

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky

Sledování člověka robotem

František Brandštýl

Vedoucí: Ing. Libor Přeučil, CSc.

Obor: Robotika

Studijní program: Kybernetika a robotika

Květen 2017

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Liboru Přeučilovi, CSc. za cenné rady a připomínky udělované během vypracovávání této práce. Dále také panu Ing. Janu Chudobovi za pomoc při práci na experimentálním zařízení. Rád bych také poděkoval své rodině za důvěru a podporu během celého studia.

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

Cílem této práce bylo navrhnout robotický systém pro sledování člověka. V úvodní části práce je přehled lokalizačních systémů používaných v robotice. U každé skupiny je uveden základní princip funkce i příklady použití. Dále následuje část zabývající se pozemními roboty a jejich využití při sledování člověka. Zmíněny jsou i některé konkrétní projekty. Práce se dále zabývá návrhem samotného algoritmu pro sledování člověka robotem. Následuje část popisující implementaci algoritmu a ověření jeho funkce při laboratorních pokusech. Při experimentech byl použit robot Pioneer 3-AT, lokalizační program WhyCon a laserový dálkoměr Hokuyo pro funkci collision avoidance.

Klíčová slova: Sledování člověka robotem, lokalizace

Vedoucí: Ing. Libor Přeučil, CSc.

Abstract

The aim of this work was to design a robotic system for human following. The first part of the thesis is an overview of localization systems used in robotics. For each group there is a basic principle of operation and examples of use. The following is a part dealing with land robots and their use in human observation. Some specific projects are also mentioned. The thesis also deals with the design of the algorithm for the human robot following itself. The following is a part describing the implementation of the algorithm and verification of its function in laboratory experiments. The experiments used the Pioneer 3-AT robot, the WhyCon localization program, and the Hokuyo laser rangefinder for collision avoidance.

Keywords: Human following robot, localization, Robotic Follower

Title translation: Robotic Follower

Obsah

1 Úvod	1	3.2.2 ApriAttenda	17
2 Určování polohy člověka	3	3.2.3 Robot pro domácí kyslíkovou terapii	18
2.1 Akustické systémy	4	3.3 Robot Pioneer 3-AT	19
2.2 Laserové systémy	4	4 Návrh koncepce řešení	21
2.3 Systémy zpracování obrazu	5	4.1 Vytvoření a udržování sledované trajektorie	21
2.3.1 Systémy zpracování obrazu bez značek	6	4.2 Řešení problémových situací ...	23
2.3.2 Systémy zpracování obrazu s pasivními značkami	7	4.2.1 Malé překážky	23
2.3.3 Systémy zpracování obrazu s aktivními značkami	8	4.2.2 Velké překážky	24
2.3.4 Motion capture	9	4.2.3 Kombinace více překážek ...	25
2.4 WhyCon	10	4.2.4 Problém rozlišení překážek ..	26
3 Pozemní roboti a jejich využití při sledování člověka	13	4.2.5 Konečný návrh algoritmu ...	27
3.1 Způsoby pohybu pozemních robotů	14	4.3 Řízení pohonu robota	27
3.2 Roboti vyvinutí pro sledování člověka	15	4.4 Collision avoidance	29
3.2.1 Robot Gita	16	5 Implementace řídicího algoritmu	33
		5.1 Program pro správu jednotlivých procesů	33
		5.2 Úpravy programu WhyCon	34

5.3 Řídicí program robota	36	7 Závěr	51
5.3.1 Souřadnice byly načteny správně	36	A Literatura	53
5.3.2 Souřadnice byly načteny chybně	39	B Zadání práce	57
6 Experimentální ověření algoritmu	41		
6.1 Testování programu WhyCon . . .	41		
6.1.1 Použitý hardware	42		
6.1.2 Měření přesnosti souřadnic . .	42		
6.1.3 Vliv osvětlení na přesnost . . .	43		
6.2 Testování sledovacího algoritmu	43		
6.2.1 Použitý hardware	44		
6.2.2 Sledování v prostoru bez překážek	45		
6.2.3 Sledování v prostoru s překážkou	46		
6.2.4 Průjezd zúženým prostorem .	47		
6.2.5 Ztráta kontaktu	48		
6.3 Vyhodnocení experimentů	49		

Obrázky

2.1 Princip funkce sonaru, převzato z: [8]	4	3.4 Robot Gita, převzato z: [19]....	17
2.2 Využití laseru pro detekci okolních překážek, převzato z: [9]	5	3.5 Robot ApriAttenda, převzato z: [6]	17
2.3 QR kód je typ pasivní značky používaný k zakódování informace, převzato z: [10]	6	3.6 Robot pro domácí kyslíkovou terapii, převzato z: [7]	18
2.4 Na obrázcích jsou zvýrazněny: infračervený vysílač a hloubkový senzor, barevná kamera, soustava mikrofonů a otáčecí motor	7	3.7 Robot Pioneer 3-AT, převzato z: [20]	19
2.5 Pasivní značky využívané programem AprilTag, převzato z: [13]	8	4.1 Porovnání proložené křivky při změně souřadnic jediného bodu. . .	22
2.6 Aktivní značky využívané systémem Certus, převzato z: [14] ..	9	4.2 Uspořádání typické situace během sledování člověka robotem.	22
2.7 Detekce značek na obleku pro motion capture, převzato z: [15] ...	9	4.3 Příklad ztráty kontaktu člověka s robotem u malé překážky.....	24
2.9 Geometrie operačního prostoru programu WhyCon, převzato z: [3]	11	4.4 Příklad ztráty kontaktu člověka s robotem u velké překážky.	24
3.1 Příklady pozemních robotů.	14	4.5 Příklad situace při průjezdu oblasti s více malými překážkami.	25
3.2 Příklady základních robotických podvozků.	15	4.6 Příklad situace při průjezdu oblasti s více velkými překážkami.	26
3.3 Legged Squad Support System je robot vyvíjený pro spolupráci s vojenskou jednotkou, převzato z: [18]	16	4.7 Celkový diagram rozhodovacího stromu robota.	27
		4.8 Aktuální rychlosti motorů robota závisí úhlu člověka od přímého směru.....	28

4.9 Schéma regulační smyčky PID regulátoru pro regulaci úhlové odchylky.	28	6.4 Laserový dálkoměr Hokuyo, převzato z: [23]	45
4.10 Porovnání průjezdu zatáčkou 90 stupňů s regulátorem bez podmínky pro zastavení pohybu a s podmínkou pro zastavení pohybu.	29	6.5 Testovací prostor.	45
4.11 3D mapování prostoru robotem, převzato z: [21]	30	6.6 Naměřené trajektorie.	46
4.12 Rozdělení sledovaného prostoru na ochranou a výstražnou zónu. ..	30	6.7 Okamžitá vzdálenost robota od člověka.	46
5.1 Základní princip funkce programu pro správu procesů.	34	6.8 Testovací prostor.	47
5.2 Základní princip funkce programu WhyCon.	35	6.9 Naměřené trajektorie.	47
5.3 Základní princip funkce předcházení srážkám.	38	6.10 Testovací prostor.	48
5.4 Funkce řídicího regulátoru robota.	39	6.11 Naměřené trajektorie.	48
5.5 Chování robota v případě detekce zprávy „fail“.	40	6.12 Testovací prostor.	49
6.1 Akční kamera Mobius, převzato z: [22]	42	6.13 Naměřené trajektorie.	49
6.2 Hodnoty odchylek naměřených při osvětlení 703 Lux.	43		
6.3 Hodnoty odchylek naměřených při osvětlení 25 Lux.	44		

Tabulky





Kapitola 1

Úvod

Roboti nebo skupiny robotů se v dnešní době využívají k velkému množství nejrůznějších činností. V některých odvětvích, zejména v průmyslové výrobě, již převzali velkou část úkonů, které dříve vykonávali lidé. Velký potenciál ale mají robotické systémy, které přímo spolupracují s člověkem. Do této skupiny můžeme zařadit i roboty, kteří sledují člověka z dané vzdálenosti a jsou tak neustále k dispozici.

Roboti, kteří si udržují stálou vzdálenost od sledované osoby mohou být využiti různými způsoby. Nabízí se především převážení nejrůznějších nákladů, jejichž velikost a váha samozřejmě závisí na schopnostech daného robota. Tito roboti mohou být využiti také v medicíně, kde mohou převážet například lékařské přístroje nebo pacienty. Malé roboty lze naopak použít pro špionáž a sledování podezřelých osob.

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat robota, který by sledoval člověka ze zadané vzdálenosti a pokud možno se pohyboval po stejné trajektorii jako sledovaná osoba. Bylo tedy potřeba určit způsob, jakým bude probíhat samotná detekce polohy sledované osoby. Dále zvolit vhodný hardware, tedy použitého robota a potřebné senzory jako kameru a laserový dálkoměr. A především vytvořit kompletní systém a program, který bude s využitím dat ze senzorů řídit robota tak, aby sledoval člověka za požadovaných podmínek.

Pro měření polohy sledovaného člověka byla v tomto případě zvolena metoda detekce značky umístěné na sledovaném objektu. Konkrétně byl využit program WhyCon, který pracuje na principu detekce kruhové značky v obrázku pořízeném kamerou.

Vzhledem k tomu, že se předpokládá využití sledování osob spíše ve venkovním prostředí, byl vybrán robot Pioneer 3-AT. Je to robot na kolech se smykovým řízením o rozměrech přibližně 0,5 x 0,5 metrů. Robot je schopen převážet veškeré další komponenty potřebné k fungování sledovacího algoritmu. Tím jsou myšleny doplňkové senzory a řídicí počítač.

Díky požadavku na kopírování předchozí trajektorie sledovaného člověka se nepředpokládá velká pravděpodobnost kolizí s prostředím. Přesto byla na sledovacím robotu použita metoda pro bezpečný průjezd v blízkosti okolních objektů. K tomu slouží laserový dálkoměr, který monitoruje prostor před robotem.

Kapitola 2

Určování polohy člověka

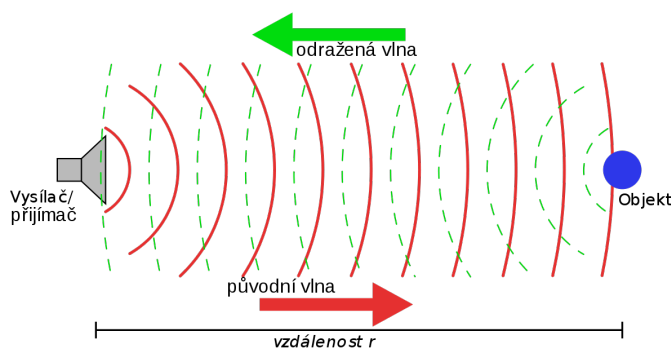
Základem správné funkce celého systému je správná detekce a určení polohy sledovaného člověka. Pro určování polohy se dnes používá mnoho různých metod pracujících na rozdílných principech. Všechny však mají společný cíl a to je co nejpřesnější určení polohy a v případě 6DOF (6 stupňů volnosti) lokalizace i natočení sledovaného objektu. Sledování může probíhat například ve 2D nebo 3D. Dále se využívá ještě určování natočení sledovaného objektu. Natočení se obvykle vyjadřuje ve třech osách.

