

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky

Vizuální navigace mobilních robotů ve formaci

Martin Žákovec

Vedoucí: Ing. Libor Přeučil, CSc.

Obor: Robotika

Studijní program: Kybernetika a robotika

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Liboru Přeučilovi, CSc. za cenné rady v průběhu celého semestru, dále Ing. Janu Chudobovi, Dr. Gaël Pierre Marie Ecorchardovi a Ing. Martinu Dörflerovi. Jejich rady a zpětná vazba byly stěžejní pro úspěšné dokončení této práce.

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

.....
podpis autora práce

Abstrakt

S rostoucím využitím mobilních robotů napříč odvětvími roste potřeba po schopnosti robotu orientovat se s využitím lokální informace namísto GPS signálu, který není vždy dostupný. V této práci je nejprve shrnuta problematika lokalizace ve formaci robotů se zaměřením na využití vizuální informace. Dále je představena metoda kombinující využití systému pasivních značek April s prstencem o půdorysu pravidelného osmiúhelníku pro určení vzájemné polohy a orientace robotů ve formaci. Následně je metoda implementována a podrobena sérii testů, které pokrývají běžný provoz formace robotů.

Klíčová slova: vizuální navigace, formace mobilních robotů, April značky, udržování formace, lokalizace

Vedoucí: Ing. Libor Přeučil, CSc.
ČVUT CIIRC,
Jugoslávská 3
Praha 6
160 00

Abstract

While usage of mobile robots is growing across industries, there is increased demand for robot's ability to locate itself in a formation using local information instead of GPS signal which might not be available. In this thesis, an executive summary is conducted, focusing on robot localization using visual information. A method is introduced, using a system of passive markers AprilTags for determination of mutual position and robot's orientation in a formation is suggested. The method is implemented and tested in series of tests designed to cover common operation of robots formations.

Keywords: visual navigation, mobile robot formation, AprilTags, formation keeping, localization

Title translation: Visual Navigation for Robot Formation Keeping

Obsah

1 Úvod	1	2.5.2 Značky April	11
2 Teoretický úvod	3	2.5.3 MaxiCode	12
2.1 Robotické formace	3	2.5.4 CyberCode	12
2.2 Požadavky na udržování formací .	4	2.5.5 Data Matrix	12
2.3 Aktuálních metody lokalizace . . .	5	2.5.6 Značky AR	13
2.3.1 Inerciální systémy	6	2.5.7 Intersense	13
2.3.2 Magnetické systémy	7	2.5.8 WhyCon	14
2.3.3 Mechanické systémy	7	2.5.9 Požadavky na pasivní značky	14
2.3.4 Akustické systémy	8	2.6 Značky April	15
2.4 Metody lokalizace využívající vizuální informace	8	2.6.1 Detekce značky v obraze	15
2.4.1 Lokalizace bez využití značek .	9	2.6.2 Kódování informace ve značce	17
2.4.2 Lokalizace s aktivními značkami	10	3 Analýza zadání	19
2.4.3 Lokalizace s pasivními značkami	10	3.1 Analýza problému	19
2.5 Vizualní lokalizace pomocí pasivních značek	11	3.2 Analýza možných stavů formace	21
2.5.1 QR kódy	11	3.3 Požadavky na řešení vizuální navigace	22
		3.4 Požadavky na kameru	23

4 Návrh vlastní metody vizuální navigace	25	5 Kvantitativní vyhodnocení	43
4.1 Možnost zachycení 360° obrazu .	25	5.1 Metodika měření	43
4.2 Použitý hardware	28	5.2 Přesnost měření v závislosti na vzdálenosti	45
4.2.1 Kamera	28	5.3 Přesnost měření v závislosti na úhlu natočení	46
4.2.2 Sestava kamer	29	5.3.1 Rotace kolem svislé osy (pitch)	46
4.2.3 Objektiv	30	5.3.2 Rotace kolem vodorovné osy (yaw)	47
4.2.4 Robotická platforma	31	5.3.3 Rotace kolem osy kolmé na značku (roll)	48
4.3 Umístění navigačních značek na roboty	32	5.4 Přesnost měření v závislosti na osvětlení v místnosti	49
4.3.1 Princip činnosti se soustavou April značek	34	5.5 Přesnost měření v závislosti na rozlišení kamery	51
4.3.2 Řešení chybových stavů	37	5.6 Charakteristiky polohy a variability pro jízdu za vedoucím robotem . . .	53
4.4 Kalmanův filtr	38	5.6.1 Následování po rovné trajektorii bez překážek (viz obrázek 5.13) .	54
4.4.1 Princip činnosti s Kalmanovým filtrem	40	5.6.2 Následování po rovné trajektorii s překážkou (viz obrázek 5.14) . .	55
4.5 Implementace	41	5.6.3 Následování po obloukové trajektorii (90°, viz obrázek 5.19)	56
4.5.1 Načtení obrazu	41	5.6.4 Následování po obloukové trajektorii (180°, viz obrázek 5.20)	57
4.5.2 Detekce značky	42		
4.5.3 Kalmanův filtr	42		

5.6.5 Následování po obloukové trajektorii s okluzí za objekty prostředí (viz obrázek 5.25)	58
5.6.6 Obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem (viz obrázek 5.26)	60
6 Závěr	61
6.1 Další kroky	63
A Literatura	65
B Obsah CD	71
C Zadání práce	73

Obrázky

2.1 Typické tvary formací - a) linie b) kolona c) diamant d) klín.	3	2.12 Příklad CyberCode.	12
2.2 Typická organizace členů ve formaci - a) centralizovaná b) podle vedoucího robotu c) decentralizovaná.	4	2.13 Příklad DataMatrix.	13
2.3 Kombinovaná formace mobilních robotů a mikrooptér (převzato z [10]) a pohled z kamery dronu.	5	2.14 Příklad AR značky.	13
2.4 Pohyb formace robotů s laserovými senzory (převzato z [5]).	6	2.15 Příklad Intersense.	14
2.5 Vysílací cívka (vlevo) a tříosý detektor (převzato z [12]).	7	2.16 Příklad WhyCon.	14
2.6 Využití akustických vysílačů pro lokalizaci podvodního plavidla (převzato z [14]).	8	2.17 Příklad využití April značek [21] na mobilních robotech.	15
2.7 Rekonstrukce zachycených vektorů ze senzoru Microsoft Kinect® (převzato z [16]).	9	2.18 Proces rozpoznání - zdrojový obraz pro rozpoznání (z [21]).	16
2.8 Použití 15-bodové sestavy pro zachycení pohybu při tvorbě animací v počítačových hrách (převzato z [19]).	10	2.19 Proces rozpoznání - lokální gradient velikosti (z [21]).	16
2.9 Příklad QR kódu.	11	2.20 Proces rozpoznání - lokální gradient směru (z [21]).	16
2.10 April značka s ID = 12.	11	2.21 Proces rozpoznání - shlukování podle gradientu (z [21]).	16
2.11 Příklad MaxiCode.	12	2.22 Proces rozpoznání - detekce jednotlivých hran (z [21]).	16
		2.23 Proces rozpoznání - detekce čtyřúhelníků (z [21]).	16
		2.24 Ukázka různých druhů April značek.	17
		2.25 Proces rozpoznání - detekce hran značky.	18

2.26 Proces rozpoznání - zakreslení ID ve středu značky.	18	4.3 Transformace obrazu s využitím [36] z panoramatického nástavce...	26
3.1 Ilustrační model formace ve tvaru klínu pro úlohu pokrytí pásu terénu.	19	4.4 Transformace obrazu s využitím [36] z parabolického zrcadla.....	26
3.2 Ilustrační model formace s virtuálními pružinami [32].	20	4.5 Zachycený obraz přes parabolické zrcadlo, rozlišení kamery 1280x960 pixelů.	27
3.3 Situace majoritního otočení vedoucího robotu formace. Šipka znázorňuje orientaci robotu.	21	4.6 Kamera Basler Dart daA1280-54um.	28
3.4 Ilustrace objíždění překážky s rozštěpením formace.	22	4.7 Znázornění sestavy kamer na formaci robotů.	29
3.5 Ilustrace objíždění překážky s deformací formace.	22	4.8 Objektiv T0412FICS.	30
3.6 Uspořádání scény při snímání (β je vertikální záběr kamery, α je horizontální záběr kamery, H je výška obrazu, W je šířka obrazu, X je střed obrazu a D je vzdálenost obrazu od kamery).	23	4.9 Ilustrační obrázek robotu Turtlebot 2.	31
3.7 Rozdělení April značky na elementární jednotky ve tvaru čtverce, čísla 1 a 8 značí jednotky vnějšího rámečku, čísla 2, 3, ... 7 jednotky s kódovanou informací v April značce.	24	4.10 Detailní pohled na Turtlebot [33] zepředu a ze strany.	31
4.1 Princip činnosti všesměrových kamer s využitím parabolického zrcadla.....	25	4.11 Ukázka možné pozice robotu vůči kameře, obě sousední značky jsou vidět pod úhlem $\pm 22, 5^\circ$	32
4.2 Zachycený obraz s panoramatickým nástavcem, rozlišení kamery 640x480 pixelů.	26	4.12 Navržený prstenec, pohled shora.	33
		4.13 Navržený prstenec, pohled z boku.	33
		4.14 Prstenec s označením jednotlivých značek (A jako zadní značka modře; H a B jako sousední značky zeleně; C, D, ... G jako přední značky černě).	34

4.15 Schéma pro výpočet vzdálenosti při detekci sousední značky.	35	5.6 Porovnání reálné a naměřené vzdálenosti prstence od robotu v závislosti na osvětlení, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 24, 671 a 982 lux.	49
4.16 Schéma pro výpočet úhlu při detekci sousední značky.	35	5.7 Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (pitch) značky prstence vzhledem k robotu v závislosti na osvětlení, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 24, 671 a 982 lux.	50
4.17 Řídící smyčka rozhodování při detekci značek na prstenci.	36	5.8 Porovnání reálné a naměřené vzdálenosti prstence od robotu v závislosti na rozlišení kamery, osvětlení 671 lux, rozlišení 1280x960 px, 1024x768 px a 640x480 px.	51
4.18 Princip činnosti Kalmanova filtru.	39	5.9 Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (pitch) značky prstence vzhledem k robotu v závislosti na rozlišení kamery, osvětlení 671 lux, rozlišení 1280x960 px, 1024x768 px a 640x480 px.	52
4.19 Řídící smyčka rozhodování při detekci značek na prstenci s Kalmanovým filtrem.	40	5.10 Trajektorie pro testování - a) rovná trajektorie bez překážek, b) rovinná trajektorie s překážkou, c) oblouková trajektorie 90°, d) oblouková trajektorie 180°, e) okluze za objektem prostředí, f) obnovení kontaktu s vedoucím robotem. Černá čára značí trajektorii, červeně jsou vyznačeny překážky.	53
5.1 Orientace souřadné soustavy a příslušných prostorových úhlů yaw, pitch, roll.	44	5.11 Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro rovnou trajektorii bez překážek.	54
5.2 Porovnání reálné a naměřené vzdálenosti prstence od robotu, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 671 lux.	45	5.12 Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro rovnou trajektorii bez překážek.	54
5.3 Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (pitch) značky prstence vzhledem k robotu, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 671 lux.	46		
5.4 Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (yaw) značky prstence vzhledem k robotu, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 671 lux.	47		
5.5 Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (roll) značky prstence vzhledem k robotu, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 671 lux.	48		

5.13 Rovná trajektorie bez překážek.	55	5.24 Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii s okluzí za objekty prostředí.	59
5.14 Rovná trajektorie s překážkou.	55	5.25 Okluze za objektem prostředí.	59
5.15 Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro rovnou trajektorii s překážkou.	55	5.26 Obnova kontaktu s vedoucím robotem.	59
5.16 Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro rovnou trajektorii s překážkou.	55	5.27 Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem.	60
5.17 Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii (90°).	56	5.28 Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem.	60
5.18 Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii (90°).	56		
5.19 Oblouková trajektorie (90°).	57		
5.20 Oblouková trajektorie (180°).	57		
5.21 Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii (180°).	58		
5.22 Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii (180°).	58		
5.23 Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii s okluzí za objekty prostředí.	59		

Tabulky

2.1 Příklad generování lexikodů, vektor o délce $X = 3$, minimální Hammingova vzdálenost mezi aktuálním vektorem a všemi doposud přidanými vektory $Y = 2$. Aktuální Hammingovu vzdálenost značíme jako d	17
4.1 Parametry kamery Basler Dart daA1280-54um	28
4.2 Ověření vhodnosti kombinace kamery Basler Dart daA1280-54um a objektivu T0412FICS, zeleně jsou vyznačeny případy vyhovující podmínce $p < 0.006875$ m, viz kapitola 3.4.	29
4.3 Parametry objektivu T0412FICS	30
5.1 Charakteristiky polohy pro jízdu po rovné trajektorii bez překážek. .	54
5.2 Charakteristiky variability pro jízdu po rovné trajektorii bez překážek.	54
5.3 Charakteristiky polohy pro jízdu po rovinné trajektorii s překážkou.	55
5.4 Charakteristiky variability pro jízdu po rovinné trajektorii s překážkou.	56
5.5 Charakteristiky polohy pro obloukovou trajektorii (90°).	57
5.6 Charakteristiky variability pro obloukovou trajektorii (90°).	57
5.7 Charakteristiky polohy pro obloukovou trajektorii (180°).	58
5.8 Charakteristiky variability pro obloukovou trajektorii (180°).	58
5.9 Charakteristiky polohy pro obloukovou trajektorii s okluzí za objekty prostředí.	59
5.10 Charakteristiky variability pro obloukovou trajektorii s okluzí za objekty prostředí.	59
5.11 Charakteristiky polohy pro obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem.	60
5.12 Charakteristiky variability pro obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem.	60



Kapitola 1

Úvod

Kooperace robotů v rámci formace přináší řadu výhod. Členy formace jsou identické a zastupitelné v případě poruchy. Roboty mohou být sdruženy do formací a umožnit tak pokrytí větší plochy (v úlohách prohledávání či mapování), zlepšit robustnost algoritmu, zefektivnit využití dat ze senzorů nebo zjednodušit ovládání. Formace umožňují řešit úlohy složité nebo nesplnitelné pro jednotlivý robot a mohou jako celek flexibilně reagovat na měnící se podmínky. Uspořádání do formace dále zlepšuje odolnost vůči chybovým stavům, neboť jednotky formace jsou navzájem zastupitelné.

Většina aplikací pro řízení autonomních či semi-autonomních formací využívá, kromě interní komunikace, navíc GNSS (Global Navigation Satellite System; například GPS, Galileo,...) k lokalizaci polohy. Do sdílené sítě jsou posílány údaje o pozici vůdčího robotu a každá jednotka formace si určuje vlastní teoretickou polohu v rámci formace. Ta je porovnána s aktuální polohou a případně dojde k upravení dráhy tak, aby odchylka byla korigována. Toto řešení naráží na problém ve chvíli, kdy není možné polohu pomocí GNSS zaměřit. Příkladem je lokalizace uvnitř budov (slabý signál) nebo ve venkovních prostorech (signál blokován překážkou - střecha, stromy, ...). V některých případech není GNSS signál dostupný vůbec.

Hlavním cílem této práce je vytvořit systém vizuální navigace pro vhodnou formaci mobilních robotů. Jeden robot bude vedoucí, ovládaný lidským operátorem, a ostatní roboty se budou podle něho pohybovat v předem definované formaci. Celý systém bude schopen detekovat překážky, upravit tvar formace pro vyhnutí se překážce a zároveň udržet definovanou pozici relativně k vedoucímu robotu.

Tato práce řeší vizuální navigaci pro komplexní úlohu řízení formace robotů se zabudovaným systémem pro zabránění kolize (collision avoidance). V této práci se pokusíme realizovat určení relativní polohy vůči vedoucímu robotu takovým způsobem, který je robustní, tedy odolný vůči výpadkům a zároveň zahrnuje možnost obnovení z chybového stavu. Potenciální využití tohoto řešení je možné v situacích, kdy existuje potřeba pokrýt velkou plochu mobilními roboty. Příkladem může být sestavení formace na mapování terénu, formace robotických sekaček či sněžných pluhů. S případnou další modifikací lze stejný princip použít i pro jiné druhy robotů.

Nejprve se seznámíme s požadavky na udržování formací pozemních mobilních robotů, především s takovými postupy, které k určení vzájemné polohy a orientace využívají vizuální informaci. Po analýze vybraných postupů a vyhodnocení vhodnosti pro řešení našeho problému navrhne vlastní metodu k měření relativní orientace a vzdálenosti robotů tak, aby systém byl odolný vůči dočasné ztrátě viditelnosti a zároveň poskytoval možnost obnovy z chybového stavu. Tuto metodu budeme dále implementovat, ověřovat na formaci robotů v laboratorních podmínkách a kvantitativně vyhodnocovat.

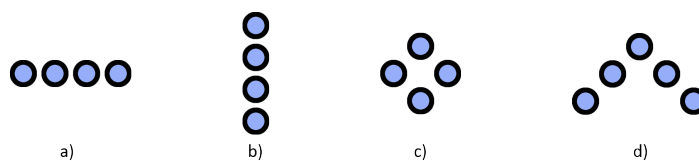
Kapitola 2

Teoretický úvod

2.1 Robotické formace

Formace mobilních robotů umožňuje sdružovat zdroje, navrhovat robustní řešení problémů a zvládat komplexní úlohy neřešitelné samostatným robotem. Formace představuje uspořádání jednotlivých členů v daném geometrickém tvaru. Geometrický tvar je dán požadavkem na konkrétní řešení problému - prohledávání prostoru, mapování prostředí, navigace uvnitř objektu, atp.

Sdružování robotických jednotek do formací je inspirováno přírodou - hejny tažných ptáků, roji hmyzu, stády sudokopytníků či pohybem ryb v oceánských proudech. Mezi typické tvary formací patří linie, kolona, diamant a klín [2].



Obrázek 2.1: Typické tvary formací - a) linie b) kolona c) diamant d) klín.

Při volbě tvaru formace je třeba brát v potaz prostředí, ve kterém se formace bude pohybovat (bez překážek/s překážkami) a možnosti vzájemné komunikace mezi členy formace.

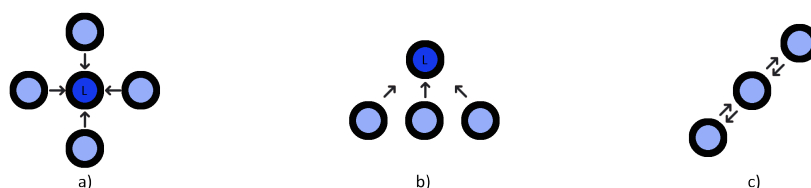
2.2 Požadavky na udržování formací

Základním předpokladem pro udržení požadovaného tvaru formace je zajistit informace o relativní poloze a natočení robotu v rámci formace (lokalizační část). Ze získaných hodnot je porovnáním s požadovanou polohou vypočtena regulační odchylka, která je vhodným způsobem převedena na vstupy motorů robotu (motorická část).

V [3] jsou uvedeny tři základní referenční postupy pro lokalizaci v rámci formace - centralizovaný, decentralizovaný a se vztahem vedoucí robot - následovník (leader - follower). Při použití centralizovaného postupu se všechny členy formace orientují podle centrálního robotu (viz obrázek 2.2a).

Při použití postupu vedoucí robot - následovník se všechny členy orientují podle jednoho vedoucího robotu (viz obrázek 2.2b). Vedoucí robot není zodpovědný za udržování formace.

Při použití decentralizovaného postupu se každý člen orientuje podle předem definovaného jiného členu formace a snaží se udržet definovanou pozici vůči němu (viz obrázek 2.2c).



Obrázek 2.2: Typická organizace členů ve formaci - a) centralizovaná b) podle vedoucího robotu c) decentralizovaná.

