ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Bakalářská práce

Vojtěch Cajtler

Lokalizační systém pro roje mobilních robotů

Katedra řídicí techniky

Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Krajník, Ph.D.**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 21. 5. 2013 .....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Vojtěch Cajtler**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Lokalizační systém pro roje mobilních robotů**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s algoritmem analýzy obrazu používaným skupinou IMR pro relativní lokalizaci malých UAV.
2. Rozšiřte algoritmus tak, aby byl použitelný pro lokalizaci skupiny pozemních mobilních robotů.
3. Seznamte se s lokalizačním modulem systému SyRoTek.
4. Porovnejte přesnost původního lokalizačního algoritmu systému SyRoTek s vámi modifikovaným algoritmem.

Seznam odborné literatury:

[1] J. Faigl, T. Krajník, J. Chudoba, M. Saska: Low Cost Embedded System for Relative Localization in Robotic Swarms, In Proceedings of the ICRA 2013 (to appear).
[2] T. Krajník et al.: A practical visual based multirobot localization system, Journal of Real Time Image Processing (in preparation)
[3] M.Kulich et. al. : SYROTEK – distance teaching of Mobile Robotics, IEEE Trans. On Education, 56(1),2013.

Vedoucí: Ing. Tomáš Krajník, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2013/2014

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 3. 2013

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Krajníkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky při řešení dané problematiky. Děkuji také své rodině a přátelům za jejich podporu v průběhu celého mého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce prezentuje algoritmus analýzy obrazu používaný skupinou IMR pro relativní lokalizaci malých UAV a popisuje způsob rozšíření tohoto algoritmu tak, aby byl použitelný pro lokalizaci skupiny pozemních mobilních robotů. Teoretický úvod práce se věnuje popisu oboru robotika a rozdělení robotů do základních kategorií. Další část práce poskytuje potřebné informace týkající se problematiky lokalizace mobilních robotů. Jsou zde prezentovány principy vizuální lokalizace a lokalizace multirobotických systémů. Praktická část se věnuje seznámení s lokalizačním modulem systému SyRoTek. Dále je je zde prezentován algoritmus analýzy obrazu, konkrétně principy lokalizace vzoru, určení parametrů pracovního prostoru a výpočetní náročnost algoritmu. Poté jsou navržena dvě různá řešení modifikace algoritmu tak, aby byl schopen lokalizovat více vzorů v obraze. Tato řešení jsou následně realizována a je porovnána jejich výpočetní náročnost. Následně je porovnána přesnost lokalizačního modulu SyRoTek a prezentovaného modifikovaného algoritmu.

Klíčová slova: mobilní robotika, lokalizace, řízení

Annotation

This bachelor thesis presents the algorithm for video image analysis which is being used for relative localization of micro aerial vehicles by the IMR group. It also describes the approach to modify this algorithm so it can be used for localization in robotic swarm. Theoretical part of the thesis deals with field of robotics and the basic categorization of robots. Subsequent chapter provides the necessary information concerning the mobile robot localization. In particular, the principles of visual localization and localization of multi-robot systems are presented. Practical part of the presented work deals with the system SyRoTek and its localization modul. Next part is devoted to principles of pattern detection, geometry of the operational space and computational complexity of the aforementioned localization algorithm. Then two different ways to approach needed modifications of algorithm are presented. Proposed solutions are implemented and their computational complexity is compared. Last part of the thesis present comparation of error of relative distance estimation of SyRoTek modul and modified algorithm.

Keywords: mobile robotics, localization, control

Obsah

Úvod **1**

1 Robotika **2**
1.1 Taxonomie robotů . . . 2
1.1.1 Mobilita robotu . . . 2
1.1.2 Autonomie robotu . . . 3
1.2 Multirobotické systémy . . . 4
1.2.1 Řízení multirobotických systémů . . . 5
1.3 Aplikace mobilní robotiky . . . 6
1.3.1 Automobilový průmysl . . . 6
1.3.2 Vojenský průmysl . . . 7
1.3.3 Výzkum . . . 7
1.3.4 Zábava a vzdělání . . . 8
1.4 Shrnutí kapitoly . . . 8

2 Lokalizace mobilních robotů **9**
2.1 Taxonomie lokalizačních technik . . . 9
2.1.1 Prostředky relativní a absolutní lokalizace . . . 9
2.1.2 Lokální a globální lokalizace . . . 10
2.1.3 Statické a dynamické prostředí . . . 11
2.2 Vizuální lokalizace . . . 11
2.2.1 Lokalizace ve známé mapě . . . 11
2.2.2 Lokalizace podle orientačních bodů . . . 13
2.3 Lokalizace multirobotických systémů . . . 13
2.4 Shrnutí kapitoly . . . 14

3 Systém SyRoTek **16**
3.1 Lokalizační modul . . . 17
3.1.1 Rektifikace obrazu . . . 17
3.1.2 Určení pozice robotu . . . 18
3.1.3 Určení orientace robotu . . . 19
3.1.4 Identifikace robotu . . . 19
3.2 Shrnutí kapitoly . . . 20

4 Algoritmus pro analýzu obrazu **21**
4.1 Lokalizace vzoru . . . 22
4.1.1 Segmentace obrazu . . . 22
4.1.2 Detekce vzoru . . . 23
4.1.3 Určení pozice vzoru . . . 23
4.2 Výpočetní náročnost . . . 24
4.3 Pracovní prostor a rozměry vzoru . . . 25

4.4 Shrnutí kapitoly 26

5 Lokalizační systém pro roj mobilních robotů 27
5.1 Návrh řešení problému 27
5.1.1 Paralelní řešení 28
5.1.2 Sekvenční řešení 29
5.2 Implementace algoritmu 30
5.2.1 Implementace paralelního řešení 31
5.2.2 Implementace sekvenčního řešení 32
5.3 Funkce opětovné kontroly 32
5.4 Orientace a identifikace robotu 33
5.4.1 Identifikace robotu 33
5.4.2 Orientace robotu 34
5.5 Shrnutí kapitoly 35

6 Experimenty 36
6.1 Porovnání výpočetní náročnosti algoritmů 36
6.2 Porovnání přesnosti lokalizace 37

Závěr 40

Seznam obrázků

1 Příklad konvojového systému 6
2 Bezpilotní letoun 7
3 Princip lokalizace ve známé mapě 12
4 Přehled systému SyRoTek 16
5 Světelné podmínky v SyRoTek aréně 17
6 Obraz získaný z kamery před a po rektifikaci 18
7 Odezva na konvoluční filtr - určení pozice robotu 18
8 Identifikace robotu 19
9 Určení orientace robotu 19
10 Příklad lokalizace vzoru v reálném prostředí 21
11 Příklad prahování 22
12 Technika rostoucí oblasti 23
13 Model původního obrazu a obrazu po provedení homografie 24
14 Model pracovního prostoru a lokalizačního vzoru 25
15 Blokové schéma paralelního řešení algoritmu 28
16 Blokové schéma sekvenčního řešení algoritmu 29
17 Příklad trénovací množiny 34
18 Upravené lokalizační vzory 35
19 Porovnání výpočetní náročnosti navrhovaných modifikací algoritmu 36
20 Porovnání přesnosti určení pozice robotu 38

Seznam tabulek

1 p-hodnoty při porovnání přesnosti určení pozice robotu 38
2 p-hodnoty při porovnání přesnosti určení orientace robotu 38
3 Naměřené hodnoty pro L=0.5m 44
4 Naměřené hodnoty pro L=1m 44
5 Naměřené hodnoty pro L=1.5m 44
6 Naměřené hodnoty pro L=2m 45
7 Naměřené hodnoty pro L=2.5m 45
8 Naměřené hodnoty pro L=3m 45
9 Odchylky určení pozice robotu 46
10 Odchylky určení orientace robotu 47
11 Obsah přiloženého CD. 48

Seznam výpisů kódu

1 Implementace paralelního řešení 31
2 Implementace sekvenčního řešení 32

Seznam příloh

1. Porovnání výpočetní náročnosti - naměřené hodnoty
2. Porovnání přesnosti lokalizace - naměřené hodnoty
3. Obsah přiloženého CD

Úvod

Roboty zastávají stále důležitější roli v každodenním životě a jsou nedílnou součástí mnoha průmyslových aplikací napříč všemi obory. Používají se ve výrobních továrnách, automobilovém průmyslu, letectví a nebo pro zábavu a vzdělání. I přes jejich velkou všestrannost se můžeme setkat s úkoly, jejichž splnění by bylo pro jeden robot složité, či dokonce nemožné. V takové situaci se využívá skupiny robotů, které spolu kooperují za účelem splnění společného cíle. Nicméně bez znalosti své polohy nejsou roboty schopné provést kvalifikované rozhodnutí o svém následujícím kroku a naplánovat tak cestu ke splnění úkolu. Proto je lokalizace, tedy určení pozice[1] a orientace robotu, považována za klíčový problém mobilní robotiky. Řešení tohoto problému lze definovat jako hledání odpovědi na otázku „Kde to jsem?"z pohledu robotu. Existuje více možností jak zodpovědět tuto otázku a právě jedné z nich je věnována tato práce.

Práce je strukturována do šesti kapitol. První kapitola se věnuje popisu oboru robotika a rozdělení robotů do základních kategorií podle jejich společných vlastností. Tato kapitola také pojednává o principu multirobotických systémů, klíčových činnostech těchto systémů a o možnostech jejich řízení. Závěr kapitoly je poté věnován představení několika aplikací mobilní robotiky. Druhá kapitola se zabývá problematikou lokalizace mobilních robotů a rozdělení lokalizačních technik do několika kategorií. Hlavní částí kapitoly je prezentace technik vizuální lokalizace, především lokalizace ve známé mapě a lokalizace pomocí orientačních bodů. V závěru kapitoly jsou představeny výhody a možné principy společné lokalizace skupiny mobilních robotů. Třetí kapitola se zabývá popisem systému SyRoTek se zaměřením na lokalizační modul tohoto systému. Jsou zde popsány způsoby rektifikace obrazu, určení pozice, orientace a identifikace robotu. Čtvrtá kapitola se věnuje konkrétnímu řešení vizuální lokalizace mobilních robotů a tím je algoritmus analýzy obrazu používaný skupinou IMR[2] pro relativní lokalizaci malých UAV[3] v reálném prostředí. Je zde popsán princip detekce a určení pozice lokalizačního vzoru, parametry pracovního prostředí systému a výpočetní náročnost samotného algoritmu. Pátá kapitola se zabývá řešením problému rozšíření zmiňovaného lokalizačního algoritmu tak, aby byl použitelný pro lokalizaci skupiny pozemních mobilních robotů. V kapitole jsou prezentovány návrhy možného řešení problému, výhody a nevýhody těchto návrhů a také princip implementace modifikovaných algoritmů. V závěru práce jsou představeny výsledky experimentů, které se snaží porovnat výpočetní náročnost obou navrhovaných řešení. Součástí této kapitoly je také porovnání přesnosti původního lokalizačního algoritmu systému SyRoTek[4] s modifikovaným algoritmem ze čtvrté kapitoly.

Jelikož je robotika poměrně mladým tématem, který se neustále vyvíjí, nejsou doposud v českém jazyce ustáleny všechny odborné termíny použité v této práci. V takovém případě jsou anglické termíny zmíněny vedle termínu českých, psány kurzívou.

[1] Výrazy pozice a poloha robotu jsou v této práci považovány za synonyma
[2] Skupina Inteligentní a mobilní robotiky, http://imr.felk.cvut.cz/
[3] Unmanned aerial vehicle neboli bezpilotní letoun
[4] System for robotic e-learning, http://syrotek.felk.cvut.cz/

1 Robotika

Robotika je moderní multidisciplinární obor z oblasti počítačové vědy a techniky, který zahrnuje vlastnosti mechaniky, elektrotechniky, umělé inteligence a celé řady dalších disciplin. Tento obor se zabývá studiem a konstrukcí robotů, strojů, které se mohou pohybovat a reagovat na základě údajů ze svých senzorů. Roboty jsou v dnešní době používané převážně v továrnách, kde provádějí velmi přesné práce jako je sváření a nýtování. Využívají se taky v situacích, které by mohly být pro člověka nebezpečné – čištění toxických odpadů, práce v prostředí s vysokou hladinou hluku nebo zneškodňování bomb. Díky rychlému vývoji robotiky můžeme roboty stále častěji nalézt i v domácnostech, kde vykonávají běžné domácí práce. Slovo robot bylo poprvé v dějinách zmíněno v roce 1920 ve hře R.U.R - Rossum's Universal Robots Karla Čapka. Toto slovo je odvozené od slova robota neboli práce. Samotný termín robotika byl poté představen spisovatelem Isaacem Asimovem. Ve své knize Já, robot, publikované v roce 1950, také představil tři zákony robotiky:

1. Robot nesmí ublížit člověku nebo svou nečinností dopustit, aby bylo člověku ublíženo.
2. Robot musí uposlechnout příkazů člověka, kromě případů, kdy tyto příkazy jsou v rozporu s prvním zákonem.
3. Robot musí chránit sám sebe před zničením, kromě případů, kdy je tato ochrana v rozporu s prvním nebo druhým zákonem.

1.1 Taxonomie robotů

Společné označení robot nese velké množství strojů. Liší se od sebe svými schopnostmi, kinematikou, samostatností, senzorickým vybavením a dalšími vlastnosti, které jsou pro robot charakteristické. V této části kapitoly se budeme věnovat především mobilitě a autonomii robotů. Na základě jejich společných rysů je poté můžeme rozdělit do několika základních kategorií.

1.1.1 Mobilita robotu

Mobilita patří mezi základní vlastnosti robotu. Na základě této vlastnosti robotu volíme metody jeho lokalizace, velikost pracovního prostoru a také jeho senzorického a výpočetního vybavení. Podle schopnosti pohybovat se můžeme rozdělit roboty na stacionární a mobilní.

Stacionární robot je robot bez možnosti volného pohybu. Je pevně připevněn k jednomu pevnému místu. Kolem tohoto bodu, takzvané základny, se může otáčet, či se vůči ní posouvat, ale rozsah jeho pohybu je omezen. Uplatnění tohoto typu robotu najdeme především v průmyslu v podobě manipulátorů.

Mobilní robot je takový robot, který je sám schopen přemístit se v prostoru. K přesunu využívá různé kinematické modely pohybu v závislosti na prostředí, ve kterém se má

pohybovat. Nejčastěji se můžeme setkat s kolovými a pásovými roboty, méně častější už jsou kráčející roboty, které napodobují chůzi člověka nebo zvířete. Pohyb mobilního robotu není omezen pouze na souši, může i létat ve vzduchu nebo plavat ve vodě. Každý mobilní robot má prvky, které snímají a ovlivňují prostředí. Těmto prvkům se říká senzory a akční členy.

- **Senzor** je prvek, pomocí kterého získává robot informace o prostředí, ve kterém se nachází. Obecně vzato jsou senzory pro robot to samé jako smysly pro člověka. Data shromážděná ze senzorů nahrazují robotu zrak, hmat či sluch. Množství a rozmanitost senzorů je velká. Robot může být vybaven od jednoduchých dotekových snímačů až po složité sonary, kamery, infračervená čidla a další.
- **Akční člen** je prvek, pomocí kterého robot ovlivňuje své okolí. Každý mobilní robot má minimálně jeden akční člen a tím je mechanismus umožňující mu pohyb. Tím může být například motor pohánějící vrtuli, vodní šroub či kola robotu. Robot je často vybaven nějakým druhem robotické paže, která mu umožňuje manipulovat s předměty [1]. Možnosti využití akčních členů jsou velmi široké a mění se podle požadavků na funkci mobilního robotu.

Lokalizace a řízení stacionárních robotů je díky omezenému pohybu poměrně přímočaré na základě informací získaných pomocí senzorů otočení nebo posunutí. Naopak u mobilních robotů je řešení těchto problémů velmi náročné a složité [2]. Způsobům možného řešení lokalizace mobilních robotů se zabývá kapitola 2.

1.1.2 Autonomie robotu

Úroveň autonomie robotu závisí na tom, do jaké míry je robot závislý na činnosti lidského operátora. Podle toho, zda se robot řídí pouze pokyny operátora nebo se naopak rozhoduje pouze na základě informací ze svých senzorů, můžeme rozdělit roboty do tří základních skupin: dálkově řízené, semiautonomní a autonomní.

Dálkově řízené neboli **teleoperované roboty** vykonávají práci pouze na základě přímých pokynů živého operátora, který ovládá veškeré výstupy robotu. Jejich cílem je co nejpřesněji interpretovat přijaté příkazy a zpětně zobrazit aktuální stavy senzorů.

Robotu, který pouze částečně splňuje výše zmíněné požadavky plně autonomního robotu, se říká **semiautonomní robot**. V tomto případě operátor zadává částečné cíle a robot autonomně vykonává některé řídící činnosti. V některých případech může robot přejít i do plně autonomního režimu, ale pouze na omezenou dobu. Jedná se například o situace, kdy dojde ke ztrátě dostupnosti řídícího signálu nebo k nebezpečné situaci která vyžaduje okamžitou reakci apod.

