optických myší . . . . . 3
1.2 Úloha trilaterace . . . . . 4
1.2.1 Přístup řešení založený na majácích . . . . . 5

**2 Optické myši** **7**
2.1 Základní princip optických myší . . . . . 7
2.2 Parametry použitých myší . . . . . 8
2.3 Výpočet pozice robota . . . . . 8
2.3.1 Odhad pozice robota . . . . . 10
2.4 Identifikace parametrů . . . . . 11
2.5 Praktické realizace . . . . . 12
2.5.1 Mechanické uchycení myší . . . . . 12
2.5.2 Vyčítání dat z myší . . . . . 13
2.5.3 Otočení robota o úhel 360° . . . . . 14

**3 Majáková lokalizace** **15**
3.1 Statická identifikace polohy robota . . . . . 17
3.1.1 Bancroft algoritmus . . . . . 17
3.1.2 Hledání těžiště trojúhelníku . . . . . 19
3.2 Identifikace polohy robota při pohybu . . . . . 20
3.3 Praktická realizace . . . . . 21
3.3.1 Hardware majáku . . . . . 21
3.3.2 Identifikace polohy majáků . . . . . 21
3.3.3 Filtrace . . . . . 22

**4 Experimenty** **23**
4.1 Popis robota . . . . . 24
4.2 Popis hřiště . . . . . 24
4.3 Popis experimentů . . . . . 25
4.4 Identifikace parametrů . . . . . 26
4.5 Základní trajektorie v nízkých rychlostech . . . . . 26
4.6 Základní trajektorie ve vyšších rychlostech . . . . . 29
4.7 Obecná trajektorie . . . . . 31

4.8 Mapa chyb . . . . . 32

**5 Závěr** **34**

**Příloha A: Obsah CD** **38**

# Seznam obrázků


1 Vyobrazení herního hřiště pro téma „Nakrmit svět” . . . . . 1

1.1 Nárůst nejistoty určení polohy robota . . . . . 4
1.2 Princip trilaterace v rovině . . . . . 5

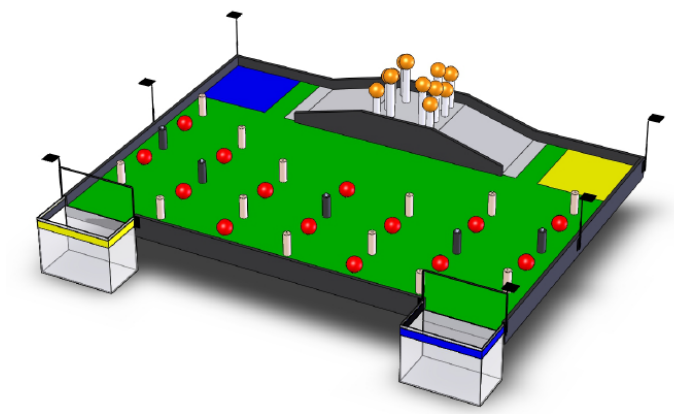
2.1 Vnitřní uspořádání optické myši . . . . . 8
2.2 Umístění myší vzhledem k souřadnému systému robota . . . . . 9
2.3 Schéma přítlačného systému pro uchycení myší . . . . . 12
2.4 Vyhotovené přichycení myší na tělo robota . . . . . 13
2.5 Identifikace parametrů s využitím laseru . . . . . 14

3.1 Princip měření vzdáleností mezi robotem a majáky . . . . . 15
3.2 Možná poloha robota při šumu v měření . . . . . 16
3.3 Oblasti řešení v Bancroftově algoritmu . . . . . 19
3.4 Aproximace trojúhelníkem . . . . . 19
3.5 Měření z majáků při pohybu robota . . . . . 20
3.6 Náhled na použité majáky . . . . . 21

4.1 Robot typu $G^2$Bot a jeho krokové motory . . . . . 24
4.2 Použité hřiště soutěže Eurobot . . . . . 25
4.3 Odhad pozice robota z majákové lokalizace . . . . . 27
4.4 Filtrované pozice z majákové lokalizace a lokalizace z myší . . . . . 27
4.5 Detailní porovnání lokalizací z jednotlivých metod . . . . . 28
4.6 Porovnání Bancroftova algoritmu a algoritmu aproximace trojúhelníkem 29
4.7 Odhad pozice robota s falešným určením a vyfiltrovaná data . . . . . 30
4.8 Detailní porovnání lokalizací z jednotlivých metod . . . . . 30
4.9 Porovnání lokalizací z obou metod . . . . . 32
4.10 Grafická prezentace chybové mapy . . . . . 33

# Úvod

Úloha lokalizace je jedním ze základních problémů autonomní navigace mobilního robota[1]. Problematika lokalizace se řeší již několik desetiletí, a proto existuje mnoho možných přístupů jak odhadovat pozici robota. V této práci jsou studovány dva možné přístupy lokalizace. První přístup reprezentuje metodu typu dead-reckoning založenou na inkrementálním odhadu změny pozice robota. Druhý přístup využívá externí lokalizační infrastruktury a poskytuje odhad absolutní pozice robota. Tyto přístupy jsou studovány na dvou konkrétních metodách využívající dvou systémů lokalizace, které jsou experimentálně porovnány. Za prvé je použit lokalizační systém složený z několika optických myší, ve druhém případě je použito tří ultrazvukových majáků rozmístěných v prostředí a jednoho majáku umístěného na robotovi. Tyto metody byly vybrány k porovnání právě proto, že jsou základními možnými přístupy lokalizace mobilního robota v rámci studentské mezinárodní soutěže Eurobot [5], která je jednou z motivací řešení této bakalářské práce.



Obrázek 1: Vyobrazení herního hřiště pro téma „Nakrmit svět"

V soutěži Eurobot se vždy utkávají proti sobě dva autonomní roboti na hřišti o rozměrech 3,0×2,1 m po dobu 90 s. Roboti mají rozměrová omezení na 120 cm v obvodu při startu a maximálně 140 cm v obvodu při hře, jejich výška je omezena na 35 cm. Konkrétní téma soutěže se každý rok mění, již se třídily odpadky (2007), sbíraly prvky na Marsu (2008) a stavěly chrámy z Atlantidy (2009). Letošním tématem je „Nakrmit svět", tedy po hřišti sesbírat co nejvíce herních prvků symboli-

[1] Český jazyk připouští dvě možnosti jak skloňovat slovo *robot*, podle životného nebo neživotného rodu. V bakalářské práci jsem se rozhodla používat rod životný, jelikož jsou pro mne roboti něčím víc, než jen pouhým strojem.

zujících ovoce a zeleninu a dopravit je do cílové oblasti. Hrací plocha je znázorněna na obrázku 1. Z pohledu lokalizace mohou týmy používat libovolný systém spojený přímo s tělem robota a dále mají k dispozici vždy tři stojánky na umístění „majáku" o rozměrech 8×8×16 cm, jejichž vnitřní funkce může být libovolná. Nad hřištěm není žádná konstrukce, kam by případně bylo možné umístit kameru a získávat tak náhled na hřiště.

Mezi nejčastěji používané metody lokalizace robota v rámci soutěže Eurobot patří základní vlečná odometrie či lokalizace ze zpracování obrazu kamery. Některé týmy se snaží použít jako doplněk k odometrii lokalizaci na základě optických myší. Přestože součástí hřiště jsou vyhrazené pozice na majáky, velmi málo týmů je používá, při tom se jedná o relativně nezávislý způsob globální lokalizace. Tato práce si klade za cíl ukázat, jak mohou být optické myši použity v lokalizaci robota a dále ukázat, že použití majáků není tak náročné a při správném použití může velmi dobře odhadovat pozici robota.

Z důvodu snahy použití systémů v rámci soutěže Eurobot, jsou na systémy používané v této práci kladena omezení vyplývající především z následujících klíčových atributů.

1. **Nízká cena** - vítězné týmy na mezinárodní soutěži sice mají rozpočet až desítky tisíc eur, ale soutěž je otevřena hlavně běžným studentům, kteří chtějí aplikovat své znalosti. Z tohoto pohledu jsou pořizovací náklady zásadní.

2. **Nenáročné řešení** - lokalizace je jedním ze základním systémů robota a při přípravě robota na soutěž Eurobot je nutno řešit i další problémy jako sbírání prvků, herní plánování apod. S ohledem na přípravu robota k soutěži je tedy vhodné realizovat lokalizační systém jako jednu z prvních komponent tak, aby bylo možné robota řádně otestovat a navrhnout různé herní strategie v dostatečném předstihu. Tedy vlastní realizace lokalizačního systému by měla být relativně snadná a přímočará.

3. **Snadné používání** - jednotlivé systémy robota musí být snadno ovladatelné jak při soutěži, tak i při testování. Proto je velmi žádoucí, aby byly schopny snadného připojení k běžnému přenosnému počítači. Jednoduchost použití zahrnuje také případná nastavení dílčích parametrů, na které není při vlastní soutěži mnoho času. Tedy v ideálním případ by mělo být postačující systém zapnout/připojit a ten by měl již bezchybně poskytovat dobrý odhad pozice robota.

# Kapitola 1

# Definice úlohy

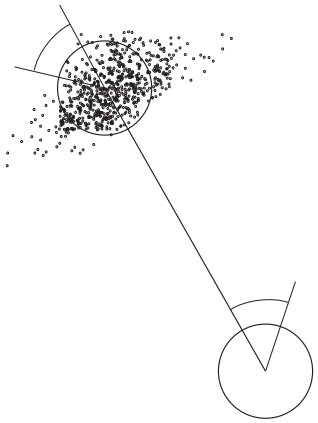
Problém lokalizace autonomního mobilního robota je v této práci řešen dvěma základními přístupy a to jako úloha dead-reckoning využívající znalosti předchozí polohy robota, a jako úloha trilaterace [16] využívající externího lokalizačního systému. V úloze dead-reckoning jsou pro odhad změny pozice robota použita data naměřená soustavou čtyř optických myší, které jsou připevněny přímo na tělo robota. Přestože se použitím bezkontaktního měření pohybu optickými senzory myší nejedná o klasickou odometrii, jsou data z myší svým charakterem vhodná pro aplikování metody dead-reckoning. Úloha trilaterace je řešena odhadem pozice robota ze tří vzdáleností od robota k definovaným referenčním bodům. Tyto vzdálenosti jsou poskytovány soustavou přijímacího majáku připevněného na robotovi a tří externích vysílacích majáků. V následujících částech této kapitoly jsou tyto dva přístupy blíže specifikovány, zejména s ohledem na použité realizace systémů lokalizace.

## 1.1 Úloha dead-reckoning

Dead-reckoning je princip lokalizace pohybujícího se robota využívající informace o předchozí poloze robota, směru robota a ujeté vzdálenosti. Cena realizace systému lokalizace využívající tohoto principu závisí především na použitém senzoru pro snímání ujeté vzdálenosti. Pokud je použit levný senzor, např. optické myši jako v této práci, lze o ceně mluvit jako o jedné z výhod metody dead-reckoning. Další výhodou je rychlost zpracování dat a výpočet polohy, který probíhá v podstatě inkrementálně. Jednou z hlavních nevýhod je však akumulace chyby, která způsobuje zvyšování nejistoty v určení polohy robota se zvětšující se délkou ujeté trajektorie, viz obrázek 1.1.

### 1.1.1 Přístup k řešení na základě optických myší

Počítačová optická myš, která slouží k posunu kurzoru po obrazovce, je jednoduchým a levným způsobem, jak zjistit posun ve dvou, na sebe kolmých směrech. Úspěšné používání myši k ovládání počítače je inspirací k vytvoření systému pro lokalizaci mobilního robota za použití právě optických myší. Na rozdíl od využití myší k pohybu kurzoru po obrazovce, kde se jedná o systém se zpětnou vazbou v podobě lidského oka, systém na robotovi tvoří otevřenou smyčku. Tento rozdíl je



Obrázek 1.1: Nárůst nejistoty určení polohy robota

důležitý, protože jednoduchost ovládání kurzoru může vést k dojmu, že použití myší pro lokalizaci je jednoduché a identické s pohybem kurzoru.

Problém však spočívá v tom, že pozice $P$, robota v rovině, je určena jeho polohou $X = (x, y)$ a natočením $\varphi$ ve zvolené souřadné soustavě:

$$P = (x, y, \varphi). \tag{1.1}$$

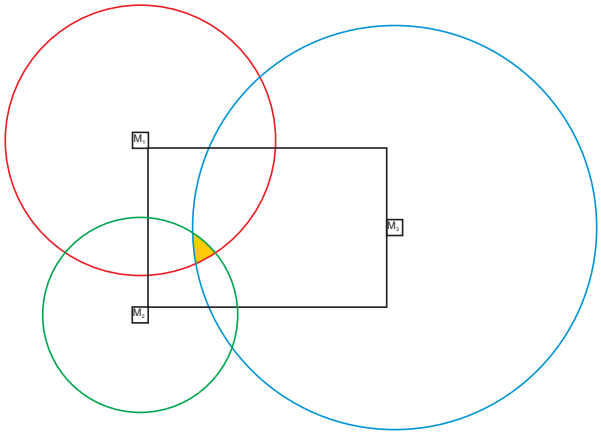
Tedy pozice je určena třemi parametry, avšak jediná myš poskytuje pouze dvě hodnoty změny polohy $\Delta x, \Delta y$ v na sebe kolmých směrech. Je tedy zřejmé, že jediná samotná myš nemůže sloužit k určení pozice robota. Proto je nutné data z myši doplnit o popis kinematických omezení robota a nebo použít dvě či více myší. Použití více myší je dále výhodné pro přesnější odhad pozice. Mohou tak být odhadovány chyby jednotlivých měření a pozice může být počítána pouze z důvěryhodnějších dat, neboť reálná měření jsou zatížena šumem a nejistotou.

Jedním z klíčových problémů přímého použití optických myší je zajištění definované výšku senzoru optické myši nad snímaným povrchem, neboť pouze tak je zajištěna správná funkce optické senzoru. To přímo souvisí s problémem praktického vyhotovení, při kterém je nutné řešit jak a kam myši správně na tělo robota připevnit. Dalším praktickým problémem je jak vyčítat data z myší. Tyto problémy jsou dále diskutovány v kapitole 2.