Aby bylo sledování polohy co nejefektivnější, mělo by probíhat v reálném čase, tedy s dostatečnou frekvencí určování polohy. Pokud je tato podmínka splněna, je možné na základě získaných dat rekonstruovat celou trajektorii pohybu sledovaného objektu. Další výhodou funkce v reálném čase je to, že lze na základě již zpracovaných dat předpovídat budoucí polohy sledovaného objektu. Tato metoda se nazývá „Point of interest“, neboli bod zájmu. Jejím využitím lze ještě více zrychlit zpracování dat.

Vzhledem k tomu, že se určování polohy využívá ve všech robotických systémech, je kladen velký důraz na co největší přesnost. Existuje mnoho způsobů určování polohy, které se liší fyzikálním principem na kterém pracují. Je také samozřejmé, že různé metody se uplatňují v různých aplikacích. Každá metoda je tedy více či méně vhodná pro daný typ úlohy. Některé základní principy budou vysvětleny v následujících kapitolách.

2.1 Akustické systémy

Akustické systémy [1], neboli sonary, využívají k detekci objektů šíření zvuku. Sonarový systém sestává z vysílací a přijímací části s akustickými měniči. Nejčastěji se využívá ultrazvukový sonar. Zdroj zvuku vysílá signál, který se volně šíří prostorem. Pokud narazí na nějaký objekt, dojde k odrazu signálu a tento odražený signál je poté zachycen přijímačem. Podle doby, za kterou se vyslaný signál vrátí zpět se určuje vzdálenost a směr objektů. Aby se zvýšila efektivita této metody, používá se často celá soustava vysílačů a přijímačů.



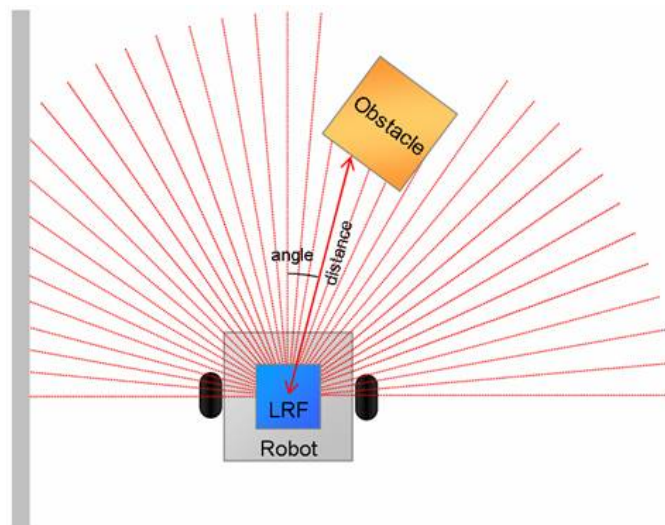
Obrázek 2.1: Princip funkce sonaru, převzato z: [8]

Hlavní nevýhodou je relativně malý dosah z důvodu útlumu ultrazvuku ve vzduchu. Většinou jde pouze o jednotky metrů. Dosah závisí na kvalitě a výkonu použitých komponent a především na okamžitých podmínkách v okolním prostředí. U malých zařízení vhodných pro roboty však bývá výkon a tedy i dosah omezený. Tato zařízení jsou také náchylná na rušení. V robotice se tedy často využívají pro detekci překážek na poměrně malou vzdálenost (přibližně do 5 m), kde je pravděpodobnost chyby únosná.

2.2 Laserové systémy

Další v robotice často využívanou metodou je určování polohy pomocí laserového dálkoměru. Princip tohoto zařízení je podobný jako u ultrazvukového sonaru v předchozí kapitole. Místo zvukového signálu se ale využívá elektromagnetického záření, konkrétně infračerveného záření (případně červeného laseru). Zařízení opět vysílá signál do okolí a z přijatého odraženého signálu určuje polohu předmětů.

Využití laserových měřících systémů, neboli lidarů, je v robotice často



Obrázek 2.2: Využití laseru pro detekci okolních překážek, převzato z: [9]

výhodnější než využití akustických zařízení. U srovnatelných systémů má laser díky malému rozptylu paprsku podstatně větší dosah a přesnost, a je také méně náchylný na rušení. Díky vyšší rychlosti šíření světla může také pracovat s vyšší opakovací frekvencí jednotlivých měření. Nevýhodou obou systémů je ale to, že je nelze zaměřit na konkrétní bod nebo objekt. Sledují vždy celou oblast, ve které detekují všechny přítomné objekty. Narozdíl od sonaru je však lidar úzce zaměřen ve vertikálním směru, kde vysílá pouze jeden paprsek. Oba systémy se nejčastěji využívají pro detekci překážek v okolí robotů a ne ke sledování konkrétního cíle.

2.3 Systémy zpracování obrazu

Systémy zpracování obrazu využívají k detekci objektů elektromagnetické záření v oblasti viditelného světla. Proto se hojně využívá nejrůznějších kamer. Někdy však může tato oblast zahrnovat i zpracování infračerveného záření, což nám umožňují některé speciální kamery. K určení polohy objektu je tedy v tomto případě nezbytné zpracování obrazu a detekce sledovaného objektu v něm. Na základě principu detekce sledovaného objektu v obrazu můžeme tyto systémy rozdělit do tří kategorií.

- Zařízení, která k detekci nevyužívají žádné další značky umístěné na objektu a opírají se výhradně o tvar, strukturu a další přirozené vlastnosti povrchu objektů.

- Zařízení využívající pasivní značky, tedy značky, které nevydávají vlastní světlo a pouze odrážejí světlo z okolí.
- Zařízení využívající značky aktivní, které mají vlastní zdroj světla.

Všechny tyto kategorie mají své výhody a nevýhody. Největší výhodou použití značek, ať už aktivních či pasivních, je to, že do těchto značek lze často zakódovat další informace. Můžeme tak například odlišit více sledovaných objektů tím, že do jejich značek zakódujeme jejich identifikaci. Naopak výhodou systémů, které značky nevyužívají je to, že sledované objekty nemusí být předem nijak označeny.



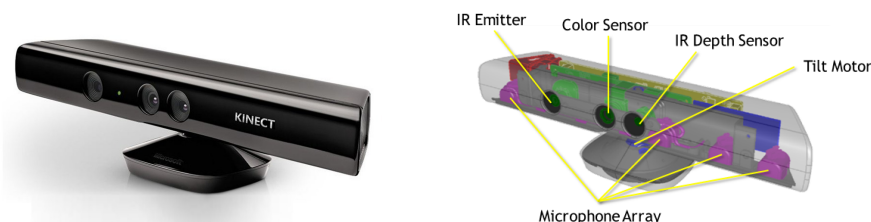
Obrázek 2.3: QR kód je typ pasivní značky používaný k zakódování informace, převzato z: [10]

Přesnost a dosah těchto zařízení, závisí převážně na vlastnostech použité kamery. Důležitým faktorem je především rozlišení. Dále také ohnisková vzdálenost. Záleží ale také na intenzitě osvětlení scény, jenž implikuje expoziční dobu kamery. V některých případech dochází k využívání většího počtu kamer zároveň. Důvodem může být například zvýšení přesnosti, nebo také pokrytí většího prostoru. Toto bývá často důležité v soustavách více robotů - robotických hejnech (swarm), která například udržují předem stanovenou formaci.

■ 2.3.1 Systémy zpracování obrazu bez značek

Tato skupina systémů nevyužívá k detekci objektů žádné další pomůcky. Vyhledávání předmětů se tak provádí pouze na základě tvaru, či struktury povrchu detekovaného objektu. Nejčastěji se používá kombinace kamer pracujících ve viditelném spektru, popřípadě infrakamer s vlastními zdroji infračerveného záření. Sledování okolí ve vzdáleném infračerveném spektru (odpovídá vlnové

délce přibližně $10 \mu\text{m}$) může ulehčit rozlišování předmětů. Lze snadno odlišit předměty s různou teplotou. Proto se tyto systémy nejčastěji využívají pro detekci a sledování lidí. Lidské tělo si udržuje téměř konstantní teplotu přibližně 36 stupňů celsia, což je obvykle teplota vyšší, než mají ostatní okolní předměty.



(a) : Zariadení Kinect, převzato z: [11]

(b) : Senzory použité v zařízení Kinect, převzato z: [12]

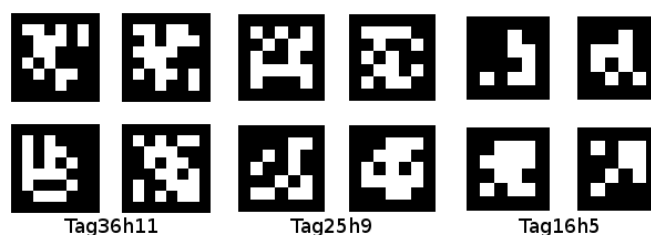
Obrázek 2.4: Na obrázcích jsou zvýrazněny: infračervený vysílač a hloubkový senzor, barevná kamera, soustava mikrofonů a otáčecí motor

Zřejmě nejznámějším zařízením, které využívá tento typ detekce je KinectTM od firmy MicrosoftTM. Je to zařízení původně vyvíjené pro herní konzole a počítače. Díky jeho dostupnosti se ale začalo využívat i v dalších oblastech, mimo jiné i v robotice. KinectTM dokáže detekovat člověka a při ovládání počítače nebo herní konzole je schopen rozeznávat předem definovaná gesta a obličeje a tím rozlišovat jednotlivé uživatele. Kromě základní funkce detekce a sledování pohybů člověka se KinectTM používá také k mapování okolí.

2.3.2 Systémy zpracování obrazu s pasivními značkami

Skupina systémů využívajících pasivní značky je v robotice poměrně hodně rozšířená. Hlavními pozitivy jsou poměrně nízké náklady. Tyto systémy většinou nevyužívají žádné vlastní zdroje světla a spoléhají se pouze na okolní osvětlení. Proto je potřeba, aby toto osvětlení bylo dostatečné, protože může mít velký vliv na schopnost systému značky detekovat a přesně určit jejich polohu v obraze. Výhodou jsou i samotné pasivní značky. Používají se značky různých tvarů i velikostí, které jsou méně či více náročné na detekci. Složitější značky však s sebou přinášejí další možnosti jako například dodatečné informace o natočení značky v prostoru. Užitečné jsou také značky s možností zakódování informace přímo do samotného obrázku značky. Ty bývají nejčastěji rozpoznávány podle tvaru a kontrastu barvy a pozadí. Většinou jsou pouze černobílé. Právě proto bývají nenákladné a nenáročné na výrobu. Cena těchto systémů tedy často závisí pouze na použité kameře.