Autonomní robot je schopen samostatného vykonávání úkolů. Činnost lidského operátora je v tomto případě omezena pouze na zadávání nových úkolů. Způsob dosažení cíle volí

robot samostatně na základě stavu okolního světa a svého řídícího programu. Aby mohl být robot požadován za plně autonomního, musí tedy splňovat tyto vlastnosti:

- schopnost dlouhodobé práce bez intervence lidského operátora
- aktivně shromažďovat a zpracovávat informace o svém okolí
- schopnost samostatného pohybu v prostoru a vyhýbání se překážkám
- schopnost vyhýbat se situacím, které by vedly k ohrožení člověka, poškození majetku nebo samotného robotu

Požadovaná úroveň autonomie robotu se mění v závislosti na množství neurčitosti v operačním prostředí. Pro robotické manipulátory využívané v průmyslu není problém vykonávat svojí činnost na základě pevně dané procedury bez jakékoliv autonomie. Je to i logické, neboť výrobce produktů nechce, aby robot pracoval podle sebe, ale aby pouze plnil přesně zadané pokyny. Navíc tyto manipulátory mohou vykonávat stejnou činnost stále dokola mnohem přesněji a spolehlivěji než člověk. V jiných případech je autonomie robotu nezbytná. Jedná se o procedury, u kterých neznáme přesný postup řešení, ale pouze cíl, kterého chceme dosáhnout. V takové situaci je nezbytné využít plně či semiautonomního robotu [3].

1.2 Multirobotické systémy

Multirobotické systémy využívají vzájemné spolupráce několika robotů za účelem dosáhnutí cíle. Skupina robotů je schopna vykonávat úkoly, jejichž splnění by pro jeden robot bylo velmi složité, či dokonce nemožné. V mnohých případech také nasazení více robotů výrazně sníží dobu potřebnou k vykonání úkolu, umožní použití méně prostředků a dosáhne snížení energetické náročnosti. Větší skupina robotů může také být schopna dokončit zadaný úkol i v případě selhání jednoho nebo i více robotů. Mezi klíčové činnosti multirobotického systému patří komunikace, koordinace a kooperace.

- **Komunikace** je nejčastěji realizována rádiovým spojením, ať už se jedná o technologii WiFi, bluetooth, zigBee nebo proprietární rádiové spojení. Často se také používá optická komunikace (IrDA). Komunikace ovšem nemusí být explicitní a je možné použít i komunikaci založenou na modifikaci společného prostředí, nejčastěji použitím značek. Jako komunikaci můžeme využít i sledování chování ostatních členů týmu [4].
- **Koordinace** je zajištění koherentního chování jednotlivců ve skupině. Cílem koordinace je zajistit, aby činnost jednoho člena týmu negativně neovlivnila činnost jiného člena. Typickým příkladem koordinovaného chování je pohyb ve formaci. K zajištění koordinace je nezbytně nutná nějaká forma komunikace nikoliv však nutně komunikace explicitní. Pro zajištění pohybu ve formaci stačí komunikace ve formě pozorování

činnosti ostatních. Informace o pozici ostatních spolu s několika málo pravidly zajistí koordinované chování celé skupiny [4].

- **Kooperace** je nejvyšší forma skupinového chování. Kooperace, tedy spolupráce, je činnost při které je také vyžadována komunikace. Při spolupráci je dosahováno takových cílů, k jejichž dosažení nestačí schopnosti jediného robotu. Takovou činností může být například spolupráce při přesunu velkého břemene, kterým jediný robot není schopen pohnout. V multirobotických systémech nemusí být kooperace přítomna [4].

1.2.1 Řízení multirobotických systémů

Řízení multirobotických systémů je velmi náročný problém. Pro řešení tohoto problému existují dva základní možné přístupy – centralizovaný a decentralizovaný. Ty se od sebe liší především tím, jakým způsobem jsou v systému uchovávány a zpracovány data získaná ze senzorů jednotlivých robotů.

Centralizovaný přístup využívá řídícího prvku, který získává informace ze všech ostatních robotů a zajišťuje celou funkci multirobotického systému. Shromažďuje a vyhodnocuje data získaná ze senzorů celého systému, přiděluje úkoly jednotlivým robotům a stará se o splnění zadané úlohy. Tento prvek je realizován jako statický počítač nebo jako jeden z robotů, kterému je explicitně přidělena funkce řídícího prvku. Hlavní nevýhodou tohoto přístupu je závislost celého systému na funkčnosti a dostupnosti řídícího prvku. V případě jeho selhání dojde ke kolapsu celého systému.

Decentralizovaný přístup (též distribuovaný) pro řešení problému a nalezení cesty k cíli využívá všechny roboty v systému rovnoměrně. Nenachází se tu žádný řídící prvek, který by jakýmkoliv způsobem řídil prvky ostatní. Systém se skládá ze skupiny autonomních robotů, přičemž chování každého jednoho robotu je závislé na prostředí, ve kterém se pohybuje a na informacích získaných z ostatních robotů skupiny. Jako typické příklady decentralizovaného přístupu řízení můžeme uvést multiagentní přístup řízení, robotický cluster a roje robotů.

- **Multiagentní přístup** je jedním z distribuovaných systémů řízení skupiny robotů. Rozdělování úkolů, koordinace a kooperace je řešena pomocí vyjednávání. Každý agent má své individuální cíle a schopnosti. Tyto schopnosti nabízí ostatním a naopak ostatní využívá k řešení svých individuálních cílů. Typickým mechanizmem je aukce a vyjednávání [4].

- **Robotický cluster** pracuje na obdobném principu, jako počítačový cluster. Mobilní roboty sdílejí svůj výpočetní výkon s ostatními roboty v clusteru za účelem vyřešení náročných úloh, které by samotný robot nebyl schopen vyřešit.

- **Roje robotů** (anglicky *swarm robotics*) je typem decentralizovaného přístupu řízení, které napodobuje reálné biologické systémy. Součástí roje robotů je velké množství

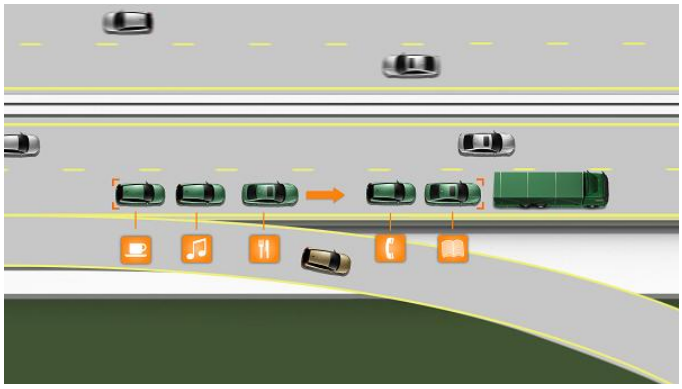
jednoduchých jedinců, kteří jsou schopni interakce s okolím a mezi sebou navzájem. Na základě této interakce je založeno jakékoliv složitější chování roje, kdy z jednoduchých komunikačních vzorů vyplývá komplexní chování celého roje. Inspirací tohoto přístupu řízení je chování mravenčích kolonií nebo hejn ryb a ptáků [5].

1.3 Aplikace mobilní robotiky

V tomto oddílu je uvedeno několik příkladů aplikací mobilních robotů. Mobilní roboty se používají především v takovém prostředí, které je člověku nebezpečné či nepříjemné, jako jsou provozy s vysokou hladinou hluku, vysokou teplotou, nebezpečnými plyny apod. Další využití můžeme najít v úlohách, které mají dlouhý a náročný pracovní cyklus. V neposlední řadě je mobilní robotika využívána pro usnadnění běžných činností člověka, pro jeho zábavu a vzdělání.

1.3.1 Automobilový průmysl

Mobilní robotika v automobilovém průmyslu slouží především k získání doplňujících informací o stavu a poloze vozidla. Dochází tím ke zvýšení bezpečnosti uživatele vozidla i ostatních účastníků silničního provozu. GPS[5] navigace, sledování krajnice a bezpečné vzdálenosti mezi vozidly, adaptivní tempomat, parkovací asistent či systém upozorňování na dopravní značky jsou dnes běžným vybavením každého vozidla. Zajímavé využití mobilní robotiky v automobilovém průmyslu jsou konvojové systémy. První vozidlo je zpravidla řízeno člověkem a ostatní autonomně řízená vozidla ho následují. Jejich uplatnění najdeme především v nákladní dopravě. Tato technologie přináší zlepšení v celé řadě oblastí. Nejvýznamnější z nich je bezpečnost silničního provozu, neboť dochází k minimalizaci lidského faktoru, který je příčinou více než 80 procent dopravních nehod [6].



Obrázek 1: Příklad konvojového systému
Převzato z [6]

[5]Global Positioning System

Zvláštním případem využití mobilní robotiky v automobilovém průmyslu jsou autonomní vozidla. Tato vozidla jsou schopna samostatného pohybu v terénu. Není pro ně problém jezdit po parkovištích při hledání volného místa k zaparkování, dokáží manévrovat v zalidněné pěší zóně nebo projíždět zácpami nejužších center měst. Za zmínku stojí projekt Google Car [7] nebo závod autonomních vozů DARPA [8].

1.3.2 Vojenský průmysl

Díky štědrým dotacím ze státních rozpočtů se mobilní robotika používaná ve vojenském průmyslu řadí mezi nejrychleji se rozvíjející oblasti robotiky. Pozemní mobilní roboty se používají k přepravě materiálu nebo k odstranění nástražných min. V poslední době se tyto roboty využívají dokonce i k samotnému boji. Tato teleoperovaná vozidla jsou mimo svého senzorického vybavení opatřena nejrůznějšími zbraněmi. Ve vzduchu poté operují bezpilotní letouny, známé pod zkratkou UAV (anglicky *Unmanned Aerial Vehicle*), které prozkoumávají okolí a monitorují pohyb pozemních jednotek či plní jiné úkoly [9].

Obrázek 2: Bezpilotní letoun
Převzato z [9]

1.3.3 Výzkum

Mobilní robotiku můžeme najít dnes prakticky ve všech odvětvích výzkumu. Nejčastěji se roboty používají na prozkoumávání míst, které jsou člověku nedostupné či jsou pro něj nebezpečné. Velkou roli hraje mobilní robotika také při výzkumu vesmíru. Použití lidské posádky je v tomto případě velmi drahé a riskantní, proto se zde využívají teleoperované nebo semiautonomní roboty. Při průzkumu vzdálených planet je alespoň částečná autonomie robotu nutná, neboť při přenosu řídícího rádiového signálu dochází ke značnému zpoždění. Například při průzkumu Marsu byla použita sonda Opportunity, jejímž cílem bylo prozkoumat a zmapovat povrch planety.

1.3.4 Zábava a vzdělání

Nějaký druh mobilního robotu je dnes součástí prakticky každé domácnosti a usnadňuje člověku jeho každodenní činnost. Nejvíce rozšířené jsou robotické vysavače. Tyto roboty jsou schopny autonomního plánování cesty v prostředí ve kterém se vyskytují. Na obdobném principu pracují též autonomní sekačky nebo roboty na čištění oken a podlah. Velký krok dopředu se odehrál také v oblasti vývoje robotů pro zábavu. Příkladem mlže být robotický pes Aibo nebo Robotsapien. Mobilní robotika ve vzdělání pomáhá studentům snáze a rychleji pochopit danou problematiku a získat praxi v práci s reálnými roboty. Úroveň výukových robotů se různí – od robotických stavebnic vybavených základními senzory, až po plně vybavené autonomní roboty. Jedním z příkladů robotických systémů určených ke vzdělávání je projekt SyRoTek, který je blíže popsán v kapitole 3.

1.4 Shrnutí kapitoly

Úvod této kapitoly je věnován představení oboru robotika, jakožto multidisciplinárního oboru z oblasti počítačové vědy a techniky. Zmíněny jsou také tři zákony robotiky a význam slova robot. První podkapitolou je taxonomie robotů, ve které jsou roboty rozděleny do několika základních skupin. Podle schopnosti pohybovat se je dělíme na roboty stacionární, což jsou roboty bez možnosti volného pohybu a roboty mobilní, které jsou schopny pohybu v prostoru. V této části kapitoly jsou také popsány prvky mobilního robotu, které snímají a ovlivňují prostředí. Podle úrovně autonomie dále dělíme roboty na dálkově řízené, semiautonomní a autonomní. Zatímco dálkově řízené roboty plně ovládá lidský operátor, autonomní roboty jsou schopny samostatného vykonávání úkolů na základě zadaných cílů. Semiautonomní robot je schopen autonomní činnosti, ale pouze na omezenou dobu. Druhá podkapitola se zabývá multirobotickými systémy a možnostmi jejich řízení. Multirobotické systémy využívají vzájemné spolupráce několika robotů za účelem dosáhnutí cíle. Pro tuto spolupráci jsou klíčové tři činnosti - komunikace, koordinace a kooperace. Existují dva základní možné přístupy pro řešení problému řízení multirobotických systémů. Centralizovaný přístup využívá řídícího prvku, který získává informace ze všech ostatních robotů a zajišťuje celou funkci multirobotického systému, zatímco decentralizovaný přístup pro řešení problému a nalezení cesty k cíli využívá všechny roboty v systému rovnoměrně. K decentralizovanému přístupu je uvedeno několik možných příkladů řízení. V závěru kapitoly je uvedeno několik aplikací mobilní robotiky a jejích prostředků.

2 Lokalizace mobilních robotů

Problém lokalizace, často též nazýván jako odhad polohy, je jedním z hlavních předmětů výzkumu v oblasti robotiky v posledních letech. Řešení tohoto problému lze definovat jako hledání odpovědi na otázku „Kde to jsem?“ z pohledu robotu. Správné určení pozice a orientace robotu v prostoru je klíčové pro vyřešení úloh rozpoznání cíle (anglicky *goal recognition*) a plánování cesty (anglicky *path planning*). Jedná se tedy o základní problém při řešení všech robotických úloh. Při hledání řešení tohoto problému byla vyvinuta řada systémů, senzorů a různých lokalizačních technik. Tato kapitola je věnována rozdělení těchto technik do několika základních skupin dle jejich společných charakteristik. Věnuje se také popisu prostředí, ve kterém se roboty pohybují. Dále se zabývá vizuální lokalizací, konkrétně principem lokalizace ve známé mapě a lokalizace podle orientačních bodů. Poslední významnou částí kapitoly je seznámení se s principem a výhodami lokalizace skupiny mobilních robotů.

2.1 Taxonomie lokalizačních technik

S rychlým vývojem mobilní robotiky dochází i k rychlému rozvoji lokalizačních technik, přičemž každá z nich má své výhody a nevýhody. Prostředky a techniky pro lokalizaci robotu jsou vybírány s ohledem na vlastnosti úkolu, kterým je robot pověřen. V této části kapitoly je uvedeno základní rozdělení technik právě na základě společných rysů a charakteristik požadovaných vlastností.

2.1.1 Prostředky relativní a absolutní lokalizace

Lokalizační prostředky poskytují údaj o poloze a případně i orientaci robotu. Nicméně přesnost všech prostředků není stejná a také nezůstává s narůstajícím časem konstantní. Na základě této vlastnosti můžeme rozdělit lokalizační prostředky na relativní a absolutní.

Prostředky relativní lokalizace (anglicky *relative localization* nebo též *dead reckoning*) odhadují relativní změnu polohy robotu, tedy typicky jeho posunutí a rotaci v rovině vůči jeho předcházející poloze. Celková změna polohy robotu, vztažená k počáteční nebo poslední známé poloze, je potom určena na základě skládání všech dílčích změn pozice robotu. Nepřesnosti jednotlivých měření, ke kterým dochází s každou nově určenou pozicí, vedou k akumulaci chyby rostoucí s časem a ujetou vzdáleností. Proto se prostředky relativní lokalizace používají pouze na krátkodobý odhad pozice robotu. Mezi nejrozšířenější prostředky patří odometrie, gyroskop a inerciální navigace [2].

Prostředky absolutní lokalizace poskytují informace o pozici robotu nezávisle na všech předchozích polohách. Aktuální pozice je tedy určena pouze z jednoho měření, nikoliv skládáním dílčích změn polohy. Tím se eliminuje akumulace chyby, ke které dochází u prostředků relativní lokalizace. Měření mohou být úplná a obsahovat souřadnice polohy robotu včetně jeho orientace nebo částečná, tedy zajišťovat pouze polohu nebo pouze

orientaci robotu. Nevýhodou těchto metod jsou velké technické a výpočetní požadavky a většinou i nižší frekvence měření. Nejrozšířenějším prostředkem absolutní lokalizace jsou globální satelitní systémy [3].

V praxi se často využívá kombinací dvou nebo více prostředků zároveň. Lokalizační algoritmus poté musí zkombinovat údaje ze všech dostupných relativních i absolutních prostředků a vytvořit odhad polohy robotu v daném čase. Hlavním problémem potom je, jak správně kombinovat a prezentovat data z několika různých senzorů najednou. Tato fúze dat z více senzorů (anglicky *multi-sensor fusion*) umožňuje daleko přesnější lokalizaci než jakou může poskytnout pouze jeden senzor a to zejména při použití různých typů senzoru. Při volbě senzorického vybavení robotu je proto dobré brát v úvahu výhody a nevýhody jednotlivých senzorů, neboť přednosti jednoho lokalizačního prostředku mohou vhodně nahradit nedostatky toho druhého a naopak. Možné řešení problému fúze dat z více senzorů lze nalézt v [2][3][10][11].

2.1.2 Lokální a globální lokalizace

Pracovní prostředí a ani výchozí poloha nemusejí být robotu v okamžiku jeho zapnutí známé. Na základě toho, zda si s daným problémem dokáže robot poradit či nikoliv, je možné rozdělit lokalizační techniky na lokální a globální.