## 1.2 Úloha trilaterace

Trilaterace je metoda odhadu polohy objektů založená na geometrických relacích trojúhelníku obdobně jako triangulace. Při trilateraci se využívá dvou a více referenčních bodů se známými souřadnicemi, změřených délek mezi nimi a objektem, na rozdíl od triangulace, při které se pro odhad polohy objektu využívá změřených úhlů společně s alespoň jednou známou délkou. K odhadu polohy bodu v rovině za použití trilaterace jsou potřeba alespoň tři referenční body (majáky), viz obrázek 1.2. Problémem zde může být především členitost pracovního prostoru, kde v nějakém jeho

místě nemusí být k dispozici přímá viditelnost určitého majáku, tento problém se musí řešit vhodným počtem a umístěním referenčních bodů. V našem případě tento problém nenastával, jelikož hřiště pro soutěž Eurobot je obdélníkového tvaru.




Obrázek 1.2: Princip trilaterace v rovině

### 1.2.1 Přístup řešení založený na majácích

Princip trilaterace lze využít k lokalizaci robota na základě měření vzdáleností robota od tří externích majáků. Základní omezení tohoto přístupu je v tom, že pozice robota v rovině je dána třemi parametry $x, y, \varphi$, ale z naměřených vzdáleností mezi robotem a majáky $r_1, r_2, r_3$ se řešením úlohy trilaterace získá pouze odhad parametrů $x$ a $y$. Určení úhlu $\varphi$ je v případě, že robot mění svou aktuální polohu, možné založit na výpočtu odhadu okamžitého úhlu $d\varphi$ z polohy $(x(t), y(t))$ v časovém okamžiku $t$ a polohy $(x(t + \Delta t), y(t + \Delta t))$ v časovém okamžiku $t + \Delta t$ jako

$$d\varphi = \tan \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{x(t + \Delta t) - x_(t)}.$$

Pokud se robot otáčí kolem svého středu otáčení, jeho aktuální poloha zůstává ideálně neměnná a takto počítaná změna úhlu se nemění, přestože dochází ke změně absolutního úhlu $\varphi$. Z této metody tedy principiálně nelze získat určení $\varphi$ jako u optických myší a tento problém patří mezi hlavní nevýhody tohoto systému.

Při nezašuměném signálu se hledání polohy robota transformuje na problém nalezení průniku tří kružnic. Takový stav prakticky nenastane, jelikož šum, způsobený tepelným kmitáním molekul, ovlivňuje každé měření. Problém nalezení polohy reálného robota tedy není již tak jednoduchý a transformuje se na odhad pozice v oblasti vymezené částmi tří kružnic, viz obrázek 1.2.

Provedení majáků může být v zásadě libovolné, ale mezi metody používané v Eurobotu patří měření vzdálenosti ultrazvukem či infračerveným (IR) zářením. Obě metody jsou náchylné na rušení. U ultrazvuku je problém, že i další týmy mohou používat majáky na podobném principu a stejné pracovní frekvenci. V případě IR

záření je problém rušení ještě závažnější z důvodu rušení běžným osvětlením. U obou systémů je tedy potřeba volit vhodné pracovní frekvence.

V této práci je použit systém na základě měření vzdálenosti ultrazvukem. Funkce použitých majáků je založena na principu, že hlavní přijímací maják, který je umístěn na robotovi, postupně pošle jednotlivým majákům radiový impuls, na základě kterého majáky vyšlou puls ultrazvukového signálu. Hlavní maják si měří příslušné časové intervaly $t_1, t_2, t_3$ mezi vysláním příslušného radiového pulsu a přijetím ultrazvukového pulsu. Rozbor a řešení trilaterace je rozvedeno v kapitole 3.

# Kapitola 2

# Optické myši

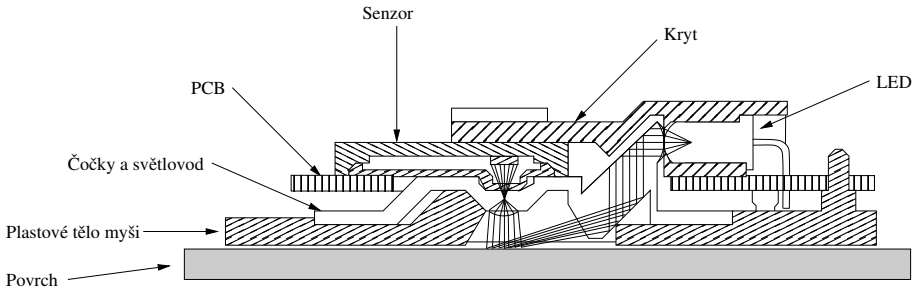
Hlavním účelem počítačové myši je snadnější ovládání počítače, které pracuje na základě transformace pohybu lidské ruky na pohyb kurzoru po obrazovce. Lidská ruka přitom pohybuje myší po podložce, tento pohyb je snímám senzorem v myši a změny polohy ve dvou, na sebe kolmých směrech ($\Delta x$, $\Delta y$), jsou daným protokolem posílány do počítače ke zpracování. Počítačové myši s optickým senzorem byly prakticky ihned po uvedení na trh použity v úloze lokalizace mobilního robota, proto lze nalézt na toto téma řadu odborných statí, které popisují základní přístupy a praktické problémy s realizací takového lokalizačního systému. O použití jedné optické myši pojednává článek [8]. Autoři [15] popisují jak využít více myší k výběru důvěryhodnějších dat. Mezi základní problémy dat poskytovaných z optických myší je značná závislost na povrchu, po kterém se pohybují [11], v takových případech lze přesnost lokalizace zvýšit použitím dalšího senzoru [14].

Na základě úspěšných aplikací myší v úloze lokalizace mobilního robota jsme realizovali vlastní systém složený ze čtyř optických myší. Tento počet umožňuje odhadovat chybná měření a polohu robota počítat z důvěryhodnějších dat. Přestože bylo publikováno několik přístupů, jak data z myší vyhodnocovat, například [15], rozhodli jsme se formulovat úlohu alternativně jako problém hledání transformace množiny dvou korespondujících bodů [10], která se například používá v úloze lokalizace metodou ICP (*Iterative Closest Point*) [9].

V následujících částech této kapitoly je uveden popis základního principu optické myši a parametry použitých myší. Sekce 2.3 se věnuje vyhodnocování pozice robota z naměřených dat. Dále je popsán způsob identifikace parametrů myší. Závěrečná sekce této kapitoly se věnuje praktickému vyhotovení, jak jsou použité myši připevněny k tělu robota, jak poskytovaná data z myší vyčítat a jak prakticky realizovat identifikaci parametrů myší.

## 2.1 Základní princip optických myší

Z pohledu lokalizace je nejdůležitější částí myši senzor snímání pohybu. Ten je v případě optické myši založen na bezkontaktním snímání povrchu podložky, po které se myš pohybuje, a porovnání dvou po sobě získaných snímků povrchu. Vnitřní uspořádání optické myši je znázorněno na obrázku 2.1.




Obrázek 2.1: Vnitřní uspořádání optické myši

Přesnost určení posunutí ve dvou, na sebe kolmých směrech ($\Delta x$, $\Delta y$) je ovlivněna principem činnosti a jednotlivými použitými komponentami. Snímky povrchu jsou pořizovány CMOS kamerou s malým rozlišením, obvykle 16×16 pixelů nebo 32×32 pixelů. Informace o posunutí je získávána komparací dvou po sobě následujících snímků povrchu za využití metody korelace. Ta porovnává jednotlivé pixely ve snímku a vyhodnocuje nejlepší vzájemné překrytí, pro které je následně určeno posunutí v osách $x$ a $y$. Korelaci provádí digitální signálový procesor (DSP).

Rychlost snímání a zpracování dat omezuje možnou rychlost pohybu myši z důvodu, že je vždy nutné zajistit určité minimální překrytí dvou sousedních snímků. Maximální udávané rychlosti pohybu standardní myši jsou přibližně 0,7 m.s$^{-1}$, ale některé aplikace mohou vyžadovat vyšší rychlosti. Těch lze docílit například zvětšením snímané oblasti modifikací optické soustavy. Tak lze snímanou oblast zvětšit z plochy řádově v jednotkách milimetrů čtverečních na stovky centimetrů čtverečních [6].

Přesnost je také ovlivněna množstvím detailů ve snímku povrchu. Použitím vhodného osvětlení povrchu lze docílit vyšší přesnosti, za prvé z důvodu lepšího osvícení nerovností povrchu na snímku, za druhé vlnová délka použitého osvětlení ovlivňuje rozlišení nerovností povrchu. Při použití laserové diody s koherentním zářením je tak docíleno vyšší přesnosti oproti běžné LED diodě.

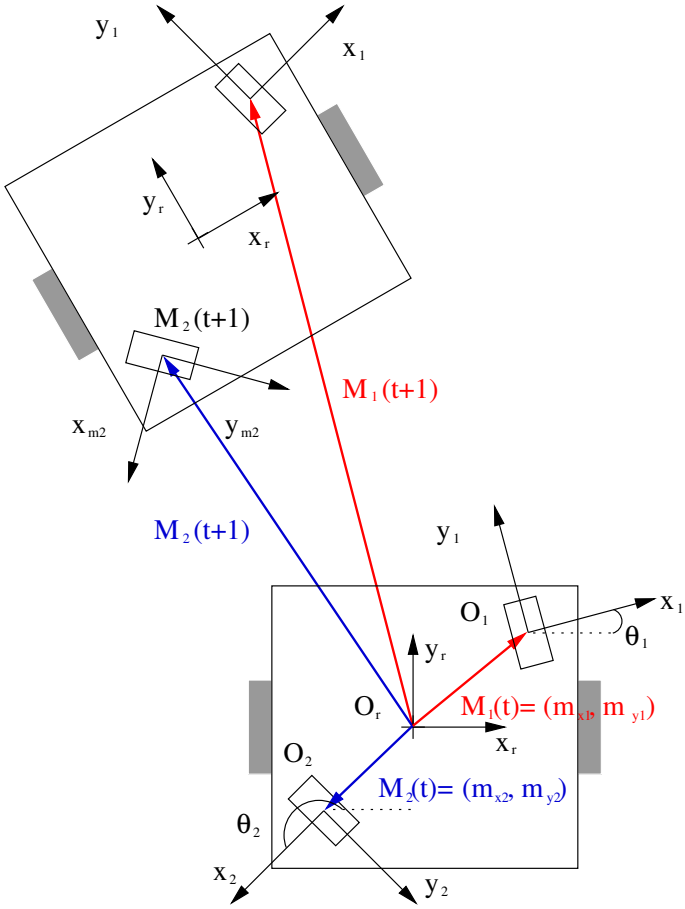
## 2.2 Parametry použitých myší

Při volbě vhodné optické myši byl vzhledem k ceně, velikosti a parametrům zvolen typ „Genius NetScroll+ Mini Traveler Laser“, zejména proto, že nabízí rozlišení 1600 dpi, maximální rychlost pohybu 28 palců za sekundu (0,7112 m.s$^{-1}$), zrychlení 20g. Senzor zpracuje 6600 snímků za sekundu s pracovní frekvencí procesoru 27 MHz. Rozměry myši jsou přibližně 9×5 cm, proto se snadno umístí na robota. Cena je přibližně 300 Kč včetně DPH.

## 2.3 Výpočet pozice robota

Pozice robota v globální souřadné soustavě je udávána vůči zvolenému referenčnímu bodu reprezentující robota. Z pohledu dílčích výpočtů je vhodné definovat souřadné soustavy robota a jednotlivých myší. Ty jsou zobrazeny na obrázku 2.2, který zachycuje změnu souřadných soustav při pohybu robota. Souřadný systém

robota $O_r$ je umístěn v jeho středu otáčení, s osami $x_r, y_r$, kde $y_r$ je ve směru jízdy robota. Myš $i$ je umístěna v bodě $M_i(t)$ o souřadnicích $M_i(t) = (x_{m_i}, y_{m_i})$ vůči počátku souřadnic $O_r$. V tomto bodě je umístěn souřadný systém myši $O_i$, který je otočen o úhel $\theta_i$ od souřadného systému $O_r$.




Obrázek 2.2: Umístění myší vzhledem k souřadnému systému robota

Pozice robota je definována třemi parametry $(x, y, \varphi)$, při pohybu robota z jedné pozice do jiné se z myší získá změna polohy ve dvou směrech $\Delta x_m$ a $\Delta y_m$. Pokud robot vykonal pouze translační pohyb, tedy $\varphi$ se nezměnilo, lze pro určení polohy použít prostá sumace přírůstků

$$x = \sum_{t=1}^{n} \Delta x_m(t), y = \sum_{t=1}^{n} \Delta y_m(t),$$

kde $n$ je počet přírůstků na dané dráze. Tento přístup odpovídá použití myši pro změnu pozice kurzoru na obrazovce, neboť myš zpravidla není otáčena.

V případě pohybu robota však dochází k otáčení a robot se může pohybovat po obecné trajektorii. V úloze dead-reckoning je možné použít aproximaci pohybu pro malý časový interval jako rotaci robota o úhel $\omega$ a translaci o určitou vzdálenost. Základní rovnice pro takový pohyby v diskrétním intervalu $\langle t, t+1 \rangle$ lze zapsat jako

$$\begin{aligned} \varphi(t+1) &= \varphi(t) + \omega \\ X(t+1) &= R_{\varphi(t+1)} T + X(t), \end{aligned} \tag{2.1}$$

kde $\varphi$ je orientace robota, $X$ je poloha robota v rovině vzhledem ke globálnímu počátku souřadnic, $R_{\varphi(t+1)}$ je rotační matice pro úhel $\varphi(t+1)$,

$$R_{\varphi(t+1)} = \begin{bmatrix} \cos\varphi(t+1) & -\sin\varphi(t+1) \\ \sin\varphi(t+1) & \cos\varphi(t+1) \end{bmatrix}$$

a $T$ je vektor translace popisující lokální změnu pozice robota. Problém odhadu pozice robota je tedy převeden na problém nalezení $\omega$ a $T$ z příslušných naměřených dat z myší.