Mezi systémy pracujícími na tomto principu patří například programy



Obrázek 2.5: Pasivní značky využívané programem AprilTag, převzato z: [13]

AprilTag [2] nebo WhyCon [3][4][5]. Program WhyCon byl využit i v tomto projektu, proto je mu věnována samostatná kapitola. Program AprilTag využívá čtvercové černobílé značky, které připomínají známé QR kódy. AprilTagy ale nejsou tak složité a obsahují také menší množství informace, nejčastěji od 4 do 16 bitů. Díky tomu jsou však hodně robustní, poměrně snadno rozpoznatelné a mohou být také detekovány na velkou vzdálenost. AprilTagy existují v různých verzích, které se liší svou složitostí a možným množstvím zakódovaných informací. Složitější verze se používají například v robotických hejnech s velkým počtem spolupracujících robotů. Velkou výhodou AprilTagů je to, že kromě samotné vzdálenosti a polohy ve 3D prostoru poskytují také informaci o natočení ve třech osách. Program AprilTag dokáže detekovat několik jednotlivých značek zároveň a díky dodatečným informacím je také dokáže přesně odlišit. Pro funkci tohoto systému stačí i webkamera tak, jak bývá používána v přenosných počítačích. Kvalitnější kamery s vyšším rozlišením ale poskytují lepší výsledky z hlediska přesnosti detekce. Lze tak výrazně zvýšit nejen dosah systému ale také spolehlivost rozpoznání značek a správné určení polohy.

■ 2.3.3 Systémy zpracování obrazu s aktivními značkami

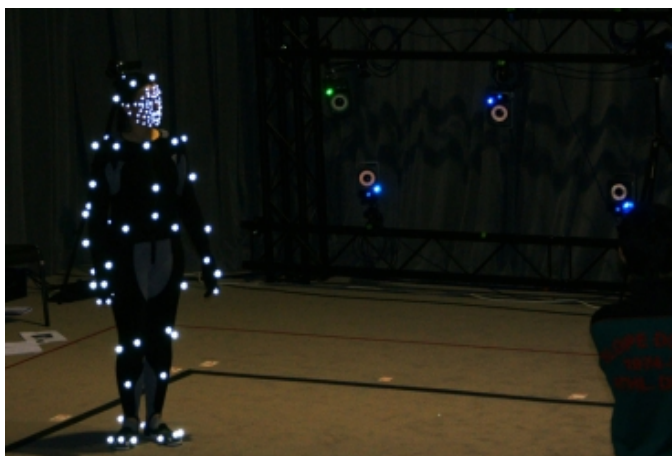
Tato skupina systémů využívá jako značky samostatné zdroje záření. Nejčastěji se opět využívá viditelného nebo infračerveného záření. V dnešní době se hojně používají různé světlo emitující diody. Značka se může skládat buď z jednoho bodového zdroje světla, nebo z několika bodů tvořících definovaný obrazec. Na složitosti značky opět závisí robustnost systému a také množství poskytovaných informací. Výhodou těchto zařízení je nezávislost na okolním osvětlení a menší náchylnost na rušení. Naopak nevýhodou může být složitější výroba značek a nutnost samostatného zdroje napájení, což se odráží na výrazně vyšší ceně oproti pasivním značkám.



Obrázek 2.6: Aktivní značky využívané systémem Certus, převzato z: [14]

■ 2.3.4 Motion capture

Motion capture, neboli systémy snímání pohybu, slouží k detailnímu zachycení reálných pohybů sledovaných objektů a převodu na jejich digitální model. U těchto systémů se využívá velké množství značek, které jsou detekovány zároveň. To se řeší rychlým sledováním jednotlivých značek a využitím kinematického modelu objektu. Uvedená technologie se hojně využívá například ve filmech nebo počítačových hrách. Vytvoření digitálních modelů postav umožňuje jejich zasazení do uměle vytvořeného světa, ale přitom lze zachovat reálnost pohybů skutečných herců. Hojně se také využívá zachycování mimiky, tedy pohybů obličeje. Při aplikaci této metody je na herce nebo předměty umístěno množství značek, které označují důležité body na objektech (u lidí například klouby a podobně). Jednotlivé body jsou poté v počítači propojeny s jejich digitálními obrazy.

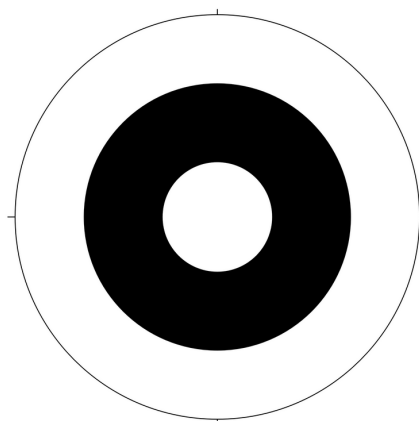


Obrázek 2.7: Detekce značek na obleku pro motion capture, převzato z: [15]

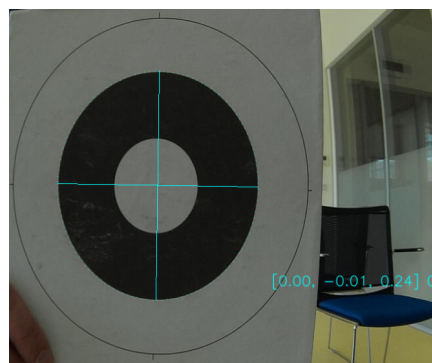
Významným producentem těchto systémů je firma ViconTM, která se výrobou zařízení pro snímání pohybu zabývá již od roku 1980. Její produkty využívají pro zachycování pohybů vysoce reflexní pasivní bodové značky v infračervené oblasti. Tyto systémy se zaměřují jak na snímání obličeje tak na snímání celého těla. Firma vyvíjí i speciální kamery s vlastními zdroji infračerveného záření určené pro použití v kombinaci se značkami.

2.4 WhyCon

Program WhyCon patří mezi systémy zpracování obrazu využívající pasivní značky. Tento program je volně dostupný k použití. Jeho hlavní předností je poměrně snadná instalace i používání. WhyCon je určen pro systémy využívající unixového prostředí. Po instalaci programu postačí připojit téměř jakoukoli kameru schopnou propojení s počítačem a systém je připraven k použití. Nejsou vyžadovány žádné dodatečné senzory nebo zařízení. Program lze využívat i na běžném počítači s průměrným výkonem. Vzhledem ke zmíněným vlastnostem je zřejmé, že ve výsledku závisí jak cena tak přesnost a spolehlivost WhyCon systému pouze na použité kameře a počítači. Vyšší výpočetní výkon je zapotřebí zejména v případech, kdy je potřeba detekovat větší množství značek najednou.



(a) : Značka používaná systémem WhyCon.



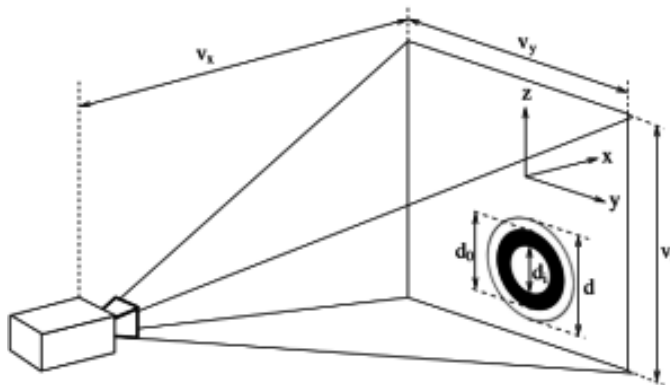
(b) : Úspěšně detekovaná značka.

Značky používané tímto programem mají podobu dvourozměrného obrazu. Obraz se skládá z bílého kruhu který je ohraničen černým mezikružím a dále ještě jedním bílým mezikružím. Přesné rozměry značky ani poměry jednotlivých částí nejsou fixní. Lze užít značku libovolné velikosti nebo například měnit poměry černých a bílých částí. Zvolené rozměry je třeba zadat do programu v podobě vstupních parametrů. Co se týče samotné technologie výroby značky, stačí ji vytisknout na jakékoli tiskárně. Pro správnou detekci

je však vhodné zafixovat značku na tvrdou podložku, aby nedocházelo k deformaci. Pokud se značka zdeformuje, může dojít ke zkreslení parametrů a naměřené údaje nemusí být správné.

Samotný program WhyCon je k dispozici v několika různých verzích, které se liší v poskytovaných funkcích. Každá verze byla vyvinuta pro konkrétní aplikaci, přičemž v této práci byla využita základní verze WhyCon-ROS. Program je možno kompilovat jako sdílenou knihovnu pro ROS (Robot Operating System), ale může pracovat i samostatně. V této práci byla využita samostatná verze. Tato verze umožňuje použití několika základních funkcí. Především lokalizaci značek ve 2D nebo 3D prostředí, přičemž je možné i nastavení vlastních os. Dále je možné využít program k detekci značek ve videozáznamu nebo přímo v záběrech přenášených z kamery. Pokud je program využíván v real-time aplikaci, dokáže standardně zpracovat 30 FPS (snímků za sekundu), což je maximální počet u běžných kamer. WhyCon zároveň ukládá zpracovávaný videozáznam k pozdějšímu využití.

Samotná detekce značky v programu probíhá tak, že se nejprve prohledává celý obrázek a vyhledávají se černé pixely. Pokud je nalezen černý pixel, prohledá se i jeho okolí, až je zkompletována celá ohraničená oblast. Dále se testuje, zda tato oblast odpovídá značce, tedy černému mezikruží. Toto ověření se provádí pomocí několika výpočtů. Například výpočtem zaoblení nalezeného obrazce a porovnání s předpokladem. Pokud je potvrzena detekce značky, opakuje se tento krok ještě pro vnitřní bílý kruh značky. Je-li i druhý krok úspěšný, je značka označena jako správně rozpoznána. Když je značka v obrázku rozpoznána, zpracování dalšího snímku využívá POI v okolí výskytu předchozí značky. Tím je omezena výpočetní náročnost postupu.



Obrázek 2.9: Geometrie operačního prostoru programu WhyCon, převzato z: [3]

Program zároveň automaticky upravuje i prahovou hodnotu pro rozpoznání černých a bílých pixelů. Pokud při daných hodnotách značku nerozpozná, tak hodnoty postupně upravuje. Navíc u značek, které již byly detekovány, si program pamatuje jejich prahovou hodnotu. Toto je výhodné například při

sledování více značek, které nejsou stejnoměrně osvětleny.