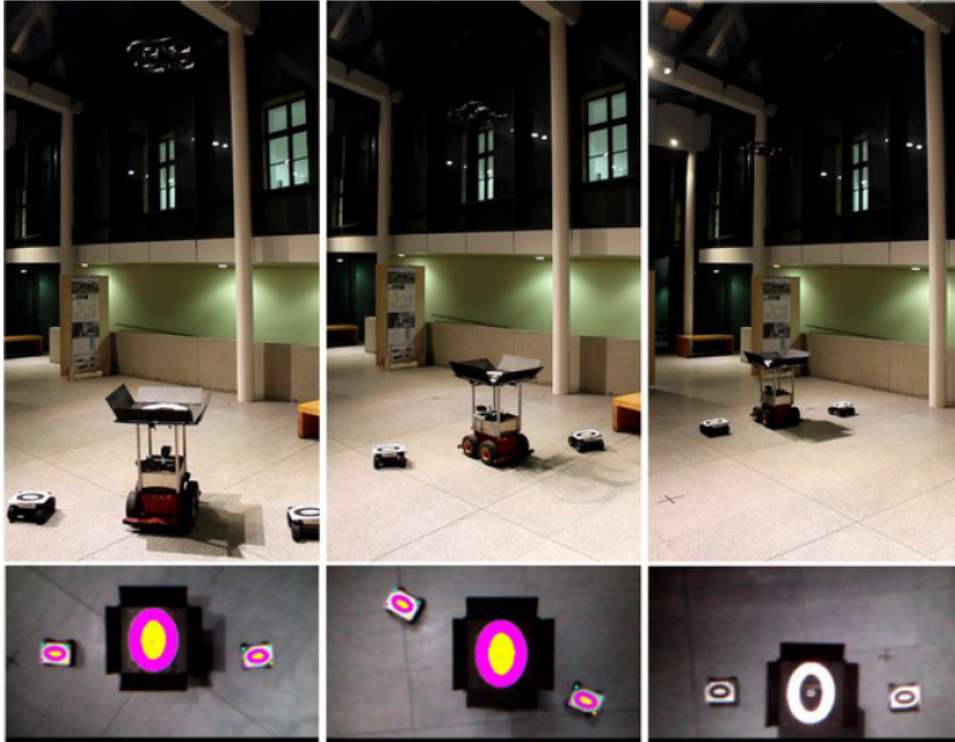
Pro udržení robotické formace je dále nutné zamezit kolizi mezi členy formace navzájem a mezi členy formace a objekty prostředí (collision avoidance).

V případě využití metod zpracování vizuální informace pro udržování formace robotů je třeba zajistit vzájemnou viditelnost mezi členy formace. Pro zlepšení robustnosti a efektivity je možné využít vhodného komunikačního kanálu mezi členy formace pro výměnu údajů o poloze a sensorických měření. Každý člen je tedy schopen pracovat s informacemi mimo dosah svých sensorů.

Při mapování neznámého prostoru [1] umožňuje spolupráce jednotlivých robotů ve formaci soustředění sensorů jednotlivce na určitou část prostředí a detekované informace jsou v rámci komunikace předány dalším členům formace, což vytváří komplexní představu o okolním prostoru.

2.3 Aktuálních metody lokalizace

V [9] je lokalizace členů formace provedena zachycením 360° obrazu v horizontálním směru a následnou triangulací. V [10] je použito vizuální navigace pomocí optických pasivních značek pro lokalizaci smíšené formace mobilních robotů a mikrokoptér.



Obrázek 2.3: Kombinovaná formace mobilních robotů a mikrokoptér (převzato z [10]) a pohled z kamery dronu.

V [6] je použita kombinace méně přesných systémů pro globální lokalizaci (GPS a kompas) společně s přesnějšími laserovými senzory k relativní lokalizaci. Takové spojení umožňuje udržování složitějších formací robotů v reálném čase.

V [7] je použit systém pro formaci robotů využívající GPS moduly a sdílející si vzájemně svoje koordináty pro případy, kdy jsou jednotlivé roboty formace příliš vzdáleny pro iniciaci metod pro vzájemnou lokalizaci ve formaci.

Inspiraci echolokací lze pozorovat v [8], kde je použitý triangulační algoritmus pro určení pozice vůči dvěma „majákům“ vysílajícím rádiové vlny v kombinaci se čtyřmi laserovými senzory pro detekci překážek z každé strany. Tento postup umožňuje formaci robotů pohyb v uzavřených prostorech bez předchozí znalosti prostředí.

V [4] je použito RGB senzoru a LED diod různých barev pro členy formace. Vzájemná poloha je pak určena na základě světelné intenzity sousedních robotů. V [5] je představena kombinace laserového senzoru pro určení vzdálenosti mezi členy formace a kamery detekující barevné proužky (jiná barva jako označení pro každý člen) pro rozlišení nejbližších sousedních členů.



Obrázek 2.4: Pohyb formace robotů s laserovými senzory (převzato z [5]).

Pro lokalizaci objektů se nejčastěji používají metody pro snímání pohybu (motion capture). Jejich využití je široké a přesahuje obor robotiky. Častou aplikační oblastí je segment virtuální reality, snímání pohybu člověka jako základ pro animaci a speciální efekty ve filmech nebo například detekce pohybu v interaktivních herních systémech s využitím senzoru Microsoft Kinect[®]. [16].

Metody lokalizace se dělí podle fyzikálních principů. Hlavními vlastnostmi jsou přesnost lokalizace a rychlost zpracování (určuje, zda je možné danou metodu použít v systémech pracujících v reálném čase). Určení polohy může být relativní (umožňuje určit změnu polohy vůči souřadné soustavě s neznámou absolutní polohou a orientací) a absolutní (vzhledem k pevně dané souřadné soustavě).

■ 2.3.1 Inerciální systémy

Inerciální systémy určují polohu s využitím gyroskopů a akcelerometrů, které poskytují informace o lineárním a úhlovém zrychlení při dané úhlové rychlosti. Polohu a natočení získávají integrací rychlosti a úhlové rychlosti, což vede k jejich hlavní nevýhodě - kumulativní chybě měření. S postupem času tak klesá jejich přesnost a systém je třeba periodicky znovu kalibrovat. Určování polohy je relativní, tedy pouze vůči poloze počáteční.

V [11] je použit akcelerometr, gyroskop a magnetometr (všechna zařízení trojosá) v jediném senzoru pro zachycení pohybu lidské paže v 3D prostoru. Tato konkrétní aplikace byla realizována měřením celkem sedmi různých úhlů (3 v rameni, 2 v lokti a 2 u zápěstí).

■ 2.3.2 Magnetické systémy

Magnetické systémy určují polohu pomocí měření okolního magnetického pole, které je vytvářeno většinou uměle (případně lze využít i magnetické pole Země). Pro snímání magnetického pole se využívají Hallovy sondy a anizotropní magnetorezistory (AMR). Jejich přesnost může být negativně ovlivněna výskytem kovových předmětů v blízkosti přijímače a dalšími nehomogenitami magnetického pole.

V [12] je 2D lokalizace robotu realizována s jednou vysílací a třemi přijímacími cívkami složenými do tříosého detektoru.



Obrázek 2.5: Vysílací cívka (vlevo) a tříosý detektor (převzato z [12]).

■ 2.3.3 Mechanické systémy

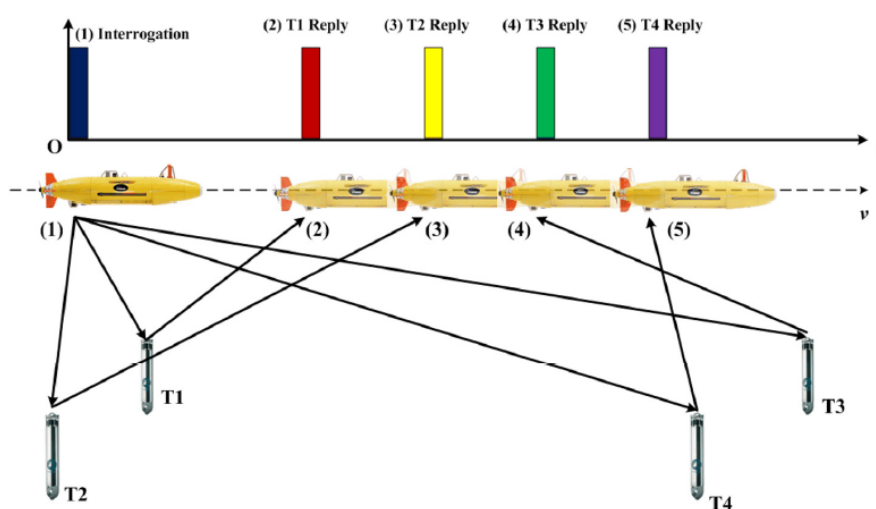
Mechanické systémy snímají pohyb u pevně spojených částí struktury (např.: části robotického ramena). Pro určování polohy se používají potenciometry nebo inkrementální senzory. Nevýhodou těchto systémů je, že při použití v mobilních aplikacích lze měřit pouze relativní polohu a některé události – smyk či prokluzování kol na hladkém povrchu – nebudou detekovány.

V [13] je měření polohy řešeno užitím inkrementálních senzorů na speciální konstrukci pohybující se na diferenciálním podvozku se dvěma koly.

2.3.4 Akustické systémy

Akustické systémy využívají pro určení polohy šíření zvuku, nejčastěji ultrazvukového signálu. Takové měření probíhá z intenzity zachyceného zvukového signálu. Nevýhodou je potřeba přímého spojení mezi vysílačem a přijímačem (ani nesmí dojít k zákrytu senzoru částí robotu), stejně jako snadné rušení okolními zvuky prostředí (téměř nepoužitelné v neřízeném venkovním prostředí).

Akustické systémy mohou pracovat i pod vodní hladinou, jako v [14], kdy lokalizační systém může být využit pro zachycení polohy plavidel. Pod hladinou umístěné vysílače odpovídají na signály z hladinového plavidla, jehož poloha je známa, a triangulací je dopočítávána poloha navigovaného systému.



Obrázek 2.6: Využití akustických vysílačů pro lokalizaci podvodního plavidla (převzato z [14]).

2.4 Metody lokalizace využívající vizuální informace

Optické systémy využívají pro určení polohy elektromagnetického záření a často pracují ve spektru viditelného světla (což umožňuje využití běžných kamer). Určení polohy se uskutečňuje pomocí rozpoznání daného objektu v obraze. Pokud je pevně daná poloha kamery, je určení polohy absolutní. Přesnost určení polohy závisí primárně na rozlišení použitých kamer, kvalitě

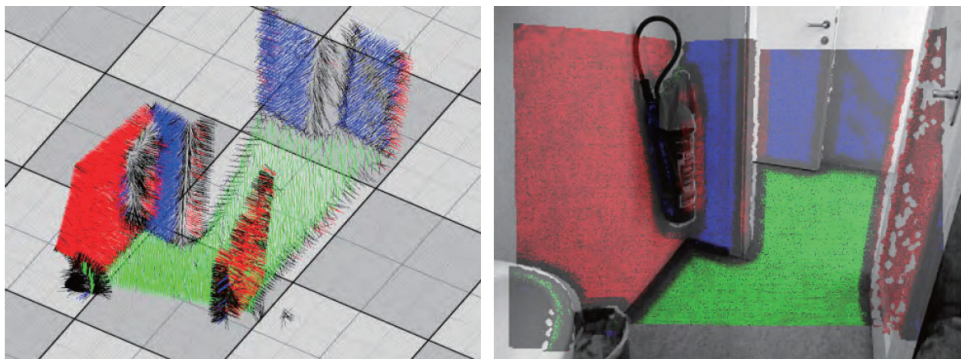
okolního osvětlení a vzdálenosti objektu od kamery.

Pro zjednodušení úlohy rozpoznávání se objekty označují. Pro označení se používají identifikační značky, které v sobě mohou nést zakódovanou další informaci. Optické systémy pracující ve spektru viditelného spektra dále dělíme podle typu značek na systémy pracující s aktivními značkami, pasivními značkami a bez značek s využitím přirozených znaků prostředí.

2.4.1 Lokalizace bez využití značek

Optické systémy pracující bez identifikačních značek určují polohu objektu ze zachyceného obrazu. Sledování tak není omezeno na objekty se značkami a je možné rozpoznat i další přirozené znaky prostředí. Při zpracování obrazu je dále možné detekovat překážky nebo mapovat okolní prostředí.

Vzhledem k výpočetní náročnosti se využívají specializované senzory pro daný typ rozpoznávání. Příkladem takového senzoru je Microsoft Kinect[®] [15], který byl původně vyvinut pro herní konzole a zaměřuje se na rozpoznání pohybu lidského těla. Díky své cenové dostupnosti je využíván i v robotice [16], např.: pro vytváření 3D map vnitřku objektů v reálném čase, atp.

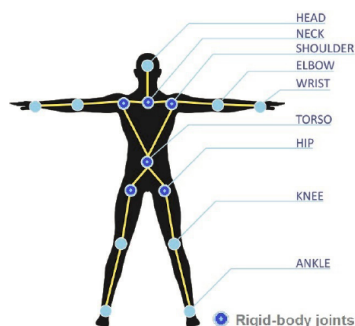


Obrázek 2.7: Rekonstrukce zachycených vektorů ze senzoru Microsoft Kinect[®] (převzato z [16]).

2.4.2 Lokalizace s aktivními značkami

Aktivní značky vyzařují elektromagnetické záření, nejčastěji ve viditelné nebo infračervené části spektra. Tento typ identifikačních značek je méně náchylný na změny okolního osvětlení. Nevýhodou je potřeba vlastního napájení a obecně vyšší pořizovací cena. Systémy s aktivními značkami jsou nejčastěji používány ve filmovém průmyslu a při tvorbě počítačových her, kdy se pomocí aktivních značek mapuje pohyb těla v různých situacích [17].

V [18] je navržený systém zachycení pohybu lidského těla s využitím LED diod jako aktivních značek. V [19] je použito 15-bodové struktury k zachycení hlavních bodů lidského těla pro počítačovou animaci.



Obrázek 2.8: Použití 15-bodové sestavy pro zachycení pohybu při tvorbě animací v počítačových hrách (převzato z [19]).

2.4.3 Lokalizace s pasivními značkami

Pasivní značky nevyzařují energii, ale pracují s odrazem okolního světla. V obraze jsou detekovány na základě svého tvaru, barvy a případně jiných geometrických a strukturálních vlastností. Ve většině případů stačí značky pouze vytisknout, což výrazně snižuje pořizovací cenu. Nevýhodou je závislost na okolním osvětlení, které musí mít pro správnou funkci systému dostatečnou intenzitu a být stálé. Pasivních značek je vícero druhů; jejich detekce má svá specifika a do některých z nich je možné i kódovat další informace.

Optický systém s pasivními značkami je využit pro určování vzájemné polohy formace pozemních a létajících robotů (Unmanned Aerial Vehicle) v [10], kde použité mikroptéry (Micro Aerial Vehicle) detekují polohu mobilních robotů pomocí systému WhyCon.

2.5 Vizuální lokalizace pomocí pasivních značek

2.5.1 QR kódy

QR (Quick-Response) kódy jsou dvourozměrné čárové kódy pro vizuální identifikaci, kde je informace uchována v matici binárních pixelů. Toto kódování umožňuje uchovávat od 1817 do 7089 znaků [20] v závislosti na použité abecedě. Formát kódu je navržen tak, aby rozpoznávání bylo robustní a odolné vůči rotaci – zajištěno třemi čtverci v rozích kódu. Samotné rozpoznávání je relativně pomalé vzhledem k množství kódované informace. Proto se QR kódy využívají především v takových aplikacích, kde je velikost přenášených dat důležitější než rychlost rozpoznání [20].



Obrázek 2.9: Příklad QR kódu.



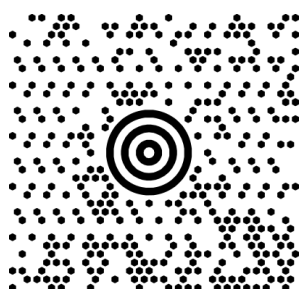
Obrázek 2.10: April značka s ID = 12.

2.5.2 Značky April

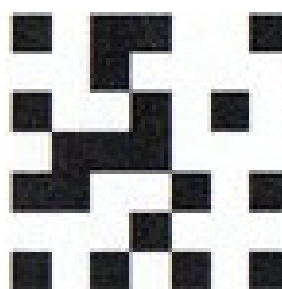
April značky jsou konceptuálně podobné QR kódům. Jedná se o dvourozměrný čárový kód využívající matici binárních pixelů k uložení informace. V tomto případě lze kódovat mnohem méně informace (rozmezí 4 až 36 bitů). Přidanou hodnotou je mnohem robustnější detekce [21] a zároveň rozpoznávání těchto značek z větší vzdálenosti. Softwarové detektory mají dále zabudovanou přesnou 3D lokalizaci v prostoru, která dokáže popsat všech 6 stupňů volnosti April značky vzhledem ke středu kamery.

2.5.3 MaxiCode

MaxiCode je systém používaný americkou společností UPS (United Parcel Service). Jedná se znovu o čtvercovou značku, která využívá hexagonální (šestiúhelníkovou) mřížku pro umístění pixelů. Robustní rozpoznávání je umožněno symetrickým terčíkem uprostřed značky, který slouží k detekci neohledně na relativní natočení vzhledem ke snímači. Dokáže pojmout až 93 numerických znaků informace a samotná detekce kódované informace je velice rychlá [22]. Čtečky jsou standardizované na čtvercové značky o rozměru 2.54 cm (1 palec).



Obrázek 2.11: Příklad MaxiCode.



Obrázek 2.12: Příklad CyberCode.

2.5.4 CyberCode

Systém CyberCode byl původně vyvinut pro využití na zařízeních s nízkou výpočetní kapacitou. Znovu se jedná o dvourozměrný čárový kód, kde jsou informace uloženy v binární pixelové matici. Hlavní výhodou je rychlost rozpoznávání, která je mimo jiné umožněna i malou kapacitou pro zakódování informace (pouze 24 bitů). Rozpoznání je robustní vůči natočení značky v různých úhlech vzhledem ke kameře. Softwarové detektory pro CyberCode dokáží lokalizovat značku v prostoru a používaly se v rané fázi výzkumu rozšířené reality [23].

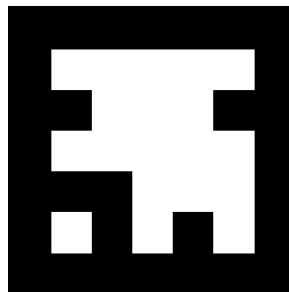
2.5.5 Data Matrix

Data Matrix je dvourozměrný čárový kód - značka - která využívá binární matici pro uložení až 1556 bitů dat. V praxi se využívá především pro označení

malých objektů (malé elektronické součástky). Díky přidaným Reedovým-Solomonovým kódům je možné správné dekodování informace, i když je část kódu zakryta či poškozena [24].



Obrázek 2.13: Příklad DataMatrix.



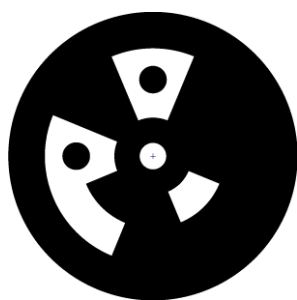
Obrázek 2.14: Příklad AR značky.

2.5.6 Značky AR

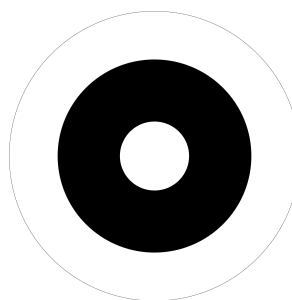
Značky AR vychází z předchozích aplikací značek pro rozšířenou realitu (konkrétně ARToolKitPlus [25], nástupce ARToolKit [26]). Jedná se o čtvercovou značku, kde je informace uchována v binární matici a chráněná kódem FEC [27]. Stejně jako v předchozích případech, i tento druh kódu je rychle dekodovatelný, robustní vzhledem k natočení a perspektivě. Do AR značek lze zakódovat až 36 bitů informace.

2.5.7 Intersense

Intersense je prstencový čárový kód. Data jsou zakódována ve značce v soustředných prstencích a k detekci samotné značky slouží bílý kruh v samotném středu obrazce. Do tohoto typu kódu jsou šifrovány pouze ID údaje, které se využívají pro lokalizaci objektu v prostředí popsaném pomocí těchto značek. Samotné rozpoznávání je velice rychlé [28].



Obrázek 2.15: Pří-
klad Intersense.



Obrázek 2.16: Pří-
klad WhyCon.

■ 2.5.8 WhyCon

WhyCon je vizuální lokalizační systém pro použití v robotických aplikacích. Jedná se o soustředné prstence střídavě bílé a černé barvy, které slouží k rychlé a výpočetně nenáročné lokalizaci pro robotické systémy. Do značky se nedají kódovat žádné informace, jedinou variantou pro odlišení různých značek je využití rozdílných poměrů velikosti kruhů tvořících samotnou značku [29].

■ 2.5.9 Požadavky na pasivní značky

Ve formaci robotů je třeba jednotlivé členy od sebe odlišit, proto potřebujeme možnost kódování malého množství informace do optických pasivních značek.

Formace se pohybuje v prostoru s překážkami. Z důvodu vyhýbání se překážkám bude docházet ke změnám v relativním natočení a vzdálenosti jednotlivých členů formace. Proto je dalším kritériem vysoká robustnost rozpoznávání pod různými úhly natočení.

Námi navrhované řešení požaduje schopnost určit relativní vzdálenost a úhel natočení rozpoznané značky. V úvahu tedy připadají takové druhy značek, jejichž softwarové detektory umožňují 6 DoF (stupňů volnosti) lokalizaci značky v prostoru. Jednoznačné určení polohy v prostoru umožňují AR značky [27] a April značky [21].