Lokální lokalizace jsou metody určení polohy, při kterých je robotu známa jeho výchozí poloha. Cílem této metody je vypořádat se s chybami jednotlivých měření a tím zamezit akumulaci chyb, kterou jsou zatíženy prostředky relativní lokalizace. Nicméně i při krátkodobém selhání lokalizace dochází k nezotavitelným chybám. Techniky řešící tento problém se nazývají lokální techniky, často též uváděné jako techniky sledování pozice (anglicky *tracking*) [10].

Složitějším problémem je řešení pomocí **globální lokalizace**. Tyto metody jsou schopny lokalizace robotu i bez předchozí znalosti jeho pozice nebo orientace. Je tedy nutné, aby tyto metody byly schopné se vypořádat s jakýmkoli možným umístěním robotu. Techniky, které jsou schopny řešit tento problém se nazývají globální techniky nebo techniky řešící problém probuzeného robotu (anglicky *wake-up robot problem*). Typicky se používají v situacích, při kterých lze předpokládat dlouhodobé selhání lokalizace. Speciální situací, se kterou se globální techniky dokáží také vypořádat, je problém uneseného robotu (anglicky *kidnapped robot problem*). „Únosem“ se v tomto případě myslí přemístění robotu do libovolné pozice během jeho provozu, aniž by byl robot o této změně polohy informován. Lokalizační techniky mají v tomto případě za úkol detekovat „únos“ robotu a určit jeho novou polohu. Tento problém simuluje reálné situace, při kterých dochází k dlouhodobému selhání lokalizačních technik, nebo k náhlé změně pozice robotu například vlivem nárazu nebo posunutí [10].

Schopnost robotu řešit výše zmíněnou situaci je určena jeho senzorickým vybavením, stejně tak i následným správným zpracováním a prezentací získaných dat [2].

2.1.3 Statické a dynamické prostředí

Jedním z hlavních faktorů, který výrazně komplikuje problém lokalizace mobilních robotů je charakteristika prostředí, ve kterém se robot pohybuje. Na základě toho, zda se v průběhu času mění či nikoliv, můžeme rozdělit prostředí na statické a dynamické.

Statické prostředí je konstantní a neměnné. Jediným pohybujícím se objektem je robot, jehož polohu a orientaci chceme určit. Lokalizační prostředky a techniky se nemusí zabývat možností zákrytu robotu dalším pohybujícím se objektem. Díky těmto konstantním vlastnostem se ve výzkumu lokalizačních technik využívá výhradně statické prostředí, a to i přesto, že v reálném světě neexistuje.

Dynamické prostředí obsahuje další pohybující se objekty, jako jsou například další roboty, lidé nebo přepravovaný materiál. Tyto pohybující se objekty výrazně ztěžují problém lokalizace, neboť ovlivňují lokalizační prostředky. Ve skutečnosti pak robot s neměnnou orientací a polohou získává v průběhu času ze svých senzorů rozdílné informace pouze vlivem objektů pohybujících se kolem něj [3]. Řešení problému lokalizace v dynamickém prostředí je mnohem obtížnější než lokalizace v prostředí statickém. Nicméně pro využití robotů v reálném světě je tento problém nutné vyřešit, proto je problém lokalizace robotů v dynamickém prostředí jedním z hlavních témat výzkumu současnosti.

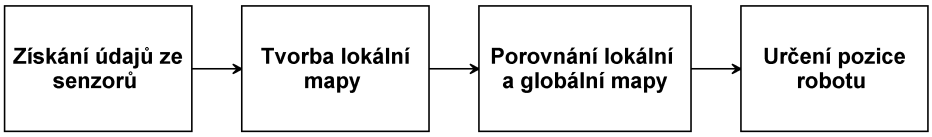
2.2 Vizuální lokalizace

Vizuální lokalizace je metoda určení polohy, která je založena na údajích získaných z jednoho nebo více optických senzorů. Pracovní prostředí robotu je pak vnímáno v podobě souboru geometrických informací, jako jsou orientační body (anglicky *landmarks*) v prostředí, modely objektů a mapy ve 2D nebo 3D. Pomocí těchto údajů může robot získat velmi podrobné informace o své pozici a o prostředí, ve kterém se pohybuje. Samotné senzory jsou umístěny na robotu jako součást jeho senzorického vybavení nebo mimo něj, sledující pracovní prostor robotu. Často se také můžeme setkat se situací, kdy je senzor připevněn k UAV, které sleduje skupinu pozemních mobilních robotů. Mezi nejběžněji využívané senzory patří kamery a laserové dálkoměry. Ze získaných dat můžeme určit relativní pozici robotu vzhledem k senzoru nebo relativní polohu jednotlivých robotů k sobě navzájem. Pokud však známe absolutní pozici a orientaci senzoru nebo nějakého významného bodu v obraze, můžeme určit i absolutní polohu robotu.

2.2.1 Lokalizace ve známé mapě

Lokalizace ve známé mapě (anglicky *map-based positioning*) je lokalizační technika, při které se robot snaží sestavit mapu svého okolí na základě dat získaných ze senzorů. Tato mapa je následně porovnána s globální mapou prostředí. Při nalezení shody může robot vypočítat svojí polohu a orientaci. Globální mapa může být robotu zadána z vnějšího zdroje nebo si ji robot musí prvně vybudovat během svého pohybu v neznámém prostředí,

v takzvaném stádiu průzkumu. Existuje i třetí možnost, která je nazývána simultánní lokalizace a mapování, neboli SLAM (anglicky *Simultanneous Localization and Mapping*). V tomto případě se robot pohybuje v neznámém prostředí a postupně vytváří globální mapu a zároveň využívá získané údaje k určení své pozice. Podrobné informace o principu SLAM lze najít v [11].



Obrázek 3: Princip lokalizace ve známé mapě
Převzato z [12]

Mezi senzory používané při lokalizaci robotu ve známé mapě patří mimo kamery i laserové nebo infračervené dálkoměry, sonary, radary, doteková čidla a další. Nicméně tato práce se věnuje analýze obrazu získaného z kamery, proto je tato technika vedena jako prostředek vizuální lokalizace. Informace získané ze svých senzorů musí robot správně zpracovat a prezentovat. Podle typu prezentace prostředí lze mapy rozdělit do tří základních skupin: senzorická mapa, geometrická mapa a topologická mapa.

- **Senzorická mapa** je nejnižší možná reprezentace prostředí. Jedná se pouze o vhodně reprezentovaná a uchovaná senzorická data. Takovou senzorickou mapou je například mřížka obsazenosti. Prostředí je rozděleno na dílky uspořádané do mřížky. Každá buňka mřížky v sobě uchovává pravděpodobnost, že je prostor obsazený nějakou překážkou nebo je volný. Výhodou je snadná tvorba a možnost fúze dat přímo při tvorbě mapy. Nevýhodou je paměťová náročnost reprezentace [4].

- **Geometrická mapa** reprezentuje prostředí geometrickými primitivy, jako jsou přímky, polygony, kružnice apod. Takto vystavěná mapa má určitou míru abstrakce. Abstrahuje model od přílišných detailů. Tvorba takové mapy je už výpočetně náročnější, neboť je třeba najít takové geometrické primitivum, které nejlépe modeluje naměřená data. Je ovšem přívětivější pro další práci a pro plánování trajektorie. Díky abstrakci není také tak náročná na paměťový prostor [4].

- **Topologická mapa** je ještě abstraktnější model prostředí než geometrická mapa. Prostředí je modelováno grafem, ve kterém uzly reprezentují jednotlivá místa, která jsou pro robot nějakým způsobem význačná či zajímavá. Hrany uzlu reprezentují způsob, jakým se robot přemístí z jednoho místa do druhého. Topologické mapy nemusí obsahovat žádnou geometrickou informaci. Typickou ukázkou topologické mapy je mapa linek pražského metra. Stavba takové mapy klade vysoké nároky na zpracování senzorických dat, ve kterých je nutné rozpoznat význačná místa [4].

2.2.2 Lokalizace podle orientačních bodů

Orientační body jsou charakteristické rysy prostředí, které může robot rozpoznat pomocí svých senzorů. Mohou se vyskytovat v podobě různých geometrických tvarů, jako jsou obdélníky, přímky nebo kruhy. Často též obsahují další doplňkové informace, například ve formě čárových kódů. Tyto body jsou vybírány na základě jejich snadné identifikace. Důležitý je především jejich kontrast oproti jejich pozadí. Robot je schopen rozpoznat tyto body pouze pokud jsou mu předem známy, tedy pokud se nachází v paměti robotu nebo jsou součástí lokalizačního algoritmu. Hlavním úkolem lokalizace je poté rozpoznání tohoto bodu v obraze a následné určení pozice robotu. Podle typu orientačních bodů můžeme rozdělit tento způsob lokalizace do tří základních podskupin [12]

První podskupinou je lokalizace pomocí **přirozených orientačních bodů** (anglicky *natural landmarks*). Hlavním problémem tohoto typu je správná detekce a porovnání charakteristických vlastností bodu na základě dat poskytovaných senzory. V případě využití kamer jsou nejčastěji používanými orientačními body dlouhé kolmé hrany, které můžeme najít například u dveří. Pokud ale chceme určit polohu robotu na základě dálkových senzorů, je vhodné zvolit jako orientační body například roh místnosti, nebo dlouhou rovnou zeď. Správné zvolení těchto bodů je velmi důležité, protože snižuje šanci možné záměny orientačního bodu za jiný a zvyšuje přesnost odhadu polohy robotu.

Druhým typem je lokalizace pomocí **umělých orientačních bodů** (anglicky *artificial landmarks*). Tento způsob je jednoduší a přesnější, protože dané body jsou zpravidla navrženy tak, aby měly optimální kontrast se svým pozadím. Mimo to jsou jejich rozměry a tvar předem známé a umožňují snadnou a rychlou identifikaci. Typickým příkladem umělých orientačních bodů jsou černé čtverce s bílými značkami v rozích nebo černobílý vzor ve tvaru elipsy.

Třetím typem je lokalizace robotu pomocí **sledování vodící čáry** (anglicky *line navigation*). Tento typ lokalizace má široké využití především v průmyslu. Vodící čáru si lze představit jako kontinuální orientační bod. Nicméně optický senzor pro svoji správnou funkci musí být ve většině případů velmi blízko vodící čáry, tudíž je pohyb mobilního robotu značně omezen [13].

Obdobně jako v případě lokalizace ve známé mapě se i u lokalizace podle orientačních bodů můžeme setkat se situací, při které orientační body nejsou robotu dopředu známé. V takovém případě by výběr a lokalizace těchto orientačních bodů měl být součástí lokalizačního procesu robotu.

2.3 Lokalizace multirobotických systémů

Všechny výše zmíněné lokalizační metody a prostředky se zaměřují na lokalizaci pouze jediného robotu. Jak ale vyřešit problém lokalizace skupiny mobilních robotů? Nabízí se možnost vyřešit problém lokalizace N robotů pomocí lokalizace každého robotu zvlášť, což je platný přístup, pomocí kterého lze získat dobré výsledky v mnoha aplikacích. Pokud

se roboty dokáží detekovat mezi sebou navzájem, nabízí se zde další řešení. Když robot dokáže určit relativní polohu dalšího robotu vzhledem k té své, mohou oba roboty na základě tohoto údaje upravit svůj vlastní odhad o aktuální poloze a tím vylepšit přesnost lokalizace. Schopnost robotu vyměňovat si vzájemně informace má velký význam především v souvislosti s globální lokalizací, neboť každá takováto výměna informací významně sníží nepřesnost v odhadu pozice robotu. Význam výměny informací je zvláště výrazný při lokalizaci heterogenní skupiny mobilních robotů. Jako příklad je možné uvést skupinu robotů, kde několik z nich je vybaveno velmi přesnými a nákladnými senzory a ostatní roboty jsou vybaveny pouze senzory levnými. Předáváním informace napříč skupinou robotů prakticky umožňuje všem robotům využít údaje z přesných senzorů a razantním způsobem tak vylepšit přesnost odhadu pozice u celé skupiny robotů. Řešení problému lokalizace skupiny robotů jako celku také nabízí možnost zlepšit účinnost lokalizačního algoritmu za použití menšího množství dat [14]. Nejrozšířenější způsob lokalizace mobilních robotů je založen na systému GPS a nic se na tom nemění ani v rámci multirobotických systémů. Ovšem přesnost tohoto systému není pokaždé dostačující a také není možné ho použít uvnitř budov, jelikož modul systému pro svoji funkci vyžaduje výhled na otevřené nebe. Nedostupnost systému GPS je možné vyřešit pomocí aktivních lokalizačních prvků, takzvaných majáků, které se rozmístí po prostředí, ve kterém se robot pohybuje. Majáky poté plní obdobnou funkci jako družice systému GPS na oběžné dráze. Mezi další možné prostředky lokalizace patří například lokalizace na základě informací z WiFi a Bluetooth [15], ultrazvukových snímačů a technologie Zigbee [16] nebo jiných metod založených převážně na kombinaci dat z několika různých lokalizačních prostředků [14]. Všechny tyto metody ovšem vyžadují instalaci drahých lokalizačních modulů nebo pohyb robotu v předem známém prostředí.

V následujících kapitolách jsou prezentovány vizuální lokalizační metody, při kterých kamera sleduje pracovní prostor robotu. Výhodou tohoto řešení je možnost využití malých robotů, které nejsou schopné unést těžké senzory nebo potřebnou výpočetní techniku. Lokalizace se provádí na základě orientačních bodů, které souvisejí s tvarem robotu nebo lokalizačním vzorem připevněným na tělo robotu. Na základě nalezení polohy těchto bodů je potom určena celková pozice a případně i orientace robotu.

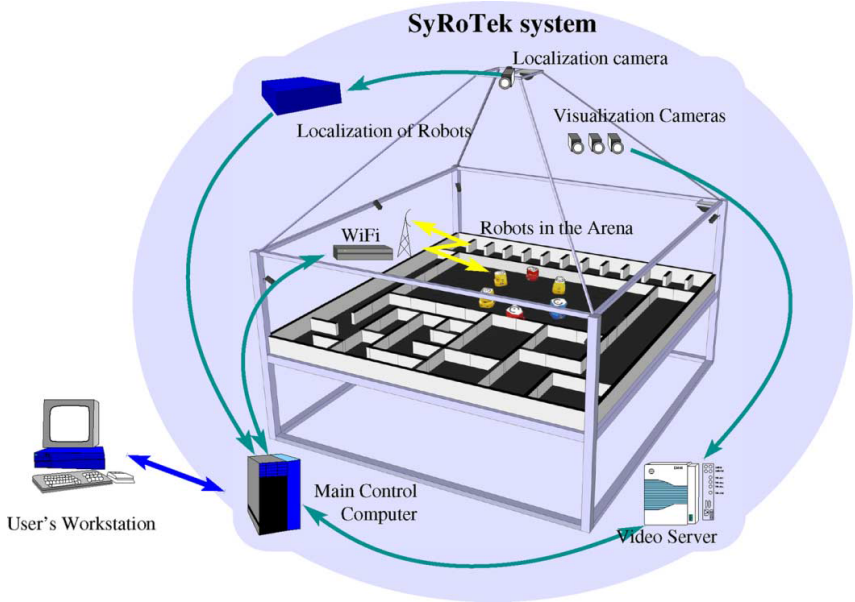
2.4 Shrnutí kapitoly

Úvod kapitoly se věnuje problému lokalizace mobilních robotů, který lze definovat jako hledání odpovědi na otázku „Kde to jsem?“ z pohledu robotu. Jedná se o základní problém mobilní robotiky. První podkapitolou je taxonomie lokalizačních technik a prostředků, ve které jsou tyto techniky rozděleny do několika základních skupin podle jejich společných rysů. Podle toho, zda se přesnost lokalizace horší s narůstajícím časem a ujetou vzdáleností můžeme rozdělit lokalizační prostředky na relativní a absolutní. Prostředky relativní lokalizace odhadují změnu polohy robotu vůči jeho předcházející poloze, čímž dochází k akumulaci chyb, které vnikají díky nepřesnostem při jednotlivých měřeních. Oproti tomu prostředky absolutní lokalizace poskytují informace o pozici robotu nezávisle na všech

předchozích polohách a tím eliminují akumulaci chyby. Podle schopnosti robotu zjistit svojí aktuální polohu a orientaci i bez znalosti výchozí pozice dělíme lokalizaci na lokální a globální. Zatímco metodám lokální lokalizace je výchozí poloha robotu známa, globální lokalizace dokáže určit polohu robotu i bez této znalosti. Výrazným faktorem komplikující lokalizaci je charakteristika prostředí, ve kterém se robot pohybuje. Statické prostředí je konstantní a neměnné a jediným pohybujícím se objektem je robot. V dynamickém prostředí můžeme najít další pohybující se objekty, jako jsou jiné roboty nebo lidé. Druhou podkapitolou je vizuální lokalizace, což je metoda určení polohy, která je založena na údajích z optických senzorů. Jednou z využívaných technik vizuální lokalizace je lokalizace ve známé mapě, při kterém se robot snaží sestavit mapu svého okolí a tu potom porovnat s globální mapou uloženou v paměti. Podle toho, jakým způsobem je okolí prostředí prezentováno, můžeme mapy rozdělit do tří základních skupin: senzorická mapa, geometrická mapa a topologická mapa. Další z využívaných technik vizuální lokalizace je lokalizace podle orientačních bodů. Tato metoda je založena na rozpoznávání charakteristických rysů prostředí. Podle typu orientačních bodů můžeme rozdělit tento způsob lokalizace do tří základních podskupin: lokalizace pomocí přirozených orientačních bodů, pomocí umělých orientačních bodů a pomocí sledování vodící čáry. Třetí podkapitolou je lokalizace multirobotických systémů, která se zabývá možnými způsoby řešení problému lokalizace skupiny mobilních robotů. Existují dva možné způsoby přístupu k řešení tohoto problému. Prvním z nich je řešit lokalizaci každého robotu zvlášť. Druhou možností je přistupovat k lokalizaci celé skupiny robotů jako celku. U této možnosti si roboty navzájem vyměňují informace ze svých senzorů a tím přispívají k vylepšení přesnosti lokalizace.