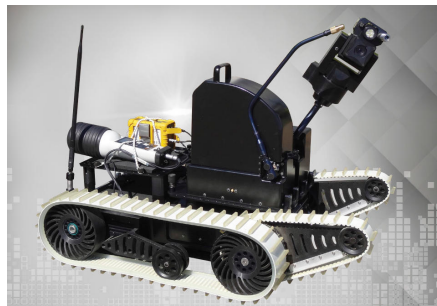
Určení souřadnic značky v prostoru program provádí porovnáváním velikosti značky zjištěné z obrázku s parametry zadanými na vstupu programu. Zároveň se provádějí i další výpočty některých parametrů kružnice, potažmo elipsy, do které se kružnice promítá při natočení. Díky tomu je možné detekovat i značky, které nejsou v obrázku zachyceny kolmo ke kameře.

Kapitola 3

Pozemní roboti a jejich využití při sledování člověka

Roboty primárně rozdělujeme na mobilní a stacionární podle toho, zda mohou nebo nemohou měnit svou pozici v prostoru. Stacionární roboti se nejčastěji používají v průmyslu. Většinou mají podobu pohyblivého ramene, které má na konci určitý typ chapadla, aby robot mohl manipulovat s předměty. Pohyblivé roboty pak můžeme dále rozdělit na pozemní a létající. Pozemní roboti se často používají k převážení nákladů například ve skladištích. Naopak létající roboti se dobře uplatňují například při natáčení nebo pořizování fotografií ze vzdušné perspektivy. Proto se v poslední době stali létající roboti velmi populárními mezi širokou veřejností.

Kromě tohoto základního rozdělení bychom mohli roboty dále kategorizovat podle toho, zda pracují pouze na základě předem pevně daného programu, nebo zda reagují na své okolí vnímané pomocí senzorů. Pro sledování okolí lze využít mnoho typů senzorů pracujících na různých principech. Některé z takových senzorů byly popsány v předchozí kapitole. Dokonce i roboti, kteří sami senzory nevyužívají, bývají často chráněni takzvanou světelnou závorou. To je vlastně druh laserového senzoru, který při přerušení paprsku okamžitě zastaví práci robota. Tento systém slouží k ochraně lidí, kteří by omylem vstoupili do pracovního prostoru robota v provozu.



(a) : Robot Cameleon s pásovým podvozkem, převzato z: [16]



(b) : Robot TurtleBot s diferenciálním podvozkem, převzato z: [17]

Obrázek 3.1: Příklady pozemních robotů.

3.1 Způsoby pohybu pozemních robotů

Tato práce se zabývá návrhem sledovacího algoritmu pro pozemního robota. Proto nebudou ostatní typy robotů dále zmiňovány. Samotnou kategorii pozemních robotů lze ovšem ještě dále rozčlenit do více menších skupin. Z hlediska vhodnosti využití pro aplikaci sledování člověka je významné zejména rozdělení podle způsobu pohybu robota. Nejčastěji používanými jsou roboti na kolech nebo pásech, přičemž tento způsob řízení lze dále rozdělit na smykové a nesmykové. Další skupinou jsou takzvaní kráčejíci roboti, kteří ke svému pohybu používají pohyblivé končetiny. Podvozek těchto robotů je obvykle tvořen jedním až čtyřmi páry končetin. V následujícím výčtu jsou uvedeny základní kinematické konstrukce robotických podvozků.

■ Nesmykové řízení:

Diferenciální pohon - Dvě kola jsou pevná a poháněná, další jedno nebo dvě kola udržují stabilitu podvozku.

Ackermanovo řízení - Dvě kola jsou pevná a poháněná, jedno přední řízené kolo je otočné.

Car-like řízení - Podobné jako ackermanovo řízení, ale přední řízená kola jsou dvě.

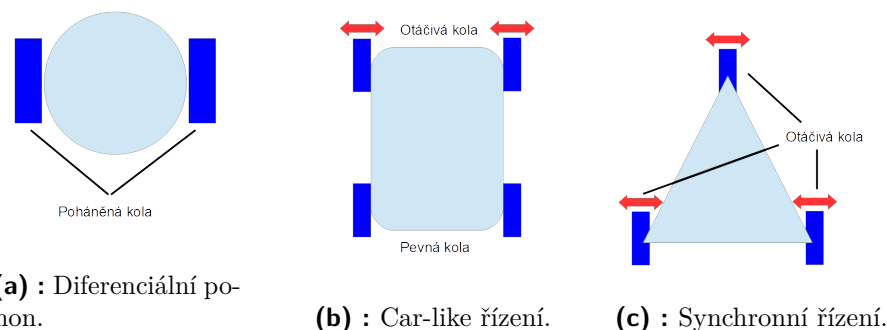
Synchronní pohon - Nejčastěji se používají tři kola. Každé kolo má dva stupně volnosti, takže se může otáčet i natáčet.

Všesměrová kola - Obvykle tři nebo čtyři kola. Každé kolo je schopné pohybovat se do všech směrů.

■ Smykové řízení:

Pásky - Ze dvou stran robota jsou umístěny pásové pohony podobně jako u tanku. Při zatáčení dochází ke smýkání pásů.

Spřažená kola - Pásky jsou zde nahrazeny spřaženými koly. Tato kola jsou poháněná, ale nemohou se otáčet.

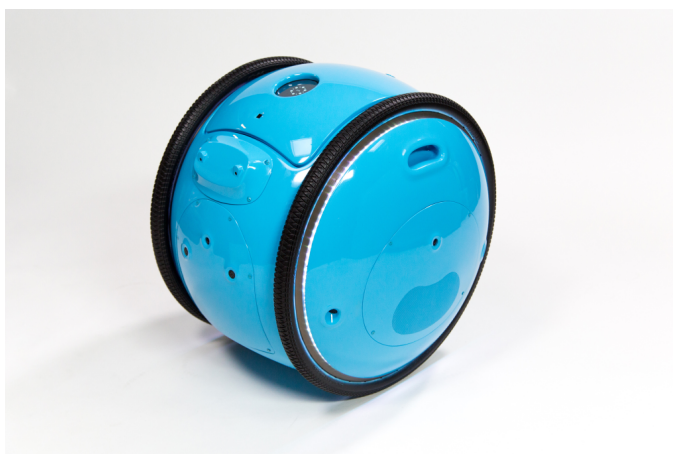


Obrázek 3.2: Příklady základních robotických podvozků.

■ 3.2 Roboti vyvinutí pro sledování člověka

Využití robotů, kteří jsou schopni sledovat člověka má v dnešní době velký potenciál. Asi nejlepší uplatnění takových robotů je při převážení nákladů. Transportní roboti mohou plnit například role nákupních tašek, ale mohou převážet i větší a těžší náklady. Tito roboti mohou být využíváni například armádními jednotkami k převážení těžké výzbroje nebo munice. Dobře by se uplatnili i ve velkých skladech. Dalším odvětvím, kde by tito roboti byli určitě užiteční, je zdravotnictví, kde mohou převážet zdravotnické přístroje nebo i samotné pacienty. Kromě využití pro transport předmětů lze sledovací roboty používat například pro mediální účely. Mohou například plnit role automatických kamer při natáčení filmů a podobně.

Podle toho, do jakého prostředí je sledovací robot určen, se samozřejmě volí i jeho konstrukce a senzory, které bude robot používat. Například pro malého robota pracujícího pouze uvnitř nemocnice stačí diferenciální podvozek s malými koly. Jako sledovací zařízení lze použít například optický systém s pasivními značkami, které budou dostatečné pro stálé vnitřní prostředí nemocnice. Naopak pro velkého armádního robota pracujícího na bojišti je vhodnější pásový podvozek, který je schopný zajistit spolehlivý pohyb v terénu. Místo pasivních značek se jistě více hodí aktivní, protože budou lépe detekovatelné v tmavých nebo prašných prostředích.



Obrázek 3.4: Robot Gita, převzato z: [19]

■ 3.2.2 ApriAttenda

Robot ApriAttendaTM[6] byl vytvořen firmou ToshibaTM. Jeho hlavním účelem je především sledování člověka jako takové. Takže může být využit například pro trvalý dozor dětí nebo naopak sledování starých nebo nemocných lidí. Zároveň dokáže převážet i lehké předměty. Robot má tvar dvou koulí umístěných nad sebou. Jeho speciální design má zajistit to, aby robot vypadal přátelsky a přívětivě. Pohyb těla zajišťuje dvoukolový podvozek, který může vyvinout maximální rychlost 4,3 km/h. Robot dokáže zároveň otáčet i hlavou, aby sledování člověka bylo plynulé a pokud možno nedocházelo ke ztrátě kontaktu.

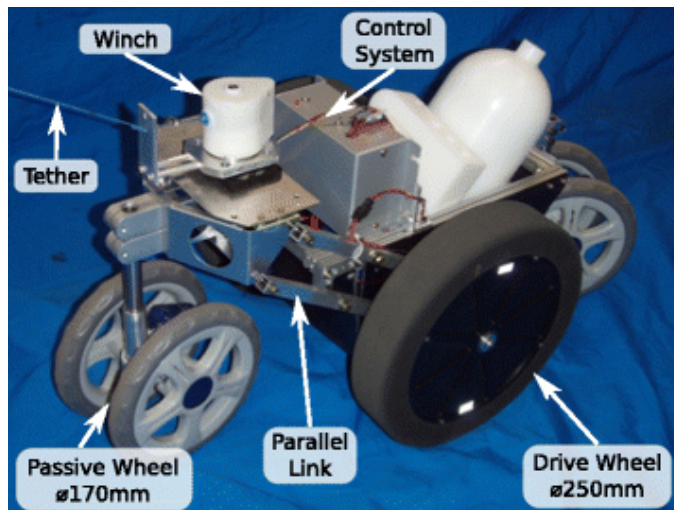


Obrázek 3.5: Robot ApriAttenda, převzato z: [6]

K detekci sledovaného člověka slouží dvě kamery. Algoritmus dokáže rozpoznat a zapamatovat si barvy a vzory na oblečení sledované osoby. Podle oblečení pak dokáže člověka odlišit od okolního prostředí. Robot je dále také vybaven laserovým a ultrazvukovým senzorem. Tyto senzory slouží k upřesnění dat o poloze sledovaného člověka a také pro detekci a vyhýbání se překážkám. Robot může být ovládán několika způsoby. Buď hlasovými příkazy nebo pomocí dotykového displeje na jeho zádech. Robot je také možné připojit bezdrátově k počítači.

3.2.3 Robot pro domácí kyslíkovou terapii

Domácí kyslíková terapie [7] je léčebná metoda, která se používá pro léčení lidí s chronickými dýchacími potížemi. Při této léčbě musí být nemocný neustále připojen na oxygenátor. Je zřejmé, že nutnost trvalého připojení na oxygenátor značně omezuje pohybové možnosti. Ačkoliv některé přístroje jsou přenosné, kvůli jejich váze může být jejich přenášení obtížné, zejména pro starší pacienty. Proto se skupina japonských vědců rozhodla navrhnout sledujícího robota, který by toto zařízení převážel. Jedním z hlavních kritérií byly co nejnižší náklady, protože samotná léčba kyslíkovou terapií je finančně náročná.