Podle výsledků z [21] je patrné, že pro náš účel se nejlépe hodí systém April značek pro vizuální rozpoznávání, který dále rozebereme podrobněji.

2.6 Značky April

Značky April jsou systémem pro vizuální identifikaci pro široké množství aplikací (rozšířená realita, robotika, kalibrace kamer, . . .) [21]. Samotné značky jsou dvourozměrné čárové kódy využívající binární matici pixelů umožňující uložení malého množství informace (ID značky). Výhodou tohoto systému je možnost jednoduché a přesné 6D identifikace, tedy souřadnice x , y , z a příslušné prostorové úhly (yaw, pitch, roll) vzhledem ke kameře.



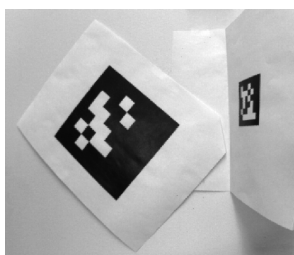
Obrázek 2.17: Příklad využití April značek [21] na mobilních robotech.

Proces detekce April značek má dvě fáze - detekci samotné značky a dekodovací systém. Nejprve tedy dojde k vyhledání oblasti a polohy značky v obrazu a následně je řešeno dekodování informace ve značce obsažené. Podrobně je celý proces popsán v [21].

2.6.1 Detekce značky v obraze

V první řadě je provedena segmentace barevného obrazu do binární formy (hodnoty pixelů mezi 0 - bílá a 1 - černá) a je aplikováno Gaussovské rozostření. Gaussovské rozostření realizuje dolnofrekvenční propust k potlačení šumu a detailů, které by ztěžovaly rozpoznávání. Výsledný obraz je vyhlazený ve stupních šedi. V řízených situacích, kdy je použita kamera a optika kvalitní a světelné podmínky optimální, je možné tento krok vynechat a pracovat přímo se snímáním černobílého obrazu (kamera obraz automaticky prahuje).

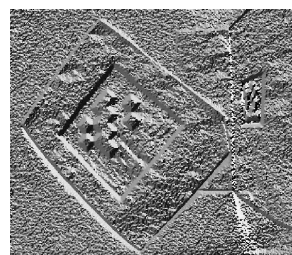
V dalším kroku se vypočte lokální gradient (jeho velikost a směr - rovnice 2.1) pro každý pixel (ϕ). Souřadná soustava obrázku má počátek v levém



Obrázek 2.18: Proces rozpoznání - zdrojový obraz pro rozpoznání (z [21]).



Obrázek 2.19: Proces rozpoznání - lokální gradient velikosti (z [21]).



Obrázek 2.20: Proces rozpoznání - lokální gradient směru (z [21]).

spodním rohu, osa y je v horizontálním směru, osa x ve vertikálním směru.

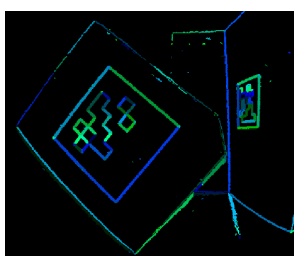
$$\nabla\phi = \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}, \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) \quad (2.1)$$

Pixely jsou pak aglomerativně (vycházíme z jednotlivých pixelů - shluk o velikosti jedna - a postupujeme k větším celkům) shlukovány do větších skupin se stejnou velikostí gradientu a stejným směrem.

Pixely se stejnou velikostí gradientu a se stejným směrem jsou proloženy přímkou (rovnice 2.2). Koeficienty této přímky jsou vypočteny metodou nejmenších čtverců (rovnice 2.3), kde n je počet pixelů se stejným gradientem a směrem, a dochází tak k detekování jednotlivých hran.

$$f(u) = k_1 u + k_0 \quad (2.2)$$

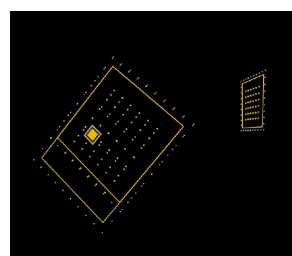
$$k_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad k_0 = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.3)$$



Obrázek 2.21: Proces rozpoznání - shlukování podle gradientu (z [21]).



Obrázek 2.22: Proces rozpoznání - detekce jednotlivých hran (z [21]).



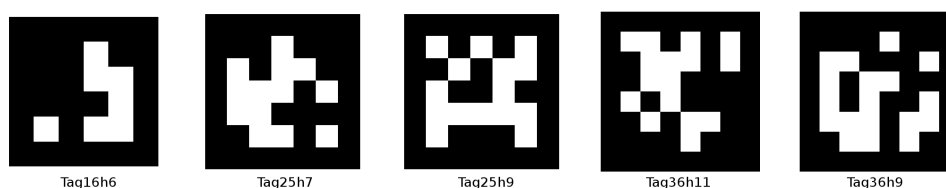
Obrázek 2.23: Proces rozpoznání - detekce čtyřúhelníků (z [21]).

Následně je potřeba detekovat takové sekvence hran, které dohromady vytvoří čtyřúhelník. Toho je dosaženo rekurzivním prohledáváním do hloubky ve stromech o hloubce 4. Kritériem spojování jednotlivých hran je vzdálenost konce hrany aktuální a začátku hrany potenciální, následující. Jakmile jsou

nalezeny čtyřúhelníky (potenciální detekované značky), dojde k jejich ořezu v obraze a pokusu o dekódování potenciální značky.

2.6.2 Kódování informace ve značce

K dispozici je více druhů značek, které mají označení „TagXhY“, kde X značí počet bitů ve značce a Y značí minimální Hammingovu vzdálenost mezi jednotlivými značkami daného druhu.



Obrázek 2.24: Ukázka různých druhů April značek.

Po ořezu potenciální rozpoznané značky následuje dekódování, kdy dochází k ověření, zda je informace v potenciální značce validní. Kódování April značek má vždy specifikovaný počet bitů informace (X) a minimální Hammingovu vzdálenost (Y). Kódování April značek vychází z tzv. lexikódování [30], ke kterému je přidána řada modifikací.

Lexikódy o délce X a minimální Hammingově vzdálenosti Y jsou generovány postupně z nulového vektoru délky X. Hodnota vektoru se iterativně zvětšuje a další kód je přidán až tehdy, kdy je minimální Hammingova vzdálenost mezi aktuálním vektorem a všemi doposud přidanými vektory Y.

Pro názornost uvedeme příklad pro $X = 3$, $Y = 2$. Aktuální Hammingovu vzdálenost značíme jako d .

Vektor	Vyhodnocení
000	přidán
001	$d = 1 < Y$
010	$d = 1 < Y$
011	$d = 2 = Y$; přidán
100	$d = 1 < Y$
101	$d = 2 = Y$; přidán
110	$d = 2 = Y$; přidán
111	$d = 1 < Y$

Tabulka 2.1: Příklad generování lexikódů, vektor o délce $X = 3$, minimální Hammingova vzdálenost mezi aktuálním vektorem a všemi doposud přidanými vektory $Y = 2$. Aktuální Hammingovu vzdálenost značíme jako d .

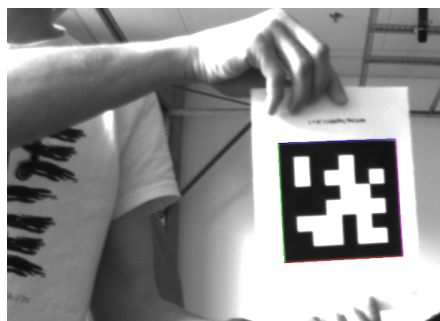
Z důvodu spolehlivé prostorové detekce (6 DoF) se při generování April značek používají modifikace snižující výskyt chyby prvního druhu (false-positive).

Vzniklé kódy musí být odolné vůči rotaci, tj. při otočení o 90° , 180° a 270° musí zůstat zachována minimální Hammingova vzdálenost Y .

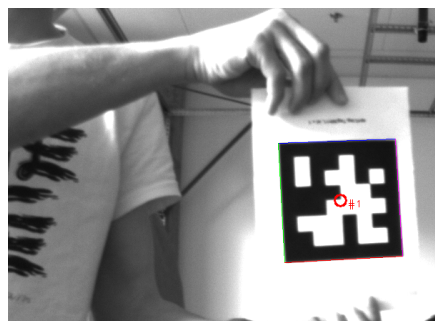
Při generování kódu je brán v potaz minimální počet obdélníků, které je třeba k vytvoření lexikódu. Pokud je jejich počet menší než 10, kód je zamítnut. Toto kritérium zajišťuje odlišnost od běžně se vyskytujících geometrických obrazců.

Pro každý druh značek jsou tedy předgenerovány jednotlivé lexikódy, které jsou porovnávány s obsahem oříznuté části. Pokud dojde ke shodě, nález je přidán do seznamu detekovaných značek.

Nalezené značky jsou pak případně vykresleny do analyzovaného obrazu s informací o zakódovaném ID.



Obrázek 2.25: Proces rozpoznání
- detekce hran značky.



Obrázek 2.26: Proces rozpoznání
- zakreslení ID ve středu značky.

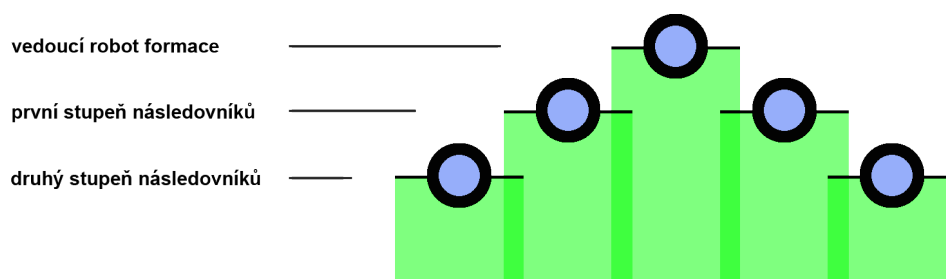
Kapitola 3

Analýza zadání

3.1 Analýza problému

Při návrhu řešení se snažíme o vytvoření metody vizuální navigace pro formace semiautonomních mobilních robotů pro průmyslové/zemědělské využití. Soustředíme se tedy na takové formace, které jsou schopné efektivně pokrýt velkou plochu. Zároveň nesmí docházet ke kolizím mezi jednotlivými členy formace navzájem a mezi členy formace a objekty prostředí.

Volíme formaci ve tvaru klínu z důvodu pokrytí maximální plochy při přímočarém pohybu a možnosti sestavit členy formace tak, aby se jejich dráhy částečně překrývaly a bylo tak zaručeno spolehlivé pokrytí projeté plochy.



Obrázek 3.1: Ilustrační model formace ve tvaru klínu pro úlohu pokrytí pásu terénu.

Vedoucí člen formace bude řízen lidským operátorem, tedy celá struktura

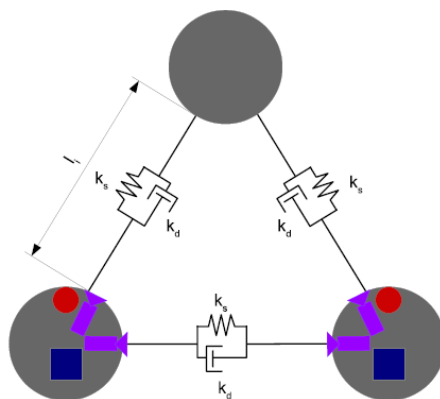
robotů bude organizována podle vedoucího robotu pro první stupeň následovníků a pak podle nejbližšího souseda pro všechny další stupně (viz obrázek 3.1). Vzdálenost mezi roboty v klidu bude 1 m pod úhlem $\pm 45^\circ$. Tyto rozměry umožňují testování uvnitř laboratoří.

Pro udržení formace je použita metoda pružin, která vychází z metody potenciálových polí. Tato metoda byla zvolena na základě porovnání s dalšími přístupy pro udržování robotických formací a testování v simulaci [31].

Mezi jednotlivými roboty formace jsou vytvořeny virtuální pružiny o dané tuhosti, které udržují formaci pohromadě (viz obrázek 3.2). Pružiny jednotlivým členům formace vymezí možnosti odchýlení se od požadované struktury formace, tedy vzájemně se nekontrolovatelně příliš vzdálit a/nebo přiblížit. Pro daný člen formace platí tento matematický popis:

$$m\ddot{x} = \left[\sum_{i \in S} k_s(l_i - l_0)\vec{u}_i \right] - k_d\dot{x}, \quad (3.1)$$

kde \ddot{x} je vektor zrychlení konců pružiny [m/s^2], \dot{x} je vektor rychlosti mezi konci pružiny [m/s], S je počet připojených pružin k danému robotu [$-$], l_i je délka i -té pružiny [m], \vec{u}_i je jednotkový směrový vektor i -té pružiny [$-$], který určuje směr působení pružiny, l_0 je přirozená délka pružiny [m], k_s je tuhost pružiny [$-$] a k_d je koeficient tlumení [$-$] a m je hmotnost robotu [kg]. V našem případě předpokládáme, že zrychlení je nulové, hmotnost je jednotková a z rovnice (3.1) dopočítáme vektor rychlosti pro daný robot.



Obrázek 3.2: Ilustrační model formace s virtuálními pružinami [32].

Pro zjednodušení problému budeme rozpoznávání překážek a rozpoznávání členů formace řešit odděleně. Systém pro detekci a vyhnutí se překážkám pracuje také na principu virtuálních pružin, kdy po detekování překážky je jí přiřazena pružina s exponenciálně se zvyšující odpudivou tuhostí v závislosti na vzdálenosti od překážky [32].

Pro udržení požadovaného tvaru formace je potřeba zajistit informace o rela-

tivní poloze každého členu vzhledem k vedoucímu robotu. Poloha je jednoznačně určena vzdáleností a natočením vůči nejbližšímu sousedu.

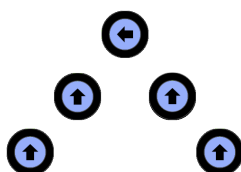
Navržené řešení by mělo být:

- Schopné určit relativní polohu každého členu bez GNSS.
- Robustní a odolné proti dočasné ztrátě kontaktu mezi členy formace.
- Schopné řešení chybových stavů způsobených ztrátou vizuálního kontaktu.
- Aplikovatelné na různé tvary formací.

3.2 Analýza možných stavů formace

Pro návrh správné metody pro měření relativní orientace a vzdálenosti robotů je potřeba analyzovat, jaké stavy mohou v rámci běžného provozu nastat. Rozdělíme si tedy chování formace na dvě části – běžný provoz a chybové stavy.

Při běžném provozu se formace pohybuje v základním tvaru klínu. Tuto formaci udržuje vzhledem k vedoucímu robotu, který je v pozici na hrotu klínu. Jednotlivé roboty jsou vzdáleny 1 m pod úhlem $\pm 45^\circ$. Při běžném provozu formace může při zatáčení dojít k majoritní změně polohy (viz obrázek 3.3) vedoucího robotu a může být vůči následovníkům otočen bokem či dokonce čelem. Při detekci překážky se celá formace vyhne překážce jako celek s dočasnou změnou tvaru formace (viz obrázek 3.5).

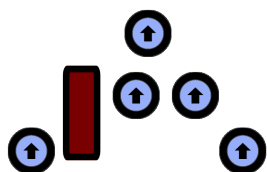


Obrázek 3.3: Situace majoritního otočení vedoucího robotu formace. Šipka znázorňuje orientaci robotu.

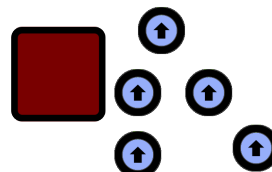
Chybové stavy mohou být dvojího druhu - dočasné a trvalé. Při dočasném chybovém stavu musí být jednotlivé roboty formace schopné přechodu zpět do běžného provozu. Během provozu může dojít k následujícím situacím:

- Překážka se dostane mezi jednotlivé členy formace a způsobí dočasnou okluzi (dočasný chybový stav, viz obrázek 3.4).

- Nastane okluze v důsledku výskytu rohu objektu prostředí v cestě formace (dočasný chybový stav).
- Dojde k prudkému zrychlení vedoucího robotu, který se ocitne mimo dosah detekce následovníků (dočasný chybový stav).



Obrázek 3.4: Ilustrace objíždění překážky s rozštěpením formace.



Obrázek 3.5: Ilustrace objíždění překážky s deformací formace.

- Dojde k softwarovému/hardwarovému selhání jednotky formace (trvalý chybový stav).
- Dojde k trvalé ztrátě kontaktu následovníka s vedoucím robotem formace (trvalý chybový stav).

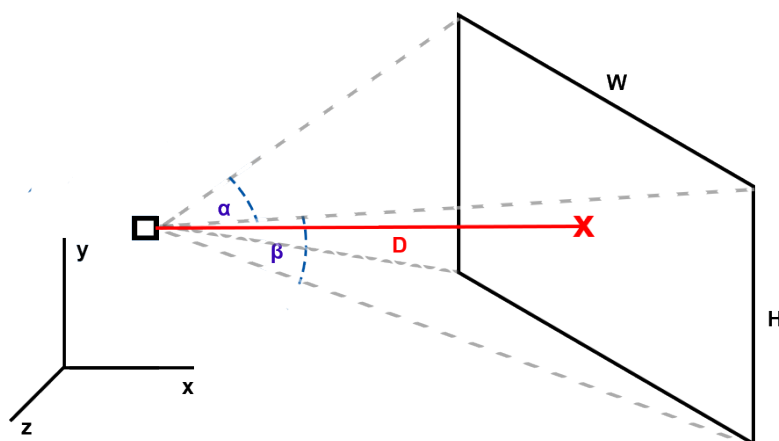
3.3 Požadavky na řešení vizuální navigace

Z vyhodnocení těchto stavů vyplývá, že navržený systém musí být:

- Schopen řešit dočasné výpadky vizuálního kontaktu.
- Schopen řešit okluzi za objekty prostředí.
- Schopen reakce na majoritní změnu směru vedoucího robotu a sledování jeho boku/čela.

3.4 Požadavky na kameru

Pro realizaci optického systému pro měření vzdálenosti a relativní polohy je třeba určit, jak velká rozlišovací schopnost kamery bude potřebná. Předpokládáme vzdálenost nejvýše 2 m mezi jednotlivými členy formace. Velikost jedné optické pasivní značky je (stejně jako u testování v kapitolách 5.2 až 5.6) 11x11 cm. Výpočet potřebného rozlišení je ilustrován na obrázku 3.6.

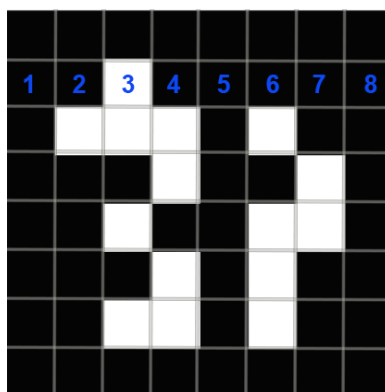


Obrázek 3.6: Uspořádání scény při snímání (β je vertikální záběr kamery, α je horizontální záběr kamery, H je výška obrazu, W je šířka obrazu, X je střed obrazu a D je vzdálenost obrazu od kamery).

Záběr kamery uvažujeme pro případy běžných objektivů s obrazem v poměru stran 4:3. V případě použití April značek je třeba, aby na každý čtverec informace ve značce připadaly minimálně 2 pixely na zachyceném obraze (Shannonův teorém).

Značka April má rozměry 11x11 cm. Jedna strana značky se skládá z 6 elementárních jednotek ve tvaru čtverce (čísla 2, 3, ... 7) + 2 elementární jednotky ve tvaru čtverce rámečku (čísla 1 a 8) (viz obrázek 3.7). Elementární jednotka ve tvaru čtverce má tedy rozměr 1.375 cm. Z principu Shannonova vzorkovacího teorému musí být vzorkování vždy alespoň 2x hustší, než je perioda informace v obraze.

Velikosti 1 pixelu v zachyceném obraze (1.375 cm) musí tedy odpovídat maximálně poloviční velikost reálného objektu, tedy 0.6875 cm. Splnění této podmínky je nutné, aby byla zajištěna rozlišitelnost informace nesené značkou v obraze.



Obrázek 3.7: Rozdělení April značky na elementární jednotky ve tvaru čtverce, čísla 1 a 8 značí jednotky vnějšího rámečku, čísla 2, 3, ... 7 jednotky s kódovanou informací v April značce.

Pro výpočet výšky a šířky obrazu použijeme rovnice

$$W = 2D \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.2)$$

$$H = 2D \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (3.3)$$

kde β je vertikální záběr kamery, α je horizontální záběr kamery, H je výška obrazu, W je šířka obrazu a D je vzdálenost obrazu od kamery.