### 2.3.1 Odhad pozice robota

Pokud robot vykoná pohyb v diskrétním časovém intervalu $\langle t, t+1\rangle$ z jedné pozice do jiné, pak nová pozice $i$-té myši $M_i(t+1)$ lze vyjádřit jako

$$M_i(t+1) = M_i(t) + R_{\theta_i} \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix}. \tag{2.2}$$

Takovou novou pozici lze vyjádřit pro každou myš, čímž se získá množina dvojic bodů: původních pozic myší $M_i(t)$ a nových pozic $M_i(t+1)$. Problém je pak možné formulovat jako hledání společné transformace jak převést body $M_i(t)$ na body $M_i(t+1)$ pro $k$ myší, tedy nalézt úhel $\omega$ a vektor $T$. Nalezení takové transformace lze formulovat jako optimalizační úlohu s kvadratickým kritériem

$$E(\omega, T) = \sum_{i=1}^{k} |R_\omega M_i(t) + T - M_i(t+1)|^2. \tag{2.3}$$

Řešení rovnice (2.3) je

$$\begin{aligned} \omega &= \arctan \tfrac{S_{xy'} - S_{yx'}}{S_{xx'} + S_{yy'}} \\ T &= \begin{bmatrix} \overline{x}' \\ \overline{y}' \end{bmatrix} - R_\omega \begin{bmatrix} \overline{x} \\ \overline{y} \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{2.4}$$

kde

$$\begin{aligned} \overline{x} &= \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i(t), & \overline{y} &= \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} y_i(t), \\ \overline{x}' &= \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i(t+1), & \overline{y}' &= \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} y_i(t+1), \\ S_{xx'} &= \sum_{i=1}^{k}(x_i - \overline{x})(x_i(t+1) - \overline{x}'), & S_{yy'} &= \sum_{i=1}^{k}(y_i - \overline{y})(y_i(t+1) - \overline{y}'), \\ S_{xy'} &= \sum_{i=1}^{k}(x_i - \overline{y})(y_i(t+1) - \overline{y}'), & S_{yx'} &= \sum_{i=1}^{k}(y_i - \overline{x})(x_i(t+1) - \overline{x}'). \end{aligned}$$

V [14] autoři uvedli postup výpočtu transformace vedoucí na výpočet pseudo-inverzní matice. My jsme se rozhodli využít analogie problému hledání transformace mezi pohybem myší a pohybem robota s problémem hledání transformace mezi dvěma množinami bodů popisující stejný objekt, který se používá například u metody ICP. V případě dat z myší není nutné řešit problém korespondence, určení změny pohybu pozice robota je tak pouze řešení optimalizačního kritéria. Uvedené řešení je oproti řešení s výpočtem pseudo-inverzní matice přímočařejší a umožňuje velmi jednoduše zahrnout data z další myši. Výpočet přímo využívá pouze základních matematickým operací jako je sčítání a násobení, což je zvláště výhodné při implementaci pro jednoduchý mikrokontrolér.

## 2.4 Identifikace parametrů

Pozice myší vůči $O_r$ je dána bodem $M_i = (m_{x_i}, m_{y_i})$ a orientací $\theta_i$. Tyto tři parametry je nutné identifikovat, aby bylo možné použít rovnici (2.4). Identifikace těchto parametrů lze provést z pohybu robota po dvou definovaných trajektoriích. Nejdříve je možné určit úhly $\theta_i$ z rovné jízdy. Pokud robot nevykonává rotaci, lze použít prostá sumace přírůstků

$$x_{c_i} = \sum_{t=1}^{n} \Delta x_m(t), y_{c_i} = \sum_{t=1}^{n} \Delta y_m(t).$$

Úhel $\theta_i$ je pak určen jako

$$\theta_i = \operatorname{atan} \frac{y_{c_i}}{x_{c_i}}.$$

Jsou-li známy úhly $\theta_i$, je možné každé dílčí měření z $i$-té myši $(\Delta x, \Delta y)$ natočit do souřadné soustavy robota a určit pozici myší $M_i$. To lze v případě robota s diferenciálním podvozkem provést z jeho rotačního pohybu o definovaný úhel $\omega$. Pokud robot vykoná pouze rotaci o velmi malý úhel $\Delta\omega$ je možné použít rovnici

$$\Delta\omega \begin{bmatrix} -m_{x_i} \\ m_{x_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix}, \tag{2.5}$$

kde $\Delta x_i$ a $\Delta y_i$ jsou příslušné změny polohy poskytované myší.

Z otočení robota o úhel $\omega$ lze určit polohu jednotlivých myší vůči středu robota ze sumace natočených příslušných změn polohy myší

$$\begin{aligned} m_{x_i} &= \frac{1}{\omega} \sum_{t=1}^{n} (\sin\theta_i \Delta x_i(t) + \cos\theta_i \Delta y_i(t)), \\ m_{y_i} &= -\frac{1}{\omega} \sum_{t=1}^{n} (\cos\theta_i \Delta x_i(t) - \sin\theta_i \Delta y_i(t)). \end{aligned} \tag{2.6}$$

Uvedeným postupem se tedy získá odhad pozice myší a jejich natočení vůči souřadné soustavě robota $O_r$.

## 2.5 Praktické realizace

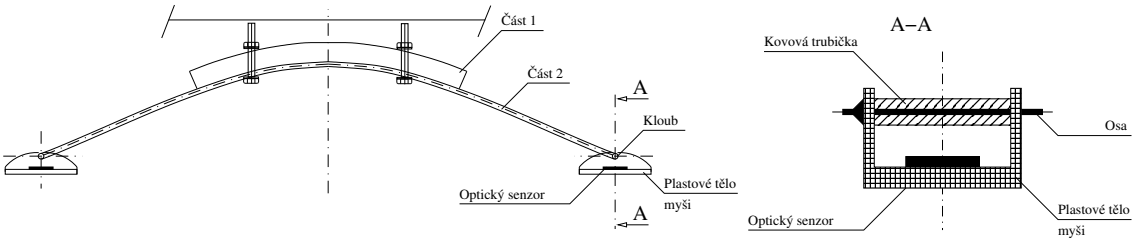
Tato část je věnována popisu fyzického osazení myší na tělo robota, popisu jak z myší potřebná data vyčíst a jak prakticky realizovat přesné otočení robota o úhel 360°.

### 2.5.1 Mechanické uchycení myší

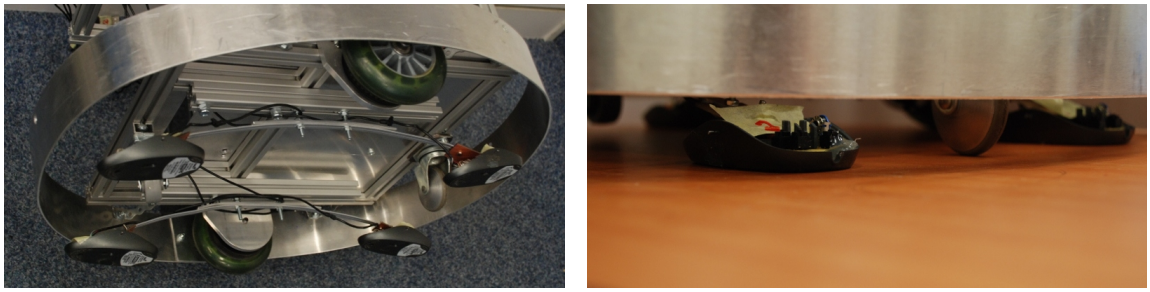
Důležitým parametrem mechanického umístění myší je usazení optického senzoru do definované výšky z důvodu správné projekce zaostřeného obrazu povrchu na rovinu snímacího čipu. Pokud definovaná výška není zajištěna, pak je obraz rozostřen a vyhodnocení posunu $\Delta x, \Delta y$ není správné. Pro použité myši vybavené senzorem PAW3601DH-NF je definovaná vzdálenost od spodní strany senzoru k podložce $7,45 \pm 0,14$ cm [1].

U běžného použití myší zajišťuje správnou výšku plastový obal, do kterého je mechanicky připevněna deska s optickým senzorem. Existují dva rozdílné přístupy, jak optický senzor přichytit k robotovi. Buď jej nechat v plastovém obalu, nebo jej vymontovat a použít jen základní desku, či ještě lépe, vyrobit si vlastní tištěný spoj se senzorem. První metoda je výhodná z hlediska nenáročnosti na výrobu tištěného spoje, naopak její nevýhoda je ve velikosti plastového obalu. Druhá metoda řeší nedostatek místa, ale je náročnější na výrobu a dodržení požadované přesnosti umístění optického senzoru. V této práci byla použita první metoda, zejména s ohledem na rychlost realizace, jelikož cílem práce je najít finančně nenáročné a rychlé řešení, které by mohlo být použito v rámci studentské soutěže Eurobot.

Požadovanou výšku senzoru je možné zajistit pružným přítlačným mechanismem, ale přítlak nesmí být příliš silný, aby myš dokázala přejíždět drobné nerovnosti povrchu. Schéma použitého systému je na obrázku 2.3, část 1 je vyrobena ze silnějšího pásku hliníkové slitiny a je mechanicky ohnuta tak, aby vytvořila podpůrný systém části 2, která tvoří hlavní pružnou část. Z myší byla odebrána horní část plastového obalu a v bočních stranách dolní části byly vyvrtány díry pro umístění osy otáčení, ke které je pevně připevněna pružná část systému. Na jedné pružné části jsou připevněny dvě myši. Na robota byly připevněny celkem dva tyto mechanismy jak je ukázáno na obrázku 2.4.




Obrázek 2.3: Schéma přítlačného systému pro uchycení myší



Obrázek 2.4: Vyhotovené přichycení myší na tělo robota

### 2.5.2 Vyčítání dat z myší

Způsob vyčítání surových dat z myší velmi záleží na použitém operačním systému (OS). V systémech založených na jádru Linux jsou myši dostupné prostřednictvím rozhraní `/dev/input/mouseX`, kde *X* je celé číslo symbolizující pořadí myši připojené k systému. Proto je nutné si před použitím ověřit, od kterého čísla začíná číslování, neboť to se může lišit v závislosti na konkrétním použitém OS. USB myš komunikuje přes ovladač, který poskytuje emulaci PS/2 protokolu. Tento protokol pracuje se sekvencí tří bytů, kde první byte je z pohledu lokalizace nepodstatný, je v něm uložená informace o stisknutých tlačítkách myši, další dva obsahují změnu polohy v $x$ a $y$ směru, tedy poskytují hodnoty od -127 do 127. Důležité je, že data myš poskytuje pouze tehdy, pokud se pohybuje (případně došlo ke změně stavu tlačítka), v opačném případě nevysílá žádnou zprávu.

Základní vyčítání dat je možné realizovat voláním funkce `getchar()` pro příslušný souborový deskriptor rozhraní `/dev/input/mouseX`. Tento přístup je však vhodný zejména pro jedinou myš, neboť volání funkce blokuje vykonávání programu do doby než je načten příslušný znak. Pokud takto vyčítaná myš pracuje správně, nepředstavuje volání funkce žádný problém. Ovšem pokud je myš například špatně uchycena a neposkytuje žádná data, funkce `getchar()` zůstane zablokovaná a neumožní tak vykonání další části programu, například vyčítání dalších myší nebo výpočet odhadu pozice robota. Tento problém lze řešit několika možnými přístupy, jedním z nich je použití funkce `poll`, která program upozorní, když jsou k dispozici nová data na příslušném rozhraní.

Použití funkce `poll` nad množinou souborových deskriptorů skrývá jedno drobné úskalí, neboť její zpracování proběhne relativně rychle (v závislosti na daném počítači, kde program běží) a způsobí tak, že je program upozorněn na příchozí data pouze z jediné myši. Metoda výpočtu uvedená v části 2.3.1 předpokládá, že došlo ke změně pozice všech myší, tak aby bylo možné odhadnout transformaci pozice robota. To je obzvláště důležité při filtraci dat z jednotlivých myší, neboť došlo-li ke změně pouze u jediné myši, tak na základně vypočtené transformace a chybě pro konkrétní myš z rovnice (2.3) bude vyhodnoceno chybné měření právě to, ve kterém (jediném) došlo ke změně. V takovém případě je nutné nejdříve vyčíst data ze všech myší a teprve následně počítat pozici robota.

Při testování výpočtu pozice robota může být pro sběr dat použit notebook, na kterém může běžet hlavní aplikace sběru dat a výpočtu pozice. Typicky na takovém

počítači běží nějaké grafické uživatelské prostředí a pohyb robota způsobí i pohyb kurzoru takového prostředí, což může být uživatelsky velmi nepříjemné. Je-li jako správce zařízení použit démon `hal`, je možné nežádoucí pohyb kurzoru po obrazovce odstranit použitím konfigurace uvedené ve výpisu 2.1, kterou lze umístit do souboru `/dev/hal/fdi/policy`.