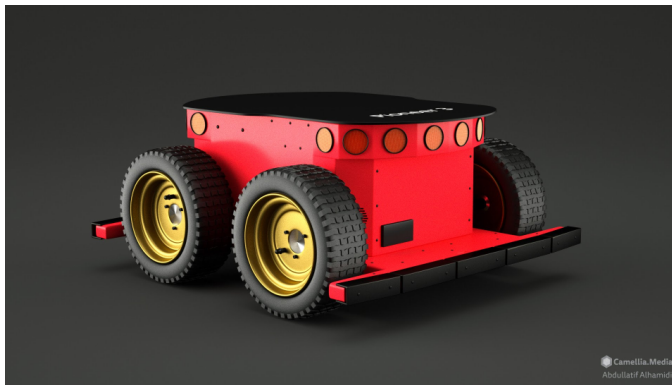
Obrázek 3.6: Robot pro domácí kyslíkovou terapii, převzato z: [7]

Robot má jednoduchou konstrukci s čtyřkolovým podvozkem, který má dvě říditelná a dvě podpurná kola. Tato konstrukce je dostatečná pro převoz kyslíkových přístrojů o váze přibližně 3 kg a dalších komponent jako například napájecích baterií. Pro detekci polohy sledovaného člověka byla využita velice jednoduchá metoda nazvaná Pseudo-Joystick control. Pacient je s robotem spojen pomocí vodícího vlákna. Robot dokáže díky speciálnímu navigáku

změřit odvinutou délku vodícího vlákna a úhel, pod kterým napnuté vlákno vychází. Z těchto údajů je schopen určit relativní pozici člověka a spočítat potřebné hodnoty pro správný pohyb.

3.3 Robot Pioneer 3-AT

Při výběru robota pro tuto práci bylo uvažováno několik hlavních požadavků. První z nich byl, aby byl robot schopen uvést všechny potřebné senzory a také počítač, který je nutný pro spuštění a kontrolu řídicího algoritmu. Další předpoklad byl, že robot bude provozován jak ve vnitřním, tak ve vnějším prostředí. Tomu také musí odpovídat jeho konstrukce.



Obrázek 3.7: Robot Pioneer 3-AT, převzato z: [20]

Po zvážení předchozích požadavků byl nakonec vybrán robot Pioneer 3-AT od firmy Omron Adept Technology. Tento robot je postaven na čtyřkolovém podvozku se smykovým řízením pohybu. Pohyb i otáčení robota se tak provádí pouze změnou otáček jednotlivých kol. Obě kola na jedné straně jsou vždy mechanicky spřažena a poháněna stejným motorem. Robot je už v základní verzi vybaven několika senzory, například ultrazvukovým sonarem. Tyto vestavěné senzory však nebyly v této práci využity. Řízení robota zajišťuje vestavěný základní počítač. Tento počítač je schopen vykonávat základní ovládací povely, jako je například již zmiňovaná změna otáček kol. Po připojení k tomuto počítači tak lze robota ovládat s pomocí volně dostupné knihovny ovládacích funkcí.

Robot Pioneer dokáže vyvinout rychlost až 0.8 m/s. Zároveň může převážet náklad až o váze 12 kg.

Kapitola 4

Návrh koncepce řešení

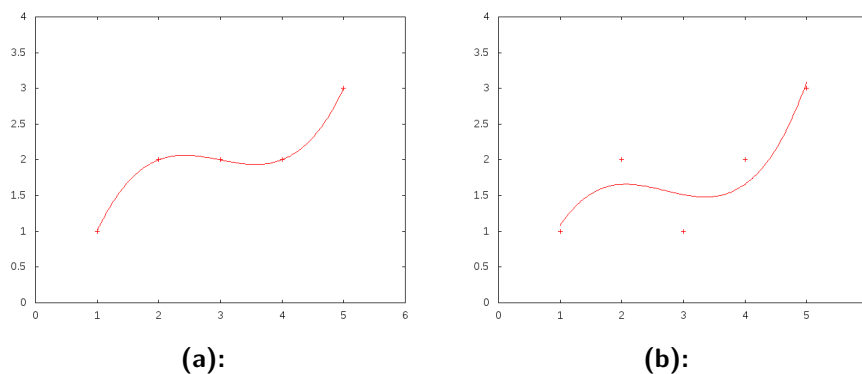
Cílem této práce bylo navrhnout sledovacího robota s ohledem na relativní jednoduchost výroby robota i řídicího programu. Hlavní motivací je samozřejmě nízká cena výsledného systému. Předpokládá se tedy využití malého množství senzorů a uplatnění veřejně dostupných programů. Tento přístup s sebou však přináší jistá omezení na funkce výsledného sledovacího systému. Především se nepředpokládá, narozdíl od některých dříve uvedených projektů, použití kombinace více lokalizačních systémů. To by sice snížilo riziko ztráty kontaktu mezi sledovanou osobou a robotem na minimum, ale výrazně by tím vzrostla náročnost i cena celého systému. Proto byl v práci použit pouze jediný lokalizační systém a to na principu optické detekce pasivní značky umístěné na sledovaném člověku.

Celkový návrh koncepce řešení je rozdělen do čtyř částí. První částí je způsob ukládání a správy jednotlivých bodů trajektorie sledovaného člověka. Druhá část řeší chování robota v nestandardních situacích. Další je metoda předcházení srážkám (collision avoidance). Třetí částí je návrh regulátoru pro řízení pohybů sledovacího robota.

4.1 Vytvoření a udržování sledované trajektorie

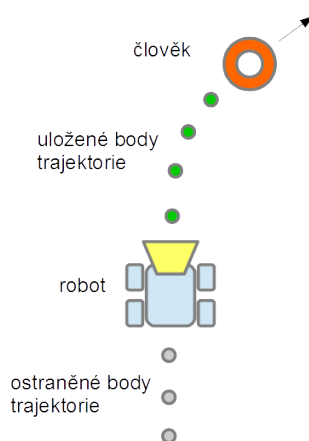
Vzhledem k požadavku na kopírování trajektorie sledovaného člověka je velmi důležité její zachycení a ukládání. Nejjednodušším způsobem je reprezentace trajektorie jako posloupnosti jednotlivých bodů. Tyto pozice mohou být

ukládány s různou hustotou a lze tedy ovlivnit vzdálenosti mezi jednotlivými body. Při využití této metody směřuje robot vždy pouze k nejbližšímu bodu trajektorie a další body v pořadí jeho pohyb neovlivňují.



Obrázek 4.1: Porovnání proložené křivky při změně souřadnic jediného bodu.

Další možností reprezentace trajektorie je případ, kdy jsou jednotlivé body prokládány křivkou. Výsledkem je spojitá čára, která původní trajektorii aproximuje. Proložená křivka nemusí nutně procházet všemi body. V obrázku 4.1 je vidět, že při změně souřadnic třetího bodu se odchylka proložené křivky od bodů výrazně zvýší. V některých případech, například v ostrých zatáčkách, většinou dochází k tomu, že proložená křivka prochází obloukem místo ostrého zatočení. V krajních situacích se tak může stát, že proložená křivka prochází překážkou, které se původní trajektorie vyhnula. Pohyb robota po této aproximační přímce je sice plynulejší než při sledování samostatných bodů, ale výpočet prokládané křivky je náročnější jak z hlediska programu, tak z hlediska nároku na výpočetní výkon.



Obrázek 4.2: Uspořádání typické situace během sledování člověka robotem.

V tomto projektu byl využit první přístup, tedy sledování samostatných bodů. Samotné získávání jednotlivých bodů trajektorie probíhá pomocí lokalizačního programu. V případě této práce pomocí programu WhyCon. Všechny

body trajektorie je potřeba ukládat ve správném pořadí. K tomu může v programu sloužit vhodná datová struktura, například matice, zásobník nebo fronta. Navíc je nutné, aby všechny body byly vztaženy ke stejné souřadnicové soustavě, jinak nebude výsledná trajektorie použitelná. Poté, co je zajištěno získávání a ukládání jednotlivých bodů trajektorie, může se robot po této trajektorii pohybovat. Body, kterými již robot projel, není potřeba dále udržovat a mohou být tedy z paměti vymazány, jak lze vidět v obrázku 4.2. Při využití toto postupu má tedy robot v paměti vždy uloženou kopii předchozí trajektorie sledované osoby. Tato trajektorie má počátek v současné pozici robota a končí v místě, kde byla sledovaná osoba naposled detekována.

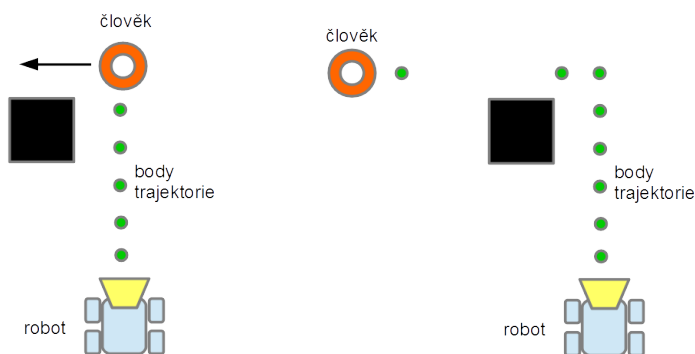
4.2 Řešení problémových situací

Během sledování člověka může nastat několik typů situací, které mohou způsobit chyby ve sledovacím algoritmu. Jsou to převážně situace, kdy robot nedokáže detekovat člověka ve svém zorném poli (zorným polem je myšlena oblast sledovaná kamerou). Ztráta kontaktu robota se sledovanou osobou může mít několik příčin, většinou však dojde k zakrytí (okluzi) člověka překážkou. Překážky mohou mít různé tvary i rozměry, je proto vhodné navrhnout sledovací algoritmus tak, aby většinu problémů dokázal vyřešit.

4.2.1 Malé překážky

Malé překážky v cestě znamenají pro robota teoreticky pouze minimální riziko. Za malou překážku můžeme považovat předměty o rozměrech relativně menších, než je sledovaný objekt (člověk). Pokud je překážka nižší než výška umístění značky, tak se člověk při jejím obcházení ze zorného pole robota neztratí. V takovém případě se trajektorie člověka stále ukládá do paměti a nenastává tedy problémová situace.

Pokud je překážka natolik vysoká, že zakryje sledovanou značku, tak robot nedokáže člověka za překážkou detekovat. Vzhledem k tomu, že uvažovaná překážka má malé rozměry, lze předpokládat, že zakrytí člověka nebude trvat dlouho a kontakt robota s člověkem bude obnoven. Proto je možné zastavit pohyb robota při ztrátě kontaktu se sledovanou osobou a počkat na opětovné navázání kontaktu. Poté, co je člověk znovu detekován, může robot pokračovat v pohybu.