Pomocí rozměrů reálného obrazu (viz rovnice 3.2 a 3.3) a rozlišení kamery určíme kolik metrů v reálném obraze odpovídá velikosti hrany jednoho pixelu p (viz rovnice 3.4).

$$p = \frac{W}{W_p} = \frac{H}{H_p} \quad (3.4)$$

W_p je šířka obrazu v pixelech, H_p je výška obrazu v pixelech.

Pro spolehlivou detekci April značky v obraze je nutné dodržet, aby velikost hrany jednoho pixelu p byla vždy menší než polovina šířky elementární jednotky April značky ve tvaru čtverce. Pro konkrétní případ značky o rozměrech 11x11 cm musí tedy platit $p < 0.006875$ m.

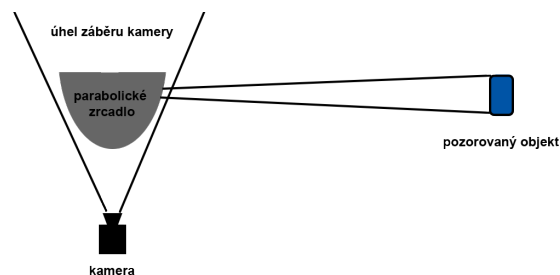
Pro navrhované řešení a z principu práce s April značkami není třeba barevný obraz, stačí černobílý.

Kapitola 4

Návrh vlastní metody vizuální navigace

4.1 Možnost zachycení 360° obrazu

Původním záměrem bylo použití principu všesměrových kamer a zachycení obrazu v 360° kolem robotu. Takové řešení umožňuje použití jediné kamery pro každý člen formace a viditelnost ve všech směrech. Všesměrové kamery pracují na principu soustředění světelných paprsků do kamery přes parabolické zrcadlo (viz obrázek 4.1).



Obrázek 4.1: Princip činnosti všesměrových kamer s využitím parabolického zrcadla.

Nejprve bylo použito panoramatického nastavce pro iPhone kamery [35] na stejném principu jako ve všesměrových kamerách. Nastavec obsahuje sférické zrcadlo, které soustředí světelné paprsky ze všech směrů kolem robotu do kamery. Výsledný obraz byl transformován kvůli zkreslení. V ideálním případě by pak bylo možné identifikovat všechny sousední roboty formace užitím jediné vícesměrové kamery.



Obrázek 4.2: Zachycený obraz s panoramatickým nastavcem, rozlišení kamery 640x480 pixelů.



Obrázek 4.3: Transformace obrazu s využitím [36] z panoramatického nastavce.

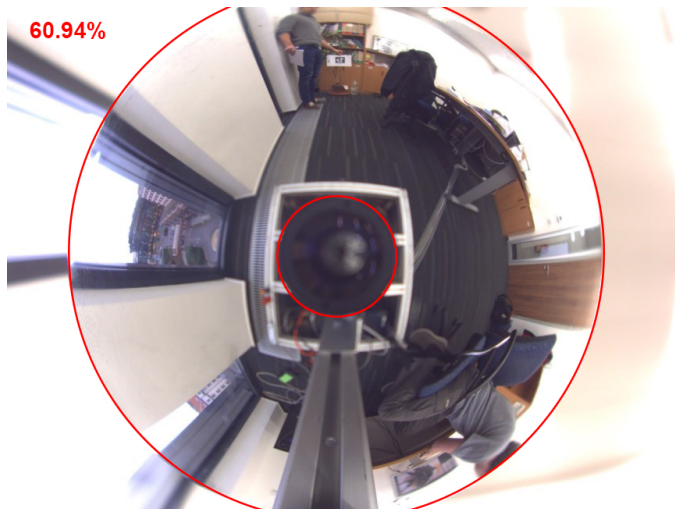
Na základě analýzy obrázku 4.2 grafickým programem Adobe Photoshop® (verze CC 2015) bylo zjištěno, že vzhledem ke konstrukci je efektivní využití snímaného obrazu pouze 19.85% (viz obrázek 4.2), což při použití kamery s nízkým rozlišením (640x480 pixelů) není vyhovující pro navrhované řešení (viz kapitola 3.4).

Další pokusy byly provedeny s kvalitnějším vybavením, kamerou Elfel NC353L a broušeným parabolickým zrcadlem. Příznivější konstrukce umožnila lepší efektivní využití obrazu (60.94%, viz obrázek 4.5). Po aplikování stejného postupu jako v kapitole 3.4 dostáváme teoretickou hraniční vzdálenost pro spolehlivé rozpoznání April značky 1.2 metru. Taková vzdálenost není dostatečná pro navrhované řešení.

S přibývajícím vertikální vzdáleností rozpoznávaného obrazu od roviny výšky umístění kamery se zvětšuje zkreslení způsobené zrcadlem. To vede k deformaci linií April značky a zhoršování úspěšnosti až nemožnosti rozpoznání.



Obrázek 4.4: Transformace obrazu s využitím [36] z parabolického zrcadla.



Obrázek 4.5: Zachycený obraz přes parabolické zrcadlo, rozlišení kamery 1280x960 pixelů.

Po kvantitativním zhodnocení dosažitelných výsledků s všesměrovou kamerou bylo od tohoto postupu upuštěno a řešení se dále soustředilo na využití průmyslových kamer pro strojové vidění.

4.2 Použitý hardware

4.2.1 Kamera

Pro navrženou metodu byly finálně zvoleny kamery daA1280-54um firmy Basler. Tyto kamery z řady Basler Dart jsou určeny pro aplikace strojového vidění, kde je kladen důraz na co nejmenší rozměry. Vzhledem k nízké hmotnosti a rozměrům pouze 29x29x20 mm jsou ideální pro nasazení na jednotky formace robotů. Pro vývoj a práci s kamerou je k dispozici knihovna Pylon SDK [37] pro C, C++ a Visual Basic .NET. Součástí kamery je závit pro objektiv typu CS.



Obrázek 4.6: Kamera Basler Dart daA1280-54um.

Výrobní řada:	Basler Dart (USB3)
Druh senzoru:	Progressive Scan CMOS, Global Shutter
Senzor:	Aptina AR0134
Velikost senzoru:	1/3"
Barva:	Monochrome
Rozlišení (V x H):	1280 x 960 pixelů
Velikost pixelu:	3.75 x 3.75 mikrometrů
Snímací frekvence:	54 fps
Komunikační rozhraní:	USB3
Napájení:	USB3
Rozměry:	29 x 29 x 20 mm (vč. závitů a konektorů)
Hmotnost:	0,015 kg

Tabulka 4.1: Parametry kamery Basler Dart daA1280-54um

Použijeme stejnou metodu výpočtu jako v kapitole 3.4 pro ověření vhodnosti kombinace této kamery s objektivem T0412FICS (kapitola 4.2.3).

Z tabulky 4.2 vyplývá, že vybraná kombinace je vyhovující a zároveň je možné

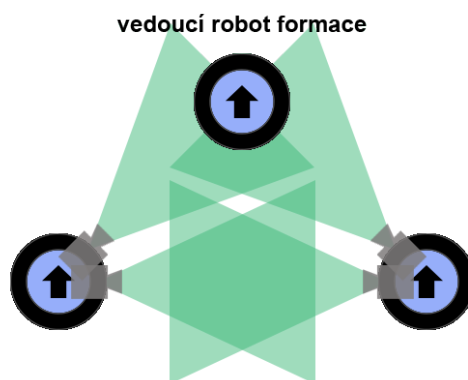
D	2	3	4	5	6	7
α [°]	49,1	49,1	49,1	49,1	49,1	49,1
β [°]	63,9	63,9	63,9	63,9	63,9	63,9
H [m]	1,66	2,49	3,32	4,15	4,99	5,82
W [m]	2,27	3,40	4,54	5,67	6,81	7,94
rozlišení	p [m/px]					
1280x960	0,0018	0,0027	0,0035	0,0044	0,0053	0,0062
1024x768	0,0022	0,0033	0,0044	0,0055	0,0066	0,0078
640x480	0,0035	0,0053	0,0071	0,0089	0,0106	0,0124

Tabulka 4.2: Ověření vhodnosti kombinace kamery Basler Dart daA1280-54um a objektivu T0412FICS, zeleně jsou vyznačeny případy vyhovující podmínce $p < 0.006875$ m, viz kapitola 3.4.

použít nižší rozlišení kamery až do vzdálenosti 3 metrů pro spolehlivé rozpoznání April značek. Pro rozlišení 1280x960 px je maximální vzdálenost spolehlivého rozpoznání April značky 7.75 m, pro rozlišení 1024x768 px 6.2 m a pro rozlišení 640x480 px 3.85 m.

4.2.2 Sestava kamer

Z důvodů omezeného úhlu záběru vybraného objektivu je třeba řešit problém omezené viditelnosti robotu. Dále je nutné počítat s možností náklonu zorného pole v důsledku nerovností terénu. Z těchto důvodů volíme použití soustavy dvou kamer pro každý robot, kdy jedna z kamer vždy sleduje robot o úroveň blíže k vedoucímu robotu a druhá sleduje robot na stejné úrovni.



Obrázek 4.7: Znázornění sestavy kamer na formaci robotů.

Tento způsob umožní přesnější určení relativní polohy vůči dvěma robotům ve formaci. Zároveň představuje dočasnou zálohu pro případ, že se jedné z kamer vychýlí zorné pole nebo ztratí vizuální kontakt s robotem před sebou nebo vedle sebe.

4.2.3 Objektiv

Pro výběr objektivu se řídíme požadavkem na kompatibilitu s kamerami daA1280-54um, kdy je potřeba zvolit objektiv typu CS. Dále je naším cílem dosáhnout kompromisu mezi co možná největším úhlem záběru kamery a geometrickým zkreslením objektivu (soudkovité zkreslení pro objektivy s malou ohniskovou vzdáleností).

Geometrické zkreslení se projevuje od určité prahové vzdálenosti zachycovaného předmětu od středu objektivu. Pro naše řešení používáme značky 11x11 cm, ke zkreslení nesmí docházet ve vzdálenosti větší než 15 cm (minimální vzdálenost značky, kdy se celá značka vejde do záběru).

Na základě výpočtů v kapitole 2.2 a posouzení přijatelné vzdálenosti zkresleného obrazu byl zvolen objektiv T0412FICS od firmy CBC/Computar. Geometrické zkreslení se objevuje při záběru objektu bližšího než 12 cm.



Obrázek 4.8: Objektiv T0412FICS.

Výrobce:	CBC/Computar
Obrazový formát:	1/3"
Ohnisková vzdálenost:	4.0 mm
Světelnost:	F1.2
Váha:	36g
Úhel záběru	
- diagonální	76,9°
- horizontální	63,9°
- vertikální	49,1°

Tabulka 4.3: Parametry objektivu T0412FICS

4.2.4 Robotická platforma

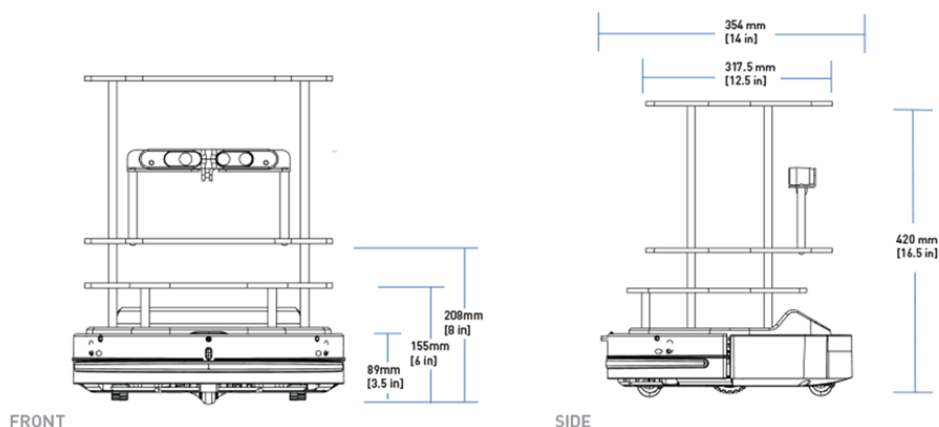
Pro testování zde navržené metody budeme používat formaci složenou z robotů Turtlebot 2 [33]. Tyto roboty využívají open-sourcový SDK (Software Development Kit) založený na ROSu (Robot Operating System) [34].



Obrázek 4.9: Ilustrační obrázek robotu Turtlebot 2.

Samotný robot je kompaktní (rozměry 354 x 354 x 420 mm) a relativně lehký (6.3 kg), což vyhovuje našim požadavkům na sestavení funkčního prototypu formace robotů pro testování uvnitř budovy. Dále je robot vybaven dvěma motory zajišťujícími maximální dopřednou rychlost 0.65 m/s na každém kole robotu [33].

Instalací distančních sloupků je možné přidávat jednotlivá patra pro umístění komponent a senzorů. Robot je schopný operovat se zátěží až 5 kg [33], což je dostačující pro další komponenty nutné k řízení formace.



Obrázek 4.10: Detailní pohled na Turtlebot [33] zepředu a ze strany.

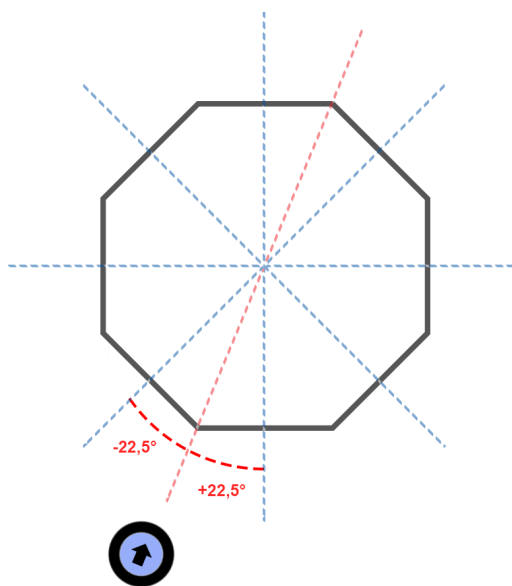
Pro popis polohy robotu je použita kartézská souřadná soustava s počátkem umístěným ve středu příslušného robotu, přičemž daný robot se pohybuje v kladném směru osy x .

4.3 Umístění navigačních značek na roboty

Z kapitoly 5.3 vyplývá, že detekce April značek funguje spolehlivě do úhlu cca $\pm 60^\circ$ (maximum $\pm 68^\circ$) v horizontální rovině. Problém nastane, když vedoucí robot formace provede prudký obrat a změni svoji polohu o úhel větší. V tu chvíli je April značka ztracena ze zorného pole úplně nebo není možné ji rozpoznat. Pokud pracujeme s úhlem pro efektivní rozpoznání $\pm 60^\circ$, existuje riziko, že v blízkosti této hranice bude systém nespolehlivý. Proto byla zvolena rezerva 100% v tomto parametru a další návrh řešení byl veden pro maximální úhel natočení značky vůči kameře nejvýše $\pm 30^\circ$.

Jelikož vedoucí robot formace může provádět libovolné pohyby, například se i otočit o 180° , je potřeba, aby jej jeho následovník dokázal rozpoznat ze všech stran.

Z výše naznačeného důvodu tedy pro naši metodu navrhujeme využití prstence o půdorysu pravidelného osmiúhelníku, který bude umístěn na vrchu každého robotu a umožní tak řešení obou problémů (maximální úhel $\pm 30^\circ$ a identifikace robotu ze všech stran) zmíněných v této kapitole.

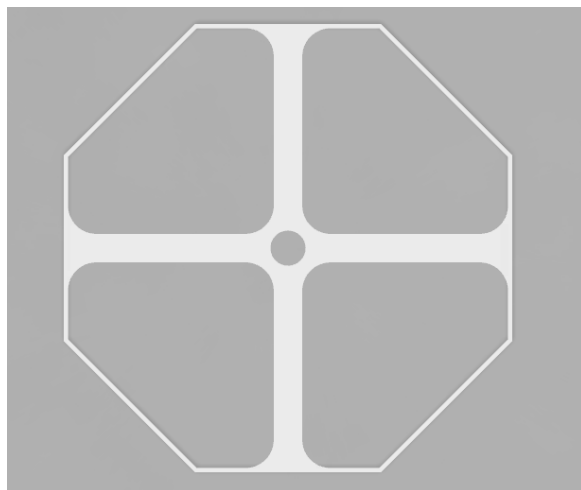


Obrázek 4.11: Ukázka možné pozice robotu vůči kameře, obě sousední značky jsou vidět pod úhlem $\pm 22,5^\circ$.

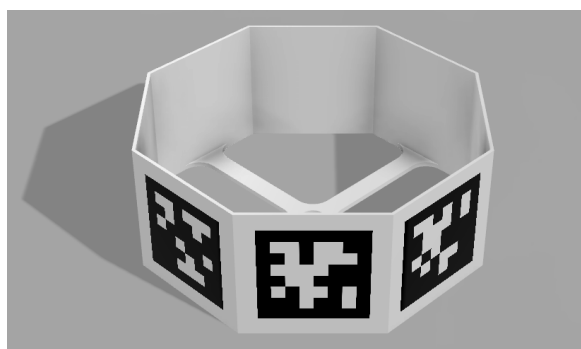
Hrany tohoto osmiúhelníku tvoří pravidelné čtverce o hraně 13x13 cm, přičemž na každé z nich je umístěna jedna April značka o velikosti 11x11 cm. Tato velikost je maximální možná pro daný rozměr podložky (vrchní část robotu), neboť pro rozpoznávání značek je třeba umožnit detekci kontrastu černé hrany značky a bílého okolí užitě značky.

Nejhorší varianta nastává v případě, kdy kamera směřuje v ose mezi dvěma podložkami značky (viz obrázek 4.11). Pokud směřujeme kameru kolmo na jednu ze stěn a postupně budeme stěnu vychylovat, dostaneme se na maximální úhel vychýlení $\pm 22,5^\circ$. V tento okamžik vidíme pod stejným úhlem dvě vedlejší stěny prstence. Díky zakódovanému a odlišnému ID sousední značky dokážeme určit, na kterou stranu prstence je kamera namířená a vždy je možno vidět a rozpoznat minimálně dvě značky pod maximálním úhlem $\pm 22,5^\circ$.

Pro naše potřeby byl navržen prstenec o půdorysu pravidelného osmiúhelníku o délce strany 13 cm. Prstenec má výšku 13 cm a na spodní hraně kříž pro uchycení na robot.



Obrázek 4.12: Navržený prstenec, pohled shora.



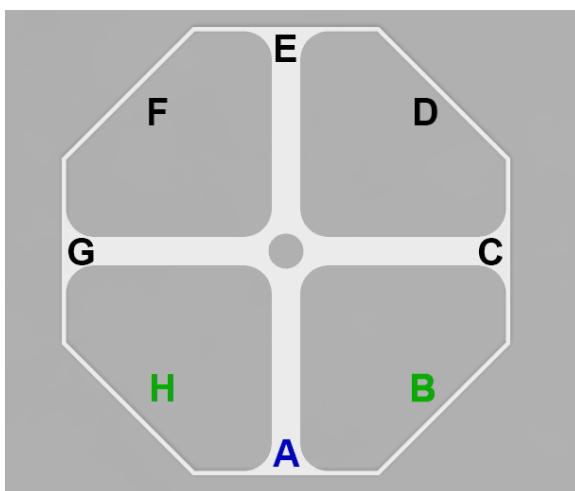
Obrázek 4.13: Navržený prstenec, pohled z boku.

Celý prstenec byl následně vytištěn na 3D tiskárně, osazen April značkami a umístěn na robot.

4.3.1 Princip činnosti se soustavou April značek

Použití prstence s půdorysem pravidelného osmiúhelníku umožní zachycení vedoucího robotu, ať už je natočen kteroukoliv stranou k robotu, který jej sleduje. Před začátkem je potřeba určit, jaké ID mají značky osazené na prstenci (každý z členů formace disponuje jinou sadou znaků ID) a zároveň určit, která značka je umístěna po směru pohybu robotu.

Pro vysvětlení principu označme osazení prstence vedoucího robotu jako A, B, ... H v následujícím uspořádání:



Obrázek 4.14: Prstenec s označením jednotlivých značek (A jako zadní značka modře; H a B jako sousední značky zeleně; C, D, ... G jako přední značky černě).

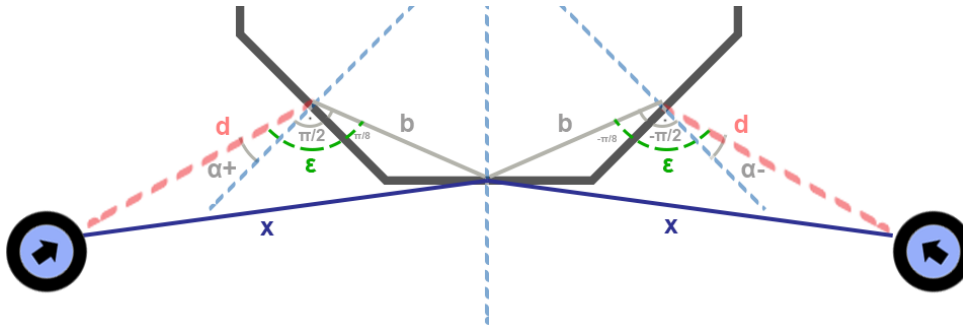
Značku A označíme za zadní. Značky B a H označíme za sousední. Značky C, D, ... G označíme za přední.