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<deviceinfo version="0.2">
   <device>
      <match key="info.product" contains="Genius␣Laser␣Mouse">
         <remove key="input.x11_driver"></remove>
      </match>
   </device>
</deviceinfo>
```

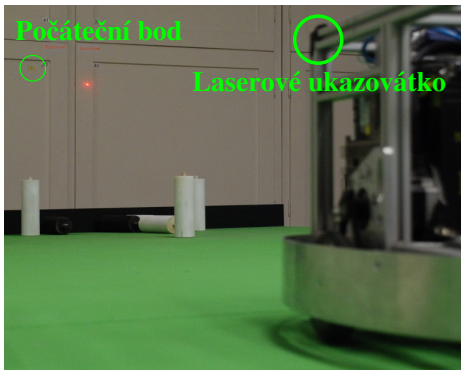
Výpis 2.1: Konfigurace pro zamezení pohybu kurzoru po obrazovce konkrétním typem myši

### 2.5.3 Otočení robota o úhel 360°

Při praktické realizaci identifikace parametrů optických myší, uvedené v části 2.4, může být problém jak docílit přesného otočení robota o definovaný úhel. Při experimentech byl použit následující postup otočení robota o úhel 360°.

1. Připevnění laserového ukazovátka na tělo robota.
2. Umístění robota do pracovního prostoru, bod z laserového ukazovátka se zaměří na protilehlou zeď, kde se vyznačí daný bod. Se vzdáleností zdi od robota se zvyšuje přesnost měření.
3. Robot vykoná rotační pohyb o necelých 360°.
4. Robot je manuálně natáčen tak, aby bod z ukazovátka překryl značku na stěně, tím se docílí otočky o 360°. Při manuálním otáčení je nutné postupovat velmi obezřetně a zajistit, aby se robot nevychýlil do stran.

Tento postup zajistí dostatečnou přesnost pro identifikaci parametrů. Na obrázku 2.5 je znázorněn robot, vyznačený bod a odraz laserového ukazovátka.

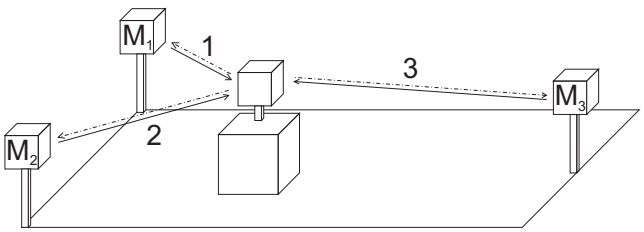



Obrázek 2.5: Identifikace parametrů s využitím laseru

# Kapitola 3

# Majáková lokalizace

Systém majákové lokalizace využívá majáků, které poskytují vzdálenost robota od definovaných míst pracovního prostoru robota. V našem případě jsou tři ultrazvukového majáky umístěny na dedikovaných místech v okolí vlastní hrací plochy hřiště soutěže Eurobot. Poskytované vzdálenosti reprezentují poloměry tří kružnic $r_1, r_2, r_3$ se středem definovaným pozicí majáku, robot se pak pro jednotlivé měření nachází na obvodu příslušné kružnice a jeho pozici je možné odhadnout metodou trilaterace. Formulace úlohy lokalizace a postup řešení při použití ultrazvukových majáku lze nalézt v [13].

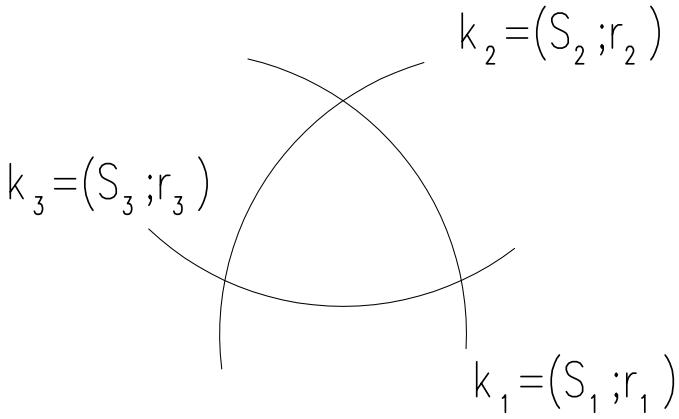



Obrázek 3.1: Princip měření vzdáleností mezi robotem a majáky

Základní princip použitého majákového systému je založen na měření času šíření ultrazvukového pulsu mezi dvěma majáky, princip je zobrazen na obrázku 3.1. Hlavní přijímací maják, který je umístěn na robotovi, postupně poveluje jednotlivé majáky radiovým impulsem, na základě kterého majáky vyšlou puls ultrazvukový. Hlavní maják si měří příslušné doby $t_1, t_2, t_3$ mezi vysláním příslušného radiového pulsu a přijetím ultrazvukového pulsu. Měřenou vzdálenost lze pak určit ze znalosti rychlosti šíření ultrazvuku, která je ovlivněna několika parametry. Především se jedná o teplotu a vlhkost vzduchu, proto je nutné pro minimalizaci chyby zamezit velkým teplotním změnám v místnosti, kde se robot pohybuje. Vztah mezi vzdáleností $r$ a časem $t$

je proporcionální a lze jej vyjádřit jako lineární závislost $r = at$, kde $a$ je příslušná převodní konstanta. Při vlastní zpracování signálu však dochází k nutnému dopravnímu zpoždění, proto je vhodnější spíše uvažovat převodní vztah $r = at + b$, kde $b$ vyjadřuje příslušné dopravní zpoždění. Použité hodnoty parametrů $a, b$ jsou uvedeny v kapitole 4, věnované experimentům.

V následujícím popisu metod určení pozice robota je předkládána známá poloha všech majáků, která je značena jako $(x_i, y_i)$ pro $i \in \{1, 2, 3\}$. Pozice robota je značena $(x, y)$. V popisu přístupu vypočtu odhadu polohy robota se vychází z ideálního případu, kdy jednotlivé vzdálenosti $r_i$ odpovídají identickému časovému okamžiku a kdy příslušná měření nejsou zatížena šumem, což vedena na problém nalezení společného průsečíku tří kružnic. Tato idealizovaná situace však nedostatečně modeluje reálné podmínky, proto jsou postupně v následujících částech jednotlivé podmínky relaxovány a problém se transformuje na odhad pozice robota v oblasti vymezené částmi tří kružnic. Příklad takové oblasti je znázorněn na obrázku 3.2. Obsah této oblasti lze interpretovat jako možnou nepřesnost určení polohy.




Obrázek 3.2: Možná poloha robota při šumu v měření

Tato kapitola je organizována následovně. V části 3.1 je řešena základní úloha určení pozice robota za předpokladů známé polohy majáků a vzdáleností k jednotlivým majákům z identického časového okamžiku $t$. Jsou zde popsány dvě metody řešení. První metoda využívá Bancroftova algoritmu [7]. Druhá metoda je založena na intuitivní aproximaci oblasti, kde se robot může nacházet, trojúhelníkem. Následující část 3.2 problém zobecňuje a uvažuje případ, kdy jsou jednotlivé vzdálenosti $r_i$ měřeny v různých časových okamžicích. V části 3.3 je uveden stručný popis použitých majáků, způsob odhadu pozic jednotlivých majáku a diskuse filtrace nedůvěryhodných odhadů polohy robota.

## 3.1 Statická identifikace polohy robota

V případě bez šumu v měření vzdálenosti lze definovat tři rovnice popisující kružnice se středem v bodě $(x_i, y_i)$ reprezentují polohu příslušného majáku

$$\begin{array}{rcl} (x-x_1)^2+(y-y_1)^2 & = & r_1^2 \\ (x-x_2)^2+(y-y_2)^2 & = & r_2^2 \\ (x-x_3)^2+(y-y_3)^2 & = & r_3^2 \end{array}, \tag{3.1}$$

kde bod $(x, y)$ je neznámá poloha robota a $r_i$ jsou naměřené vzdálenosti mezi majáky a robotem.

Tyto rovnice lze rozšířit o uvažování nepřesnosti měření vzdálenosti $r_i$ o vliv působení šumu $f(r_i)$ závislého na vzdálenosti robota od majáku a aditivní chybu $\xi$

$$\begin{array}{rcl} (x-x_1)^2+(y-y_1)^2 & = & (r_1+f(r_1)+\xi)^2 \\ (x-x_2)^2+(y-y_2)^2 & = & (r_2+f(r_2)+\xi)^2 \\ (x-x_3)^2+(y-y_3)^2 & = & (r_3+f(r_3)+\xi)^2 \end{array}. \tag{3.2}$$

Šum $f(r_i)$ se v reálném případě sice projeví, ale jeho vliv je obtížné správně modelovat, proto jeho působení není dále explicitně uvažováno. V experimentech, část 4.8, je vliv šumu $f(r_i)$ měřen v takzvané chybové mapě.

Při zjednodušeném náhledu na vztah mezi vzdáleností a časem $r_i = ct_i$ a $\xi = ct$ lze upravit rovnice (3.2) na tvar

$$x^2 - 2xx_i + x_i^2 + y^2 - 2yy_i + y_i^2 = c^2t_i^2 - 2c^2t_it + c^2t^2,$$

které lze dále upravit na

$$2(x_ix + y_iy - c^2t_it) = x^2 + y^2 - c^2t^2 + x_i^2 + y_i^2 - c^2t_i^2. \tag{3.3}$$

Tuto soustavu rovnici lze řešit Bancroftovým algoritmem. Alternativně lze řešení nalézt na základě aproximace útvaru vymezeného částmi kružnic trojúhelníkem. Pozice robota je pak vypočtena jako těžiště příslušného trojúhelníka, jehož obsah je mírou věrohodnosti takto odhadnuté pozice.

### 3.1.1 Bancroft algoritmus

Bancroftův algoritmus poskytuje řešení problému trilaterace. Tento princip je používán v systému GPS a jeho detailní popis lze nalézt v [2]. Idea algoritmu vychází z rovnice (3.3), která má po rozepsání tvar

$$\begin{array}{rcl} 2(x_1x+y_1y-c^2t_1t) & = & x^2+y^2-c^2t^2+x_1^2+y_1^2-c^2t_1^2 \\ 2(x_2x+y_2y-c^2t_2t) & = & x^2+y^2-c^2t^2+x_2^2+y_2^2-c^2t_2^2 \\ 2(x_3x+y_3y-c^2t_3t) & = & x^2+y^2-c^2t^2+x_3^2+y_3^2-c^2t_3^2 \end{array},$$

který lze intuitivně upravit následujícími kroky. Nejdříve je definován vektor neznámých $\mathbf{s}$ jako

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ ct \end{bmatrix}.$$

Levou stranu rovnice lze následně vyjádřit jako maticové násobení $2A\mathbf{s}$, kde

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & -ct_1 \\ x_2 & y_2 & -ct_2 \\ x_3 & y_3 & -ct_3 \end{bmatrix}.$$

Pro pravou stranu rovnice je možné využít Lorenzovy normy vektoru $\mathbf{s}$ a definovat $\lambda$ jako

$$\lambda =< \mathbf{s}, \mathbf{s} >= x^2 + y^2 - c^2t^2. \tag{3.4}$$

Dále lze definovat vektor $\mathbf{b}$ jako

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 - c^2t_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 - c^2t_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 - c^2t_3^2 \end{bmatrix}.$$