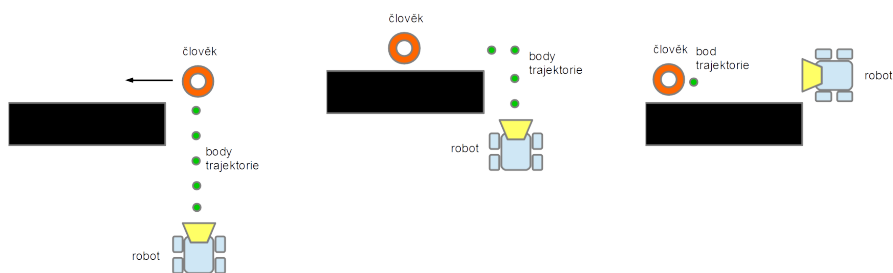


(a) : Situace před ztrátou kontaktu. (b) : Opětovné navázání kontaktu.

Obrázek 4.3: Příklad ztráty kontaktu člověka s robotem u malé překážky.

4.2.2 Velké překážky

Velké překážky o rozměru relativně o mnoho větším než sledovaný objekt (člověk) mohou způsobit sledovacímu robotu značné problémy. Ve chvíli, kdy nastane okluze, nelze předpokládat, že kontakt bude obnoven během několika málo sledovacích kroků. V takovém případě musí robot sledovat uloženou trajektorii až na její konec. Poslední uložený bod trajektorie by se měl nacházet v místě, kde došlo k okluzi. Z tohoto bodu by robot v ideálním případě měl sledovaného člověka opět lokalizovat.



(a) : Situace před ztrátou kontaktu.

(b) : Po ztrátě kontaktu robot pokračuje po trajektorii.

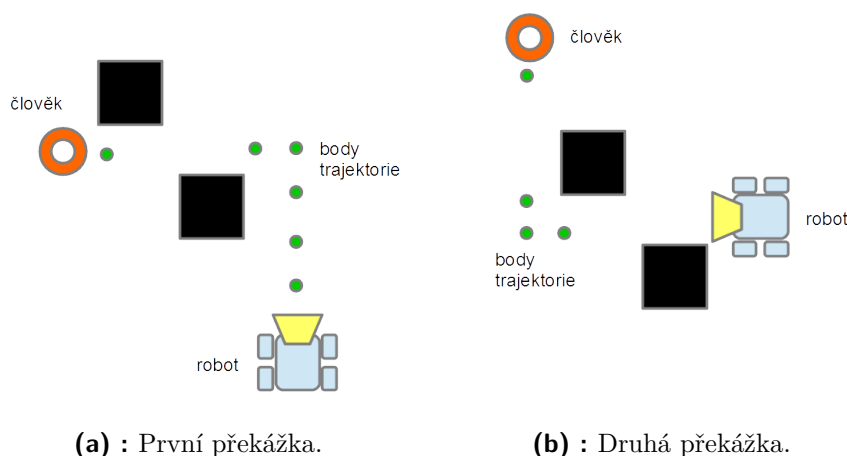
(c) : Opětovné navázání kontaktu.

Obrázek 4.4: Příklad ztráty kontaktu člověka s robotem u velké překážky.

Pokud robot dojde do posledního bodu uložené trajektorie a nemá sledovaného člověka v zorném poli, je možné, že je robot pouze natočen špatným směrem. Proto je vhodné po průchodu všemi body uložené trajektorie začít robotem, popřípadě sledovací kamerou, otáčet na místě. Tím se zvýší pravděpodobnost opětovného navázání kontaktu se sledovaným člověkem.

4.2.3 Kombinace více překážek

Při sledování člověka robotem představuje kombinace více překážek jeden z největších problémů. Dochází totiž ke značnému omezení funkce lokalizačního programu. Pokud jde o kombinaci malých překážek, je sice ztráta kontaktu mezi robotem a člověkem častější, ale algoritmus bude pravděpodobně pracovat správně.



(a) : První překážka.

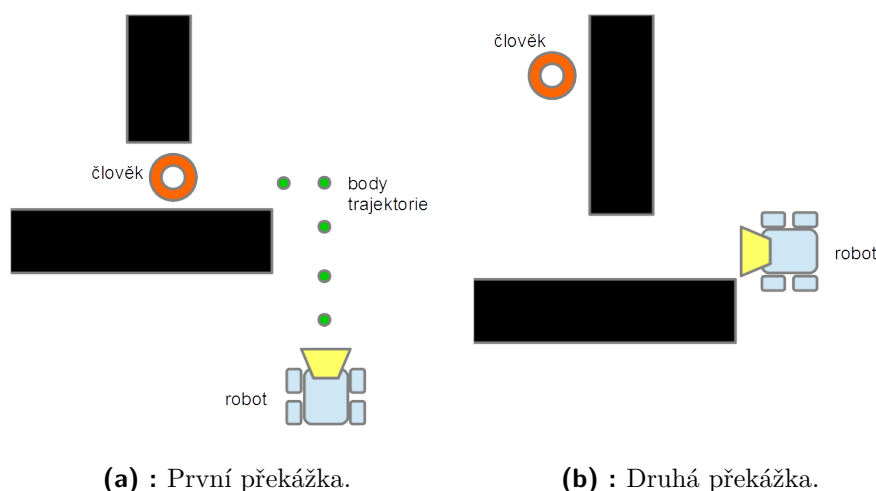
(b) : Druhá překážka.

Obrázek 4.5: Příklad situace při průjezdu oblasti s více malými překážkami.

Kombinace více velkých překážek může ale způsobit selhání algoritmu. Je totiž poměrně pravděpodobné, že dojde k trvalé ztrátě kontaktu, který už nemusí být úspěšně obnoven. K tomu postačí například i kombinace dvou velkých překážek. Může nastat následující situace.

- Člověk je zakryt první překážkou.
- Robot ztrácí kontakt s člověkem. Pokračuje tedy po dříve uložené trajektorii.
- Člověk je zakryt druhou překážkou.
- Robot dojde na konec trajektorie, ale protože už je člověk za další překážkou, nemůže obnovit kontakt.

Pokud nastane situace, kdy robot nemá žádnou další možnost jak obnovit kontakt se sledovanou osobou, musí kontakt obnovit sledovaná osoba tím, že se vrátí do zorného pole robota. Pro signalizaci neřešitelné ztráty kontaktu může robot například začít vydávat varovný zvukový signál, který sledovanou osobu upozorní na chybový stav.



Obrázek 4.6: Příklad situace při průjezdu oblasti s více velkými překážkami.

4.2.4 Problém rozlišení překážek

Při vzniku nestandardní situace v praxi nastává problém rozlišení překážek. Důvodem je, že robot nemá v paměti mapu okolí a má k dispozici pouze bezprostřední měření z lidarů určeného k vyhýbání se překážkám. Proto ve chvíli, kdy člověk zajde za překážku, má robot pouze informaci o tom, že značka nebyla detekována. Skutečnou velikost překážky však robot nemůže zjistit. Může se dokonce stát, že důvodem ztráty kontaktu není překážka.

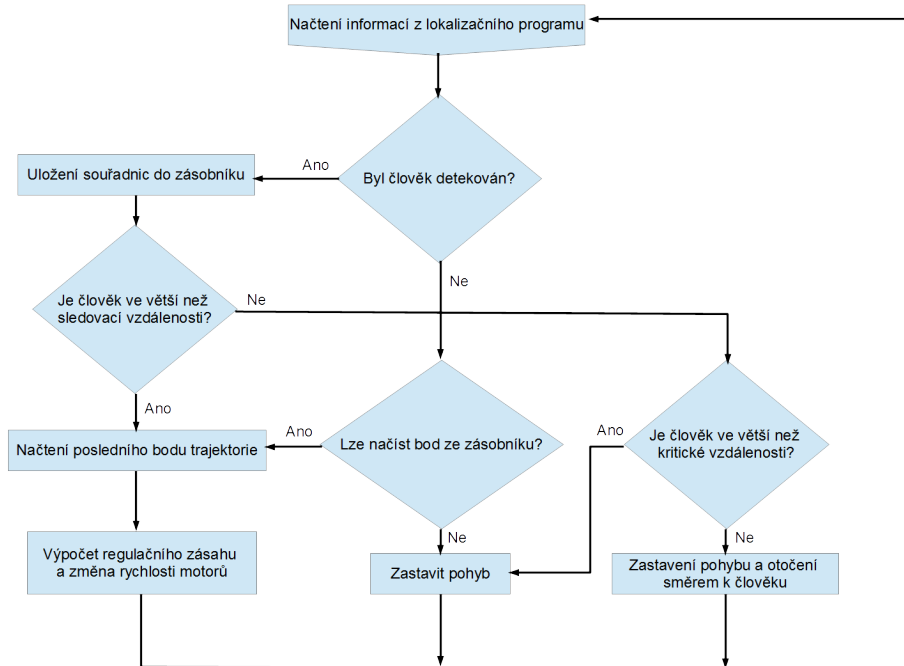
Při řešení ztráty kontaktu je tedy potřeba zvážit, zda je vhodné čekat na opětovné navázání kontaktu. To by znamenalo předpokládat, že okluze nastala pouze na malé překážce. Tuto skutečnost však nelze ověřit. Pokud tedy překážka nebude malá, ale velká, dojde ke zbytečné ztrátě času a zvýší se tím riziko, že robot nedokáže člověka detekovat ani poté, kdy dojde na konec uložené trajektorie.

Při implementaci algoritmu je tedy nutné zvolit preferovaný přístup. Buď se opřít o předpoklad výskytu malých překážek a zavést čekací doby předtím, než robot pokračuje v pohybu. Nebo automaticky pokračovat ve sledování uložené trajektorie tak, jako by všechny překážky byly velké. Oba přístupy jsou funkční, v různých situacích však mohou být různě efektivní.

Nevýhoda zavedení čekací doby spočívá v tom, že díky vzájemnému pohybu robota a člověka se může u jistých překážek stát, že se člověk dostane do zákrytu překážky opakovaně. V těchto případech by docházelo k opakovanému čekání na detekci a tedy zbytečnému zdržování pohybu sledovacího robota. Tyto případy by pak bylo vhodné ošetřit jinými postupy.

4.2.5 Konečný návrh algoritmu

V následujícím diagramu je zobrazen základní princip funkce navrženého sledovacího algoritmu. Byla zvolena metoda, kdy při okluzi robot předpokládá výskyt velké překážky a pokračuje ve sledování uložené trajektorie.