Podívejme se na možné pozice následovník – vedoucí robot. Při standardním pohybu vidí následovník jednu ze sousedních značek nebo zadní značku vedoucího robotu. Při vyhýbání se překážce či změně pohybu vedoucího robotu může dojít k rychlé změně jeho polohy a následovník vidí některou z předních značek vedoucího robotu.

Pokud následovník vidí jednu ze sousedních značek, dopočítá odchylku od očekávané polohy ve formaci a tyto údaje o poloze a natočení předá dál pro vhodný převod na vstupy motorů. Pokud následovník detekuje zadní značku, ke které se vztahuje jeho optimální poloha (v našem příkladě značka A), použijeme přímo hodnoty o relativní poloze a natočení z detektoru pro vhodný převod na vstupy motorů (viz obrázek 4.17).

Pro sousední značky je dopočítána vzdálenost od optimální polohy pomocí

Cosinové věty (rovnice 4.1), kde d je vzdálenost k sousední značce vypočtený v detektoru, b je vzdálenost středů dvou značek skrze prstenek (viz b v obrázku 4.15) a ϵ se určí podle rovnice 4.2, kde α je úhel, pod kterým je vidět sousední značka a zlomky π vyplývají z konstrukce prstence. .

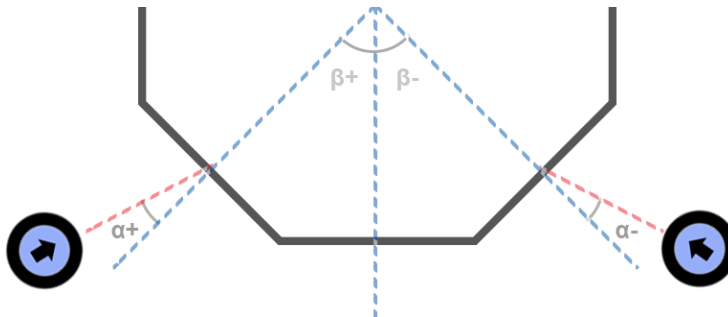


Obrázek 4.15: Schéma pro výpočet vzdálenosti při detekci sousední značky.

$$x = \sqrt{d^2 + b^2 + 2bd \cos(\epsilon)} \quad (4.1)$$

$$\epsilon = \alpha + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{8} \quad (4.2)$$

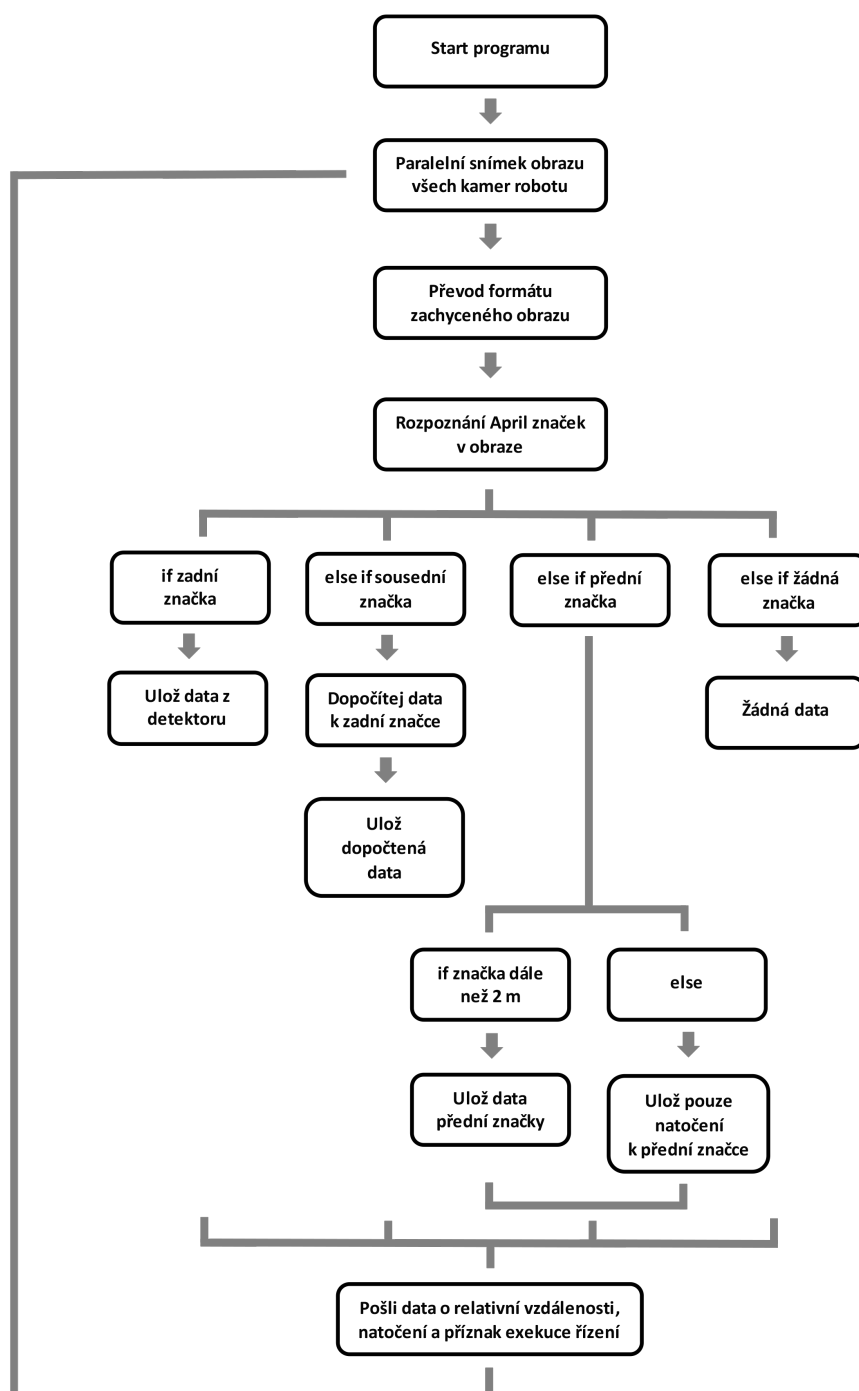
Pro výpočet odchylky od optimálního úhlu využijeme součtu detekovaného úhlu α a úhlu β , který vyplývá z konstrukce prstence.



Obrázek 4.16: Schéma pro výpočet úhlu při detekci sousední značky.

Pokud dojde k situaci, že následovník nevidí zadní ani sousední značky vedoucího robotu a zároveň je k němu dostatečně blízko (méně než dvojnásobek standardní vzdálenosti členů formace), řídicí algoritmus se snaží udržet ve svém zorném poli tu část prstence pozorovaného robotu, kterou detekuje s nejmenším úhlem natočení ve vertikálním směru. Dále předává pro převod na vstupy motorů pouze údaje o natočení, nikoliv o poloze.

Tento přístup zajistí, že při náhlé změně směru vedoucího robotu (zatačka do pravého úhlu, otočení do protisměru) bude následovník vedoucí robot sledovat a vyčkávat na jeho další pohyb. Ve většině případů tento přístup stačí ke znovunalezení zadní nebo sousedních značek.



Obrázek 4.17: Řídící smyčka rozhodování při detekci značek na prstenci.

V případě, že následovník nevidí ani jednu ze zadních značek a vedoucí robot se začne vzdalovat na více než dvojnásobek standardní vzdálenosti členů formace, dojde k následování značky, kterou následovník detekuje s nejmenším úhlem natočení ve vertikálním směru. Pokud by došlo k extrémní situaci, že vedoucí robot jede přímo proti svému následovníku, dojde k aktivování

systemu pro zabránění kolizi (collision avoidance) a následovník vedoucímu robotu uvolní průjezd.

Zde navržená metoda pokrývá většinu scénářů vzájemné pozice následovník – vedoucí robot v prostředí bez překážek.

■ 4.3.2 Řešení chybových stavů

Samotné použití prstence neřeší všechny možné chybové stavy. Zvolený přístup ošetřuje náhlou změnu relativní polohy vůči vedoucímu robotu a dočasné naklonění zorného pole jedné z kamer, ale neřeší následující situace:

- Okluze z důvodu radikálního manévru (vedoucí robot zatáčí radikálně mění směr a tím i natočení vůči následovníku).
- Okluze z důvodu struktury a tvaru prostředí (mezi vedoucí robot a následovníka vstoupí překážka a dočasně znemožní vizuální identifikaci - celý prstenec je v zákrytu).
- Dojde k přílišnému zrychlení vedoucího robotu a následovník ztratí schopnost rozpoznání značky na velkou vzdálenost (více než 6 m).
- Ztráta informace selháním detektoru značek (následovník dočasně chybně identifikuje značku jiného členu formace).

Z uvedených případů vyplývá, že je potřebné algoritmus identifikace značek dále ošetřit a případně predikovat domnělou polohu zakryté/chybně detekované značky po určité době po ztrátě vizuálního kontaktu.

4.4 Kalmanův filtr

Pro filtrování detekce značek a současnou predikci budoucích stavů slouží Kalmanův filtr. Jedná se o algoritmus pro filtraci signálů převážně v časové oblasti, který potlačuje šum (a s ním i náhodné rozpoznání špatné značky).

Ve zjednodušené podobě jde o predikčně-estimační algoritmus [38], který z předchozích a aktuálních dat předpovídá průběh signálu. Na základě znalosti statistiky náhodného procesu v systému/šumu jsou predikované hodnoty porovnány s naměřenými a jejich rozdíl se používá k dalšímu zlepšení predikce. Kalmanův filtr dále předpokládá, že všechny šумы jsou Gaussovské, což umožňuje výpočet vývoje středních hodnot a rozptylů namísto vývoje funkcí popisujících šum.

Pro sestavení Kalmanova filtru je třeba znát stavový model složený ze dvou částí - model dynamiky stavu a model měření výstupu.

Model dynamiky stavu můžeme popsat rovnicí (4.3), kde x_n je vektor n -tého stavu, x_{n-1} je vektor $(n-1)$ -tého stavu, u_n je vektor řízení a w_n je vektor šumu. M a N jsou stavové matice.

$$x_n = Mx_{n-1} + Nu_n + w_n \quad (4.3)$$

Model měření výstupu můžeme popsat rovnicí (4.4), kde y_n je vektor výstupu, x_n je vektor n -tého stavu, u_n je vektor řízení a v_n je vektor šumu. A a B jsou matice.

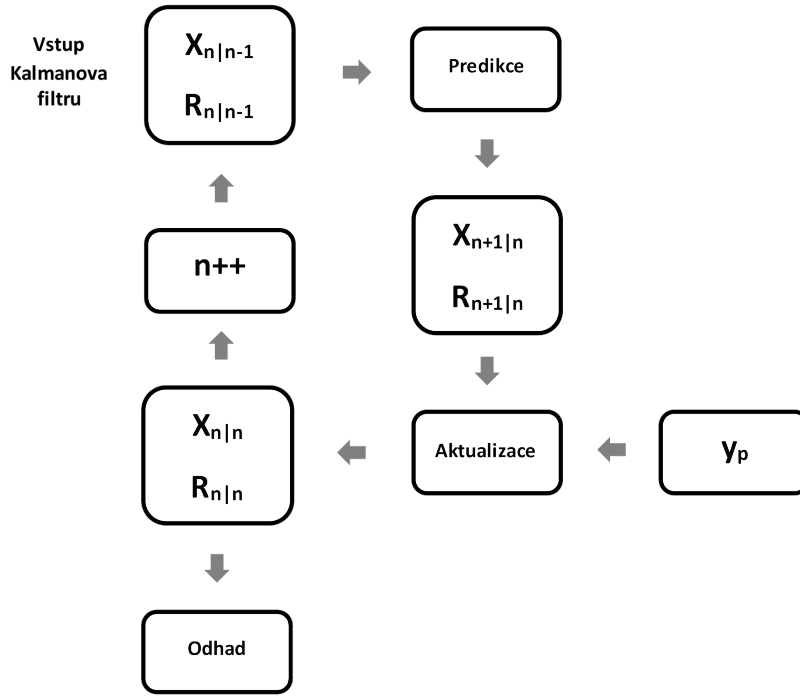
$$y_n = Ax_n + Bu_n + v_n \quad (4.4)$$

Kalmanův filtr má dvě části. Filtraci a predikci.

Prvním výstupem filtrace je bodový odhad pro střední hodnoty položek stavového vektoru $x_{n|n}$ (první n znamená odhad stavu pro n -tý cyklus, druhé n znamená výpočet z n -tých dat). Druhým výstupem filtrace je kovarianční matice pro položky stavového vektoru $R_{n|n}$.

Výstupem predikce jsou vektor odhadů středních hodnot $x_{n+1|n}$ a kovarianční matice pro další krok $R_{n+1|n}$.

Vstupem Kalmanova filtru jsou odhady středních hodnot stavových proměnných $x_{n|n-1}$ a kovarianční matice z předchozího cyklu $R_{n|n-1}$.



Obrázek 4.18: Princip činnosti Kalmanova filtru.

Celkem je 7 rovnic [39] pro algoritmus Kalmanova filtru. Předpověď výstupu (4.5), kovariance výstupu (4.6), předpověď kovariance stavu (4.7), Kalmanův gain (4.8), datová oprava stavu (4.9), předpověď stavu (4.10) a předpověď kovariance stavu (4.11).

$$y_p = Ax_{n|n-1} + Bu_n \quad (4.5)$$

$$R_p = r_v + AR_{n|n-1}A' \quad (4.6)$$

$$R_{n|n} = R_{n|n-1} - R_{n|n-1}A'R_p^{-1}AR_{n|n-1} \quad (4.7)$$

$$K = R_{n|n}A'r_v^{-1} \quad (4.8)$$

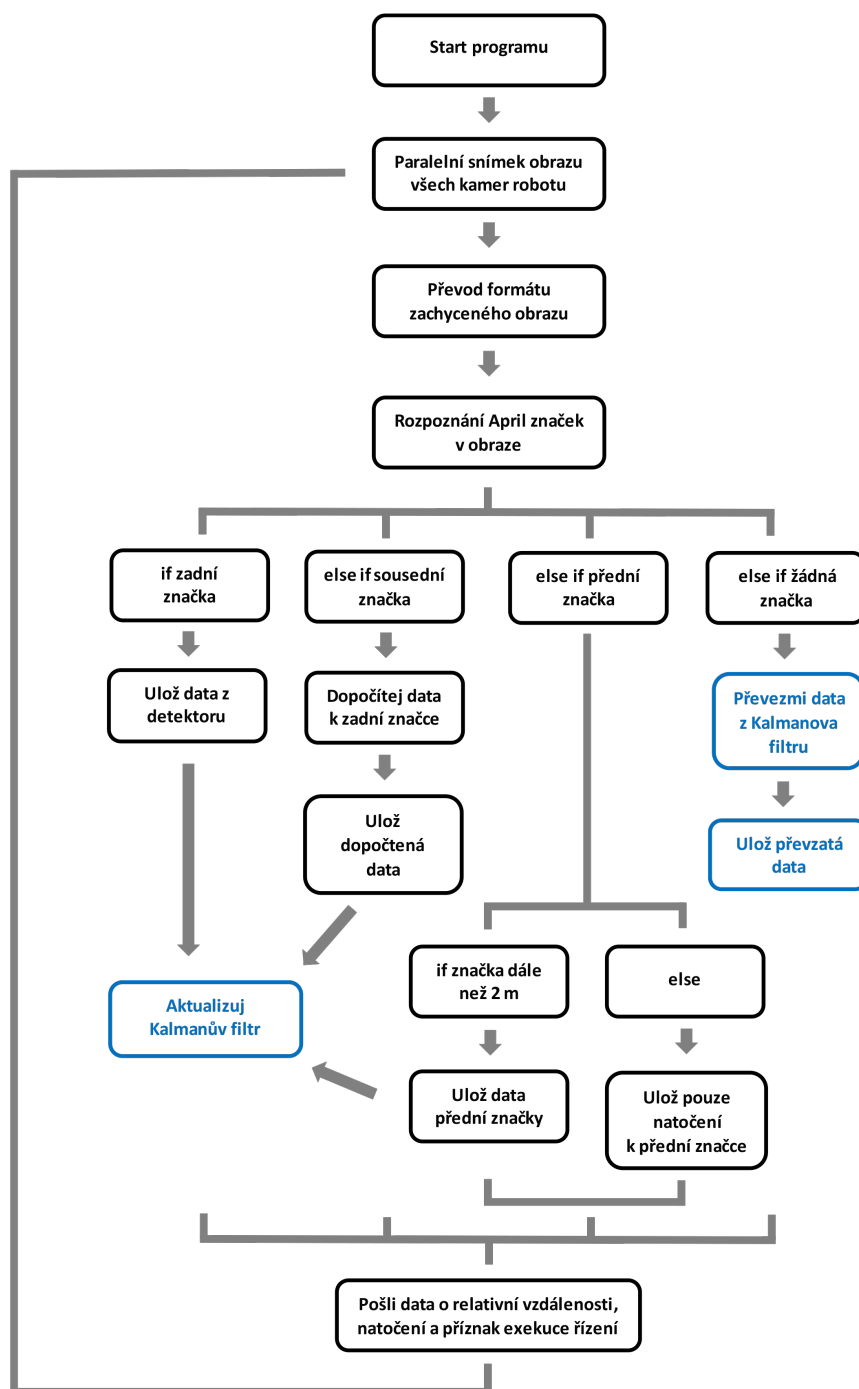
$$x_{n|n} = x_{n|n-1} + K(y_n - y_p) \quad (4.9)$$

$$x_{n+1|n} = Mx_{n|n} + Nu_n \quad (4.10)$$

$$R_{n+1|n} = r_w + MR_{n|n}M' \quad (4.11)$$

Přidáním Kalmanova filtru dojde k predikování značky v případě ztráty vizuálního kontaktu. Predikce vyřeší dočasné chybové stavy (ztráta vizuálního kontaktu kvůli překážce, manévr s okluzí za překážku - roh objektu). Filtrace ošetří náhodné zachycení značek jiného robotu.

4.4.1 Princip činnosti s Kalmanovým filtrem



Obrázek 4.19: Řídící smyčka rozhodování při detekci značek na prstenci s Kalmanovým filtrem.

Kalmanův filtr neustále aktualizuje predikci na základě předchozích dat, po spuštění programu nebude predikovat žádná data, dokud poprvé neregistruje prstenec se značkami.

Pro start filtru je vhodné predikci inicializovat hodnotami obvyklými pro běžný provoz formace, tedy hodnotami ideální pozice v rámci formace.

Přidáním Kalmanova filtru do smyčky částečně eliminujeme vznik chybových stavů. Pokud je ztráta vizuálního kontaktu dočasná, filtr bude předávat do robotu predikované hodnoty a směřovat tak ke znovu-navázání kontaktu s vedoucím robotem.

■ 4.5 Implementace

Implementace byla provedena v jazyce C++, neboť je v něm dostupná implementace ROSu a zároveň jsou v C++ k dispozici knihovny pro rozpoznávání April značek a práci s kamerami z řady Basler Dart.

Pro implementaci byla využito knihoven OpenCV (verze 2.4.11) [40], Pylon (verze 5.0.5) [37], AprilTags (verze 0.9.8) [41] a ROS Indigo [34].

Výsledný program se skládá ze tří částí - zachycení obrazu, rozpoznání značek a Kalmanův filtr.

Vzhledem k administrativním problémům nebyl dodán potřebný počet kamer a proto není zde navržené řešení implementováno pro soustavu dvou kamer na každém robotu. Na každém robotu je použita jedna kamera. V důsledku toho nebyla implementována komunikace mezi roboty.

■ 4.5.1 Načtení obrazu

Celý program začíná nadefinováním ID značek robotu, kterého chceme sledovat. Díky tomu je program použitelný pro každý člen formace.

Po spuštění programu (příloha B, *RingNavigation.cpp*) dojde pomocí knihovny Pylon k zachycení obrazu. Obraz je ve formátu *ptrGrabResult*, který je následně převeden do formátu OpenCV. Konvertovaný obraz je předán jako jeden ze vstupních argumentů funkce *processImage* sloužící k rozpoznání značek v obrazu.

■ 4.5.2 Detekce značky

Detekce značky (příloha B, *ImageProcessor.cpp*) probíhá s využitím knihoven pro rozpoznávání April značek. Na zachycený obraz jsou aplikovány postupy popsané v kapitole 2.6 - výpočet gradientu (velikost a směr), seskupení bodů se stejným gradientem do čar, identifikace spojitých hran, izolování čtverců a dekodování obsahu.