Pravá strana rovnice pak přechází na tvar $\lambda\mathbf{I} + \mathbf{b}$, kde $\mathbf{I}$ je jednotková matice. Tímto postupem lze získat nový zápis rovnice (3.3) ve tvaru

$$2A\mathbf{s} \quad = \quad \lambda\mathbf{I} + \mathbf{b}. \tag{3.5}$$

Řešením rovnice (3.5) je

$$\mathbf{s} = \lambda\mathbf{d} + \mathbf{e}, \tag{3.6}$$

kde

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &= 0,5A^{-1}\mathbf{I}, \\ \mathbf{e} &= 0,5A^{-1}\mathbf{b}. \end{aligned}$$

Takto získané řešení lze použít pro formulaci optimalizační úlohy pro kvadratické kritérium a to jako Lorenzova norma obou stran rovnice (3.6), což vede na zápis

$$< \mathbf{s}, \mathbf{s} >=< \mathbf{d}, \mathbf{d} > \lambda^2 + 2 < \mathbf{d}, \mathbf{e} > \lambda + < \mathbf{e}, \mathbf{e} > . \tag{3.7}$$

Tuto rovnici lze s využitím znalosti $\lambda =< \mathbf{s}, \mathbf{s} >$ zapsat jako

$$\lambda =< \mathbf{d}, \mathbf{d} > \lambda^2 + 2 < \mathbf{d}, \mathbf{e} > \lambda + < \mathbf{e}, \mathbf{e} >, \tag{3.8}$$

a následně přepsat jako

$$\alpha\lambda^2 + \beta\lambda + \gamma = 0, \tag{3.9}$$

kde

$$\begin{aligned} \alpha &= < \mathbf{d}, \mathbf{d} > &&= x_d^2 + y_d^2 - c^2t_d^2, \\ \beta &= 2 < \mathbf{d}, \mathbf{e} > -1 &&= 2x_dx_e + 2y_dy_e - 2c^2t_dt_e - 1, \\ \gamma &= < \mathbf{e}, \mathbf{e} > &&= x_e^2 + y_e^2 - c^2t_e^2. \end{aligned}$$

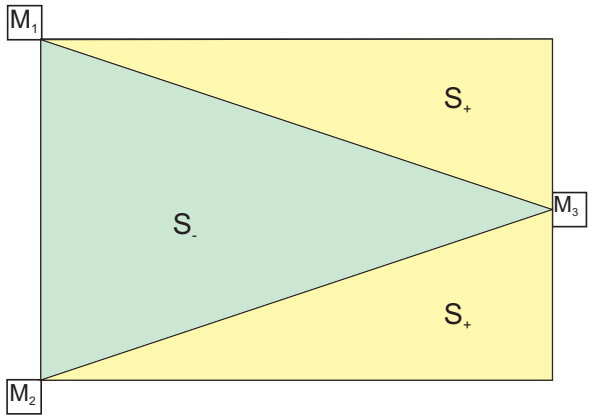
Hledané řešení kvadratického kritéria je

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_+ &= \lambda_+\mathbf{d} + e \\ \mathbf{s}_- &= \lambda_-\mathbf{d} + e \end{aligned}, \tag{3.10}$$

kde

$$\begin{aligned} \lambda_+ &= 0,5\alpha^{-1}(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}), \\ \lambda_- &= 0,5\alpha^{-1}(-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}). \end{aligned}$$

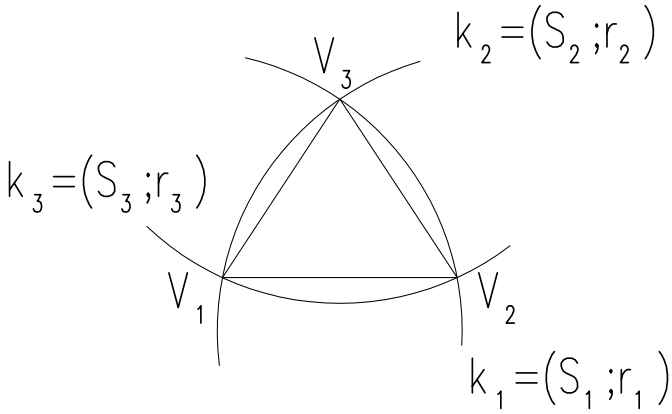
Pozice $\mathbf{s}_-$ leží ve vnitřní oblasti mezi majáky, naopak pozice $\mathbf{s}_+$ ve vnější oblasti, viz obrázek 3.3.




Obrázek 3.3: Oblasti řešení v Bancroftově algoritmu

### 3.1.2 Hledání těžiště trojúhelníku

Tento algoritmus je založen na myšlence aproximace útvaru vyčleněného částmi kružnic trojúhelníkem. Tím samozřejmě vzniká chyba, která se bude zvětšovat čím bude útvar větší, nebo-li čím bude šum větší. Tato chyba je úměrná délce kruhových úsečí, jak je ilustrováno na obrázku 3.4. Odhad polohy robota je umístěn do těžiště takové trojúhelníka. Tento postup je intuitivní a vychází z přímé geometrické aproximace. Hlavním důvodem uvedení tohoto naivního algoritmu v této práci je porovnání takto získané pozice robota s řešením získaným Bancroftovým algoritmem uvedeným v části 4.




Obrázek 3.4: Aproximace trojúhelníkem

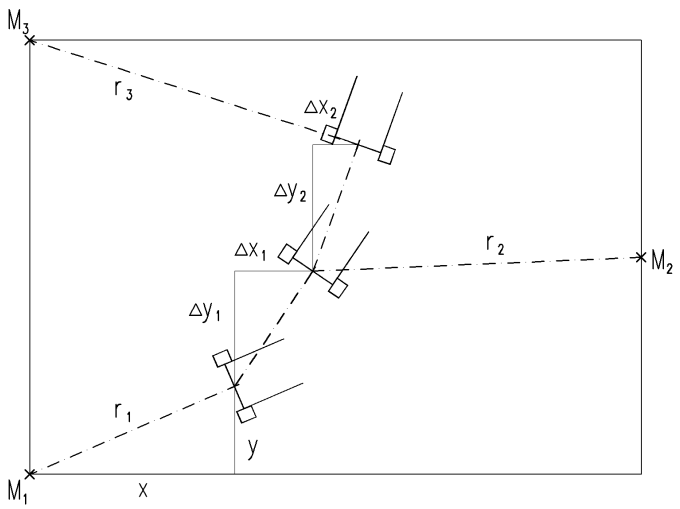
Naivní algoritmus odhadu pozice vychází z uvažování možných trojúhelníků definovaný z průsečíků dvou kružnic. Nejdříve jsou tedy nalezeny možné průsečíky každé dvojice kružnic. Tedy může být k dispozici až šest takových průsečíků, což vede na osm možných trojúhelníků. Hledaný trojúhelník je ten s nejmenším obsahem a jehož těžiště leží uvnitř všech tří kružnic. Při hledání průsečíků dvou kružnic je nutné ošetřit případy kdy existuje jedno, dvě či nekonečně řešení a kdy neexistuje žádné

řešení. Žádné řešení nastane tehdy, je-li minimálně jedno měření chybné na základě odrazu ultrazvuku v místnosti, takto chybně změřený poloměr je velký a tedy ostatní kružnice leží uvnitř této chybné kružnice. Jedno řešení nastane v optimální případě bez šumu, dvě řešení nastanou působením šumu. Nekonečně řešení odpovídá situaci úplné shody dvou kružnic, což v našem případě nenastane, jelikož se polohy středů liší.

## 3.2 Identifikace polohy robota při pohybu

Problém trilaterace lze rozšířit o řešení problému, kdy vzdálenosti mezi robotem a majáky $r_i$ nejsou měřeny v jediném časovém okamžiku $t$. Tato situace odpovídá reálném použití ultrazvukových majáků, při kterém je vždy oslovován pravě jeden maják a teprve po změření odezvy je aktivován maják následující. V případě statického robota nebo pomalého pohybu robota vůči rychlosti měření není nezbytně nutné rozdílné časy měření uvažovat, neboť možná chyba je vůči přesnosti určení pozice robota zanedbatelná. Naproti tomu v případě rychlejšího pohybu robota může být rozdíl času významný.

Pro uvažování pohybu robota mezi jednotlivými měřením je nutné pohyb robota modelovat, případně jinak odhadovat a algoritmy uvedené v sekci 3.1 je nutné upravit. Změnu pozice robota mezi dvěma měřením lze modelovat jako změnu polohy o $(\Delta x, \Delta y)$ mezi příjmem informací z jednotlivých majáků. Situace je znázorněna na obrázku 3.5. Potřebnou informaci o změně polohy lze získat z modelu pohybu na základě úlohy dead-reckoning, tedy využití znalosti o předchozí pozici. Při uvažování




Obrázek 3.5: Měření z majáků při pohybu robota

změny pozice robotu mezi prvním a druhým měřením o $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ a mezi druhým

a třetím měřením o $(\Delta x_2, \Delta y_2)$ přechází rovnice (3.1) na tvar

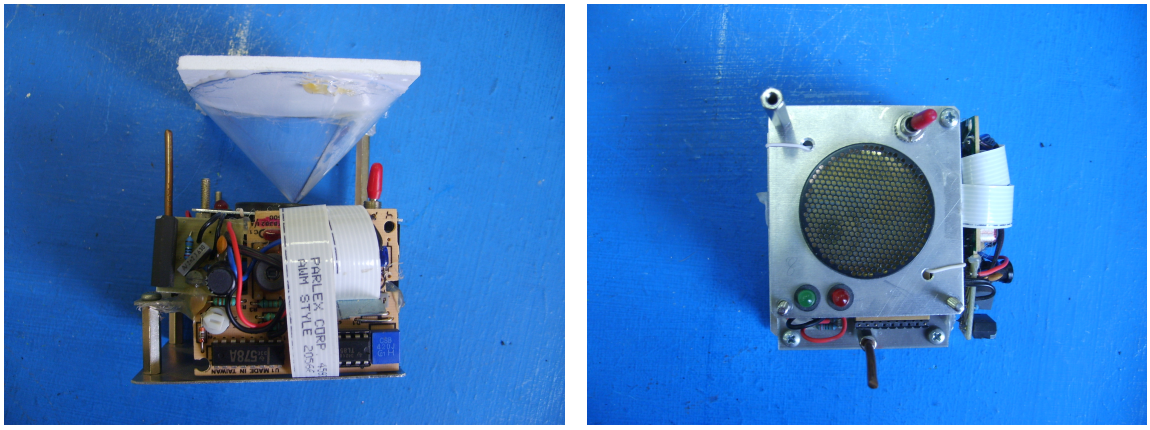
$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= r_1^2 \\ ((x + \Delta x_1) - x_2)^2 + ((y + \Delta y_1) - y_2)^2 &= r_2^2 \\ ((x + \Delta x_1 + \Delta x_2) - x_3)^2 + ((y + \Delta y_1 + \Delta y_2) - y_3)^2 &= r_3^2 \end{aligned} . \tag{3.11}$$

Z rovnic je patrné, že se změna projeví jako změna polohy jednotlivých majáků, jinak problém zůstane nezměněn a oba popsané algoritmy lze tedy přímo použít.

## 3.3 Praktická realizace

### 3.3.1 Hardware majáku

Použité majáky obsahují dvě základní funkční části: obvod pro radiovou komunikaci a obvod pro příjem či vyslání ultrazvukového pulsu [3]. Obvod pro radiovou komunikaci je schopen vysílat a přijímat sériová data a ke komunikaci využívá speciálního komunikační protokol. S majákem je dále možné komunikovat dedikovaným rozhraním RS232, které primárně slouží k připojení majáku k nadřazenému počítači. Obvod pro příjem či vyslání ultrazvukového pulsu používá sonar Polaroid 6500, který vždy vyšle 16 ultrazvukových pulsů s frekvencí 50 kHz. Maják je mechanicky rozčleněn do čtyř horizontálních úrovní, kde nejnižší úroveň je určena pro baterku, v dalších dvou jsou jednotlivé obvody a v poslední úrovni je umístěn kužel pro směrování šíření ultrazvukového pulsu. Náhled na maják je zobrazen na obrázku 3.6.




Obrázek 3.6: Náhled na použité majáky

### 3.3.2 Identifikace polohy majáků

Metody výpočtu pozice robota ze změřených vzdáleností mezi robotem a majáky předpokládá známé absolutní pozice příslušných majáků. Základní přístupem je polohu majáků určit je zaměřit ji manuálně. Tento přístup je však nepraktický pro větší vzdálenosti, zvláště tehdy, není-li k dispozici vhodný měřící prostředek, např.

laserový dálkoměr. V případě dobře definovaného pracovního prostoru robota, jako je například hřiště soutěže Eurobot, lze využít snadno definovatelných pozic robota v prostoru.

V našem případ je tedy možné robota umístit do definovaných pozic a pro každou takovou pozici změřit vzdálenost $r_i$ robotu k jednotlivým majákům. Pro identifikaci polohy jednoho majáku je zapotřebí minimálně tří definovaných pozic robota v pracovním prostoru. S ohledem na dispozici obdélníkového hřiště soutěže Eurobot se jako nejjednodušší možnost nabízí zadokování robota do tří rohů. Výpočet polohy majáků je pak totožný jako při výpočtu polohy robota, neboť středy kružnic leží ve známých polohách robota a neznámé souřadnice $(x, y)$ reprezentují v tomto případě polohu majáku.

### 3.3.3 Filtrace

Při použití naměřených vzdáleností $r_i$ z ultrazvukových majáků a vypočtení možné polohy robota se může získat i naprosto nesmyslná poloha robota. To se může například stát tehdy, pokud dojde k příjmu odraženého ultrazvukového pulsu v místnosti. Takové falešné polohy robota je nezbytné filtrovat následujícím postupem.