3 Systém SyRoTek

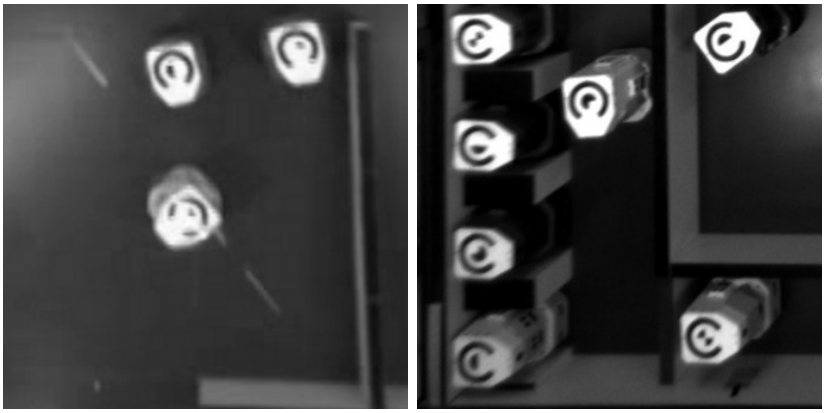
Počítače jsou součástí vzdělávání již několik desetiletí. Umožňují realizovat simulace reálných procesů a tím pomáhají snáze a rychleji pochopit studentům dané téma. Ovšem při vývoji algoritmu v ryze virtuálním prostředí nedochází ke konfrontaci s problémy reálného světa, především s šumem a nejistotami. Proto je důležité, aby součástí výuky byly i reálné systémy. Avšak pořízení a údržba těchto zařízení je velmi nákladná. Jedno z možných řešení tohoto problému spočívá ve sdílení požadovaného robotického hardwaru mezi několika institucemi. Systém SyRoTek je výsledkem projektu ČVUT v Praze. Motivací tohoto projektu bylo umožnit studentům a vědcům rozvíjet své vlastní algoritmy na multirobotické platformě v dynamickém prostředí. Uživatelé z celého světa mohou nahrát své algoritmy do systému a následně pozorovat chovaní robotů a analyzovat data získaná ze senzorů. Součástí systému SyRoTek je aréna s autonomními mobilními roboty zvanými S1R, komunikační infrastruktura, lokalizační modul a řídící počítač přístupný z internetu. Uživatelům je umožněno vzdáleně ovládat celý systém bez jakéhokoli vnějšího zásahu člověka, protože údržba robotů je plně autonomní. Nechybí zde ani možnost měnit konfiguraci arény díky odstranitelným překážkám a to i během experimentu. Po dokončení svého úkolu se roboty samostatně vrátí do dokovacích stanic. Přístup uživatele k robotům je zprostředkován pomocí řídícího počítače, který komunikuje s roboty prostřednictvím WiFi. Tento počítač obstarává také další klíčové funkce systému: kontroluje aktuální stav robotů, spravuje informace o uživatelích a slouží jako úložiště výukových materiálů. Součástí systému je i několik kamer, které monitorují prostor arény a tím umožňují uživateli získat lepší přehled o pohybu robotů. Tato kapitola rozšiřuje informace převzaté z [17][18][19].



Obrázek 4: Přehled systému SyRoTek
Převzato z [17]

3.1 Lokalizační modul

Důležitou součástí této platformy je vizuální lokalizační modul. Účelem tohoto modulu je určit pozici, orientace a identifikaci každého robotu v aréně. Skládá se z kamery snímající prostor arény, počítače a unikátního lokalizačního vzoru, který je umístěn na vrchu robotu. Vzor se skládá z černého kruhu, který určuje pozici a směr jízdy, a binárního kódu sloužícího k identifikaci robotu. Vizuální modul je prostředek absolutní lokalizace a tedy neztrácí s narůstajícím časem svoji přesnost. Bylo prokázáno, že lokalizační modul systému SyRoTek je schopen bezchybné činnosti po delší dobu (několik týdnů) s přesností 1cm u pozice a s přesností 3cm u orientace robotu. Získané informace o pozici robotu se používají především při systémové údržbě robotů, jako je například návrat do dokovací stanice. Běžný uživatel nemá k těmto informacím přístup, pokud mu není explicitně udělen. Hlavním požadavkem na tento modul je jeho spolehlivá a nepřetržitá (24/7) lokalizace v dynamickém prostředí za různých světelných podmínek. Modul poskytuje lokalizační údaje při frekvenci 12,5 FPS[6] [17]. Vlastní lokalizace robotů v obraze se provádí ve čtyřech krocích: rektifikace obrazu, určení pozice robotu, určení orientace robotu a identifikace robotu [20].

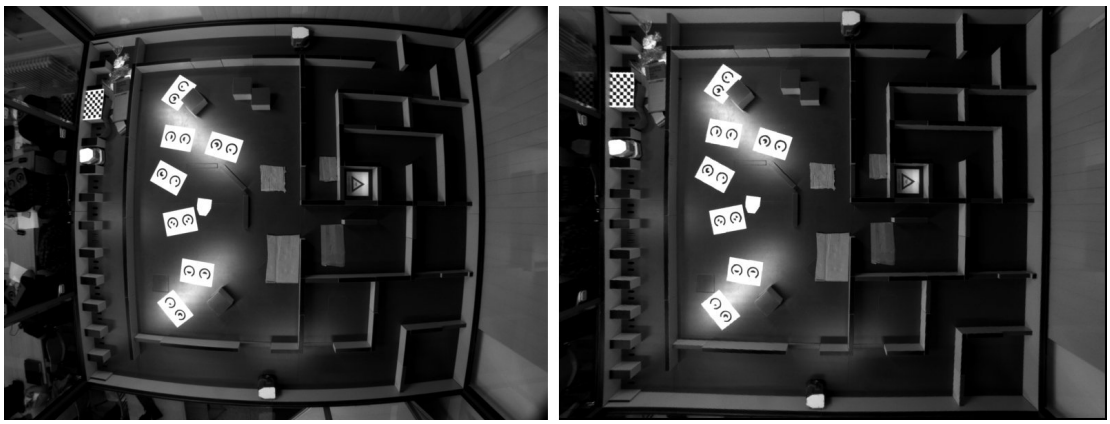


Obrázek 5: Světelné podmínky v SyRoTek aréně
Převzato z [20]

3.1.1 Rektifikace obrazu

Častým problémem při zpracování obrazu je částečná deformace získávaných snímků, ke které dochází vlivem chyby objektivu kamery. U drahých kvalitních kamer je tato deformace zpravidla zanedbatelná, ale u běžných je potřeba tuto chybu opravit. V případě, že je kamera programovatelná, je možné provést opravu snímku přímo na kameře. Další možností, kterou využívá i tento lokalizační modul, je úprava snímku v aplikaci před jeho samotnou prezentací. Cílem tohoto kroku je odstranit radiální zkreslení obrazu získaného z kamery tak, aby byl tvar arény v obraze obdélníkový a hrany arény byly zarovnané s okraji obrazu (viz obrázek 6).

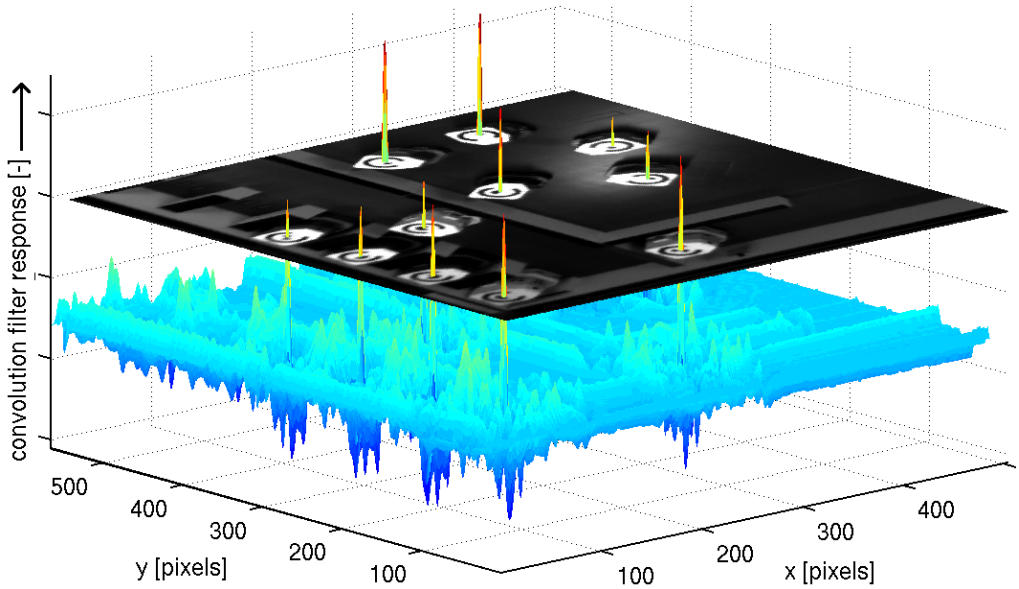
[6] anglicky Frames Per Second, snímky za sekundu



Obrázek 6: Obraz získaný z kamery před a po rektifikaci
Převzato z [18]

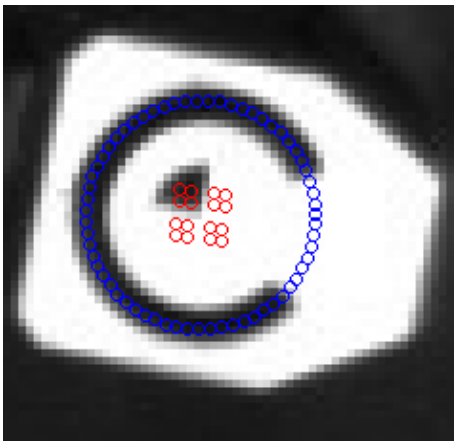
3.1.2 Určení pozice robotu

Díky provedené rektifikaci obrazu a kruhovému tvaru identifikačního vzoru je možné řešit problém lokalizace a orientace robotů pouze jako problém lokalizace ve 2D. Pro získání polohy robotu se využívá principu konvoluce (viz [21]). Jako konvoluční filtr jde zde použit prstencový vzor, jehož rozměry odpovídají velikosti identifikačních vzorů umístěných na vrchu každého robotu. V odezvě filtru jsou pak nalezena lokální maxima, která značí pozice robotů (viz obrázek 7).

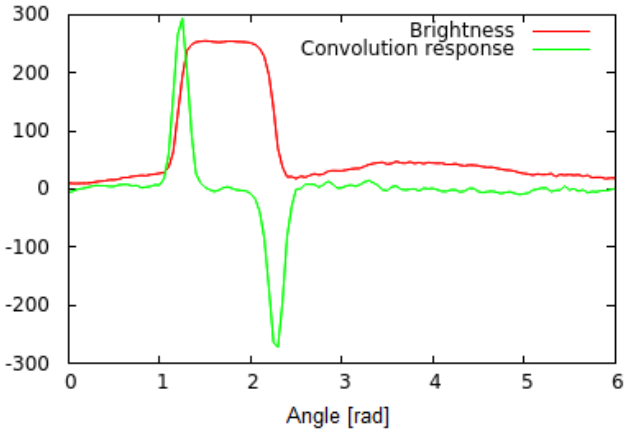


Obrázek 7: Odezva na konvoluční filtr - určení pozice robotu
Převzato z [20]

Obdobně jako u algoritmu pro analýzu obrazu používaného skupinou IMR se i zde pro urychlení algoritmu využívá sledovacího mechanismu robotu. K rektifikaci a konvoluci obrazu poté dochází jen v okolí určených poloh robotů z předchozího snímku. Proces zpracování celého obrazu nastane pouze při startu systému, případně při přidání či odebrání nového robotu z arény.



Obrázek 8: Identifikace robotu
Převzato z [20]



Obrázek 9: Určení orientace robotu
Převzato z [20]

3.1.3 Určení orientace robotu

Stejně jako u identifikace a hledání pozice se i orientace určuje pomocí lokalizačního vzoru umístěného na vrchu robotu. Nejdříve je nalezeno několik bodů po obvodu vzoru (viz modré body na obrázku 8). Jas každého bodu je poté určen pomocí jeho sousedících pixelů bilineární transformací, čímž získáme vektor obsahující hodnoty jasů těchto bodů. Pro vlastní nalezení orientace robotu se opět využívá principu konvoluce, přičemž získaný vektor hodnot je normalizován a konvoluční filtr má hodnoty předpokládaných změn jasu v koncových bodech oblouku vzoru. Maximální a minimální hodnota odezvy na konvoluční filtr odpovídá pozicím těchto koncových bodů, a proto můžeme orientaci robotu určit jako průměrnou hodnotu *argmin* a *argmax* této odezvy (viz obrázek 9). Pro ověření správného určení orientace je vzdálenost nalezeného maxima a minima porovnána s úhlem oblouku na lokalizačním vzoru.

3.1.4 Identifikace robotu

Posledním krokem lokalizačního procesu je vlastní identifikace robotu. Jakmile je známa pozice a orientace robotu, určí se jas šestnácti bodů z binárního znaku umístěného uprostřed lokalizačního vzoru (viz červené body na obrázku 8). Na základě průměrného jasu skupiny čtyř sousedních bodů je určeno, zda je daný segment černý nebo bílý. Posloupnost

těchto čtyř černobílých segmentů potom slouží k rozlišení identifikačního čísla robotu. Po nalezení pozice robotu se identifikace provádí pouze jednou, dále je jeho identita určena na základě sledovacího mechanismu. Opětovná identifikace se používá pouze jako ověření správné funkce lokalizačního algoritmu.

3.2 Shrnutí kapitoly

V této kapitole byl popsán systém SyRoTek, což je výukový systém umožňující studentům rozvíjet své algoritmy na multirobotické platformě v dynamickém prostředí. Podstatnou součástí tohoto systému je lokalizační modul, jehož úkolem je určit pozici a orientaci robotů v aréně. Lokalizace probíhá ve čtyřech základních krocích. V prvním kroku dochází ke korekci deformovaného snímku z kamery. Druhým krokem je určení pozice robotu za využití principu konvoluce. Stejný princip se využívá i ve třetím kroku, kterým je určení orientace robotu. Posledním krokem je identifikace na základě posloupnosti čtyř černobílých segmentů umístěných uprostřed lokalizačního vzoru.

4 Algoritmus pro analýzu obrazu

Algoritmus analýzy obrazu používaný skupinou IMR slouží pro relativní lokalizaci roje mobilních robotů. Vývoj tohoto algoritmu byl motivován potřebami, které jsou nezbytné pro řízení a stabilizaci roje malých UAV. Dává si za cíl splnit požadavky robotického roje působícího v reálném světě. Lokalizační systém je založen na nalezení černobílého vzoru ve tvaru elipsy, umístěného na těle robotu, jehož poloha je poté určena relativně k pozici kamery. Kamera může být umístěna do statické polohy nebo je připevněna k tělu jiného mobilního robotu, například k letounu sledující roj pozemních robotů. Druhý způsob potom výrazným způsobem rozšiřuje pracovní prostor, ve kterém se robotický roj může pohybovat. Za zmínku stojí, že celý systém je založen na levných a snadno nahraditelných součástech usnadňujících jeho reprodukci, což je jeden z požadavků při výzkumu lokalizačních prostředků pro robotické roje. Systém může být přímo použit jako součást zpětné vazby při řízení skupiny mobilních robotů. Možných řešení problému vizuální lokalizace roje mobilních robotů existuje celá řada, nicméně nesplňují požadavky, které si klade za cíl tento systém. V [22] je prezentován vizuální lokalizační systém založen na detekci různě barevných bodů vzoru. Tento systém ale není schopen správně určit pozici robotu za různého osvětlení. Detekcí vzoru ve tvaru elipsy se zabývá i [23], ale je zde vyžadován kontrast vzoru s okolím a tudíž se nehodí pro použití v reálném světě. Dalším problémem je výpočetní náročnost. Požadavkem je, aby celý systém mohl běžet v reálném čase pouze na výpočetního vybavení UAV nesoucí kameru. Většina navrhovaných řešení byla realizována na zařízení poskytující daleko větší výpočetní výkon zejména v oblastech výpočtů s plovoucí desetinou čárkou, které jsou potřeba při detekci lokalizačního vzoru. Tato kapitola rozšiřuje informace převzaté z [24].