Výsledkem je 6 DoF lokalizace (souřadnice X, Y, Z, příslušné prostorové úhly yaw, pitch a roll), ID značky a vzdálenost středu kamery a středu značky.

Podle rozpoznávaného ID značky dojde k vyhodnocení polohy vůči prstenci vedoucího robotu na základě postupu popsaného v kapitole 4.3. Informace o poloze vůči vedoucímu robotu jsou uloženy do globální struktury.

V případě, že není v obrazu žádná značka detekována, jsou do struktury zapisovány hodnoty -1.

■ 4.5.3 Kalmanův filtr

Implementace Kalmanova filtru začíná inicializací matic matematického modelu filtru po spuštění programu. Po každém úspěšném rozpoznání se hodnoty aktualizují.

V případě, že není rozpoznána žádná značka, predikuje Kalmanův filtr hodnoty na základě předchozích uložených a to pouze po určitou dobu.

Pokud ani po té době není obnoven vizuální kontakt s vedoucím robotem, nastává chybový stav permanentní ztráty vizuálního kontaktu. Ten je indikován globální proměnnou *leaderLost*. Řešení permanentní ztráty vizuálního kontaktu by mělo být implementováno v algoritmu pro udržování formace robotů.

Kapitola 5

Kvantitativní vyhodnocení

5.1 Metodika měření

Navržená metoda vizuální navigace pro formaci mobilních robotů byla testována ve dvou skupinách testů.

Přesnost měření v závislosti na vnitřních a vnějších faktorech testuje kvalitativní schopnosti zvolené kombinace kamera/objektiv/prstenec.

Charakteristiky polohy a variability pro trajektorie běžného provozu s jedním robotem vyhodnocují schopnost robotu udržet se za vedoucím robotem v řadě situací.

V kapitolách 5.2 až 5.5 je naznačena závislost přesnosti detekce na:

- vzdálenosti prstence od kamery
- relativním natočení prstence vzhledem ke kameře v prostorových úhlech (yaw, pitch a roll)
- intenzitě osvětlení v pracovním prostoru
- rozlišení snímaného obrazu

Pro každé měření v kapitolách 5.2 až 5.5 bylo provedeno 5 identických měření a výsledky byly zprůměrovány.

V kapitole 5.6 je využito charakteristik polohy (minimum, maximum, modus, medián, aritmetický průměr) a charakteristik variability (mezikvartilové rozpětí, rozptyl, směrodatná odchylka) k vyhodnocení relativní polohy a natočení následovníka vůči vedoucímu robotu formace.

Aritmetický (výběrový průměr) je definován jako

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

Medián je definován jako prostřední hodnota výběru, a to prostřední v pořadí hodnot uspořádaných podle velikosti. Modus je nejčastější hodnota znaku.

Kvantil x_p je hodnota znaku, pro který platí, že nejméně p -procent prvků má hodnotu menší nebo rovnu x_p .

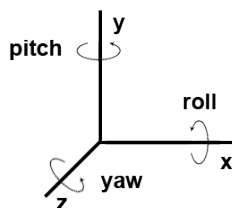
Rozptyl s^2 je definován jako součet kvadratických odchylek od průměru, děleným rozsahem výběru zmenšeným o 1.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.2)$$

Směrodatná odchylka s je definována jako odmocnina z rozptylu.

Mezikvartilové rozpětí je definováno jako rozdíl horního a dolního kvartilu (je tedy rovno $x_{75} - x_{25}$).

Ve všech měřeních používáme značky velikosti 11x11 cm ze skupiny 36h11. Detektor je kalibrován pro vzdálenost 1 m. Definice prostorových úhlů yaw, pitch, roll a souřadné soustavy, v jejímž středu je kamera orientovaná ve směru osy x , je uvedena na obrázku 5.1.

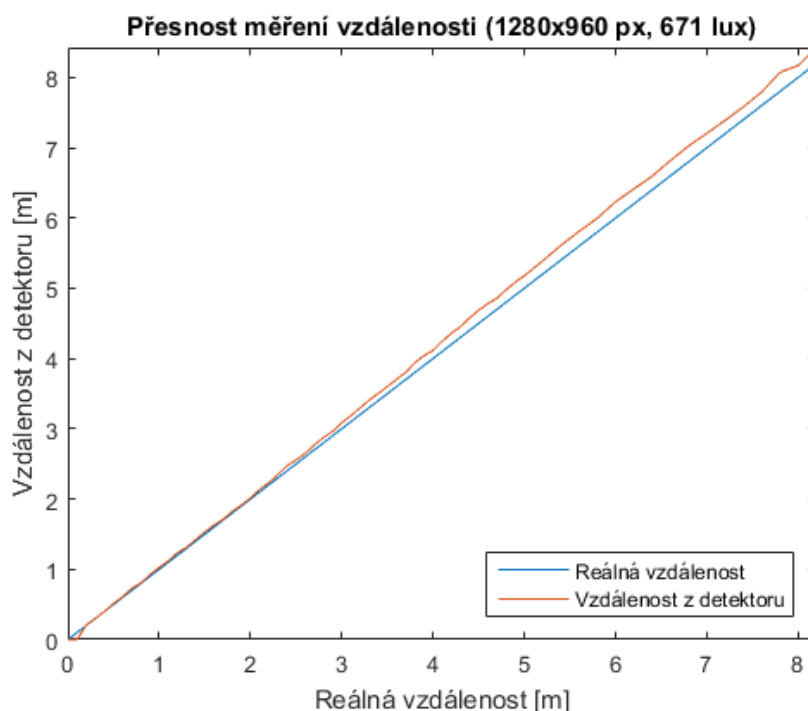


Obrázek 5.1: Orientace souřadné soustavy a příslušných prostorových úhlů yaw, pitch, roll.

Pro testy popsané v kapitolách 5.2 až 5.5 je použit statický robot, který pouze snímá obraz kamerou a postupně měří polohu prstence. Pro testy v kapitole 5.6 je využito jednoho robotu následujícího prstence s April značkami s využitím implementace z [42].

5.2 Přesnost měření v závislosti na vzdálenosti

Od statického robotu postupně oddalujeme prsteneček s krokem 0.1 m a porovnáme reálnou vzdálenost s naměřenou vzdáleností. Pokus opakujeme celkem pětkrát a hodnoty průměrujeme. Pro detektor kalibrovaný na vzdálenost 1 m od kamery předpokládáme, že se zvětšující se vzdáleností bude lineárně růst chyba měření.



Obrázek 5.2: Porovnání reálné a naměřené vzdálenosti prstenečku od robotu, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 671 lux.

Z naměřených dat je vidět, že předpoklad je správný. S rostoucí vzdáleností od kalibrované polohy (1 m) se lineárně zvětšuje chyba detekce. Maximální chyba detekce je 0.271 m u maximální detekovatelné vzdálenosti 8.2 metru.

Tato maximální detekovatelná vzdálenost odpovídá teoretickým výpočtům z kapitoly 3.4. Maximální vzdálenost pro spolehlivou detekci pro rozlišení 1280x960 px je 7.75 m. Bylo dosaženo větší detekované vzdálenosti, nicméně takové rozpoznání již není spolehlivé.

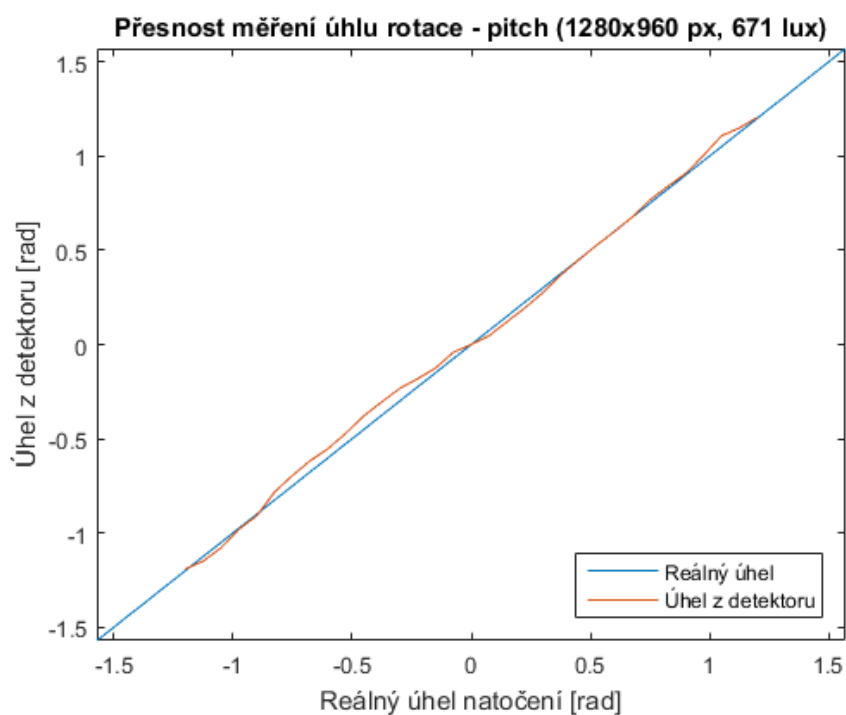
Detektor nerozpozná značky bližší než 20 cm od kamery, neboť se celá značka nevejde do záběru kamery. Pro vzdálenosti blízké vzdálenosti kalibrace (od 20 cm do 200 cm) je průměrná odchylka 0.0175 m. Maximální chyba detekce je 4.2%.

5.3 Přesnost měření v závislosti na úhlu natočení

Ve vzdálenosti 1 m od kamery měníme natočení ve třech prostorových úhlech (yaw, pitch, roll - viz obrázek 5.1) s krokem 5° a sledujeme přesnost detekce natočení. Zároveň hledáme největší úhel, pod kterým lze značku rozpoznat. Pokus opakujeme celkem pětkrát a hodnoty průměrujeme.

5.3.1 Rotace kolem svislé osy (pitch)

Z výsledných hodnot je vidět, že chyba měřeného úhlu neroste a zůstává se zvětšujícím se úhlem konstantní. Limitní úhly, kdy je ještě možno značku rozpoznat, jsou -68.18° a 68.75° .

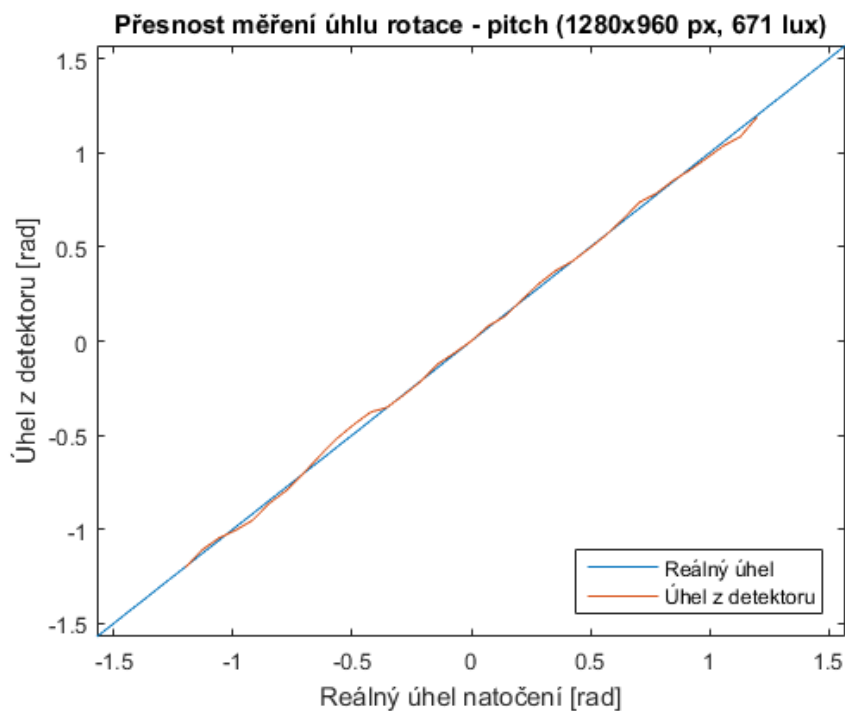


Obrázek 5.3: Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (pitch) značky prstence vzhledem k robotu, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 671 lux.

Maximální chyba měření je 4.01° (5.5%). Průměrná chyba měření je 0.95° .

5.3.2 Rotace kolem vodorovné osy (yaw)

Z grafu vyplývá, že i v tomto případě zůstává chyba konstantní po celou dobu. Limitní úhly jsou 68.75° a -68.18° .

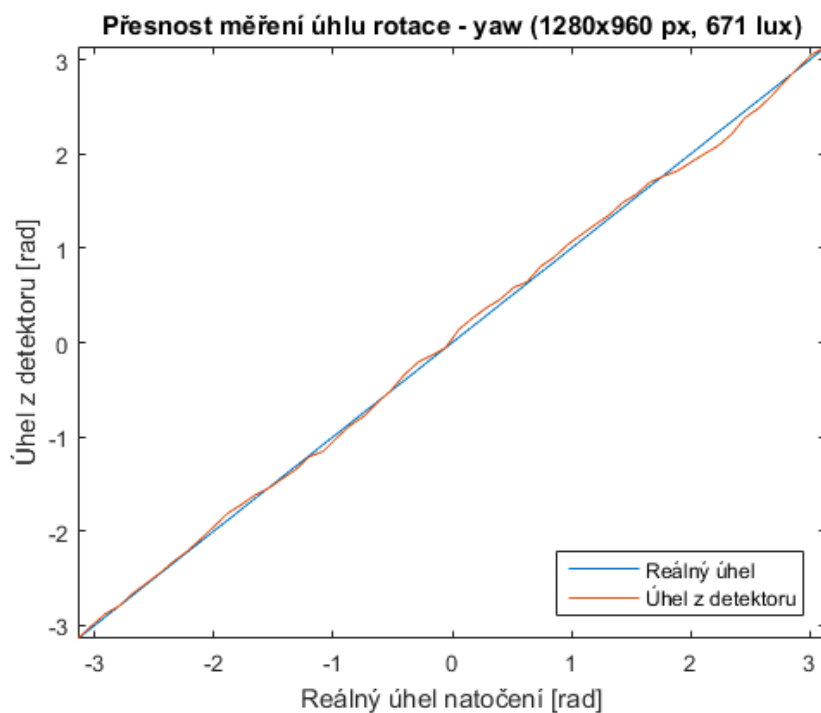


Obrázek 5.4: Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (yaw) značky prstence vzhledem k robotu, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 671 lux.

Maximální chyba měření je 2.83° (4.9 %). Průměrná chyba měření je 0.21° .

5.3.3 Rotace kolem osy kolmé na značku (roll)

Pro tento případ je chyba přibližně konstantní, nejsou zde žádné mezní úhly.

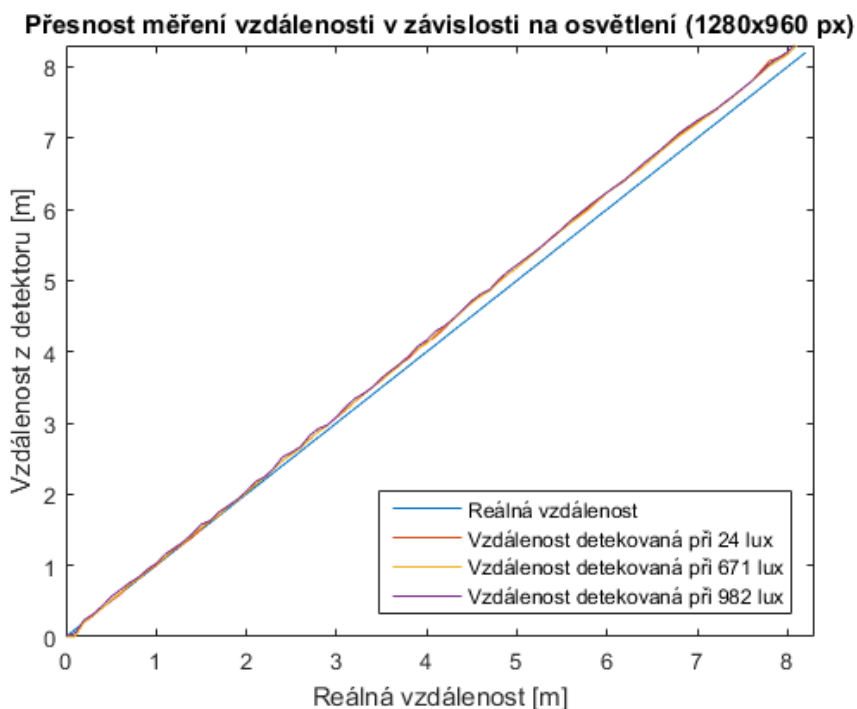


Obrázek 5.5: Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (roll) značky prstence vzhledem k robotu, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 671 lux.

Maximální chyba měření je 5.10° (9.2 %). Průměrná chyba měření je 0.39° .

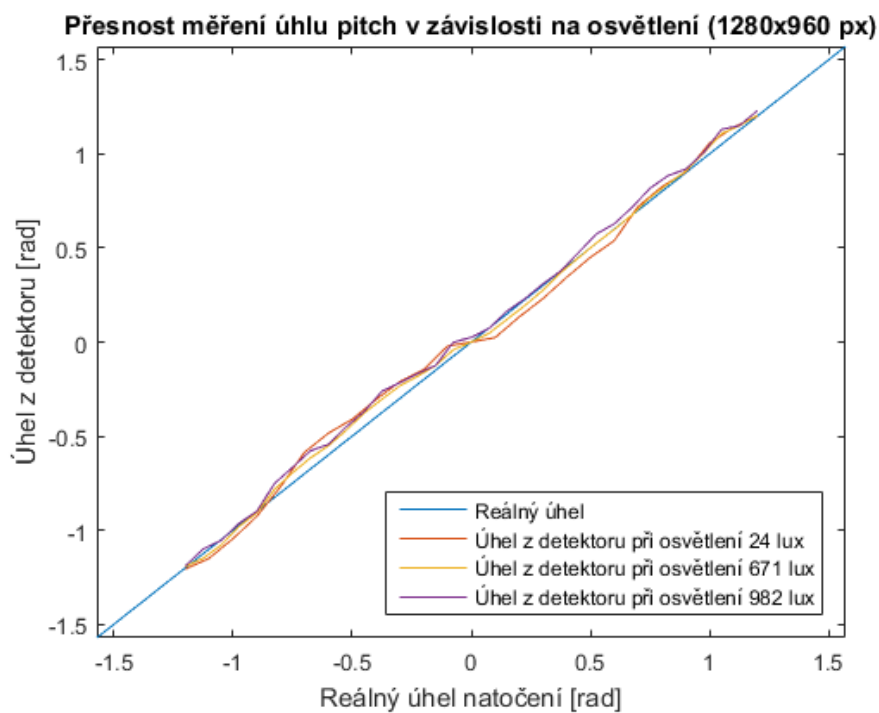
5.4 Přesnost měření v závislosti na osvětlení v místnosti

Provedeme měření pro různé vzdálenosti značky od kamery při standardním osvětlení místnosti (671 lux). Stejně měření následně opakujeme pro odlišné světelné podmínky - 24 lux a 982 lux. Pozorujeme přesnost měření vzdálenosti a natočení. Pokus opakujeme celkem pětkrát a hodnoty průměrujeme.



Obrázek 5.6: Porovnání reálné a naměřené vzdálenosti prstence od robotu v závislosti na osvětlení, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 24, 671 a 982 lux.

Z grafu vyplývá, že proměnné osvětlení nemá vliv na přesnost rozpoznání (křivky grafu jsou téměř totožné) ani na maximální vzdálenost rozpoznání značky na prstenci.