V prvním kroku se kontroluje, zda-li vypočtená poloha robota vůbec leží v prostoru hřiště, přičemž je vhodné zohlednit velikost robotu a očekávanou přesnost lokalizace. V dalším kroku je možné dále porovnat aktuální vypočtenou pozicí s předchozí pozicí. Je-li rozdíl mezi nimi větší než zvolená hodnota, odvozená z maximální možné rychlosti robota a časovým intervalem mezi odhady pozice robota, je možné takovou pozici považovat za chybu a dále ji neuvažovat. V následujícím kroku se aktuální pozice porovná s poslední správnou. Tímto postupem lze získat věrohodnější odhady pozice robota.

# Kapitola 4

# Experimenty

Pro ověření diskutovaných systémů lokalizace založených na soustavě optických myší a soustavě ultrazvukových majáků bylo navrženo několik experimentů, ve kterých byla studována *přesnost* a *opakovatelnost* odhadu pozice mobilního robota. Všechny experimenty byly provedeny s robotem typu $G^2$Bot [4], který poskytuje natolik přesnou odometrii, že její hodnoty mohou být v provedených experimentech považovány za referenční. Experimenty byly provedeny na testovacím hřišti určeném na soutěž Eurobot, které se od hřiště na národním kole liší především použitým materiálem desek. V každém experimentu byl robot opakovaně navigován po definované trajektorii a kvalita lokalizace je měřena jako průměrná odchylka $\overline{d}$ mezi vypočtenou a referenční koncovou polohou robota, opakovatelnost je pak vyjádřena jako výběrová směrodatná odchylka $s_n$. Tedy pro $n$ trajektorií, koncovou referenční polohu $(x_r, y_r)$ a vypočtený odhad pozice robotu příslušnou metodou (myši nebo majáky) $(x_i, y_i)$ je chyba jednotlivé jízdy určena jako

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - x_r)^2},$$

a chyba (přesnost) příslušné lokalizační metody je pak

$$\overline{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} d_i$$

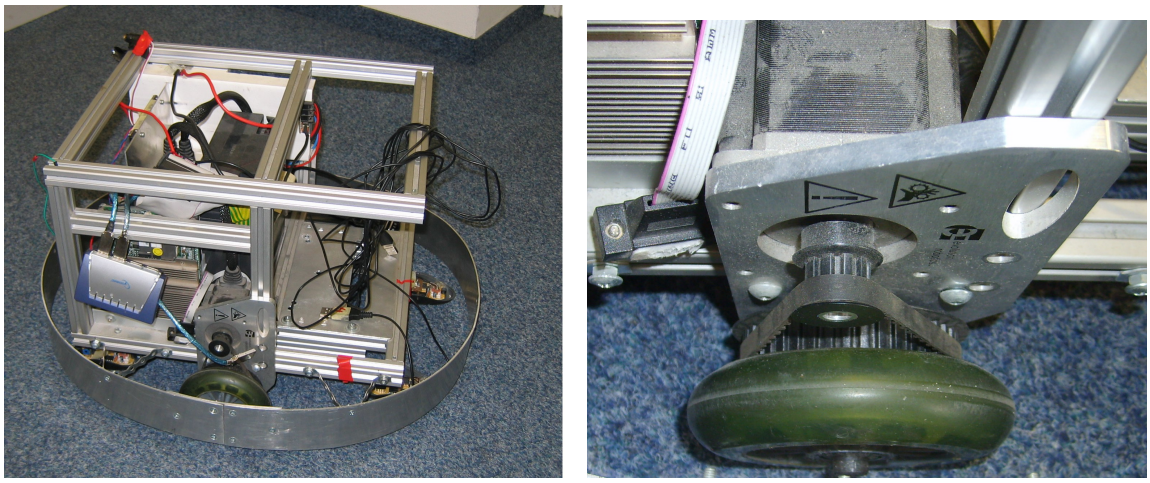
a opakovatelnost je dána vztahem

$$s_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (d_i - \overline{d})^2.$$

V případě systému majákové lokalizace, který poskytuje přímo odhad absolutní polohy robota, představuje koncová poloha robota pouze jediné měření. Proto jsou pro získání náhledu na přesnost metody jednotlivá měření vynesena v grafu spolu trajektorií jízdy robotu. Odhad přesnosti této metody je pak proveden pro množinu referenčních bodů, ve kterých bylo provedeno několik měření a výpočet přesnosti a opakovatelnosti podle výše uvedených vztahů.

## 4.1 Popis robota

Použitá robotická platforma G$^2$Bot, na obrázku 4.1a, byla vyvinuta v Gerstnerově laboratoři a má klasický diferenciální podvozek s jedním opěrným bodem. Každé kolo je samostatně poháněno krokovým motorem zobrazeným na obrázku 4.1b. Použitím krokových motorů spolu s přesným polohovým řízením je dosaženo vysoké přesnosti a opakovatelnosti pohybu robota. Při pohybu po referenční čtvercové trajektorii o délce hrany 50 cm najíždí robot do koncové polohy s milimetrovou přesností. Přesné polohové řízení je zajištěno procesorem pilot MC3410 spolu s rozlišením motorů 172 000 kroků na 1 m. Udávaná maximální rychlost je 0,7 ms$^{-1}$ a odpovídá maximální rychlosti, které roboti dosahují na soutěži Eurobot.



(a) (b)

Obrázek 4.1: Robot typu G$^2$Bot a jeho krokové motory

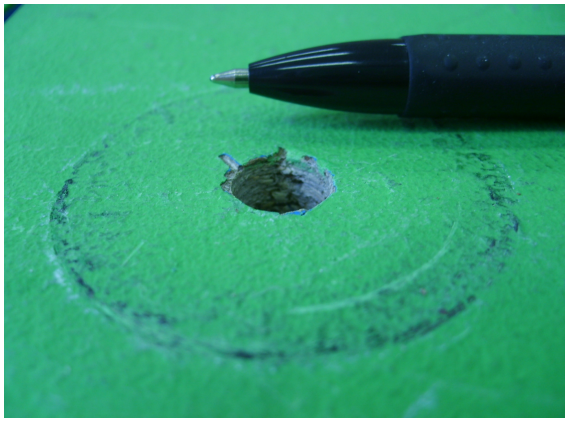
## 4.2 Popis hřiště

Použité hřiště má rozměry 300×210 cm a jsou v něm vyvrtány otvory pro umístění falešných kukuřic, na obrázku 4.2c. Dále je na hřišti umístěna oblast pro pomeranče, vše rozměrově dle specifikace pravidel pro letošní ročník soutěže Eurobot [12]. Povrch hřiště je tvořen z hrubé dřevotřísky natřené matnou barvou, obrázek 4.2a. Startovací místo je natřenou barvou jinou a povrch je výrazně hrubší, viz obrázek 4.2b. Vlastní hřiště je složeno ze tří desek sešroubovaných k sobě. Jednotlivé desky na sebe přesně nedoléhají a je mezi nimi přibližně milimetrová mezera zobrazená na obrázku 4.2d. Z tohoto pohledu je proto žádoucí, aby přejetí mezery mezi deskami či otvory pro kukuřice nevyvolalo velkou chybu odhadu pozice. Tento problém se týká pouze lokalizace na základě optických myší, měření z ultrazvukových majáků není tímto problémem zatíženo.

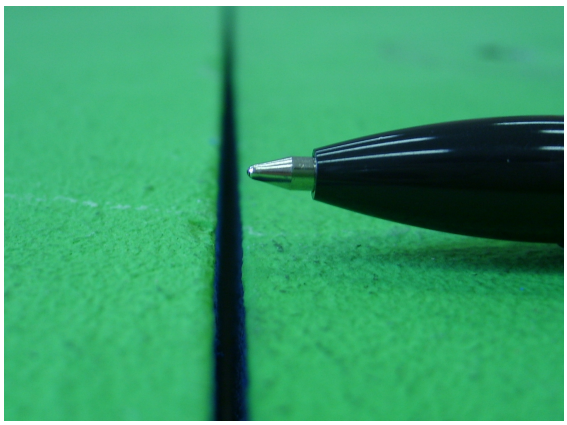
Na letošním národním kole soutěže Eurobot byly použity hladší desky odpovídající běžným pracovním stolům. Avšak i toto hřiště obsahovalo mezery v nepřesném sesazení jednotlivých desek. Z vlastních zkušeností z minulého ročníku Eurobot 2009

(a) herní plocha

(b) povrch startovního místa



(c) otvor pro kukuřici



(d) mezera mezi deskami

Obrázek 4.2: Použité hřiště soutěže Eurobot

jsou zpravidla desky přesně smontovány k sobě až na mezinárodním kole. Což eliminuje případné chyby lokalizace z optických myší při přejetí spoje desek, ale chyby způsobené při přejetí otvoru pro kukuřice zůstávají.

## 4.3 Popis experimentů

Systémy lokalizace mobilního robotu byly porovnávány ve čtyřech experimentech, nejdříve však byly identifikovány parametry optických myší. Jako základní trajektorie pro experimenty byla zvolena čtvercová trajektorie o délce strany 50 cm, složená pouze z pohybu dopředu a rotací na místě, tzv. „turn - move“ pohyb. Tento způsob pohybu je využíván i při soutěži Eurobot, jelikož prostorové omezení hřiště neposkytuje příliš důvodů používat obecný pohyb po křivce.

První experiment byl proveden pro nízkou rychlost robota, druhý při reálnější (vyšší) rychlosti s jakými se mobilní roboti obvykle pohybují v soutěži Eurobot. Ve třetím experimentu byla uvažována trajektorie zahrnující i pohyb po obecné křivce. V posledním experimentu byl zkoumám vliv polohy robota na hřišti na velikost chyby lokalizace z majáků.

## 4.4 Identifikace parametrů

V článku [11] se autoři mimo jiné zabývali použitím optických myší na různých druzích povrchů a prokázali, že data poskytovaná myší, t.j. $(\Delta x, \Delta y)$, jsou značně závislá na druhu povrchu. V našich prvotních experimentech, publikovaných v [10], byla tato závislost také ukázána a zároveň došlo ke snížení chyby lokalizace provedením identifikace parametrů myši pro konkrétní povrch. Proto byla provedena identifikace parametrů postupem uvedeným v části 2.4 pro povrch testovacího hřiště. Identifikované parametry jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Identifikované parametry pozice myší vůči souřadné soustavě robota

| **Poloha** | | **Úhel natočení** | **Převodní konstanta hodnot** |
|---|---|---|---|
| $x$ [cm] | $y$ [cm] | $\theta$ [°] | **poskytovaných myší na** 1 cm |
| -8,52 | -13,19 | -0,014 | 638 |
| -8,45 | 18,81 | -0,005 | 677 |
| 8,81 | -14,31 | -0,004 | 638 |
| 7,35 | 17,85 | 0,002 | 678 |

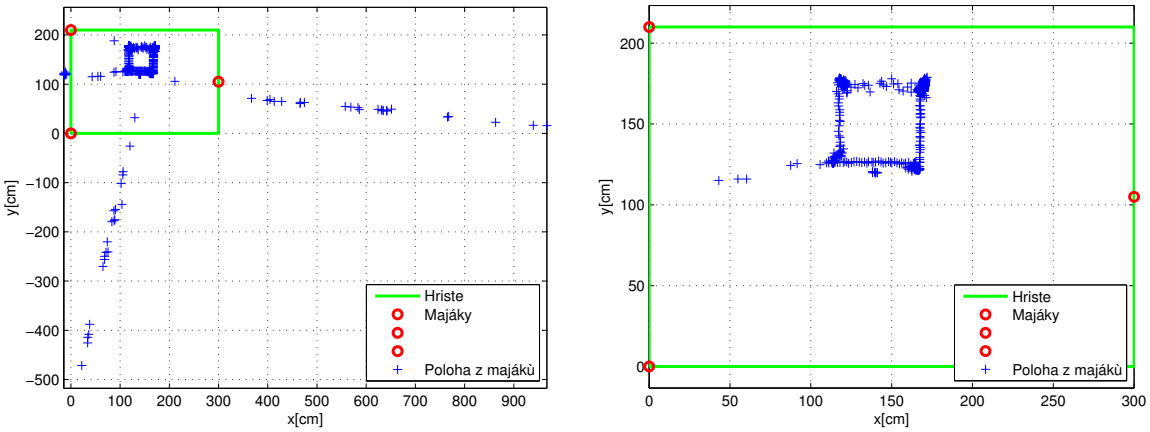
U ultrazvukových majáků spočívá identifikace v určení rychlosti šíření ultrazvuku vzduchem, která je závislá na několika parametrech, především na teplotě a vlhkosti vzduchu. Použitý převodní vztah mezi vzdáleností a časem je $r = at + b$ a převodní konstanty $a, b$ byly identifikovány jako $a = 2,16$, $b = -130$ pro $r$ v milimetrech.

## 4.5 Základní trajektorie v nízkých rychlostech

V prvním experimentu byla použita základní čtvercová trajektorie o délce hrany 50 cm složená z dopředného pohybu a rotací robota na místě o 90°. Zvolená dopředná rychlost robota byla 0,05 $\mathrm{ms}^{-1}$ a úhlová rychlost přibližně 0,052 $\mathrm{rads}^{-1}$, což přibližně odpovídá třem stupňům za sekundu. Délka hrany čtvercové trajektorie byla zvolena na základě geometrických omezení pracovního prostoru robota. Při tomto experimentu nebyly přejížděny spáry mezi deskami, ale otvory pro kukuřice ano. Tento prvotní experiment byl zaměřen zejména na ověření zvolených principů lokalizace, proto byla úmyslně zvolena velmi nízká rychlost pohybu robota tak, aby se zajistilo dostatečné vyčítání dat z obou systémů lokalizace.