Obrázek 10: Příklad lokalizace vzoru v reálném prostředí
Převzato z [24]

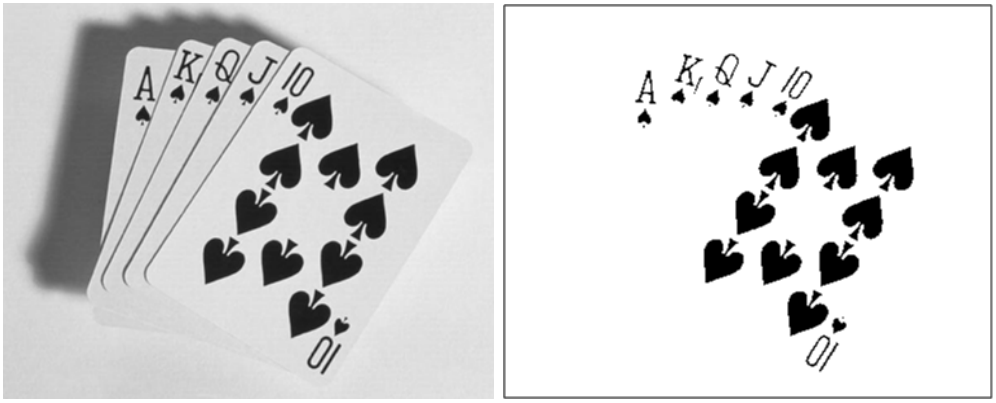
4.1 Lokalizace vzoru

Cílem algoritmu pro analýzu obrazu je zpracovat snímky získané z kamery, detekovat v nich hledaný vzor a následně určit jeho polohu. Tato část kapitoly se věnuje možným technikám řešení tohoto problému a principům jejich využití v algoritmu.

4.1.1 Segmentace obrazu

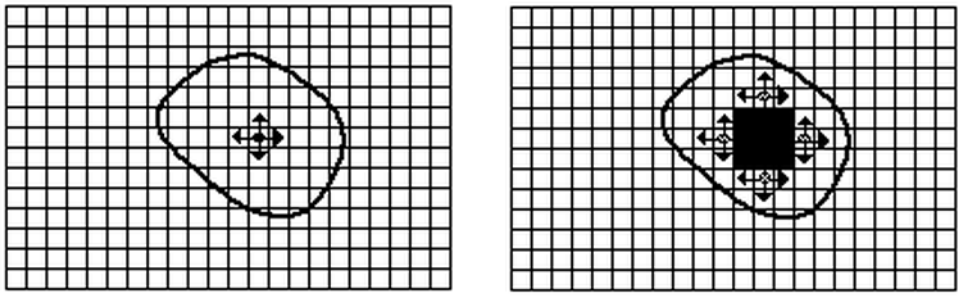
Cílem segmentace je rozdělit obraz na oblasti (nebo na obrysy těchto oblastí), které odpovídají objektům v obraze. Tyto segmenty se od sebe snažíme odlišit na základě jejich společných nebo rozdílných vlastností. Nejzákladnější vlastnost, kterou mohou společné oblasti sdílet je jejich jas. Metoda segmentace obrazu založena na této vlastnosti se jmenuje prahování (anglicky *tresholding*).

Prahování je technika, která dokáže ze snímku v odstínech šedi vytvořit binární obraz. Všechny pixely s jasem pod hodnotou prahu jsou přeměněny na pixely s hodnotou nula. Naopak pixely s jasem nad hodnotou prahu jsou přeměněny na hodnotu jedna. Hlavním problémem této techniky je, že hodnotí jas každého jednoho pixelu zvlášť, bez ohledu na hodnoty jasu pixelů v okolí. Není proto možné zaručit, že pixely identifikované během prahování patří do stejného regionu. Pro přesnější prahování můžeme využít například principu dvou prahů nebo lokálního prahování [25]. Tyto přesnější metody nejsou však v algoritmu pro analýzu obrazu využity.



Obrázek 11: Příklad prahování
Převzato z [25]

Další důležitou technikou používanou pro segmentaci obrazu je technika **rostoucí oblasti**. Ta nám umožňuje určit spojité oblasti obrazu se stejným jasem. Na začátku je zvolen libovolný počáteční pixel (anglicky *seed pixel*) v oblasti, kterou chceme určit. Algoritmus poté kontroluje všechny sousední pixely a v případě, že sdílejí stejnou vlastnost, v tomto případě stejný jas, jsou započítány jako součást regionu a celý proces se opakuje znovu, za použití nově získaných pixelů (viz obrázek 12)[26].



Obrázek 12: Technika rostoucí oblasti
Převzato z [26]

4.1.2 Detekce vzoru

Detekce lokalizačního vzoru je založena na segmentaci obrazu a následném nalezení dvojice soustředných černobílých kruhů, které jsou umístěny na bílém pozadí (viz obrázek 14). V prvním kroku je snímek získaný z kamery převeden na obraz v odstínech šedi. Používá se zde již zmíněného prahování, které rozdělí pixely obrazu na světlé a tmavé body. Počáteční prahová hodnota je nastavena na 0.5 (rozsah jasu jednotlivých pixelů je 0-1). Ve druhém kroku se algoritmus snaží najít vnější tmavý segment vzoru za použití techniky rostoucí oblasti (anglicky *growing region technique*). Po nalezení kompletního tmavého segmentu se vypočítá pozice jeho středu, rozměry bounding boxu[7] a velikost plochy daného segmentu (počet bodů v obraze). Pokud je velikost plochy segmentu přibližně rovna očekávané hodnotě vypočítané na základě rozměrů bounding boxu, začne algoritmus hledat vnitřní světlý segment za použití stejné techniky jako v předchozím kroku. Počáteční bod pro vyhledávání je vypočítaná poloha středu tmavého segmentu. I zde poté dochází k výpočtu rozměrů bouding boxu, velikosti plochy segmentu a určení pozice jeho středu. V případě, že je velikost plochy světlého segmentu přibližně rovna očekávané hodnotě, dochází k porovnání vypočítaných hodnot obou segmentů. Pokud jsou nalezené segmenty soustředné a poměr jejich ploch odpovídá očekávané hodnotě, můžeme předpokládat, že reprezentují hledaný vzor. Jakmile je vzor nalezen, je přepočítána hodnota prahování jako $(m_{dark} + m_{bright})/2$, kde m_{bright} je střední hodnota jasu světlých pixelů vzoru a m_{dark} je střední hodnota jasu všech tmavých pixelů vzoru. V případě, že vzor nebyl nalezen, je hodnota pro prahování snížena nebo zvýšena a celý proces se opakuje.

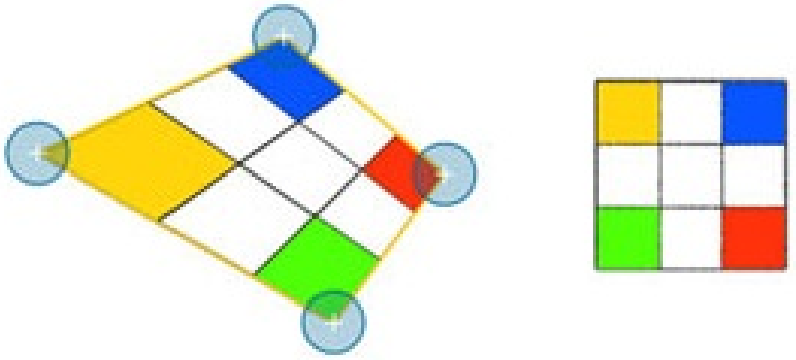
4.1.3 Určení pozice vzoru

Data získaná během detekce jsou použita k určení relativní pozice vzoru vůči kameře. Předpokladem tohoto kroku je, že radiální zkreslení vzoru není extrémní a na snímku má

[7] též uváděný jako hraniční obdélník nebo ohraničující kvádr. Je to jakási prostorová obálka dílu (například plochy nebo tělesa) představována nejmenším možným kvádrem, do kterého se toto těleso vejde

tvar elipsy. Samotné určení pozice se zakládá na faktu, že délka hlavní osy elipsy vzoru závisí čistě na relativní pozici vzoru vůči kameře. Na základě detekovaných pozic pixelů vzoru je následně spočítána kovarianční matice. Z ní poté můžeme určit délku a orientaci hlavní osy elipsy a také vlastní čísla a vlastní vektor matice. Vlastní čísla kovarianční matice odpovídají délkám poloos elipsy. Poté jsou spočítány prostorové souřadnice koncových bodů λ_{S_a} a λ_{S_b} hlavní osy elipsy až po neznámý faktor λ. Jelikož platí $d_0 = |\lambda_{S_a}, \lambda_{S_b}|$ můžeme získat rovnici $\lambda = d_0/|\lambda_{S_a}, \lambda_{S_b}|$. Neznámá pozice vzoru x je tedy následně určena jako $x = \lambda(S_a + S_b)/2$.

Prezentovaný postup je validní při určení pozice vzoru v reálném 3D prostředí. Pokud ale systém vyžaduje lokalizaci robotů pohybujících se pouze v jedné rovině, tak se zde nabízí jiné řešení. Za předpokladu, že známe přesnou polohu alespoň čtyř bodů v obraze, například rohů arény, můžeme k danému problému přistupovat jako k lokalizaci ve 2D. Využívá se zde principu homografie [27]. Na základě známých bodů vypočteme matici homografie, což je vlastně transformační matice mezi rovinou, ve které se pohybují roboty a rovinou kamery. Při vlastní lokalizaci robotu poté přepočteme souřadnice získané z kamery pomocí této matice. U této metody se předpokládá vyšší přesnost lokalizace.

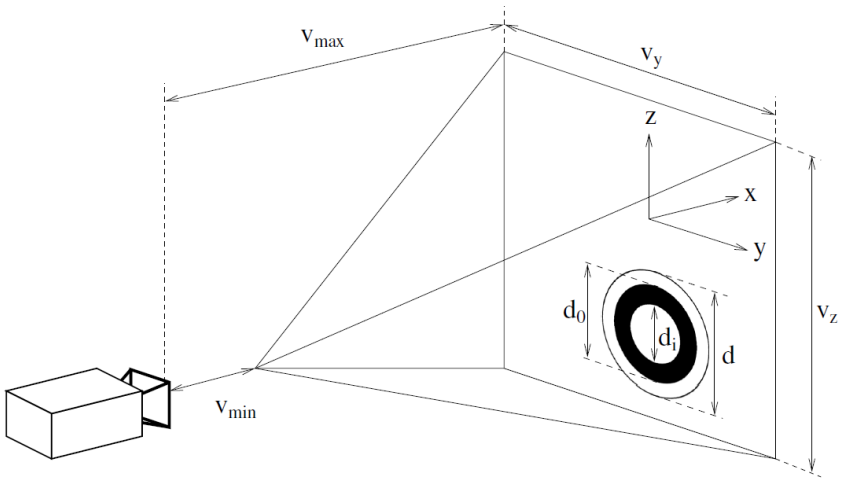


Obrázek 13: Model původního obrazu a obrazu po provedení homografie
Převzato z [27]

4.2 Výpočetní náročnost

Výpočetní náročnou algoritmu je jeho klíčovou vlastností, neboť systém má poskytovat lokalizaci robotu v reálném čase, a tak je potřeba aby algoritmus pracoval na vyšší frekvenci, než na jaké jsou mu dodávány snímky z kamery. Výpočetní náročnost výše zmíněné detekce a určení pozice vzoru závisí především na rozlišení obrazu. Nejnáročnější část je potom prahování snímku, které potřebuje dva cykly procesoru na pixel. Algoritmus je navržen na lokalizaci pouze jednoho vzoru, po jehož nalezení se vyhledávání přeruší. Nicméně v případě více vzorů v obraze může být proces detekce opakován dokud nedojde k prozkoumání celého obrazu. Pro snížení výpočetní náročnosti vyhledávání se využívá poslední známé pozice

vzoru, neboli takzvaného sledování (anglicky *tracking*). Nedochází pak k prohledání celého obrazu, ale pouze té části, ve které se vyskytoval vzor naposled. Zpracování každého pixelu obrazu technikou rostoucí oblasti trvá nejméně čtyři další cykly procesoru navíc, a proto využití poslední známé pozice vzoru umožňuje snížit výpočetní náročnost algoritmu až třikrát. Nicméně pokud se pozice vzoru změní razantním způsobem mezi dvěma po sobě jdoucími snímky získanými z kamery, je potřeba zpracovat celý obraz. Další důležitým prvkem je počet pixelů tvořící daný segment. Menší vzor nebo vzor ve větší vzdálenosti od kamery může být nalezen rychleji, než vzor větších rozměrů a blíže kameře. I když je možné vyjádřit výpočetní náročnost algoritmu jako přímo úměrnou k počtu pixelů obrazu, tak skutečná hodnota je závislá především na počtu cyklů, které je procesor schopen za vteřinu vykonat.



Obrázek 14: Model pracovního prostoru a lokalizačního vzoru
Převzato z [24]

4.3 Pracovní prostor a rozměry vzoru

Důležitou vlastností lokalizačního systému při jeho praktickém použití pro řízení a stabilizaci roje robotů jsou parametry jeho pracovního prostoru, tedy prostoru, ve kterém je daný vzor spolehlivě lokalizován. Rozměry tohoto prostoru jsou určeny na základě ohniskové vzdálenosti kamery, rozlišení obrazu, orientací vzoru v obraze a průměru objektivu kamery. Předpokládá se, že pracovní prostor má pyramidální tvar s vrcholem u kamery (viz obrázek 14). Rozměry obrazu w_i a h_i poté mohou být vypočítány jako

$$w_i = f_x d_0 cos(\varphi)/x \qquad h_i = f_y d_0 cos(\psi)/x \tag{1}$$

kde x je vzdálenost vzoru od základny prostoru, d_0 je průměr vzoru, úhly reprezentují náklon a natočení vzoru v prostoru a f_x,f_y jsou ohniskové vzdálenosti kamery. Vzhledem k tomu, že lokalizační vzor musí být zcela v zorném poli fotoaparátu a jeho šířka a výška

musejí být větší než hodnota D (experimentálně určeno jako D=11cm), tak maximální v_{max} a minimální v_{min} vzdálenosti pracovního prostoru můžeme určit

$$v_{min} = d_0 \max(f_x/w, f_y/h) \qquad v_{max} = d_0/D \min(f_x cos(\varphi), f_y cos(\psi)) \tag{2}$$

kde w a h jsou výška a šířka obrazu kamery v pixelech. Na základě určeného údaje v_{max} můžeme spočítat rozměry základny operačního prostoru v_y a v_z jako

$$v_y = v_{max} f_x/w - 2d_0 \qquad v_z = v_{max} f_y/h - 2d_0 \tag{3}$$

Na základě požadovaných rozměrů operačního prostoru a rozsahu orientace vzoru můžeme z výše zmíněných rovnic určit dostačující hodnotu průměru vzoru d_0.

4.4 Shrnutí kapitoly

Tato kapitola se věnuje popisu algoritmu analýzy obrazu používaným skupinou IMR pro relativní lokalizaci malých UAV. Jeho vývoj byl motivován potřebami nezbytnými pro řízení a lokalizaci roje mobilních robotů v reálném prostředí a dokáže detekovat lokalizační vzor i za různého osvětlení. Algoritmus klade důraz na malou výpočetní náročnost, aby celý systém mohl běžet v reálném čase pouze na výpočetním vybavení UAV nesoucí kameru. První podkapitola se věnuje detekci a určení pozice vzoru. Detekce vzoru je založená na principu segmentace obrazu, při kterém se využívá techniky prahování a techniky rostoucí oblasti. V prvním kroku detekce je obraz převeden do odstínů šedi, poté je provedeno prahování obrazu a následně je vyhledán tmavý a světlý segment lokalizačního vzoru za použití techniky rostoucí oblasti. Pokud zjištěné hodnoty odpovídají předpokladům tak se lze domnívat, že dané segmenty reprezentují hledaný vzor. V opačném případě se celý proces opakuje s rozdílnou hodnotou prahování. Samotné určení relativní pozice vzoru je založeno na faktu, že délka hlavní osy elipsy vzoru závisí čistě na relativní pozici vzoru vůči kameře. Pomocí kovarianční matice určíme prostorové souřadnice hlavní osy elipsy a následně i pozici vzoru. Druhá podkapitola se zabývá výpočetní náročností algoritmu. Ta závisí především na rozlišení daného obrazu. Náročnost algoritmu můžeme snížit pomocí poslední známé pozice vzoru. K prohledání celého snímku pak dochází pouze v situacích, kdy vzor není nalezen nebo se jeho pozice mezi dvěma po sobě jdoucími snímky změní razantním způsobem. Poslední podkapitola se pak věnuje parametrům pracovního prostoru robotu a vzoru. Rozměry tohoto prostoru a lokalizačního vzoru jsou určeny na základě ohniskové vzdálenosti kamery, rozlišení obrazu, možné orientace vzoru v obraze a průměru objektivu kamery.