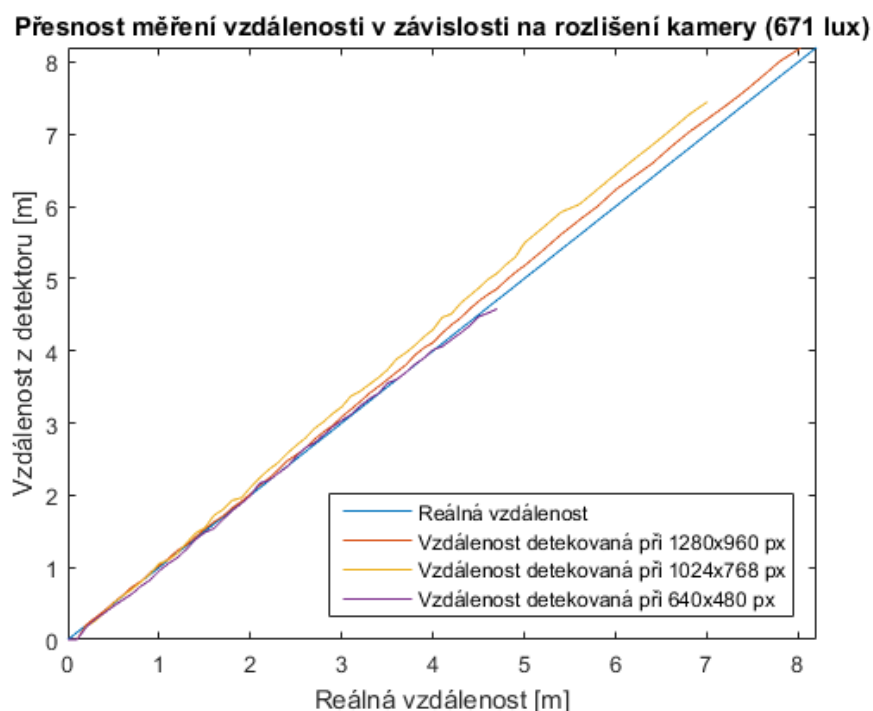


Obrázek 5.7: Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (pitch) značky prstence vzhledem k robotu v závislosti na osvětlení, rozlišení kamery 1280x960 pixelů, osvětlení 24, 671 a 982 lux.

Proměnné osvětlení nemá vliv ani na detekovaný úhel natočení, průběhy grafů se téměř shodují.

5.5 Přesnost měření v závislosti na rozlišení kamery

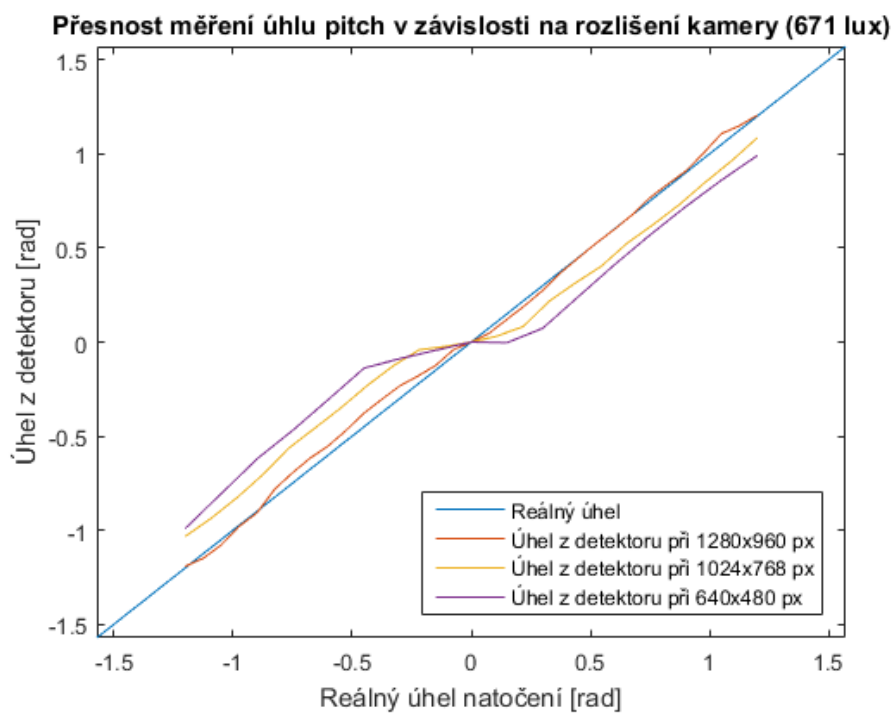
Provedeme měření pro různá rozlišení kamery (1280x960 px, 1024x768 px a 640x480 px) při standardním osvětlení místnosti (671 lux). Pozorujeme přesnost měření vzdálenosti a natočení. Pokus opakujeme celkem pětkrát a hodnoty průměrujeme.



Obrázek 5.8: Porovnání reálné a naměřené vzdálenosti prstence od robotu v závislosti na rozlišení kamery, osvětlení 671 lux, rozlišení 1280x960 px, 1024x768 px a 640x480 px.

Na grafu je vidět, že při menším rozlišení kamery se snižuje největší detekovatelná vzdálenost prstence. Tato skutečnost odpovídá úvaze v kapitole 3.4.

S použitím stejného vzorce dostáváme maximální spolehlivou detekovatelnou vzdálenost 3.85 m pro rozlišení 640x480 px (maximální detekovaná vzdálenost byla 4.69 m) a 6.2 m pro rozlišení 1024x768 (maximální detekovaná vzdálenost 7.02 m). Přesnost měření se lineárně snižuje s přibývajícím vzdáleností od kalibrační polohy.



Obrázek 5.9: Porovnání reálného a naměřeného úhlu rotace (pitch) značky prstence vzhledem k robotu v závislosti na rozlišení kamery, osvětlení 671 lux, rozlišení 1280x960 px, 1024x768 px a 640x480 px.

Z grafu vyplývá, že při menším rozlišení se nemění maximální úhel rozpoznání značky (pro všechna rozlišení $\pm 68^\circ$), ale chyba detekce je větší s menším rozlišením.

5.6 Charakteristiky polohy a variability pro jízdu za vedoucím robotem

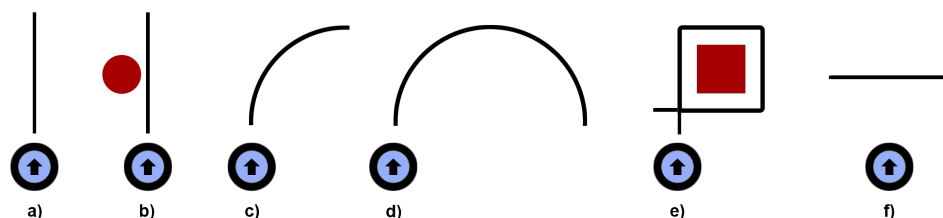
V této části testování se zaměříme na odchylku od ideální vzdálenosti a ideálního natočení následníka vzhledem k vedoucímu robotu při pohybu po základních trajektoriích (viz obrázek 5.10), které pokrývají situace při provozu formace robotů.

V grafech jsou vyneseny průběhy relativní vzdálenosti a natočení následovníka vzhledem k vedoucímu robotu. Z těchto hodnot jsou vypočteny charakteristiky polohy (minimum, maximum, modus, medián, aritmetický průměr) a charakteristiky variability (mezikvartilové rozpětí, rozptyl, směrodatná odchylka).

Dále jsou v grafech vyneseny hodnoty naměřené v simulaci s použitím [32]. Tyto hodnoty jsou pouze referenční. Pro každý pokus byla nejprve provedena simulace v programu V-Rep a tento pokus opakován v laboratorním prostředí.

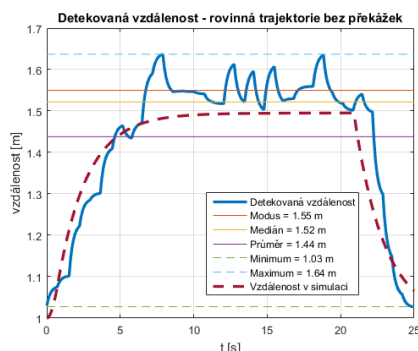
Pokusy byly prováděny s jedním robotem následujícím prstenec se značkami v laboratorních podmínkách při osvětlení 650 - 690 lux.

Kamera byla kalibrována pro rozpoznávání značek na 1 m, nastavená klidová poloha robotu byla ve vzdálenosti 1 m od vedoucího robotu s úhlem 0° . Maximální dopředná rychlost robotu byla omezena na 0.3 m/s pro oba motory.

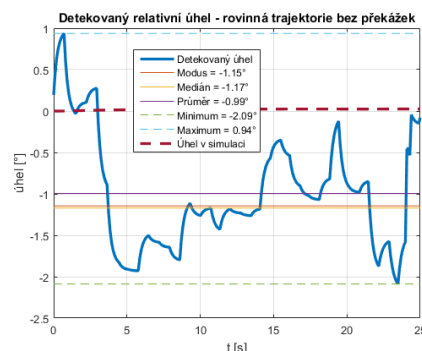


Obrázek 5.10: Trajektorie pro testování - a) rovná trajektorie bez překážek, b) rovinná trajektorie s překážkou, c) oblouková trajektorie 90° , d) oblouková trajektorie 180° , e) okluze za objektem prostředí, f) obnovení kontaktu s vedoucím robotem. Černá čára značí trajektorii, červeně jsou vyznačeny překážky.

5.6.1 Následování po rovné trajektorii bez překážek (viz obrázek 5.13)



Obrázek 5.11: Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro rovnou trajektorii bez překážek.



Obrázek 5.12: Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro rovnou trajektorii bez překážek.

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Modus	1.55	-1.15
Medián	1.52	-1.15
Průměr	1.43	-0.98
Minimum	1.03	-2.09
Maximum	1.64	0.94

Tabulka 5.1: Charakteristiky polohy pro jízdu po rovné trajektorii bez překážek.

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Směrodatná odchylka	0.18	0.69
Rozptyl	0.03	0.47
Mezikvartilové rozpětí	0.25	1.04

Tabulka 5.2: Charakteristiky variability pro jízdu po rovné trajektorii bez překážek.

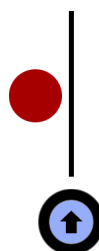
Z tabulky 5.1 vyplývá, že při jízdě po rovné trajektorii se následovník drží v průměrné vzdálenosti 1.43 m od vedoucího robotu. Z grafu 5.11 je vidět nárůst vzdálenosti při začátku pokusu, kdy se vedoucí robot rozjel z klidového stavu.

Kmitání kolem hodnoty mediánu (1.52 m) je dáno nekonstantní rychlostí pohybu vedoucího robotu. Relativní úhel natočení se pohybuje v rozmezí od -2.09° do 0.94° po celou dobu jízdy. Pokus trval 25 s.

Z charakteristik variability (tabulka 5.2) je vidět, že naměřené hodnoty mají velice malý rozptyl (0.03 m pro vzdálenost, 0.47° pro úhel).

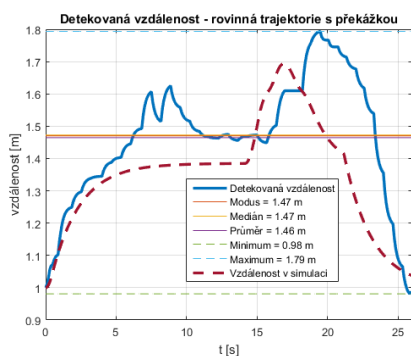


Obrázek 5.13: Rovná trajektorie bez překážek.

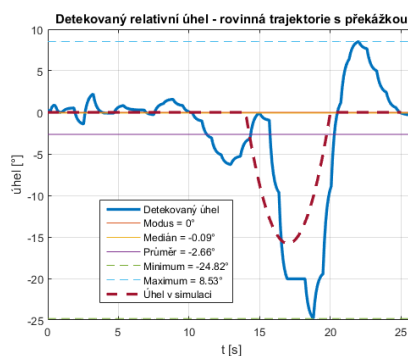


Obrázek 5.14: Rovná trajektorie s překážkou.

5.6.2 Následování po rovné trajektorii s překážkou (viz obrázek 5.14)



Obrázek 5.15: Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro rovnou trajektorii s překážkou.



Obrázek 5.16: Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro rovnou trajektorii s překážkou.

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Modus	1.47	0
Medián	1.47	-0.09
Průměr	1.46	-2.66
Minimum	0.98	-24.82
Maximum	1.79	8.53

Tabulka 5.3: Charakteristiky polohy pro jízdu po rovinné trajektorii s překážkou.

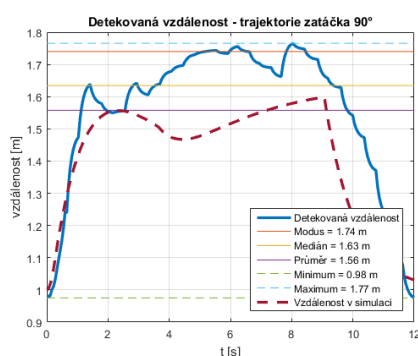
Do cesty robotu byla umístěna překážka o půdorysu kruhu s poloměrem 20 cm. Průběh pokusu (obrázky 5.15 a 5.16) je stejný jako v pokusu bez překážky do času $t = 15$ s, kdy je překážka detekována. Po detekci došlo k odpuzení robotu od překážky a zvyšovala se tak výchylka relativního natočení. Vedoucí robot se vzdálil na maximální vzdálenost 1.79 m. Pokus trval 26 s.

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Směrodatná odchylka	0.19	7.51
Rozptyl	0.04	56.36
Mezikvartilové rozpětí	0.23	4.86

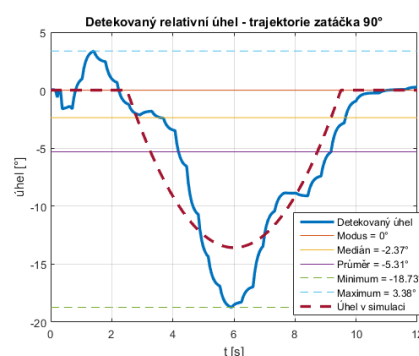
Tabulka 5.4: Charakteristiky variability pro jízdu po rovinné trajektorii s překážkou.

V čase $t = 16$ s došlo ke ztrátě prstence s April značkami ze zorného pole a hodnoty byly predikovány Kalmanovým filtrem (v grafech se vyskytuje po dobu predikce téměř konstantní hodnota). Po dosažení maximální výchylky -24.82° přestala působit odpudivá síla překážky a došlo ke korekci relativního natočení až na úhel 0° .

5.6.3 Následování po obloukové trajektorii (90° , viz obrázek 5.19)



Obrázek 5.17: Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii (90°).



Obrázek 5.18: Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii (90°).

Při jízdě zatáčkou se posouvá medián vzdálenosti od vedoucího robotu na 1.63 m, rozptyl vzdálenosti zůstává velice nízký, 0.05 m. Počáteční a konečná strmá změna vzdálenosti (viz obrázek 5.17) je dána rozjetím a následným zastavením robotu v ideální poloze ve vzdálenosti 1 m od vedoucího robotu.

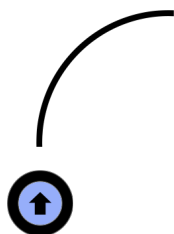
Relativní natočení se pohybuje mezi 3.38° a -18.73° , což je dáno zatáčecím vedoucího robotu o 90° . Pokus trval 12 s. Z obrázku 5.18 je vidět největší relativní natočení v čase $t = 6$ s, cca v polovině pohybu skrze zatáčku. Odchylka od ideálního relativního natočení poté klesá zpátky k nule. Po celou dobu průběhu pokusu nebyl prstenec s April značkami ztracen ze zorného pole kamery.

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Modus	1.74	0
Medián	1.63	-2.37
Průměr	1.56	-5.31
Minimum	0.98	-18.73
Maximum	1.77	3.38

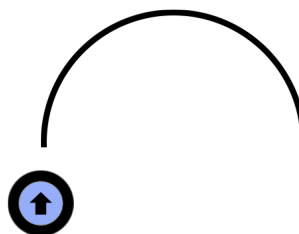
Tabulka 5.5: Charakteristiky polohy pro obloukovou trajektorii (90°).

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Směrodatná odchylka	0.22	6.36
Rozptyl	0.05	40.4
Mezikvartilové rozpětí	0.22	8.97

Tabulka 5.6: Charakteristiky variability pro obloukovou trajektorii (90°).



Obrázek 5.19: Oblouková trajektorie (90°).

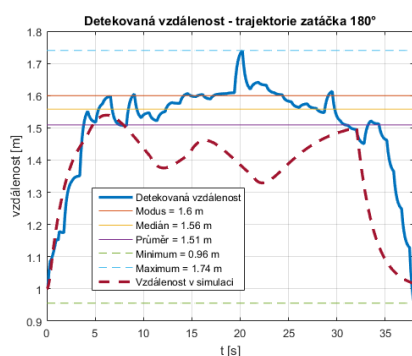


Obrázek 5.20: Oblouková trajektorie (180°).

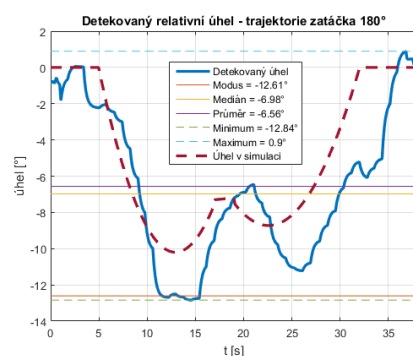
■ 5.6.4 Následování po obloukové trajektorii (180°, viz obrázek 5.20)

Při plynulém otočení o 180° dostáváme srovnatelné charakteristiky polohy a variability pro relativní vzdálenost od vedoucího robotu jako u otočení o 90° (medián vzdálenosti 1.56 m, rozptyl 0.02 m). Pokus trval 38 s.

Průběh relativního natočení (viz obrázek 5.22) se skládá z dvou průběhů otočení o 90° - první začíná v čase $t = 5$ s, druhé v čase $t = 21$ s. Maximální relativní natočení k vedoucímu robotu je -12.84° . Po celou dobu průběhu pokusu nebyl prstenec s April značkami ztracen ze zorného pole kamery.



Obrázek 5.21: Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii (180°).



Obrázek 5.22: Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii (180°).

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Modus	1.60	-12.61
Medián	1.56	-6.98
Průměr	1.51	-6.56
Minimum	0.96	-12.84
Maximum	1.74	0.90

Tabulka 5.7: Charakteristiky polohy pro obloukovou trajektorii (180°).

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Směrodatná odchylka	0.15	4.17
Rozptyl	0.02	17.42
Mezikvartilové rozpětí	0.09	7.57

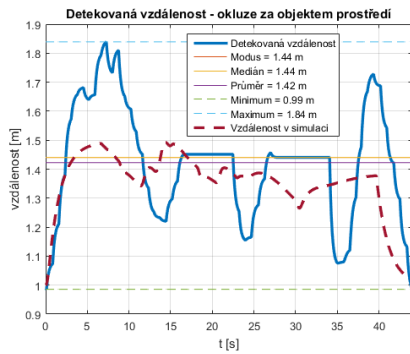
Tabulka 5.8: Charakteristiky variability pro obloukovou trajektorii (180°).

5.6.5 Následování po obloukové trajektorii s okluzí za objekty prostředí (viz obrázek 5.25)

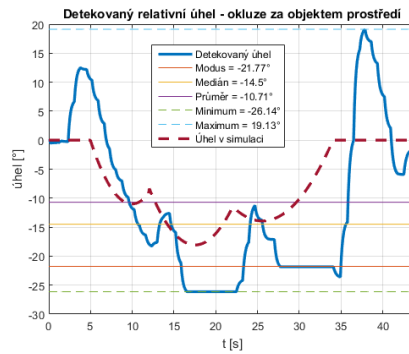
Vedoucí robot během pokusu opisoval trajektorii kolem sloupu o půdorysu čtverce (hrana 0.9 m). Pokus trval 44 s. Z průběhu grafů 5.23 a 5.24 je zřejmé, že v časech $t = 16.5$ s a $t = 27.5$ s došlo ke ztrátě vizuálního kontaktu s prstencem April značek. S použitím hodnot z Kalmanova filtru byl kontakt obnoven a po dokončení trajektorie oba grafy konvergují ke klidovým hodnotám (1 m, 0°).

Relativní úhel následovníka k vedoucímu robotu se pohyboval v rozmezí -26.14° až 19.13° . Maximální vzdálenost od vedoucího robotu byla 1.84 m. Rozptyl vzdálenosti byl 0.04 m, rozptyl úhlu 175.3° v důsledku odpuzování robotu od překážky.

5.6. Charakteristiky polohy a variability pro jízdu za vedoucím robotem



Obrázek 5.23: Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii s okluzí za objekty prostředí.



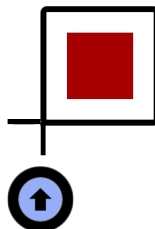
Obrázek 5.24: Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro obloukovou trajektorii s okluzí za objekty prostředí.

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Modus	1.44	-21.77
Medián	1.44	-14.5
Průměr	1.42	-10.71
Minimum	0.99	-26.14
Maximum	1.84	19.13

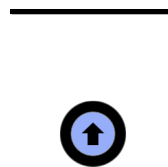
Tabulka 5.9: Charakteristiky polohy pro obloukovou trajektorii s okluzí za objekty prostředí.

	Vzdálenost [m]	Úhel [°]
Směrodatná odchylka	0.19	13.24
Rozptyl	0.04	175.3
Mezikvartilové rozpětí	0.26	21.53

Tabulka 5.10: Charakteristiky variability pro obloukovou trajektorii s okluzí za objekty prostředí.