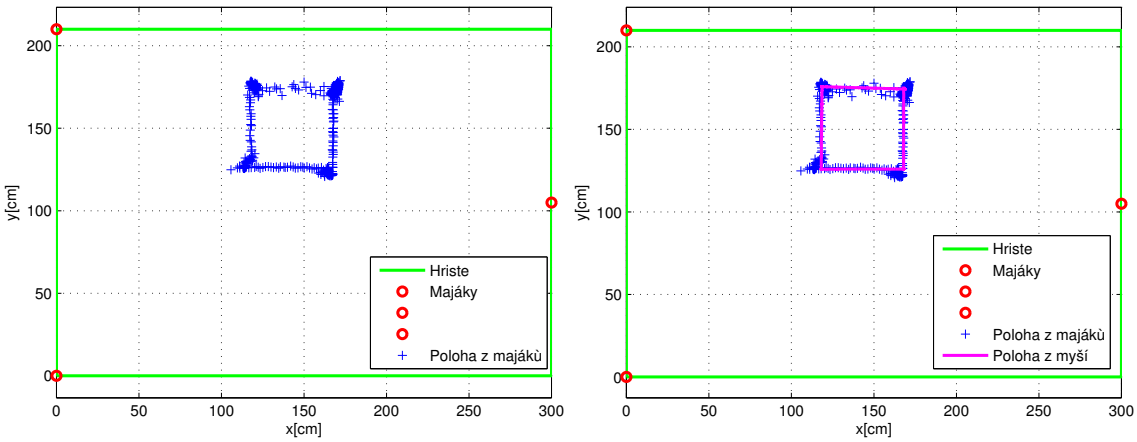
Robot byl umístěn na hřiště, laserové ukazovátko připevněné na tělo robota bylo namířeno na zeď a byla zaznamenána jeho poloha, následně robot autonomně vykonal požadovanou trajektorii a vrátil se do počátečního bodu. Při opakování jízdy byl robot umístěn do stejného místa a stejného natočení bylo zajištěno laserovým ukazovátkem, které mířilo na vyznačený bod na zdi. V tomto experimentu bylo provedeno patnáct jízd.

Při použití všech naměřených dat z ultrazvukových majáků a vypočtení možných poloh robota se získají i falešné polohy, které jsou způsobeny odrazy ultrazvukových pulsů v místnosti, viz obrázek 4.3, proto je nezbytné taková falešná měření filtrovat.




(a) nefiltrované odhady pozice (b) detail nefiltrovaných odhadů pozice

Obrázek 4.3: Odhad pozice robota z majákové lokalizace




(a) filtrované pozice (b) porovnání s lokalizací z myší

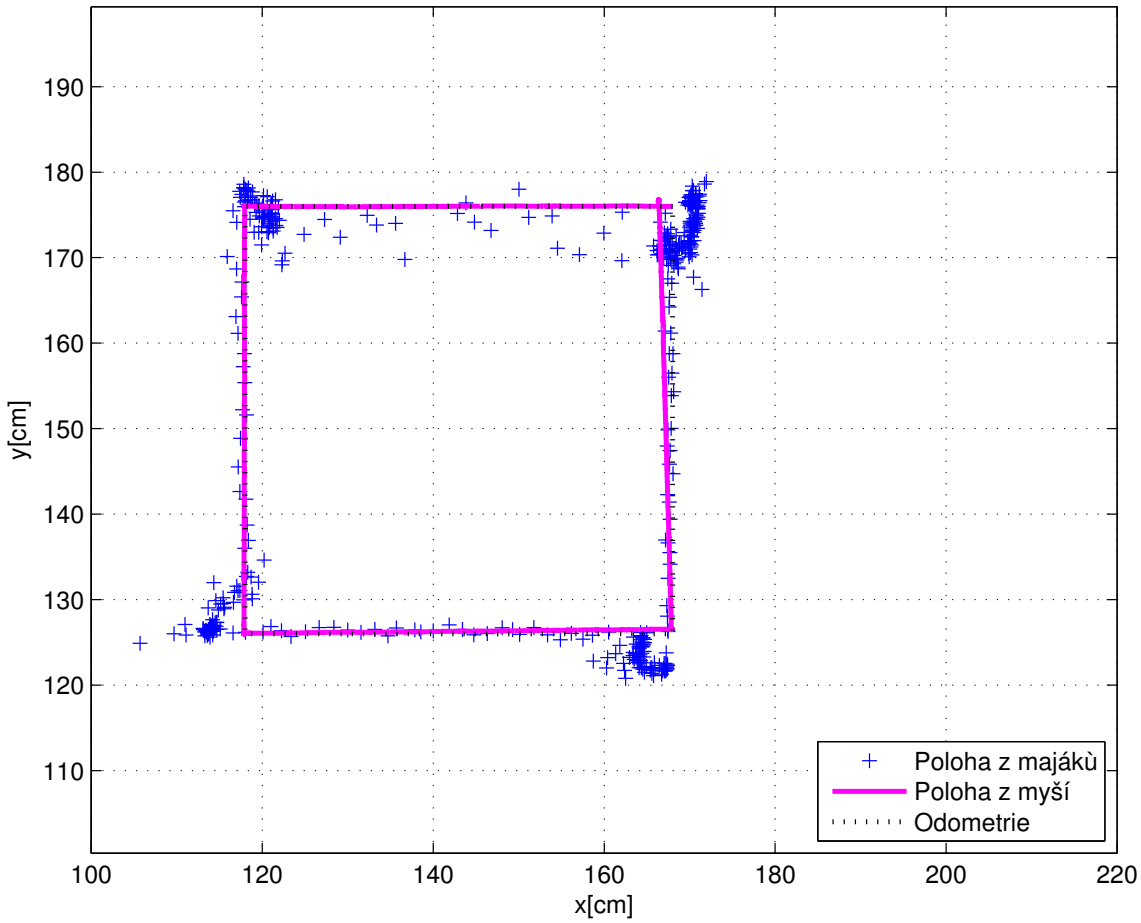
Obrázek 4.4: Filtrované pozice z majákové lokalizace a lokalizace z myší

Pouze přípustné polohy robota jsou znázorněny na obrázku 4.4. Detail odhadů pozice z majákové lokalizace a odhadu z myší je zobrazen na obrázku 4.5. Vypočtené hodnoty přesnosti a opakovatelnosti jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Porovnání systémů lokalizace pro základní experiment

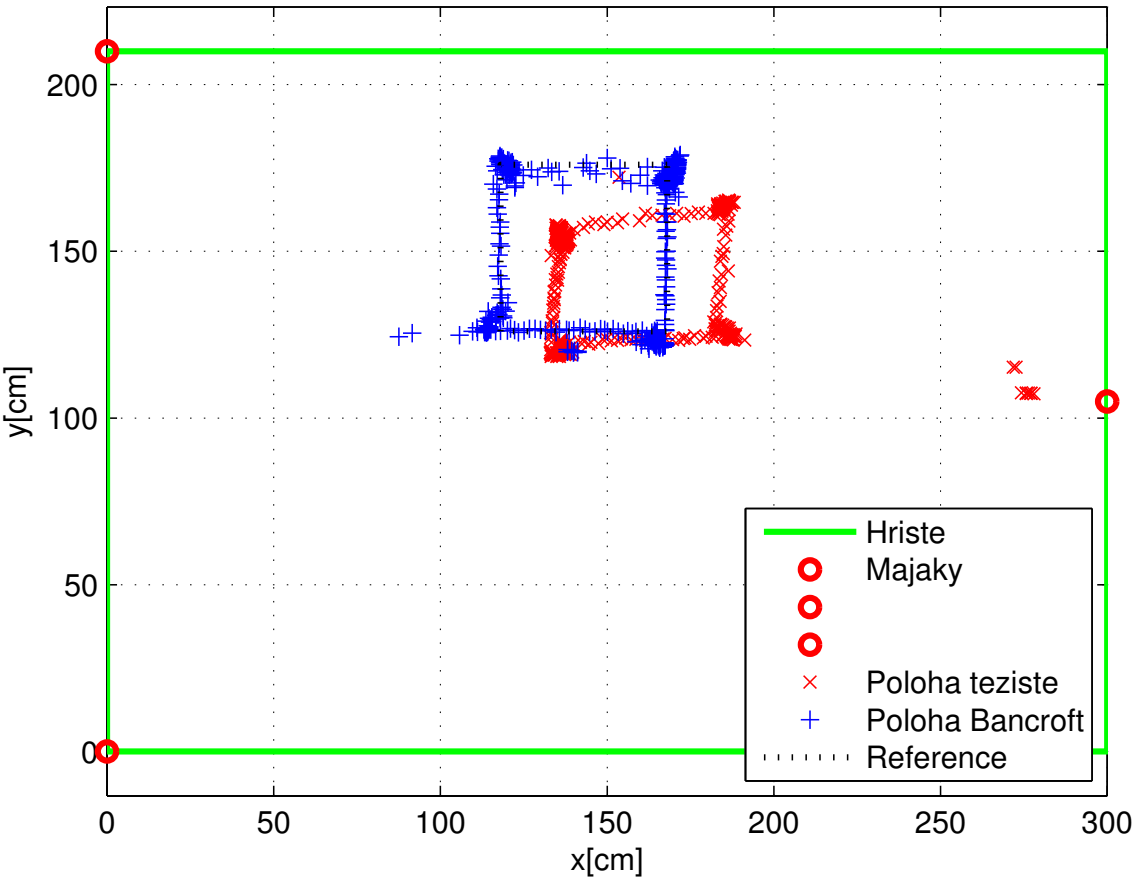
| **Metoda** | $\overline{d}$ [cm] | $s_n$ [cm] |
|---|---|---|
| myši | 1,47 | 0,90 |
| majáky | 1,93 | 0,45 |
| majáky trojúhelník | 43,50 | 1,30 |

Z prezentovaných výsledků lze pozorovat, že obě metody, optické myši i Bancroft




Obrázek 4.5: Detailní porovnání lokalizací z jednotlivých metod

algoritmus, pro dané rychlosti robota jsou přijatelnou možností lokalizace mobilního robota v rámci soutěže Eurobot. Na obrázku 4.6 je uvedeno porovnání Bancroftova algoritmu a algoritmu aproximace trojúhelníkem pro úlohu trilaterace. Lze pozorovat, že naivní přístup aproximace trojúhelníkem neposkytuje uspokojivé výsledky. Poloha robota je značně vychýlená a zkreslená od referenčních hodnot. Závěr tohoto porovnání tedy je, že naivní metoda je pro lokalizaci mobilního robota nedostatečná, proto již není tato metoda v dalších experimentech uvažována. Rychlost robota v tomto experimentu byla velmi malá, pro soutěž nepoužitelná, proto byl scénář experimentu opakován pro vyšší rychlosti.




Obrázek 4.6: Porovnání Bancroftova algoritmu a algoritmu aproximace trojúhelníkem

## 4.6 Základní trajektorie ve vyšších rychlostech

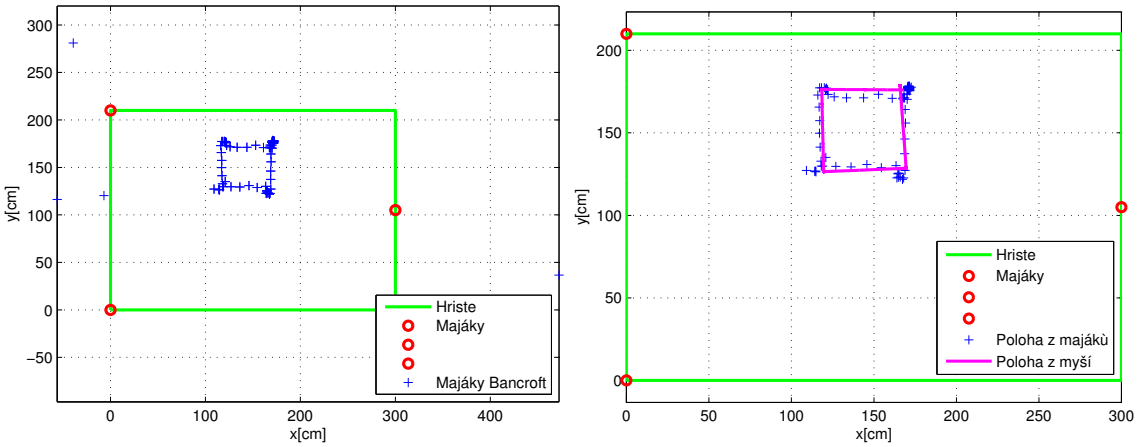
Jako druhý experiment byl zopakován scénář předchozího experimentu, tedy čtvercová trajektorie o délce strany 50 cm, ale s vyššími rychlostmi robota. Zvolená dopředná rychlost robota byla 0,2 $ms^{-1}$ a úhlová rychlost přibližně 0,524 $rads^{-1}$, což odpovídá třiceti stupňům za sekundu. Tyto hodnoty rychlostí byly odvozeny z používaných hodnot při národním kole soutěže Eurobot.

Samotné měření bylo provedeno opět patnáctkrát a proběhlo stejným postupem jako v předchozím experimentu, robot byl po skončení jízdy opět ručně natočen, aby počáteční úhly jednotlivých měření byly stejné. Vypočtené hodnoty přesnosti a opakovatelnosti jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3: Porovnání systémů lokalizace pro vyšší rychlosti robota

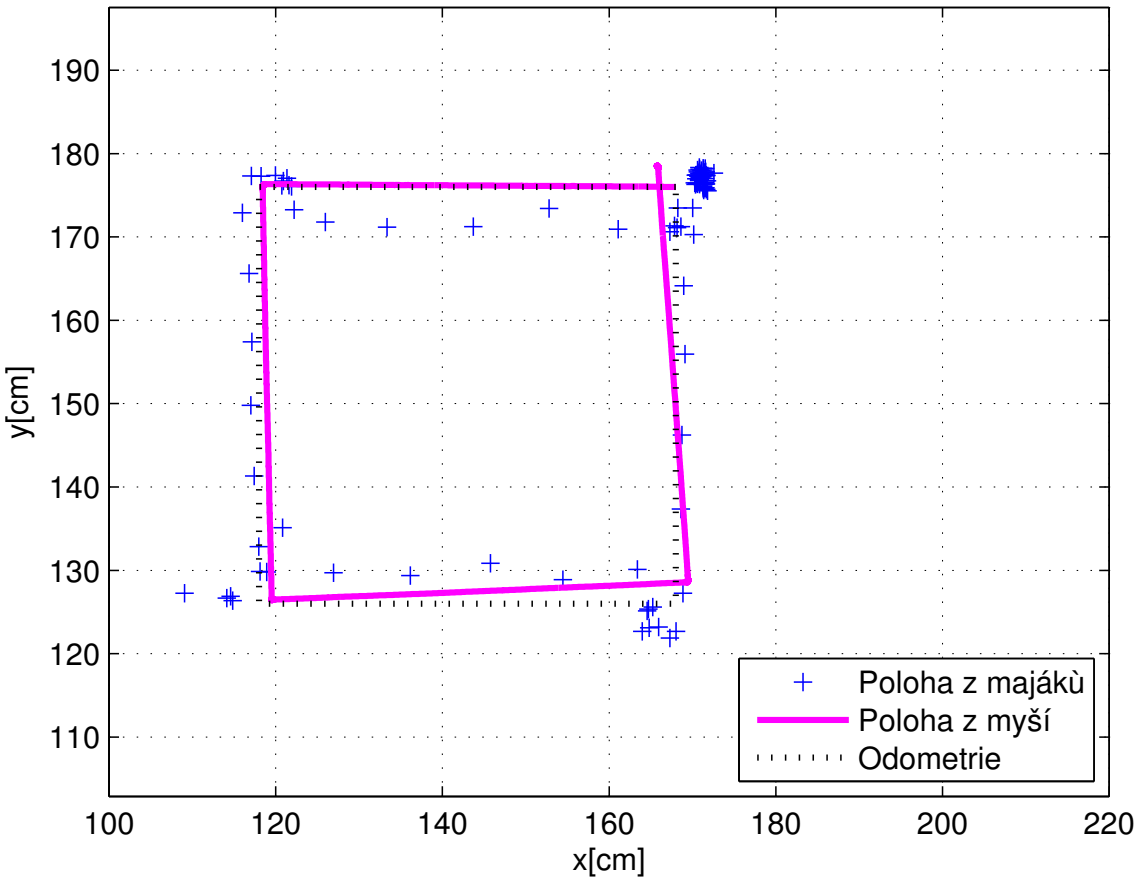
| **Metoda** | $\overline{d}$ [cm] | $s_n$ [cm] |
|---|---|---|
| myši | 3,42 | 0,67 |
| majáky | 1,26 | 0,32 |

Při vyhodnocování dat z ultrazvukových majáků byla použita filtrace falešných poloh, filtraci ilustruje obrázek 4.7. Detail odhadů pozice z majákové lokalizace a odhadu z myší je zobrazen na obrázku 4.8.




(a) nefiltrované odhady pozice (b) odhady po filtraci

Obrázek 4.7: Odhad pozice robota s falešným určením a vyfiltrovaná data




Obrázek 4.8: Detailní porovnání lokalizací z jednotlivých metod

Na základě porovnání hodnot z tabulek lze pozorovat, že u lokalizace z myší došlo k nárůstu chyby oproti experimentu při pomalých rychlostech, což bylo předpokládáno. Hodnota opakovatelnosti je velmi podobná, proto lze usuzovat na vliv systematické chyby. I přes zvýšení chyby jsou hodnoty stále dobře použitelné pro lokalizaci robota v rámci soutěže Eurobot, kde je maximální přijatelná hodnota do 5 cm, která byla stanovena experimentálně na základně vlastních zkušeností ze dvou ročníků soutěže. Chyby metody lokalizace na základě ultrazvukových majáků při použití Bancroftova algoritmu jsou srovnatelné s hodnotami pro experiment s nízkými rychlostmi.

## 4.7 Obecná trajektorie

Ve třetím experimentu byl robot navigován po obecné trajektorii složené z jízdy rovně, rotací robota na místě a jízdy po křivce. Délka trajektorie je přibližně 4,5 m. Referenční koncová poloha robotu byla $(32; 184)$ v centimetrech, vůči které byla porovnávána přesnost systémů lokalizace. Vypočtené hodnoty přesnosti a opakovatelnosti jsou uvedeny v tabulce 4.4.

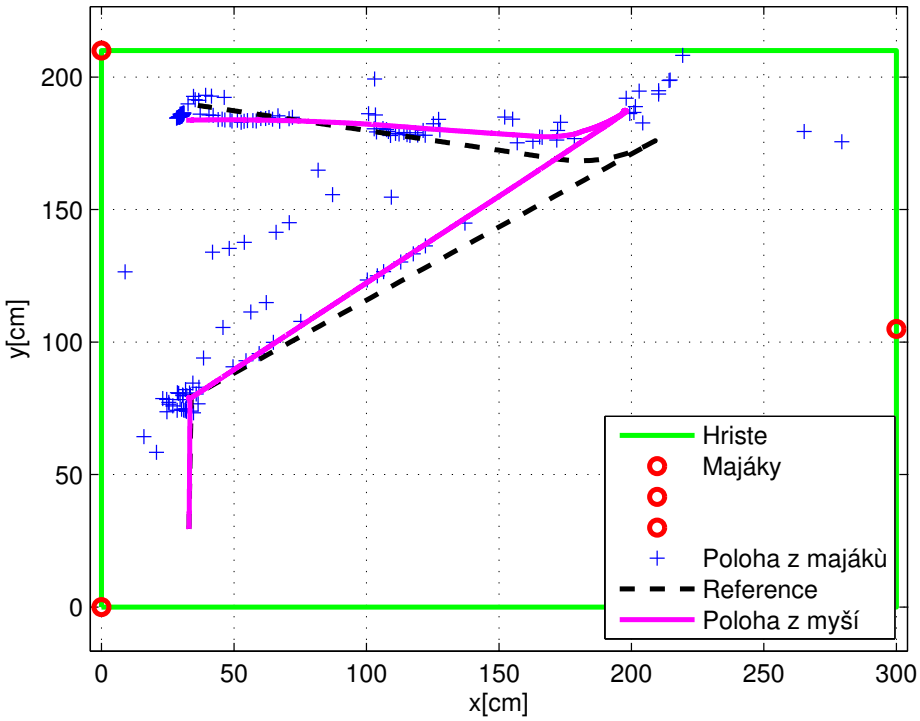
Tabulka 4.4: Porovnání systémů lokalizace pro obecnou trajektorii

| **Metoda** | $\overline{d}$ [cm] | $s_n$ [cm] |
|---|---|---|
| myši | 2,43 | 1,66 |
| majáky Bancroft | 3,07 | 0,61 |

Při experimentech cyklicky docházelo k nevyčítání dat z majáků z důvodu špatného kontaktu v napájecím obvodu majáku, což se projevilo „hluchými“ místy, které jsou dobře patrné v obrázku 4.9. U filtrace byl práh pro vyřazení falešných hodnot zvýšen (aby se nevyřadila i správná data v „hluchých“ místech), což vedlo ke špatné filtraci falešných poloh.

Na základě hodnot přesnosti lokalizace je patrné, že oproti pohybu po čtvercové trajektorii nastalo zhoršení, ale i v tomto případě poskytují oba systémy dostatečnou přesnost lokalizace pro soutěž Eurobot. Pro podrobnější vyhodnocení je však vhodné vzít v úvahu průběh referenční odometrie, který je zobrazen na obrázku 4.9. Lze pozorovat, že obě metody se s referencí rozcházejí, dobře patrné to je u metody optických myší, kde po první rotaci nastala chyba v úhlu. U ultrazvukových majáků se pravděpodobně projevila chyba $f(r)$ závislá na poloze robota na hřišti. Proto v posledním experimentu byla změřena mapa tohoto působení.

Bohužel v průběhu tohoto experimentu docházelo k chybě vyčítání dat z ultrazvukových majáků, což vedlo k výpadkům v lokalizaci. Ovšem této metodě principiálně nevadí výpadek v datech, proto lze pozorovat, že v okamžiku, kdy data byla k dispozici odpovídají pozice robota vypočtené pozici z optických myší.



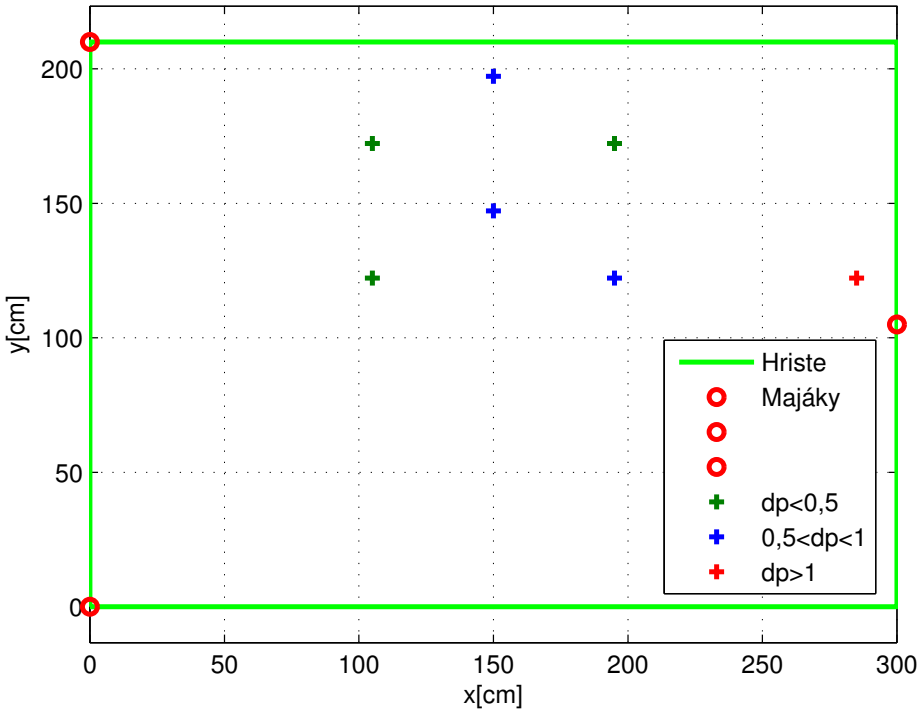

Obrázek 4.9: Porovnání lokalizací z obou metod

## 4.8 Mapa chyb

V tomto experimentu byl studován vliv chyb majákové lokalizace v jednotlivých částech hřiště, tedy na parametry $\overline{d}$ a $s_n$. Robot byl umístěn do definovaných poloh na hřišti, jejichž souřadnice $(x_i, y_i)$ byly zaměřeny, a ve kterých byla opakovaně měřena vzdálenost k jednotlivým majákům. Každé takové měření bylo provedeno nejméně patnáctkrát. Vypočtené hodnoty přesnosti a opakovatelnosti určení pozice robota jsou vyneseny v tabulce 4.10. Obrázek 4.10 poskytuje grafickou prezentaci hodnot $\overline{d}$ v jednotlivých bodech ve zvolené barevné škále.

Tabulka 4.5: Přesnost majákové lokalizace pro různá místa hřiště

| **Pozice** | | $\overline{d}$ | $s_n$ |
|---|---|---|---|
| $x$ [cm] | $y$ [cm] | [cm] | [cm] |
| 285,0 | 122,2 | 1,94 | 1,33 |
| 195,0 | 172,2 | 0,54 | 0,21 |
| 195,0 | 122,2 | 0,49 | 0,37 |
| 150,0 | 147,2 | 0,63 | 0,30 |
| 150,0 | 197,2 | 0,69 | 0,40 |
| 105,0 | 172,2 | 0,28 | 0,19 |
| 105,0 | 122,2 | 0,33 | 0,21 |




Obrázek 4.10: Grafická prezentace chybové mapy