5 Lokalizační systém pro roj mobilních robotů

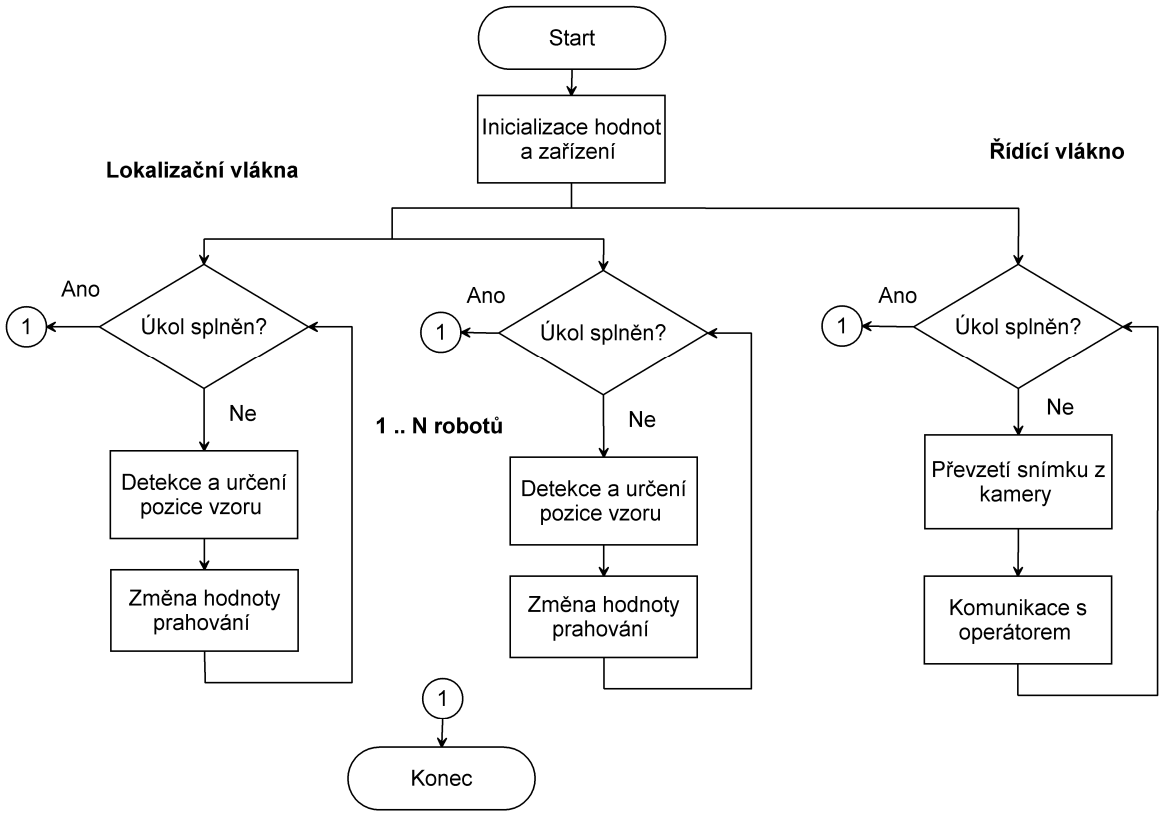
V kapitole 4 byl představen algoritmus analýzy obrazu používaný skupinou IMR pro lokalizaci mobilních robotů. Daný algoritmus je schopný v obraze lokalizovat pouze jeden robot. Cílem této kapitoly je navrhnout rozšíření algoritmu tak, aby byl použitelný pro lokalizaci skupiny pozemních mobilních robotů. Požadavky na vlastnosti lokalizačního systému jsou neměnné. Kromě lokalizace více vzorů musí být algoritmus schopen lokalizovat roboty za různého osvětlení, a to i v případě, že se na jediném snímku vyskytuje několik rozdílně osvětlených robotů. Další podmínkou je nízká výpočetní náročnost algoritmu umožňující lokalizaci v reálném čase. V této kapitole jsou prezentovány dva návrhy řešení pro modifikaci algoritmu - paralelní a sekvenční.

5.1 Návrh řešení problému

Cílem této modifikace je rozšířit původní algoritmus tak, aby dokázal v obraze lokalizovat více než jeden vzor, nalezené vzory rozlišit a určit jejich orientaci. Snažíme se tedy docílit běhu více instancí daného algoritmu najednou, a to buď sekvenčně nebo paralelně. Součástí každé takové instance je vlastní detekce a určení pozice vzoru (viz kapitola 4.1) a také vlastní zásobník v paměti, do kterého jsou ukládány mezivýsledky a stavy proměnných. Díky tomu je možné provádět prahování obrazu pro každý vzor s jinou prahovou hodnotou, což umožňuje lokalizovat vzory v obraze i za různého osvětlení. Využívá se zde i sledovacího mechanismu vzoru pro snížení výpočetní náročnosti. Prvním navrhovaným řešením je tedy paralelní řešení, neboli použití programu s více vlákny. Každé vlákno se věnuje lokalizaci pouze jediného robotu, což znamená, že bude nezávislé na lokalizaci ostatních robotů. To představuje výhodu především při lokalizaci velkých robotických rojů. Díky paralelnímu přístupu může každá instance lokalizačního algoritmu běžet na jiné frekvenci. Nicméně, jak lze zjistit analýzou původního algoritmu, ne všechny procedury potřebné pro detekci a lokalizaci vzoru mohou probíhat současně. Například segmentace obrazu vyžaduje, aby byl snímek již převeden do odstínů šedi, pro detekci vzoru je potřeba již segmentovaný obraz apod. Celý lokalizační proces je ale pro každý robot nezávislý, proto tyto procesy mohou probíhat současně. Paralelní způsob řešení lokalizace je využit i u lokalizačního modulu systému SyRoTek, kterému se věnuje kapitola 3.1. Druhým možným řešením je přistupovat k lokalizaci jednotlivých robotů sekvenčně. Sekvenční řešení se nemusí zabývat řízením paralelních vláken a správou jejich přístupu do paměti a může tedy být výpočetně méně náročné. Avšak lokalizace každého jednoho robotu je závislá na lokalizaci všech ostatních robotů a tedy i frekvence algoritmu je v tomto případě u všech robotů shodná. Tento způsob by mohl najít využití především při lokalizace menších skupin robotů. Porovnání obou řešení modifikace algoritmu a ověření teoretických předpokladů je uvedeno v kapitole 6.1.

5.1.1 Paralelní řešení

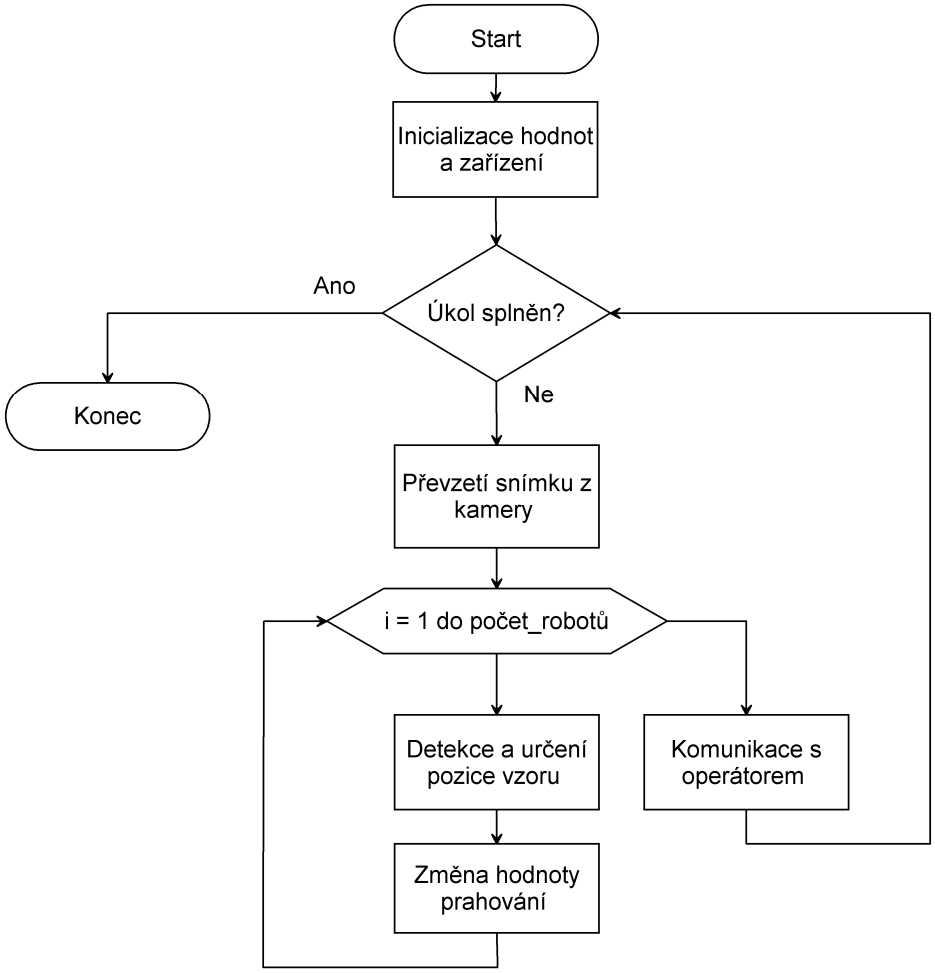
Principem paralelního řešení lokalizace více robotů, je vytvořit více instancí lokalizačního algoritmu, které mohou běžet simultánně. Je ovšem zbytečné paralelizovat kompletně celý systém, protože některé jeho části mohou být provedeny společně pro všechny vlákna programu najednou. Tímto způsobem je možné snížit výpočetní náročnost algoritmu bez ovlivnění přesnosti lokalizace jednotlivých robotů. Mezi společné úkony patří například získávání snímků z kamery nebo zajištění komunikace s operátorem. Kromě vláken, která zajišťují lokalizaci jednotlivých robotů je realizováno takzvané řídící vlákno obstarávající tyto společné úkony. Hlavní výhodou paralelního přístupu je, že lokalizace každého jednoho robotu je nezávislá na lokalizaci ostatních robotů. Nicméně toto řešení má i své nevýhody. Velkým problémem v programech s více vlákny je řízení přístupu ke sdíleným prostředkům, jako jsou například globální proměnné. Není například možné, aby proces z jednoho vlákna zapisoval informaci do proměnné, zatímco z ní bude jiný proces číst. Pro zabránění této situace se používají různé synchronizační prvky, jako je na příklad semafor nebo princip vzájemného vyloučení.



Obrázek 15: Blokové schéma paralelního řešení algoritmu

5.1.2 Sekvenční řešení

Druhým navrhovaným řešením modifikace algoritmu je řešení pomocí sekvenčního přístupu k jednotlivým instancím lokalizačního algoritmu. K lokalizaci jednotlivých robotů je přistupováno postupně v pořadí, v jakém byly nalezeny. Po dokončení lokalizačního cyklu pro všechny roboty dochází k získání nového snímku z kamery a komunikaci s operátorem. Výhody tohoto řešení jsou zřejmé a prakticky pokrývají všechny nevýhody paralelního řešení. Tok programu je mnohem přehlednější a nedochází zde k problémům s přístupem ke sdíleným prostředkům. Díky absenci problému s řízením vláken se předpokládá i nižší výpočetní náročnost tohoto řešení.



Obrázek 16: Blokové schéma sekvenčního řešení algoritmu

5.2 Implementace algoritmu

Vlastní implementace algoritmu je založena na návrhu řešení prezentovaných v kapitole 5.1. Nicméně zbývá vyřešit problém, jakým způsobem se algoritmus zachová při změně počtu robotů v obraze. V reálném prostředí může být množství robotů vyskytující se v pracovním prostoru lokalizačního systému předem neznámé a nebo se může v průběhu času měnit. V modifikovaných algoritmech je tato situace řešena tím způsobem, že počet hledaných robotů v obraze je *N+1*, kde *N* je počet již nalezených robotů. V případě že je lokalizován nový robot, dojde ke zvýšení *N*. Naopak, pokud některý z robotů není lokalizován, například se přemístí mimo pracovní prostor systému, dochází ke snížení *N*. Dalším řešeným problémem bylo, jakým způsobem označit v obraze již nalezené vzory. V opačném případě nebylo možné zaručit, že detekovaný vzor nebyl již lokalizován jinou instancí lokalizačního algoritmu. Původní algoritmus umožňoval barevné zvýraznění nalezeného vzoru v obraze (viz obrázek 10). Stejné funkce bylo využito i při řešení tohoto problému. Každý nově nalezený vzor byl obdobným způsobem barevně zvýrazněn, čímž bylo zabráněno jeho opětovné detekci. Algoritmy jsou implementovány v jazyce C++ za využití příslušných knihoven. Struktura algoritmu je zde prezentována v pseudokódu.

Významné funkce použité v pseudokódu:

- *Communication*: zajištění komunikace s operátorem, prezentace změřených údajů
- *CircleDetect*: funkce zajišťující detekci a určení pozice lokalizačního vzoru
- *ChangeTreshold*: změna hodnoty prahování podle pravidel uvedených v kapitole 4.1.2

5.2.1 Implementace paralelního řešení

```
Vlakno()
begin
    while robot nalezen do
        CircleDetect()
        ChangeTreshold(robot_nalezen)
    end
end

main()
begin
    Initialization()
    while úkol nesplněn do
        RenewCameraImage()
        CircleDetect()
        ChangeTreshold(robot_nenalezen)
        if nalezen novy robot then
            StartNewThread(Vlakno)
        end
        Communication()
    end
end
```

Výpis 1: Implementace paralelního řešení

Paralelní řešení lokalizačního systému je založeno na simultánním běhu několika samostatných vláken programu najednou. K realizaci a řízení těchto vláken je použita knihovna *pthread*. Při spuštění programu se vytvoří proces a v něm jedno řídící vlákno, které poté může spustit další. Prvním krokem řídícího vlákna je inicializace potřebného hardwaru a nastavení počátečních hodnot. Poté dojde ke spuštění smyčky několika funkcí, která se neustále opakuje až do splnění úkolu nebo ukončení programu operátorem. Nejdříve je převzat nový obraz z kamery, který je následně prozkoumán pomocí lokalizačních funkcí. Tyto lokalizační funkce jsou převzaty z algoritmu prezentovaném v kapitole 4. Pokud je v obraze nalezen hledaný vzor, tak dojde ke spuštění nového lokalizačního vlákna. Úkol nově vytvořeného vlákna je poskytovat informace o poloze nalezeného vzoru až do chvíle, kdy je tento vzor odstraněn z pracovního prostoru systému. Řídící vlákno převezme z kamery nový snímek a pokračuje ve vyhledávání dalších vzorů v obraze a spouštění nových lokalizačních vláken. Zároveň zajišťuje i komunikaci s operátorem. Pro zabránění společnému přístupu vláken ke sdíleným prostředkům se zde využívá principu vzájemného vyloučení (anglicky *mutual exclusion*, zkráceně *mutex*). *Mutex* zabraňuje přístupu více vláken do kritické sekce kódu. Pokud se více procesů snaží najednou přistoupit do kritické sekce, tak je povolen přístup pouze jednomu z nich, zatímco ostatní musejí počkat. Je tedy zřejmé, že využívání *mutexu* vede ke zvýšení výpočetní náročnosti algoritmu.

5.2.2 Implementace sekvenčního řešení

```
main()
begin
    Initialization()
    while úkol nesplněn do
        RenewCameraImage()
        for i=1; i<=N+1; i++ do
            CircleDetect([i])
            if i==N+1 & nalezen novy robot then
                N=N+1
                ChangeTreshold([i], robot_nalezen)
            end
            if i!=N+1 & N>1 & robot nenalezen then
                N=N-1
                ChangeTreshold([i], robot_nenalezen)
            end
        end
        Communication()
    end
end
```

Výpis 2: Implementace sekvenčního řešení

Při sekvenčním řešení je přistupováno k lokalizaci jednotlivých robotů postupně. Tento způsob řešení přináší mnohé výhody a nevýhody, které byly zmíněny v kapitole 5.1. Při běhu programu se používá pouze jedno vlákno, které má za úkol zajistit lokalizaci všech robotů. Prvním krokem je inicializace potřebného hardwaru a hodnot. Dále je obdobně jako u předchozího řešení spuštěna smyčka, která se opakuje až do splnění úkolu. Po převzetí snímku z kamery dochází k postupné lokalizaci všech vzorů v obraze, přičemž lokalizační instance s nejvyšším indexem ($N+1$) slouží k vyhledání nových vzorů. V případě, že je nový vzor nalezen, dochází ke zvýšení počtu vzorů vyhledávaných v obraze N. Naopak, pokud je některý ze sledovaných vzorů odstraněn z pracovního prostoru systému, tak se hodnota N sníží. Díky sekvenčnímu přístupu k lokalizaci jednotlivých robotů není potřeba řešit řízení přístupů ke sdíleným prostředkům.

5.3 Funkce opětovné kontroly

Výpočetně nejnáročnější částí algoritmu je prahování snímku, které potřebuje dva cykly procesoru na pixel. Po detekci vzoru jsou prahovány pouze segmenty určeny sledovacím mechanismem (viz kapitola 4.2). Při chybné detekci vzoru ale dochází k prahování celého obrazu a tím k razantnímu zvýšení výpočetní náročnosti algoritmu. Z tohoto důvodu byla do části algoritmu věnující se detekci vzoru přidána funkce opětovné kontroly *Recheck*. Jedná

se o rozšíření sledovacího mechanismu. Při běhu algoritmu může docházet k chybné detekci vzoru a to i přesto, že se vzor stále vyskytuje v pracovním prostoru lokalizačního systému. Tyto chyby mohou vznikat díky nedokonalosti kamery, nepřesnostem během výpočtů konstant potřebných k lokalizaci nebo vlivem prostředí, ve kterém se robot pohybuje. Lokalizační algoritmus poté změní prahovou hodnotu a prohledá celý obraz, přestože se daný vzor stále může nacházet v dosahu sledovacího mechanismu. V případě, že nebyl vzor v obraze detekován, je tedy nejdříve zavolána funkce *Recheck*, jejímž úkolem je prohledat segment daný sledovacím mechanismem i v několika následujících snímcích. K prohledání celého obrazu dochází teprve až ve chvíli, kdy ani tato funkce nenalezne vzor v daném segmentu. Počet potřebných kontrolních snímků lze experimentálně určit, nicméně tento údaj je závislý především na frekvenci lokalizačního algoritmu, velikosti lokalizačního vzoru a rychlosti pohybu robotu.