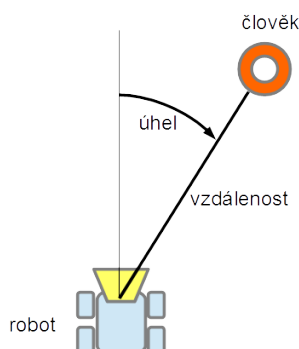


Obrázek 4.7: Celkový diagram rozhodovacího stromu robota.

4.3 Řízení pohonu robota

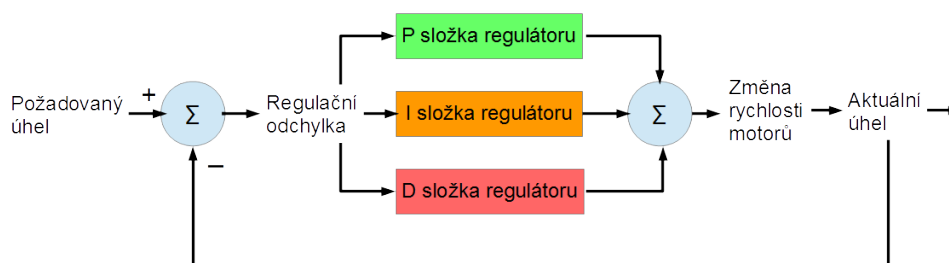
Při návrhu regulátoru robota je potřeba zvážit propojení se sledovanou trajektorií člověka. Díky tomu, že uložená trajektorie je reprezentována pouze jako posloupnost samostatných bodů, musí být řízení robota schopné tyto body zpracovávat. To v praxi znamená, že robot musí být připraven reagovat i na náhlé změny směru, protože předem neví, v jakém směru se bude nacházet další bod na trase. V extrémním případě se může stát, že za prvním bodem na trajektorii bude robot nucen zatočit o 90 stupňů.

Zároveň je nutné zohlednit požadavek na sledování člověka z předem zadané vzdálenosti. Pokud je rychlost robota vyšší než rychlost člověka, je vhodné řídit maximální rychlost v závislosti na vzdálenosti od sledovaného



Obrázek 4.8: Aktuální rychlosti motorů robota závisí úhlu člověka od přímého směru.

člověka. Rychlost robota v této práci byla však omezena na malou hodnotu, takže pohony jsou řízeny pouze s ohledem na úhlovou odchylku od aktuálně sledovaného bodu trajektorie. Tím se zajistí správný směr pohybu robota.



Obrázek 4.9: Schéma regulační smyčky PID regulátoru pro regulaci úhlové odchylky.

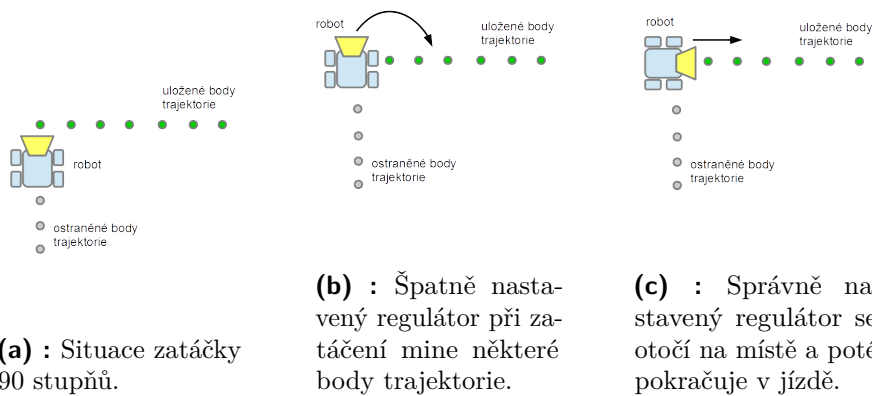
Pro splnění předchozích požadavků lze použít například jednoduchý proporcionální (P) regulátor. Ten zajistí schopnost robota reagovat i na náhlé změny. Je možné využít také proporcionálně-integrační (PI) regulátor. Ten sice dokáže úplně eliminovat regulační odchylku, ale může také zavést do systému nestabilitu v podobě překmitů. Vzhledem k experimentálnímu návrhu regulátoru v tomto projektu byl zvolen jednodušší P regulátor. Schéma PID regulátoru je na obrázku ???. Následující rovnice popisují výpočet akčního zásahu na motory robota. První je rovnice obecného PID regulátoru a druhá rovnice základního P regulátoru použitého v této práci, kde $x(t)$ je akční

veličina, $e(t)$ je regulační odchylka, r_0 je proporcionální zesílení, r_i je zesílení integrační složky, r_d je zesílení derivační složky a x_0 je výchozí hodnota akční veličiny.

$$x(t) = r_0 e(t) + r_d \frac{de(t)}{dt} + r_i \int_0^t e(t) dt + x(0)$$

$$x(t) = r_0 e(t) + x(0)$$

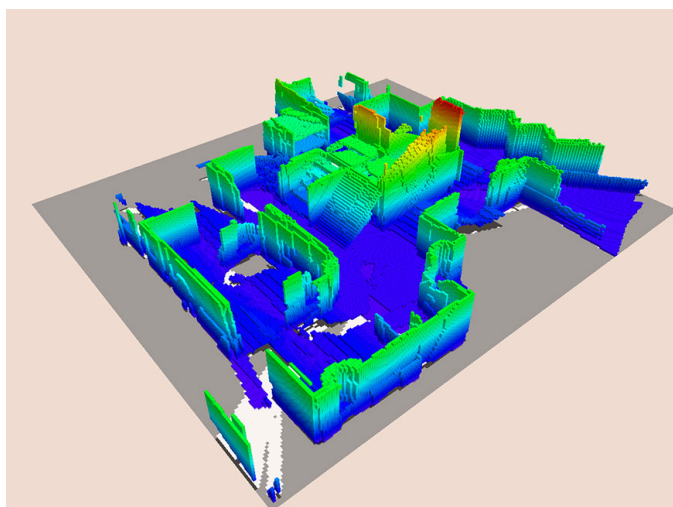
Pro případ příliš velkých změn ve směru trajektorie je vhodné přidat do regulátoru podmínku pro zastavení pohybu a pouhé otáčení robota ve správném směru. Tím lze zabránit chybám, kdy robot nedokáže dostatečně rychle zatočit a přejede tak sledovaný bod trajektorie, jak je ukázáno na obrázku 4.10. Robot by se poté musel vracet, nebo dokonce pouze kroužit okolo daného bodu bez reálné možnosti jeho dosažení. Takovéto chybové stavy je samozřejmě vhodné předem ošetřit.



Obrázek 4.10: Porovnání průjezdu zatáčkou 90 stupňů s regulátorem bez podmínky pro zastavení pohybu a s podmínkou pro zastavení pohybu.

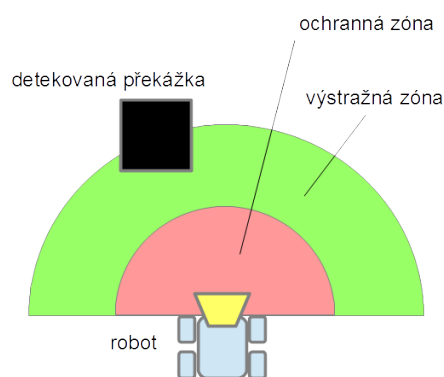
4.4 Collision avoidance

Funkce předcházení srážkám (collision avoidance) spočívá v detekci okolních překážek a vyhýbání se jim. Slouží tak především k ochraně robota a jeho okolí, protože při nárazu do překážky by mohlo dojít k poškození jak robota, tak samotné překážky. K detekci překážek se využívají různé druhy prostorové lokalizace, některé z nich byly popsány v kapitole 1. V této práci byl dle zadání použit laserový dálkoměr.



Obrázek 4.11: 3D mapování prostoru robotem, převzato z: [21]

Složitost a rozsah funkce předcházení srážkám se v různých aplikacích liší. U pokročilých zařízení se používá mapování celého okolí robota, přičemž tato mapa je uložena v paměti a robot tak ví o umístění, tvaru a velikosti každé překážky ve svém okolí. V případě robota, který sleduje člověka po stejné trajektorii, je však funkce předcházení srážkám pouze doplňková. Lze totiž předpokládat, že člověk se při svém pohybu překážkám rovněž vyhýbá. Detekce překážek se tak uplatní v případech, kdy se robot pohybuje například podél zdi nebo musí projet zúženým prostorem. Není tedy potřebné, aby si robot pamatoval celou mapu všech detekovaných objektů.



Obrázek 4.12: Rozdělení sledovaného prostoru na ochranou a výstražnou zónu.

V tomto případě má tedy robot pouze aktuální informace o směru a vzdálenosti objektů před sebou (za předpokladu, že laserový dálkoměr je umístěn v přední části robota). Překážkám, které jsou v dostatečné vzdálenosti od robota, není nutné se vyhýbat. Je proto potřeba stanovit hraniční vzdálenost

pro překážky, které již představují riziko srážky. Detekuje-li robot překážku ve vzdálenosti menší, než je stanovená hranice, musí se zachovat tak, aby do překážky nenarazil.

Vhodný způsob vyhýbání se překážkám je zásah do řídicího (sledovacího) regulátoru robota. Ve chvíli kdy robot detekuje překážku v kritické vzdálenosti, začne se místo úhlu k sledovanému bodu trajektorie regulovat úhel od nejbližší překážky. Záměnou směru otáčení jednotlivých motorů lze dosáhnout toho, že robot se bude od překážky vzdalovat místo aby se k ní přibližoval.

Pokud nastane případ, kdy robot detekuje hned několik překážek pod hraniční vzdáleností, je vhodné seřadit jednotlivé překážky podle nějakého kritéria. Robot se poté vyhýbá překážce, která podle daného kritéria představuje nejvyšší riziko. Detekované překážky lze zhodnotit například podle úhlu nebo vzdálenosti jejich výskytu.

Kapitola 5

Implementace řídicího algoritmu

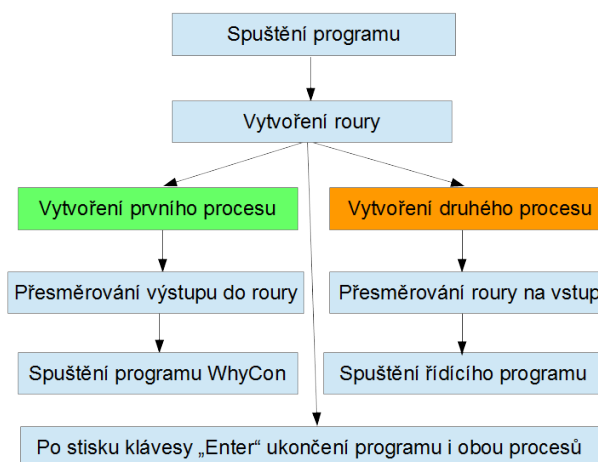
Jak už bylo dříve řečeno, tak pro tuto práci byl vybrán robot Pioneer 3-AT. Jako hlavní sledovací systém byl použit program WhyCon, tedy optický systém využívající standardní kameru a 2D pasivní značku. Robot byl navíc ještě vybaven laserovým dálkoměrem, který slouží k předcházení srážkám.