Bohužel při experimentech došlo k mechanickému poškození napájecího obvodu jednoho majáku, který následně neposkytoval data. Z důvodu dedikované časové dotace na řešení bakalářské práce, nebylo časově možné chybu opravit a provést měření pro více míst na hřišti. I přes menší počet měřících míst než bylo původně zamýšleno lze pozorovat, že pro bod $(285,0; 122,2)$ je hodnota chyby určení pozice velmi vysoká, což je zejména způsobeno značným vlivem blízkého majáku. Toto pozorování tedy indikuje potenciální problémová místa pro majákovou lokalizaci.

# Kapitola 5

# Závěr

Cílem práce bylo porovnat dva odlišné systémy lokalizace mobilního robota, metodu dead-reckoning na základě optických myší a metodu trilaterace s využitím tří externích majáků. V následujících odstavcích jsou shrnuty mé praktické zkušenosti získané při řešení bakalářské práce, v závěru této kapitoly jsou pak shrnuty zjištěné vlastnosti použitých lokalizačních systémů a jejich možné vylepšení.

V prvním kroku jsem se seznámila s úlohou dead-reckoning a přístupy řešení na základě využití optických myší. Důležitým poznatkem bylo především zjištění problémů s mechanickým umístěním myši na tělo robota tak, aby byla zajištěna definovaná výška optického senzoru. Dalším poznatkem bylo, že jeden z používaných přístupů řešení vede na výpočet pseudo-inverzní matice. Vedoucím práce mi bylo doporučeno tento postup nevyužít a naopak využít analogie problému hledání transformace mezi body měření s problémem hledání transformace mezi dvěma množinami bodů popisující stejný objekt, které je například použito v metodě lokalizace ICP (Iterativ Closest Point). Tento přístup je oproti výpočtu pseudo-inverzní matice přímočařejší a jednodušší na výpočet, skládá se pouze ze základních matematických operací. Posledním významným poznatkem při řešení problému lokalizace, za použití lokalizačního systému založeného na optických myší, bylo nastudování možností, jak konkrétně vyčítat data z optických myší pod operačním systémem typu Linux. Především jak zajistit správné vyčtení bez nutnosti aktivního čekání na data.

Po nastudování potřebných informací a prvotních experimentech byl lokalizační systém na základě optických myší realizován. V prvním kroku bylo potřeba vyřešit problém s mechanickým umístěním myší na tělo robota. Tento problém byl vyřešen vytvořením pružné mechanické konstrukce, která zajišťuje dostatečný přítlak myši na podložku. Následně byl vyhotoven program v jazyce `C` pro základní vyčítání poskytovaných dat z myší. Dále byl implementován matematický postup pro odhad pozice z měřených dat. Při jeho použití vyvstal problém s praktickou identifikací umístění myší na robotovi, proto byl použit postup pro identifikaci těchto parametrů z naměřených dat.

V další části práce jsem se seznámila s druhým systémem lokalizace založeným na řešení úlohy trilaterace. Hlavním přínosem bylo seznámení se s Bancroftovým algoritmem. Po nastudování byl algoritmus implementován v Matlabu, zejména proto, že zpracování naměřených dat probíhalo off-line. Algoritmus lze však velmi jednoduše implementovat i v jiném (vyšším) jazyku, vhodném pro běh na robotovi a online

zpracování aktuálních dat. Jako druhý, rozšiřující algoritmus na vyhodnocování pozice robota z ultrazvukových měření byla implementována aproximace oblasti, kde se robot může nacházet, trojúhelníkem. Cílem použití tohoto naivního přístupu bylo porovnání funkce s Bancroftovým algoritmem. Jak se ukázalo v experimentech, tento naivní přístup poskytuje velmi špatnou pozici robota, od referenční pozice je vychýlená přibližně o dvacet centimetrů. Problém, který u systému odhadu pozice z naměřených vzdáleností nastával, bylo vyhodnocování falešných poloh na základě odrazu ultrazvuku v místnosti. Tento problém byl vyřešen filtrací příslušných dat.

Pro porovnání obou systémů lokalizace bylo provedeno několik experimentů, ze kterých vyplynulo, že oba systémy jsou použitelné pro lokalizaci mobilního robota v soutěži Eurobot, kde byl stanoven požadavek přesnosti lokalizace do 5 cm. I tak je ovšem nutné, aby herní plánování s touto nepřesností v poloze počítalo. Metoda trilaterace se prokázala být lepší než metoda dead-reckoning, nejen vypočtenými parametry v experimentech, ale především svým principem, neboť poskytuje absolutní pozici robota na hřišti. Další její výhodou z pohledu použití při soutěži Eurobot je, že po převozu lze systém použít prakticky okamžitě, naopak u systému s optickými myši je potřeba provést nová identifikace parametrů z důvodu možného vychýlení soustavy myší vlivem převozu a jiným povrchem hřiště. U metody dead-reckoning je principiální nevýhoda kumulace chyby, ovšem tento problém se při soutěži Eurobot neprojeví natolik, aby měl na lokalizaci robota větší vliv, neboť jeden zápas trvá pouhých 90 s.

V rámci dalších úprav a rozšíření práce by bylo přínosné obě metody vylepšit tak, aby se dosáhlo vyšší přesnosti lokalizace, protože zvolená mez 5 cm je značně benevolentní. Dále by bylo zajímavé proměřit chybové působení ve více bodech hřiště a pozorovat vliv chyby v jednotlivých místech hřiště, případně využít této znalosti k vylepšení odhadu pozice mobilního robota.

# Literatura


[1] PAW3601DH Datasheet. http://www.pixart.com.tw/upload/PAW3601DH-NF_SPEC_V22_20081027113427.pdf.

[2] Bancroft, S.: An Algebraic Solution of the GPS Equations. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, ročník AES-21, č. 1, 1985: s. 56–59.

[3] Chudoba, J.: Active Beacon System – User Manual. 2004, verze 1.1.

[4] Chudoba, J.; Mázl, R.; Přeučil, L.: A Control System for Multi-Robotic Communities. V *ETFA 2006 Proceedings*, Piscataway: IEEE, 2006, ISBN 978-0-7803-9758-3, s. 827–832.

[5] Eurobot - Webové stránky národního kola. http://www.eurobot.cz.

[6] Flaubacher, D.: Characterisation of an optical flow sensor for off-road robot application. 2008, Bachelor Thesis.

[7] Geyer, M.; Daskalakis, A.: Solving passive multilateration equations using bancroft's algorithm. V *Digital Avionics Systems Conference, 1998. Proceedings., 17th DASC. The AIAA/IEEE/SAE*, ročník 2, 1998, s. F41–2 –F41–3.

[8] Lee, S.; Song, J.-B.: Mobile Robot Localization Using Optical Flow Sensors. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, ročník 2, č. 4, 2004: s. 485–493.

[9] Lu, F.; Milios, E.: Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, ročník 18, 1994: s. 249–275.

[10] Mudrová, L.; Faigl, J.; Halgašík, J.; aj.: Estimation of Mobile Robot Pose from Optical Mouses. V *International Conference on Research and Education in Robotics, Eurobot Conference 2010*, 2010, s. 10–15.

[11] Palacin, J.; Valgaon, I.; Pernia, R.: The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, ročník 126, č. 1, 2006: s. 141–147.

[12] Eurobot - pravidla pro ročník 2010. http://www.eurobot.cz/2010/E2010_Rules-CZ-v1.pdf.

[13] Savage, J.; Minami, Y.; Rivera, C.; aj.: Robot Localization Using Ultrasonic Beacons.

[14] Sekimori, D.; Miyazaki, F.: Self-localization for indoor mobile robots based on optical mouse sensor values and simple global camera information. V *Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2005 IEEE International Conference on*, 2005, s. 605–610.

[15] Sekimori, D.; Miyazaki, F.: Precise Dead-Reckoning for Mobile Robots using Multiple Optical Mouse Sensors. V *Informatics in Control, Automation and Robotics II*, 2007, s. 145–151.

[16] Globální navigační systémy - trilaterace. `http://www.czechspace.cz/cs/galileo/aktuality-GPS-Glonass/GNSS-urcovani-polohy/trilaterace`.

# Obsah CD

Přiložené CD obsahuje zdrojové kódy pro vyhotovené systémy lokalizace mobilního robota, text bakalářské práce ve formátu PDF a zdrojové kódy celého textu pro systém LaTeX. V následující tabulce je popsána struktura CD.

Tabulka 1: Adresářová struktura na CD

| Adresář | Popis |
|---|---|
| `src` | zdrojové kódy knihovny |
| `doc` | zdrojové kódy textu bakalářské práce |
| `thesis.pdf` | text bakalářské práce |