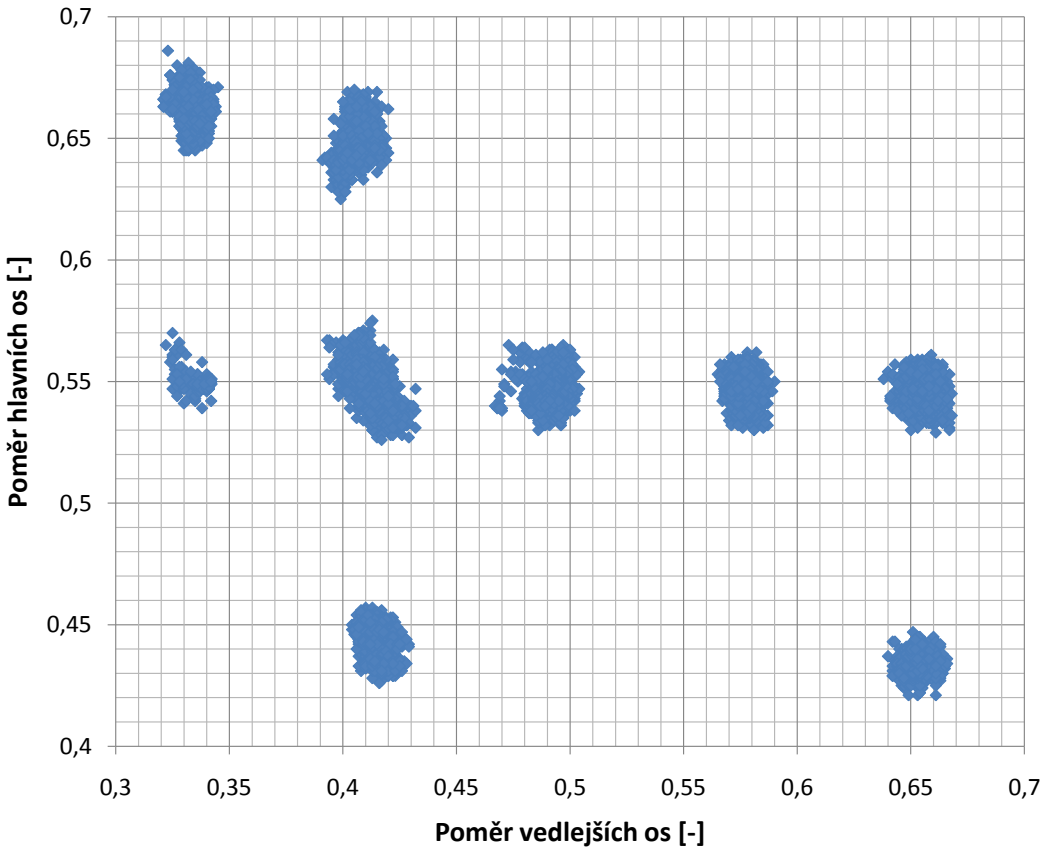
5.4 Orientace a identifikace robotu

V kapitole 4.1 byl představen způsob detekce a určení pozice vzoru. V algoritmu ale není specifikováno, jakým způsobem realizovat identifikaci a případně i určení orientace robotu. V této části kapitoly je prezentováno několik možných řešení tohoto problému.

5.4.1 Identifikace robotu

Ve velkých robotických rojích se nepředpokládá nutnost unikátní identifikace každého jednoho robotu. Postačí nám pouze informace, že se určitý robot posunul z místa A na místo B. V takovém případě je možné přiřadit vlastní identifikační číslo každému nově nalezenému robotu a dále ho identifikovat pomocí sledovacího mechanismu. Nevýhodou tohoto řešení je, že v případě chybné lokalizace nebo krátkodobého výpadku lokalizačního systému jsou robotům přiřazena nová identifikační čísla. Robustnějším řešením je tedy označit každý robot unikátním vzorem, který jednoznačně určí jeho identitu. V modifikovaném algoritmu jsou implementována obě tato řešení. Pro unikátní rozlišení robotů se využívá údajů získaných při detekci a určení pozice vzoru. Délky hlavních a vedlejších os nalezených elips u každého vzoru jsou porovnány, čímž nám vznikne unikátní identifikační hodnota. Při klasifikaci získaných hodnot se využívá algoritmu k-nejbližších sousedů, který přiřadí danou hodnotu do té třídy, ke které patří většina z jeho k nejbližších sousedících prvků. Množině těchto předem stanovených tříd se říká trénovací množina a uchovává známé hodnoty prvků každé třídy. V našem případě každá jedna takováto třída prezentuje unikátní identifikační číslo robotu (viz shluky bodů na obrázku 17). Robustnost identifikačního procesu roste s množstvím prvků v trénovací množině a také s počtem hledaných nejbližších sousedů k.

Dalším možným způsobem identifikace robotů je rozšíření lokalizačního vzoru o další znak (viz identifikace robotů SyRoTek 3.1.4). Tento způsob by ale vyžadoval rozsáhlejší úpravu a doplnění lokalizačního algoritmu. Maximální počet unikátních vzorů můžeme zvýšit vhodnou kombinací zmíněných řešení.



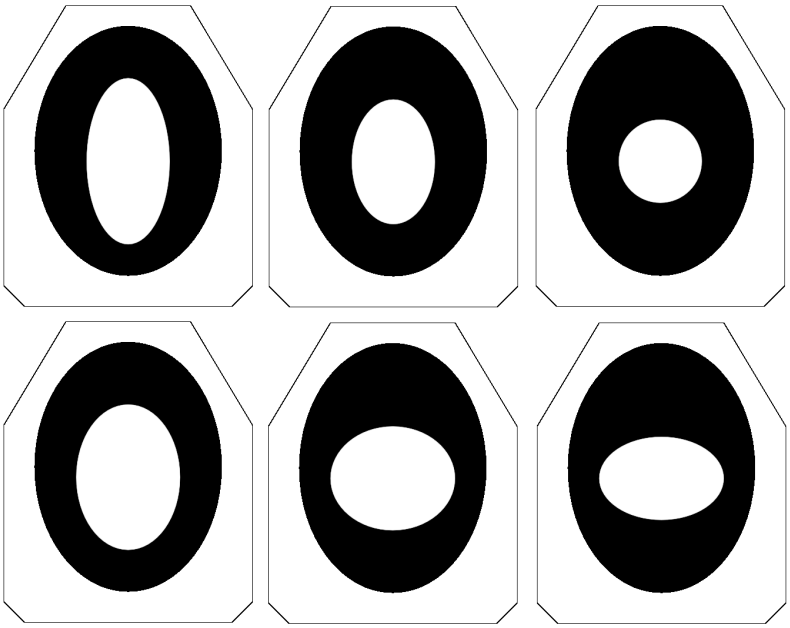
Obrázek 17: Příklad trénovací množiny

5.4.2 Orientace robotu

Hledání orientace robotů představuje složitější problém než jejich identifikace. Jedním z možných řešení je použití vzoru natočeného tak, aby hlavní osa elipsy určovala směr jízdy robotu. Ze získaných hodnot z procesu určení pozice vzoru poté určíme vektor této osy. Stále ale existují dvě možnosti orientace. Pokud známe výchozí pozici robotu, můžeme upřesnit orientaci pomocí sledovacího mechanismu. Modifikovaný algoritmus využívá faktu, že tmavé a světlé segmenty lokalizačního vzoru nemusejí být dokonale soustředné a právě směr tohoto vychýlení upřesňuje orientaci robotu (viz obrázek 18).

Jedním z možných řešení je také využití kombinace více lokalizačních prostředků najednou. Vizuální lokalizaci můžeme například doplnit hodnotami z odometrie robotu. V praxi se obdobné kombinace prostředků absolutní a relativní lokalizace využívá velmi často z důvodu vzájemné kompenzace jejich nevýhod (viz kapitola 2.1.1). Další možností je rozšíření vzoru o speciální znak, který by orientaci robotu jednoznačně určil. Ovšem i

tento způsob by vyžadoval rozsáhlejší doplnění lokalizačního algoritmu.



Obrázek 18: Upravené lokalizační vzory

5.5 Shrnutí kapitoly

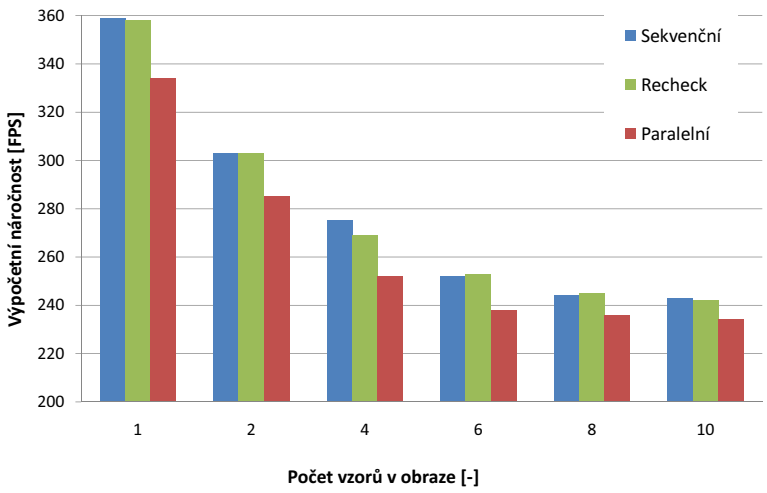
Tato kapitola se věnuje návrhu a realizaci lokalizačního systému pro roj mobilních robotů. Lokalizační systém je založen na algoritmu analýzy obrazu prezentovaném v kapitole 4. V první části kapitoly jsou navrhnuta možná řešení problému a jejich výhody a nevýhody. První z těchto řešení je paralelní přístup k lokalizaci, jehož principem je vytvořit více instancí lokalizačního algoritmu, které mohou běžet simultánně. Paralelní řešení umožňuje přistupovat k lokalizaci každého jednoho robotu jako k samostatnému problému nezávisle na lokalizaci ostatních robotů. To přináší ale i problém přístupu více instancí algoritmu ke sdíleným prostředkům. Druhým navrhovaným řešením je sekvenční přístup, který přistupuje k lokalizaci jednotlivých robotů postupně. Díky absenci problému s řízením více vláken se u tohoto řešení předpokládá nižší výpočetní náročnost. Obě navrhovaná řešení jsou poté implementována v jazyce C++. Při implementaci bylo nutné vyřešit, jakým způsobem se algoritmus zachová v případě, kdy předem nezná počet robotů, které bude lokalizovat. Dalším problémem bylo, jakým způsobem označit již nalezené vzory v obraze. V této kapitole je také navrženo několik možných řešení problémů identifikace a určení orientace robotu a je zde popsán způsob implementace těchto řešení.

6 Experimenty

V této kapitole jsou prezentovány postupy a výsledky provedených experimentů. Nejdříve je porovnána výpočetní náročnost implementovaných algoritmů z kapitoly 5. Následně je porovnána přesnost lokalizačního modulu systému SyRoTek s již zmiňovaným modifikovaným algoritmem. Při každém experimentu uvažujeme nulovou hypotézu H_0, že se testované hodnoty na dané hladině významnosti výrazně neliší. Hladina významnosti testů byla zvolena jako α=0.01. Hypotézy jsou vyhodnoceny dle postupu převzatého z [28] na základě hodnot vypočítaných pomocí programu STATISTICA 10.

6.1 Porovnání výpočetní náročnosti algoritmů

V této části kapitoly jsou představeny hodnoty naměřené v reálném prostředí za použití lokalizačních algoritmů prezentovaných v kapitole 5. Lokalizační systém běží na procesoru i3 (2.13 GHz) při rozlišení obrazu 640×480 pixelů a velikosti vzoru d=9, d_0=6 a d_i=2. Výpočetní náročnost systému je zde prezentována jako průměrný počet snímku zpracovaných za sekundu, obecně uváděn jako průměrné FPS. Mimo již zmíněné detekce a lokalizace vzoru je při tomto měření v algoritmu započítán i čas potřebný k zachycení snímku a převod barevného obrazu na černobílý. Vzory jsou umístěny v pracovním prostoru lokalizačního systému ve vzdálenosti L od kamery. Při experimentu bylo zvoleno několik různých vzdáleností a pro každou z nich probíhalo měření pro 1-10 vzorů v obraze. Cílem experimentu bylo porovnat výpočetní náročnost modifikovaných lokalizačních systémů a také určit vliv funkce opětovné kontroly (*Recheck*).



Obrázek 19: Porovnání výpočetní náročnosti navrhovaných modifikací algoritmu

Střední hodnoty paralelního a sekvenčního řešení lokalizačních algoritmů se při dané hladině významnosti testu výrazně liší (hodnota p[8]=0.00). Proto tedy můžeme zamítnou nulovou hypotézu H_0 a přijmeme alternativu. Z té plyne, že sekvenční řešení s vyšší průměrnou hodnotou FPS je výpočetně méně náročné řešení.

Další testovanou hypotézou je, že funkce opětovné kontroly nemá vliv na výpočetní náročnost algoritmu. Hodnota p je u větší než zvolená hladina významnosti testu (p=0.42), což znamená, že střední hodnoty testovaných metod nevykazují rozdíl. Přijímáme tedy nulovou hypotézu, že funkce opětovné kontroly nemá vliv na výpočetní náročnost algoritmu.

Při experimentech byly potvrzeny teoretické předpoklady. Nicméně jak můžeme vyčíst z grafu, rozdíl výpočetní náročnosti uvedených řešení se s rostoucím počtem robotů snižuje. Je tedy pravděpodobné, že při lokalizaci velkých robotických rojů robotů bude rozdíl výpočetní náročnosti uvedených řešení neznatelný. Co se funkce opětovné kontroly týče, nebyl zde prokázán její přínos pro zlepšení výpočetní náročnosti a spolehlivosti lokalizace. Při provedených experimentech byla úspěšnost lokalizačního algoritmu prakticky stoprocentní a tedy nebylo možné pozorovat vliv této funkce na výpočetní náročnost algoritmu. Určitého zlepšení bylo dosaženo pouze u vyšších vzdáleností vzoru od kamery (L=>2.5m). Tyto vzdálenosti byly ale zvoleny z čistě experimentálních důvodů a přesahují rozměry pracovního prostoru lokalizačního systému při daném rozlišení kamery a velikosti vzoru [24]. Funkce opětovné kontroly najde tedy využití pouze v případech, kdy se roboty pohybují na hranici pracovního prostoru, záleží nám na vysoké spolehlivosti lokalizace a jsou dostupné dostatečně výkonné výpočetní prostředky. Hodnoty v prezentovaném grafu byly získány při L=1m.

6.2 Porovnání přesnosti lokalizace

V této části kapitoly je porovnána přesnost lokalizačního modulu systému SyRoTek a modifikovaného algoritmu z kapitoly 5. Při experimentu se využívá prostředků systému SyRoTek, tedy příslušné kamery s rozlišením 1600×1200 bodů zabírající prostor arény a robotů S1R. Experiment probíhal následovně: nejdříve byly roboty rozmístěny po aréně a byla určena jejich reálná pozice pomocí měřícího pásma. Pro minimalizaci chyby měření v tomto kroku byly roboty rozmisťovány tak, aby neznámou hodnotou byla pouze hodnota souřadnice x nebo pouze souřadnice y. Druhým krokem bylo určení pozice těchto robotů pomocí lokalizačního modulu systému SyRoTek. Poté byl lokalizační vzor modulu na vrchu robotu nahrazen vzorem ve tvaru elipsy a byla určena pozice robotů pomocí modifikovaného algoritmu. Celý postup měření se pak několikrát zopakoval pro získání většího množství vzorků. U modifikovaného algoritmu uvažujeme dva různé principy určení pozice vzor (viz kapitola 4.1.3). Lokalizační modul systému SyRoTek je dále veden pouze jako *SYR*, modifikovaný algoritmus s původním způsobem určení pozice vzoru jako *MOD* a modifikovaný algoritmus využívající princip homografie jako *HOM*.