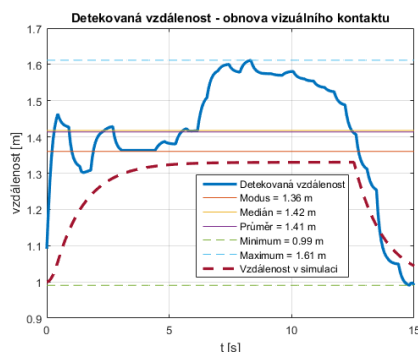


Obrázek 5.25: Okluze za objektem prostředí.

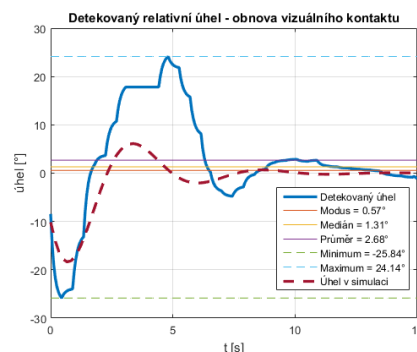


Obrázek 5.26: Obnova kontaktu s vedoucím robotem.

5.6.6 Obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem (viz obrázek 5.26)



Obrázek 5.27: Vzdálenost následovníka od vedoucího robotu v závislosti na čase pro obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem.



Obrázek 5.28: Relativní natočení následovníka k vedoucímu robotu v závislosti na čase pro obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem.

Vedoucí robot projíždí kolem následovníka mimo jeho zorné pole. Po zachycení části prstence (viz obrázky 5.27 a 5.28) vedoucího robotu dojde k obnovení kontaktu a konvergování ke klidové poloze následovníka (1 m , 0°). Relativní natočení se pohybuje mezi -25.84° a 24.14° . Pokus trval 15 s .

Po obnovení kontaktu dochází k tlumenému kmitání relativního natočení k vedoucímu robotu kolem klidové polohy (medián 1.31°). Vzdálenost je nejprve kolem 1.4 m po detekci vedoucího robotu (v zorném poli jsou přední značky vedoucího robotu), následovník se natáčí za vedoucím robotem a po detekci zadní značky (čas $t = 5.5\text{ s}$, obrázek 5.27) jej začne následovat.

	Vzdálenost [m]	Úhel [$^\circ$]
Modus	1.36	0.57
Medián	1.42	1.31
Průměr	1.41	2.62
Minimum	0.99	-25.84
Maximum	1.61	24.14

Tabulka 5.11: Charakteristiky polohy pro obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem.

	Vzdálenost [m]	Úhel [$^\circ$]
Směrodatná odchylka	0.16	10.71
Rozptyl	0.03	114.67
Mezikvartilové rozpětí	0.20	8.62

Tabulka 5.12: Charakteristiky variability pro obnovení vizuálního kontaktu s vedoucím robotem.

Kapitola 6

Závěr

V této práci jsme se seznámili s požadavky na udržování formací pozemních mobilních robotů (kapitoly 2.2 a 2.3), podrobně prostudovali problematiku postupů zpracování vizuální informace pro určení vzájemné polohy a orientace robotů ve formaci (kapitola 2.4) a seznámili se s různými druhy pasivních značek (kapitola 2.5). Pro návrh vlastní metody byl zvolen systém April značek z důvodů kvalitního a rychlého detektoru s 6D lokalizací [21] a možností kódování malého množství informace.

Robustnost vybraných postupů pro měření vzájemné vzdálenosti a relativní orientace byla ověřena v kapitolách 5.2 až 5.5. V této části práce byly nalezeny maximální úhly pro korektní rozpoznání, maximální vzdálenosti rozpoznání a ověřen vliv proměnného osvětlení a proměnného rozlišení kamery na kvalitu detekce.

V části 4 byla navržena vlastní metoda s využitím knihoven April značek. Po experimentech s panoramatickým zachycením obrazu (kapitola 4.1) byly zvoleny průmyslové kamery z řady Basler Dart. Následně byl vytvořen prstenec s půdorysem pravidelného osmiúhelníku. Prstenec zajišťuje rozpoznání robotu ze všech stran s dostatečnou rezervou pro maximální úhel natočení značky vzhledem ke kameře následovníka.

Odolnost vůči nejčastějším chybám, především dočasné ztrátě viditelnosti, zajišťuje Kalmanův filtr, který predikuje pozici April značek na základě předchozích detekovaných hodnot. V případě, že nedojde k znovu-navázání vizuálního kontaktu v určitém časovém limitu, je hlášen neobnovitelný chybový stav.

Vzhledem k nedostatku kamer byla implementována zjednodušená verze

navrhované metody. Na každém robotu je použito jedné kamery místo soustavy dvou kamer. V důsledku předchozího bylo upuštěno od využití možnosti lokální komunikace mezi roboty. Implementovaná metoda rozpoznává značky v obraze s frekvencí 3 Hz.

V části 5 byla testována robustnost detekce April značek, přesnost navržené metody pro měření vzdálenosti a prostorových úhlů yaw, pitch, roll. Každý pokus byl identicky opakován 5x a výsledky průměrovány.

Pro rozlišení kamery použité během implementace, 1280x960 pixelů, je maximální vzdálenost detekce 8.2 m při standardním osvětlení v laboratoři (671 lux). Detekce spolehlivě funguje mezi úhly $\pm 68^\circ$ vzhledem ke kameře. Dále byl testován vliv proměnného osvětlení na přesnost měření. Pro testované osvětlení (24, 671 a 982 lux) byly výsledky téměř totožné. Z toho usuzujeme, že proměnné osvětlení má na přesnost detekce minimální vliv.

Test s proměnným rozlišením kamery ukázal, že s klesajícím rozlišením (1280x960, 1024x768, 640x480) klesá maximální detekovatelná vzdálenost a pro detekci úhlu se s klesajícím rozlišením snižuje přesnost detekce. Pro rozlišení 640x480 pixelů je maximální detekovaná vzdálenost 4.69 m. Pro rozlišení 1024x768 pixelů je maximální detekovaná vzdálenost 6.2 m.

Přesnost měření se lineárně snižuje s přibývajícím vzdáleností od kalibrační polohy. Pro rozlišení 1280x960 pixelů byla detekována značka ve vzdálenosti 8.2 m. V této vzdálenosti detektor určil vzdálenost 8.47 metrů, což odpovídá chybě 3.3 %.

Dále byla navržená metoda testována pro jízdu jednoho následovníka za vedoucím robotem po základních trajektoriích (rovina bez překážek, rovina s překážkou, zatáčka 90° , zatáčka 180° , okluze za objektem prostředí, obnovení kontaktu), které pokrývají varianty pohybu robotu ve formaci.

Medián vzdálenosti následovníka od vedoucího robotu se pohyboval mezi 1.42 m a 1.6 m. To je dáno principem virtuálních pružin - pro působení síly je nutná nenulová výchylka. Maximální vzdálenost od vedoucího robotu byla 1.84 m při detekci a následném vyhnutí se překážce. Rozptyl vzdálenosti následovníka od vedoucího robotu v intervalu od 0.02 m do 0.05 m indikuje dobrou schopnost udržování konstantní vzdálenosti od prstence April značek navrženého řešení.

Relativní natočení následovníka vůči vedoucímu robotu se pohybovalo v intervalu $\pm 30^\circ$. Rozptyl natočení následovníka vůči vedoucímu robotu byl v intervalu od 17.4° do 175.3° .

Z průběhu grafů je vidět kmitání kolem optimálních hodnot pro relativní vzdálenost a natočení. To je způsobeno dvěma faktory. Jednak pohybem

po křivkách, kdy se předpokládá omezení rotační schopnosti robotu a dále také nízkou frekvencí rozpoznání April značek v obraze (3 Hz). Nicméně pro rovnou trajektorii byl rozptyl natočení následovníka vůči vedoucímu robotu pouze 0.47° .

Využití Kalmanova filtru zajistilo, že nedošlo během testování na základních trajektoriích k permanentní ztrátě kontaktu s prstencem.

6.1 Další kroky

Pro zlepšení výsledků detekce navrhujeme použití objektivu s nižší ohniskovou vzdáleností (a větším úhlem záběru) a zrychlení procesu detekce značky v obraze. Při zvýšení frekvence rozpoznání by mělo dojít k omezení kmitání robotu při pohybu po křivkách.

Pro zlepšení robustnosti navigace v rámci formace navrhujeme soustavu dvou kamer pro každý robot (kapitola 4.2.2) a zároveň detekci navzájem sousedních robotů ve formaci. Soustava kamer umožní vytvoření další virtuální pružiny a formace bude kompaktnější. Spolu s použitím soustavy kamer navrhujeme implementování komunikace mezi členy formace zajišťující sdílení navzájem detekovaných informací o relativní poloze.

Pro objektivní vyhodnocení použitelnosti zde navržené metody pro praktické využití je dále třeba provést testování ve venkovním prostředí.

Příloha A

Literatura

- [1] DIRAFZON, Alireza a Edgar LOBATON. *Topological mapping of unknown environments using an unlocalized robotic swarm*. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [online]. IEEE, 2013, s. 5545-5551 [cit. 2017-05-12]. DOI: 10.1109/IROS.2013.6697160. ISBN 978-1-4673-6358-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6697160/>
- [2] U.S. Army, *Field Manual No 7-7J*, Washington, DC, 1986.
- [3] BALCH, T. a R.C. ARKIN. *Behavior-based formation control for multi-robot teams*. IEEE Transactions on Robotics and Automation [online]. 14(6), 926-939 [cit. 2017-05-12]. DOI: 10.1109/70.736776. ISSN 1042296x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/736776/>
- [4] LEE, Hyun, Byung Rak SON, Dong Ha LEE a Jung Eun KIM. *A Mutual Position Detection based on Relative Motion Recognition of Multi-Modular Robots* [online]. South Korea Sun Moon University, 2012 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: www.onlinepresent.org/proceedings/vol2_2012/21.pdf
- [5] FREDSLUND, J. a M.J. MATARIC. *A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication*. IEEE Transactions on Robotics and Automation [online]. 2002, 18(5), 837-846 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/TRA.2002.803458. ISSN 1042-296x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1068002/>
- [6] TODESCATO, Marco, Andrea CARRON, Ruggero CARLI, Antonio FRANCHI a Luca SCHENATO. *Multi-robot localization via GPS and relative measurements in the presence of asynchronous and lossy communication*. In: 2016 European Control Conference (ECC) [online]. IEEE,

- 2016, s. 2527-2532 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/ECC.2016.7810670. ISBN 978-1-5090-2591-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7810670/>
- [7] ZAHUGI, Emaad Mohamed H., Ahmed M. SHABANI a T. V. PRASAD. *Libot: Design of a low cost mobile robot for outdoor swarm robotics*. In: 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER) [online]. IEEE, 2012, s. 342-347 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/CYBER.2012.6392577. ISBN 978-1-4673-1421-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6392577/>
- [8] FEDDEMA, J.T. a D.A. SCHOENWALD. *Distributed communication/navigation robot vehicle network*. In: Proceedings of the 5th Biannual World Automation Congress [online]. TSI Press, 2002, s. 573-578 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/WAC.2002.1049498. ISBN 1-889335-18-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1049498/>
- [9] KANG, Hyun-Deok, Jae-Hyuk KAWK, Chang-Hwan KIM a Kang-Hyun JO. *Multiple Robot Formation Keeping and Cooperative Localization by Panoramic View*. ICROS-SICE International Joint Conference [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5335185/>
- [10] SASKA, Martin, Tomas KRAJNIK, Vojtech VONASEK, Petr VANEK a Libor PREUCIL. *Navigation, localization and stabilization of formations of unmanned aerial and ground vehicles*. In: 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) [online]. IEEE, 2013, s. 831-840 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/ICUAS.2013.6564767. ISBN 978-1-4799-0817-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6564767/>
- [11] LAMBRECHT, Joris M. a Robert F. KIRSCH. *Miniature Low-Power Inertial Sensors: Promising Technology for Implantable Motion Capture Systems*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering [online]. 2014, 22(6), 1138-1147 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1109/TNSRE.2014.2324825. ISSN 1534-4320. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6817610>
- [12] CHAO, Hu, Feng ZHONGQING, Ren YUPENG, Chen YUEYUE, Lin HAIXIANG, Wang KAI, Xu XIAODONG a Bao JIANMENG. *An efficient magnetic localization system for indoor planar mobile robot*. In: 2015 34th Chinese Control Conference (CCC) [online]. IEEE, 2015, s. 4899-4904 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7260399. ISBN 978-9-8815-6389-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7260399>

- [13] USHIMI, N., M. YAMAMOTO a A. MOHRI. *Two wheels caster type odometer for omni-directional vehicles*. In: 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422) [online]. IEEE, 2003, s. 497-502 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241643. ISBN 0-7803-7736-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1241643>
- [14] LI, Zhao, Stan E. DOSSO a Dajun SUN. *Motion-Compensated Acoustic Localization for Underwater Vehicles*. IEEE Journal of Oceanic Engineering [online]. 2016, 41(4), 840-851 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/JOE.2015.2503518. ISSN 0364-9059. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7403852/>
- [15] *Meet Kinect for Windows*. Windows Dev Center [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>
- [16] OLUFS, Sven a Markus VINCZE. *Towards efficient semantic real time mapping of man-made environments using Microsoft's Kinect*. In: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [online]. IEEE, 2011, s. 130-137 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/ROBIO.2011.6181274. ISBN 978-1-4577-2138-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6181274/>
- [17] LAMBERTI, Fabrizio, Gianluca PARAVATI, Valentina GATTESCHI, Alberto CANNAVO a Paolo MONTUSCHI. *Virtual Character Animation Based on Affordable Motion Capture and Reconfigurable Tangible Interfaces*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics [online]. , 1-1 [cit. 2017-04-23]. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2690433. ISSN 1077-2626. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7891591/>
- [18] PINTO, Andry Maykol, Paulo COSTA, Antonio P. MOREIRA, Luis F. ROCHA, Germano VEIGA a Eduardo MOREIRA. *Evaluation of Depth Sensors for Robotic Applications*. In: 2015 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions [online]. IEEE, 2015, s. 139-143 [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/ICARSC.2015.24. ISBN 978-1-4673-6991-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7101623>
- [19] ALEXIADIS, Dimitrios S., Anargyros CHATZITOFIS, Nikolaos ZIOULIS, Olga ZOIDI, Georgios LOUIZIS, Dimitrios ZARPALAS a Petros DARAS. *An Integrated Platform for Live 3D Human Reconstruction and Motion Capturing*. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology [online]. 2017, 27(4), 798-813 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/TCSVT.2016.2576922. ISSN 1051-8215. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7484748/>
- [20] CHANG, Yu-Hsuan, Chung-Hua CHU a Ming-Syan CHEN. *A General Scheme for Extracting QR Code from a Non-uniform Background in Camera Phones and Applications*. In: Ninth IEEE International Symposium

- on Multimedia (ISM 2007) [online]. IEEE, 2007, s. 123-130 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/ISM.2007.4412365. ISBN 0-7695-3058-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4412365/>
- [21] OLSON, Edwin. *AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system*. In: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation [online]. IEEE, 2011, s. 3400-3407 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5979561. ISBN 978-1-61284-386-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5979561/>
- [22] KATO, Hiroko, Douglas. CHAI a Keng T. TAN. *Barcodes for mobile devices*. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 9780521888394.
- [23] REKIMOTO, Jun a Yuji AYATSUKA. *CyberCode*. In: Proceedings of DARE 2000 on Designing augmented reality environments - DARE '00 [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2000, s. 1-10 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1145/354666.354667. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=354666.354667>
- [24] HE, Wei-ping, Wei WANG, Lei LEI a Wen-tao LI. *DataMatrix code accurate locating based on boundary multi-features fusion*. In: 2012 7th International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCT) [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6530481/>
- [25] FIALA, M. *Comparing ARTag and ARToolkit plus fiducial marker systems*. In: IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications, 2005 [online]. IEEE, 2005, s. 147-152 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/HAVE.2005.1545669. ISBN 0-7803-9376-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1545669/>
- [26] FIALA, Mark. *Designing Highly Reliable Fiducial Markers*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence [online]. 2010, 7(32), 1317 - 1324 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/TPAMI.2009.146. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5184844/>
- [27] FIALA, M. *ARTag, a Fiducial Marker System Using Digital Techniques*. In: 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) [online]. IEEE, 2005, s. 590-596 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/CVPR.2005.74. ISBN 0-7695-2372-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1467495/>
- [28] WANG, Qi, Ludmila CHERKASOVA, Jun LI a Haris VOLOS. *InterSense: Interconnect Performance Emulator for Future Scale-out Distributed Memory Applications*. In: 2015 IEEE 23rd International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems [online]. IEEE, 2015, s. 122-125 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/MASCOTS.2015.13. ISBN 978-1-4673-7720-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7330181>

- [29] RAJNIK, Tomas, Matias NITSCHKE, Jan FAIGL, Tom DUCKETT, Marta MEJAIL a Libor PREUCIL. *External localization system for mobile robotics*. In: 2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR) [online]. IEEE, 2013, s. 1-6 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1109/ICAR.2013.6766520. ISBN 978-1-4799-2722-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6766520/>
- [30] JOYNER, David. *Coding theory and cryptography: from enigma and Geheimschreiber to quantum theory*. New York: Springer, c2000. ISBN 978-3540663362.
- [31] SHUCKER, Brian a John K. BENNETT. *Virtual Spring Mesh Algorithms for Control of Distributed Robotic Macrosensors* [online]. University of Colorado at Boulder, 2005 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: www.cs.colorado.edu/department/./reports/./CU-CS-996-05.pdf
- [32] NOVOTNÝ, Martin. *Robustní postupy řízení formací robotů*. Praha, 2017. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Libor Přeučil, CSc.
- [33] FOOTE, Tully a Melonee WISE. *Turtlebot* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.turtlebot.com/>
- [34] *ROS Documentation* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://wiki.ros.org/>
- [35] *TurtlebotKogeto Dot Panorama iPhone 4/4S Camera Adapter Review*. The Gadgeteer [online]. 2012 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://the-gadgeteer.com/2012/02/29/kogeto-dot-panorama-iphone-44s-camera-adapter-review/>
- [36] PRONOBIS, Andrzej. *Software for Unwrapping Omnidirectional Images*. [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.pronobis.pro/software/unwrap/>
- [37] *SDK Pylon for Linux* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/products/software/pylon-linux-x86/>
- [38] KIM, Phil. *Kalman filter for beginners: with MATLAB examples*. Přeložil Lynn HUH. Charleston: CreateSpace, 2011. ISBN 978-1463648350.
- [39] PROVÍNSKÝ, Pavel. *Stavový model a Kalmanův filtr*. In: Fakulta dopravní, ČVUT [online]. 2013 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/personal/provipav/Stochastika/Materialy-test4/Stav.pdf>
- [40] *OpenCV* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://opencv.org>
- [41] *AprilTags C++ Library* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://people.csail.mit.edu/kaess/apriltags/>

- [42] BERÁNEK, Matěj. *Experimentální prostředí pro skupinovou robotiku*. Praha, 2017. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Libor Přeučil, CSc.



Příloha B

Obsah CD

algorithmus/	implementace metody vizuální navigace pro formaci robotů
text/	text této práce
prstenc/	technický výkres prstence a podklady pro 3D tisk
video/	záznam z testování

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Martin Ž á k o v e c

Studijní program: Kybernetika a robotika (bakalářský)

Obor: Robotika

Název tématu: Vizualní navigace mobilních robotů ve formaci

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s požadavky na udržování formací pozemních mobilních robotů, soustřeďte se na postupy využívající zpracování vizuální informace k určení vzájemné polohy a orientace robotů ve formaci.
2. Analyzujte robustnost vybraných postupů vizuálního měření vzájemné vzdálenosti a relativní orientace jednotlivých robotů.
3. Navrhnete vlastní metodu nebo kombinaci existujících metod k měření relativní orientace a vzdálenosti robotů tak, aby systém byl odolný vůči nejčastějším provozním chybám, zejména dočasné ztrátě vzájemné viditelnosti a byl schopný obnovy z chybového stavu.
4. Implementujte, experimentálně ověřte a kvantitativně vyhodnoťte vybraný postup.

Seznam odborné literatury:

- [1] SZELISKI, Richard. Computer Vision: Algorithms and Applications. London: Springer, 2010. Texts in computer science. ISBN 978-1-84882-934-3.
- [2] KAEHLER, Adrian a Gary BRADSKI. Learning openCV: computer vision in C with the OpenCV library. New York: O'Reilly Media, 2016. ISBN 978-1-4493-1465-1.
- [3] GRUEN, A. a Thomas S. HUANG. Calibration and orientation of cameras in computer vision. New York: Springer, c2001. ISBN 35-406-5283-3.
- [4] TRIANNI, Vito. Evolutionary swarm robotics: evolving self-organising behaviours in groups of autonomous robots. Berlin: Springer, c2008. ISBN 978-354-0776-123.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Libor Přeučil, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Dr. Ing. Jan Kybic
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 1. 2017