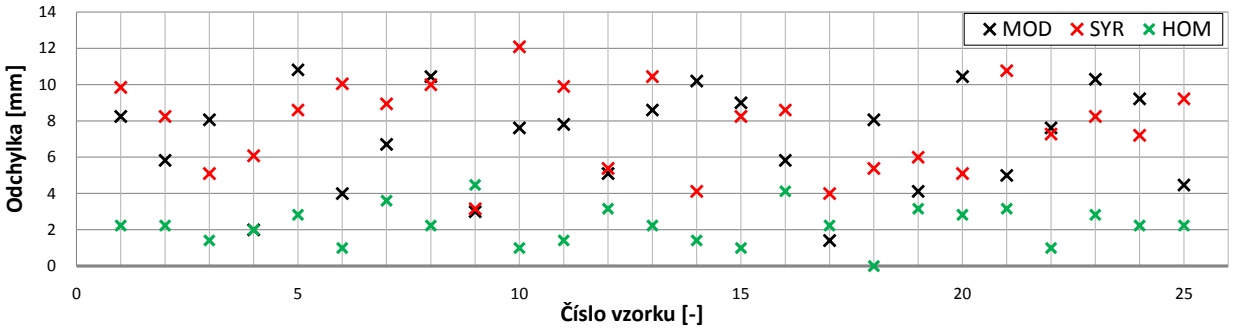
[8]hodnota p udává pravděpodobnost platnosti nulové hypotézy

Určení pozice robotu

	MOD	**SYR**	**HOM**
MOD	×	0.27	0.00
SYR	0.27	×	0.00
HOM	0.00	0.00	×

Tabulka 1: p-hodnoty při porovnání přesnosti určení pozice robotu

Střední hodnota naměřených odchylek se u *SYR* a *MOD* se při dané hladině významnosti testu výrazně neliší (hodnota p=0.27). Od těchto hodnot se naopak výrazně liší střední hodnota *HOM*, která je také z těchto hodnot nejnižší. Proto tedy můžeme zamítnou nulovou hypotézu a přijmout alternativu z níž plyne, že *HOM* je s průměrnou odchylkou 2,24mm pro určení pozice robotu nejpřesnější metodou. Průměrná odchylka modifikovaného algoritmu od reálné hodnoty činila 6,96mm, odchylka lokalizačního modulu SyRoTek byla 7,68mm. Nicméně, lokalizační modul systému SyRoTek je navržen pro nepřetržitou (24/7) lokalizaci, a proto by pro přesnější porovnání systémů bylo zapotřebí podrobit modifikovaný algoritmus dlouhodobějšímu testování.



Obrázek 20: Porovnání přesnosti určení pozice robotu

Určení orientace robotu

	MOD	**SYR**	**HOM**
MOD	×	0.37	0.12
SYR	0.37	×	0.13
HOM	0.12	0.13	×

Tabulka 2: p-hodnoty při porovnání přesnosti určení orientace robotu

Hledaná p hodnota je u všech případech větší než zvolená hladina významnosti testu, což znamená, že odchylka měření úhlu nevykazuje rozdíl mezi testovanými metodami. Přijímáme tedy nulovou hypotézu, že zmiňované metody jsou při určování orientace robotu stejně přesné.

Z provedených experimentů vyšel nejlépe modifikovaný algoritmus, který při určování pozici vzoru využívá principu homografie. Přesnost určení pozice je několikanásobně vyšší než přesnost ostatních testovaných algoritmů. Průměrná odchylka od reálné hodnoty činila 2.24mm. Dalším testovaným parametrem byla přesnost určení orientace robotu. Z provedeného experimentu je zřejmé, že metody určení orientace robotu jsou u všech testovaných algoritmů stejně přesné.

Kompletní přehled naměřených hodnot všech experimentů je možné najít v příloze této práce.

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a implementovat lokalizační systém pro roje mobilních robotů. Základem pro tento systém je algoritmus analýzy obrazu používaný skupinou IMR pro relativní lokalizaci malých UAV. Dílčím cílem práce pak byla prezentace lokalizačního modulu systému SyRoTek a porovnání přesnosti lokalizace robotu tohoto modulu s lokalizačním systémem pro roje mobilních robotů.

Teoretický úvod práce je koncipován tak, aby uvedl čtenáře do problematiky lokalizace mobilních robotů. Byly zde prezentovány termíny, které jsou následně použity v praktické části práce. Lokalizační techniky byly následně rozděleny do několika základních kategorií podle jejich společných vlastností. Důraz je kladen především na vizuální lokalizaci a principy lokalizace multirobotických systémů. Jsou zde také zmíněny některé již realizované lokalizační systémy a jejich výhody i nevýhody.

V praktické části práce jsou nejdříve prezentovány dvě různé metody vizuální lokalizace mobilních robotů. Prvním z nich je lokalizační modul systému SyRoTek, který byl navržen pro přesnou a nepřetržitou lokalizaci robotů v dynamickém prostředí. Způsob lokalizace robotů je založen na principu konvoluce. Druhou metodou je algoritmus pro analýzu obrazu. Na tomto algoritmu je následně založen celý lokalizační systém pro roje mobilních robotů. Byla navrhnuta dvě různá řešení pro rozšíření tohoto algoritmu: paralelní a sekvenční. Hlavní výhodou paralelního řešení je, že lokalizace každého jednoho robotu je nezávislá na lokalizaci robotů ostatních. Na druhou stranu je toto řešení výpočetně náročnější, jak bylo i experimentálně potvrzeno. Výhodou sekvenčního řešení je právě nižší výpočetní náročnost, přehlednost toku programu a nedochází zde k problémům s přístupem ke sdíleným prostředkům. Dalším prvkem, který má za úkol snížit výpočetní náročnost a zvýšit účinnost lokalizačního systému, je funkce opětovné kontroly. Tato funkce je rozšířením sledovacího mechanismu v algoritmu a jejím cílem je minimalizovat důsledek chyb, vzniklých kvůli nedokonalosti kamery nebo nepřesnostem při výpočtu konstant v programu. Ovšem při experimentech nebyl prokázán vliv této funkce na snížení výpočetní náročnosti lokalizačního systému. Největším problémem při samotné implementaci zmíněných řešení bylo řízení přístupu ke sdíleným prostředkům a také zachování nízké výpočetní náročnosti při lokalizaci více vzorů v obraze.

V další části práce je realizován experiment, který porovnává přesnost zmíněných lokalizačních systémů. Experiment prokázal, že nejpřesnějším lokalizačním systémem je systém založený na algoritmu pro analýzu obrazu, využívající principu homografie. Nicméně pro kompletní porovnání by bylo potřeba podrobit lokalizační systém dlouhodobějšímu testování.

V práci byly tedy splněny všechny vytyčené cíle. Modifikovaný lokalizační systém splňuje potřeby nezbytné pro lokalizaci a řízení robotického roje v reálném prostředí. Jedinou věcí limitující maximální možný počet lokalizovaných robotů je síla výpočetních prostředků, na kterých běží lokalizační algoritmus. Díky své vysoké přesnosti, nízké výpočetní náročnosti a snadné reprodukci, může tento lokalizační systém najít uplatnění v celé řadě aplikací.

Reference

[1] Ondřej Staněk. Centralized multirobot system. Bachelor thesis, Charles University in Prague, Prague, 2012. 84 p.

[2] Marek Skalka. Srovnání lokalizačních technik. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, Praha, 2011. 86 s.

[3] Rudy Negenborn. Robot localization and Kalman filters: On fnding your position in a noisy world. Master thesis, Utrecht University, Utrecht, 2003. 143 p.

[4] Karel Košnar. Mobilní robotika. Katedra kybernetiky, Fakulta elektrotechnická, České Vysoké Učení Technické v Praze.

[5] Iñaki Navarro and Fernando Matía. An Introduction to Swarm Robotics. *ISRN Robotics*, 2013, 2013.

[6] Volvocars. První praktická ukázka jízdy vozidel v konvoji. In *volvocars.com [online]*, [cit. 2013-29-4]. Dostupný z: http://volvocars.com/cz/top/about/news-events/pages/default.aspx?itemid=57.

[7] Erico Guizzo. How google's self-driving car works. In *spectrum.ieee.org/ [online]*, [cit. 2013-29-4]. Dostupný z: www.http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/how-google-self-driving-car-works.

[8] Darpa. Grand challenge. In *darpa.mil [online]*, [cit. 2013-25-4]. Dostupný z: http://archive.darpa.mil/grandchallenge/.

[9] uav uas.cz. Další využití UAV v rámci armády pro zajištění dělostřelecké podpory. In *uav-uas.cz/ [online]*, [cit. 2013-29-4]. Dostupný z: http://uav-uas.cz/dalsi-vyuziti-uav-v-ramci-armady-pro-zajisteni-delostrelecke-podpory/.

[10] Wolfram Burgard, Dieter Fox, and Sebastian Thrun. Markov localization for mobile robots in dynamic environments. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 11, 1999.

[11] Jan Gärtner. Provedení rešeršní studie v oblasti metod simultálnní lokalizace a mapování. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2008. 50 s.

[12] H. R. Everett J. Borenstein and L. Feng. Where am I?: Systems and methods for mobile robot positioning. University of Michigan, 1996.

[13] Jonathan Dixon and Oliver Henlich. Mobile robot navigation. In *Imperial College, London [online]*, [cit. 2013-25-4]. Dostupný z: http://www.doc.ic.ac.uk/∼nd/surprise_97/journal/vol4/jmd/.

[14] WonYeon Choi, Yan Li, JaeHyun Park, and JangMyung Lee. Collaborative Multi-Robot Localization. In *Proc. of the German Conference on Artificial Intelligence*, 1999.

[15] Moisés Lisboa Rodrigues, Luiz Filipe M. Vieira, and Mario F. M. Campos. Mobile robot localization in indoor environments using multiple wireless technologies. *Brazilian Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium*, pages 79 – 84, 2012.

[16] WonYeon Choi, Yan Li, JaeHyun Park, and JangMyung Lee. Efficient localization of multiple robots in a wide space. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2010.

[17] Miroslav Kulich, Jan Chudoba, Karel Košnar, Tomáš Krajník, Jan Faigl, and Libor Přeučil. SyRoTek—Distance Teaching of Mobile Robotics. *IEEE Transactions on Education*, 56, 2013.

[18] Miroslav Kulich, Jan Faigl, Jan Chudoba, and Karel Košnar. A Visualization System for Teaching Intelligent Mobile Robotics in SyRoTek. In *Proceedings of The 2nd International Conference on Simulation*, 2010.

[19] Jan Faigl, Jan Chudoba, Karel Košsnar, Miroslav Kulich, Martin Saska, and Libor Přeučil. SyRoTek - A Robotic System for Education. *IEEE Transactions on Education*, 56, 2013.

[20] Sol Pedre, Tomáš Krajník, Elías Todorovich, and Patricia Borensztejn. Accelerating embedded image processing for real time: a case study. *Journal of Real-Time Image Processing*, pages 1–26, 2013.

[21] NHL Hogeschool and Van de Loosdrecht. Computer vision: Linear filters (convolution). In *nhl.nl [online]*, [cit. 2013-11-5]. Dostupný z: http://webserv.nhl.nl/∼loosdrec/vision_course/9_linearfilters.pdf.

[22] M. Carrerasand, P. Ridao, R. García, , and T. Nicosevici. Vision-based localization of an underwater robot in a structured environment. In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, page pp. 971–976, 2003.

[23] A. A. Rad, K. Faez, and N. Qaragozlou. Fast circle detection using gradient pair vectors. In *DICTA*, page pp. 879–888, 2003.

[24] Jan Faigl, Tomáš Krajník, Jan Chudoba, and Martin Saska. Low-Cost Embedded System for Relative Localization in Robotic Swarms. In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013.

[25] Bryan S. Morse. Thresholding. Brigham Young University, 2000.

[26] David Marshall. Vision systems. Cardiff School of Computer Science and Informatics, 1994.

[27] Martin Beneda. Homografie a epipolární geometrie. *TRILOBIT*, 2/2010.

[28] M. Navara. Pravděpodobnost a matematická statistika. Skriptum FEL ČVUT, 1. vydání, Praha, 2007.

[29] J.L. Guzmán, R. González, F. Rodríguez, and M. Berenguel. Comparative Study of Localization Techniques for Mobile Robots based on Indirect Kalman Filter. Departamento de Lenguajes y Computación, Universidad de Almería.

[30] Dan Wu and Huaicheng Su. An Improved Probabilistic Approach For Collaborative Multi-Robot Localization. In *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2009.

[31] Noel S. Gunay and Elmer P. Dadios. Robust and Accurate Color-Based Global Vision Recognition Of Highly Dynamic Objects in Real Time. In *Proceedings of 2011 8th Asian Control Conference*, 2011.

[32] Daniel Pizarro, Manuel Mazo, Enrique Santiso, Marta Marron, David Jimenez, Santiago Cobreces, and Cristina Losada. Localization of Mobile Robots Using Odometry and an External Vision Sensor. *Sensors 2010*, 2010.

[33] Doc. Ing. František Šolc CSc. a Ing. Luděk Žalud Ph.D. Robotika. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2002.

Přílohy

1. Porovnání výpočetní náročnosti - naměřené hodnoty

Tato příloha rozšiřuje údaje prezentované v kapitole 6.1. Index $_R$ značí rozšíření algoritmu o funkci opětovné kontroly.

Počet vzorů	Paralelní [FPS]	Sekvenční [FPS]	Sekvenční$_R$ [FPS]
1	320	335	338
2	280	290	298
4	244	252	250
6	235	243	233
8	228	241	242
10	229	238	237

Tabulka 3: Naměřené hodnoty pro L=0.5m

Počet vzorů	Paralelní [FPS]	Sekvenční [FPS]	Sekvenční$_R$ [FPS]
1	334	359	358
2	285	303	303
4	252	275	269
6	238	252	253
8	236	244	245
10	234	243	242

Tabulka 4: Naměřené hodnoty pro L=1m

Počet vzorů	Paralelní [FPS]	Sekvenční [FPS]	Sekvenční$_R$ [FPS]
1	342	372	370
2	295	320	325
4	262	287	276
6	253	271	267
8	245	253	254
10	228	243	245

Tabulka 5: Naměřené hodnoty pro L=1.5m

Počet vzorů	Paralelní [FPS]	Sekvenční [FPS]	Sekvenční$_R$ [FPS]
1	351	384	381
2	315	342	339
4	259	283	283
6	249	264	267
8	232	249	252
10	229	249	248

Tabulka 6: Naměřené hodnoty pro L=2m

Počet vzorů	Paralelní [FPS]	Sekvenční [FPS]	Sekvenční$_R$ [FPS]
1	344	364	370
2	317	330	333
4	281	288	290
6	245	252	253
8	238	248	245
10	234	245	248

Tabulka 7: Naměřené hodnoty pro L=2.5m

Počet vzorů	Paralelní [FPS]	Sekvenční [FPS]	Sekvenční$_R$ [FPS]
1	228	250	255
2	218	230	238
4	212	219	220
6	200	222	218
8	188	186	206
10	172	183	192

Tabulka 8: Naměřené hodnoty pro L=3m

2. Porovnání přesnosti lokalizace - naměřené hodnoty

Tato příloha rozšiřuje údaje prezentované v kapitole 6.2. Poloha robotů je prezentována pomocí souřadnic x a y, přičemž nulový bod leží v rohu arény. Hodnoty odchylky polohy jsou udávané v milimetrech.

Reálná pozice		**MOD**			**SYR**			**HOM**		
x	y	x	y	odch.	x	y	odch.	x	y	odch.
420	74	428	76	8.25	429	78	9.85	422	75	2.24
891	74	896	77	5.83	899	76	8.25	893	75	2.24
1210	74	896	77	8.06	1205	73	5.10	1302	74	2.00
1304	74	1306	74	2.00	1298	75	6.08	1302	74	2.00
2667	74	2676	80	10.82	907	73	10.05	898	74	1.00
897	74	901	74	4.00	444	78	8.94	438	77	3.61
1299	74	1309	71	6.71	1309	74	10.00	1300	72	2.24
2197	74	2197	77	3.00	2194	75	3.16	2193	76	4.47
2327	74	2320	71	7.62	2338	69	12.08	2326	74	1.00
701	74	695	79	7.81	694	81.00	9.90	700	75	1.41
600	74	601	69	5.10	598	69	5.39	601	71	3.16
1745	74	1738	79	8.60	1735	77	10.44	1744	76	2.24
240	499	242	489	10.20	241	495	4.12	239	498	1.41
240	645	240	654	9.00	242	653	8.25	240	646	1.00
240	1236	2430	1241	5.83	244	1229	8.60	243	1235	4.12
240	1443	239	1444	1.41	240	1447	4.00	239	1445	2.24
240	578	236	585	8.06	235	580	5.39	240	578	00
240	998	239	1002	4.12	240	1004	6.00	239	1001	3.16
240	1566	237	1276	10.44	241	1561	5.10	238	1568	2.83
240	1946	237	1942	5.00	236	1956	10.77	237	1945	3.16
240	2341	243	2348	7.62	242	1956	10.77	241	2341	1.00
240	4821	245	472	10.30	242	489	8.25	242	479	2.83
240	822	246	828	9.22	244	828	7.21	242	823	2.24
240	1183	244	1181	4.47	246	1176	9.22	242	1182	2.24
Průměr:		MOD		6,96	SYR		7.68	HOM		2.24

Tabulka 9: Odchylky určení pozice robotu

Hodnoty odchylky orientace jsou udávány v radiánech.

MOD	SYR	HOM
0.01	0.07	0.01
0.05	0.02	0.03
0.03	0.01	0.03
0.01	0.02	0.00
0.05	0.03	0.04
0.02	0.03	0.02
0.01	0.09	0.00
0.03	0.02	0.03
0.01	0.07	0.02
0.01	0.00	0.01
0.02	0.03	0.03
0.03	0.00	0.04
0.01	0.02	0.01
0.07	0.10	0.07
0.01	0.02	0.02
0.03	0.03	0.03
0.03	0.05	0.02
0.03	0.01	0.03
0.07	0.03	0.06
0.01	0.01	0.02
0.03	0.05	0.03
0.05	0.03	0.04
0.02	0.07	0.03
0.04	0.03	0.03
0.01	0.03	0.02

Tabulka 10: Odchylky určení orientace robotu

3. Obsah přiloženého CD

V tabulce jsou uvedena jména všech kořenových adresářů přiloženého CD s popisem jejich obsahu.

Jméno adresáře	**Popis obsahu**
bp	bakalářská práce ve formátu pdf
sources	zdrojové kódy

Tabulka 11: Obsah přiloženého CD.