Pro účely tohoto projektu bylo nejprve nutné provést některé drobné změny ve sledovacím programu WhyCon. Tyto změny budou konkrétně rozebrány později. Další částí je hlavní řídicí program, který byl přímo implementován s využitím knihovny poskytované k robotu Pioneer. Tyto dvě hlavní části sledovacího systému jsou záměrně odděleny. Díky tomu je možné relativně snadno změnit například metodu používanou pro detekci člověka. Stejně tak je možné použít jiného robota. Vždy je tak ovlivněna pouze jedna část programu a není potřeba měnit celý koncept. Obě části sledovacího systému spojuje třetí část kódu, kde probíhá pouze spuštění dvou hlavních nezávislých programů.

5.1 Program pro správu jednotlivých procesů

Tento krátký program funguje jako spojovací část mezi programem pro detekci a lokalizaci člověka a hlavním řídicím programem robota. Po spuštění program nejprve vytvoří dva nové procesy. Dále vytvoří takzvaný „pipe“. Přes pipe přeměruje standardní výstup jednoho procesu na standardní vstup druhého procesu. Následovně se v prvním procesu spustí program WhyCon sloužící

k lokalizaci. Ve druhém procesu se spustí řídicí program robota. Díky pipe tedy proudí data ze standardního výstupu WhyConu na standardní vstup řídicího algoritmu robota, kde jsou dále zpracovávána. Princip je zobrazen v obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Základní princip funkce programu pro správu procesů.

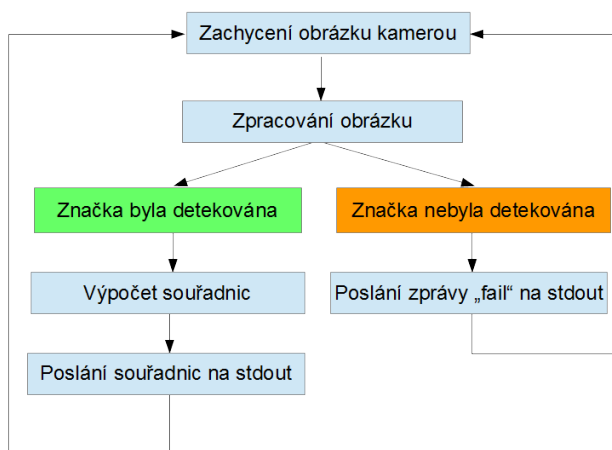
Tento krátký propojovací program slouží zároveň i k ukončení běhu sledovacího algoritmu. Celý systém lze jednoduše ukončit stisknutím klávesy „Enter“. Stisknutí této klávesy je v tomto kódu detekováno. Po stisku klávesy „Enter“ program nejprve ukončí oba podřízené procesy, tedy WhyCon i řídicí algoritmus. Následně dojde i k ukončení samotného spouštěcího programu. Tím je činnost celého systému dokončena.

5.2 Úpravy programu WhyCon

Jak bylo již dříve zmíněno, tak v této práci byla využita verze programu WhyCon-ROS. Program byl kompilován v samostatné verzi, nikoliv ve verzi pro systém ROS. Základní funkce programu byly již představeny v samostatné kapitole o tomto programu. Podrobný rozbor funkce nebo kódu programu WhyCon není předmětem této práce, proto zde budou uvedeny pouze programové změny provedené pro účely tohoto projektu.

Hlavním záměrem bylo, aby komunikace mezi WhyConem a hlavním řídicím programem probíhala přes standardní vstup a výstup, což je nejjednodušší typ komunikace. Tím dochází k oddělení lokalizačního programu od programu

pro řízení robota. V případě potřeby je tedy relativně snadné použít jiný lokalizační program než WhyCon. Proto byly všechny informační výstupy generované WhyConem přeměrovány na standardní chybový výstup. Do standardního výstupu se tedy nově posílají pouze dvě čísla, která označují souřadnice detekovaného objektu. Přestože se využívá 3D lokalizace, tak se posílají pouze dvě souřadnice, a to proto, že výšková souřadnice, tedy na ose z, se v řídicím programu nevyužívá. Pokud program značku nedetekuje, posílá na výstup zprávu „fail“.



Obrázek 5.2: Základní princip funkce programu WhyCon.

Další úpravou bylo přidání možnosti vypnutí ukládání záznamu video streamu během realtime lokalizace. Smyslem této úpravy je zvýšení výkonu. Ukládání videa zpomaluje program WhyCon, protože záběry nejsou později nijak použity. Tím není narušena možnost ukládání videa spustit, pokud mají být záběry využity například k pozdějšímu rozboru nebo vyhodnocení sledovacího algoritmu.

Poslední úpravou bylo přidání malého úseku kódu, který během testování sloužil pro kontrolu množství zpracovaných snímků za sekundu. Tyto nově přidané funkce tedy pouze měří čas jednoho proběhnutí detekční smyčky WhyConu. Po uplynutí jedné sekundy program vypíše počet zpracovaných snímků a případně i přepočítá na průměrnou hodnotu za celou dobu běhu programu. Tato funkce je však při standardním používání vypnutá. Vzhledem k tomu, že mezi WhyConem a řídicím programem robota nedochází k žádné synchronizaci, je nutné zajistit, aby počet zasílaných hodnot detekovaných souřadnic byl ideálně několikrát vyšší, než je počet hodnot, které řídicí program skutečně použije. K ověření této podmínky slouží během testování naznačené přídatné funkce.

■ 5.3 Řídicí program robota

Hlavní řídicí program využívá volně dostupné knihovny řídicí systém robotu Pioneer 3-AT. Pro přímou komunikaci s robotem a posílání příkazů jsou tedy využívány příslušné knihovní funkce. Samotný řídicí program byl napsán v programovacím jazyce C++.

Prvním krokem provedeným po spuštění programu je zahájení komunikace s robotem. Následuje inicializační část, kde se kontrolují základní funkce robota. Po potvrzení navázání komunikace a ověření operativního stavu robota se spouští samotný algoritmus pro sledování člověka. Tento algoritmus pracuje ve smyčce, dokud není přerušen zasláním signálu pro přerušování.

Algoritmus začíná načítáním souřadnic detekované značky posílaných na standardní vstup řídicího programu z lokalizačního programu. Používá se k tomu funkce *scanf*, jejíž návratová hodnota je rovna počtu bezchybně načtených a do paměti uložených položek. V tomto případě jsou očekávány dvě souřadnice, takže návratová hodnota by měla být 2. Tato hodnota se ukládá do proměnné a její hodnota rozhoduje o dalším kroku algoritmu.

■ 5.3.1 Souřadnice byly načteny správně

Pokud jsou souřadnice načteny správně, tak program pokračuje ve standardním postupu. To znamená, že sleduje člověka a pohybuje se ideálně po stejné trajektorii jako sledovaný objekt. Proto se jednotlivé dvojice souřadnic postupně ukládají do zásobníku, který je realizován datovým typem *vector*. Robot tedy sleduje pozice člověka, které si postupně ukládá a při pohybu nesměřuje přímo na současnou pozici člověka, ale na jednotlivé body uložené v zásobníku.

Aby byl robot schopen udržet si informace o své pozici v prostoru, a aby byly všechny body vztaženy ke stejné souřadnicové soustavě, přepočítávají se všechny přijaté souřadnice do globální soustavy. Za tuto soustavu je brána vnitřní souřadnicová soustava robota. Tato soustava má počátek v bodě, kde je robot spuštěn. Pokud se robot pohybuje, tak se jeho souřadnice automaticky přepočítávají s využitím odometrie. Robot tedy neustále zná svou polohu v prostoru a zná tedy i polohu všech uložených bodů.

Nejprve je nutné provést přepočítání souřadnic přijatých z lokalizačního programu do globální souřadnicové soustavy. Program WhyCon má totiž oproti vnitřní soustavě robota převrácenou osu y a pracuje v metrech, zatímco globální soustava robota pracuje v milimetrech. K přepočtu slouží následující rovnice.

$$\begin{aligned}x_{relativni} &= 1000 * x_{WhyCon} \\y_{relativni} &= -1000 * y_{WhyCon} \\d &= \sqrt{x_{relativni}^2 + y_{relativni}^2} \\ \varphi &= \text{atan2}(y_{relativni}, x_{relativni}) \\x_{globalni} &= \cos(\varphi) * d + x_{robota} \\y_{globalni} &= \sin(\varphi) * d + y_{robota},\end{aligned}$$

kde φ je úhel od přímého směru z pohledu robota a d je vzdálenost od robota.

Dále se kontroluje, zda nejsou nové souřadnice stejné, jako souřadnice posledního uloženého bodu. To zabraňuje ukládání duplicitní pozice. Za duplicitní jsou považovány body, které jsou méně než 30 cm od sebe. Pokud jsou body odlišné, souřadnice se uloží na konec zásobníku. Poté se ze zásobníku načte první bod, tedy ten který je uložen nejdéle.

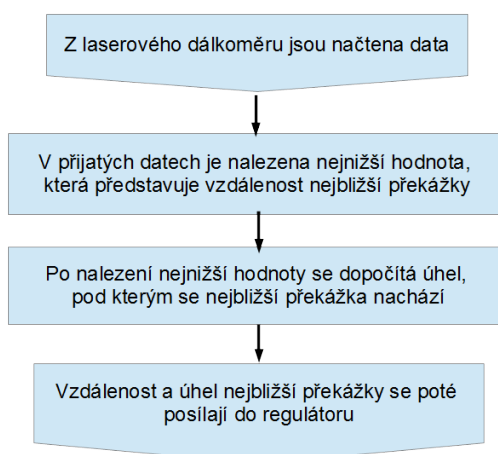
Po načtení dalšího bodu se postupuje podle toho, v jaké vzdálenosti od robota se v dané chvíli nachází sledovaný člověk.

- Pokud se člověk nachází ve vzdálenosti větší než je požadovaná sledovací vzdálenost, tak robot pokračuje v jízdě. To znamená, že se vypočítá vzdálenost a úhel od dalšího bodu na trase. Tyto hodnoty se pošlou do regulátoru, který vypočítá konkrétní hodnoty pro otáčky jednotlivých motorů. Pokud robot dojde na požadované souřadnice, načte se ze zásobníku další bod a robot pokračuje v jízdě. Bod se považuje za projetý, pokud je vzdálenost mezi souřadnicemi bodu a robota menší než 30 cm.
- V případě, že vzdálenost člověka od robota je menší než sledovací vzdálenost, ale větší než kritická vzdálenost, robot se zastaví. Uložené body zůstávají v paměti, případně se stále ukládají další. Robot se ale nehýbe a čeká, dokud se vzdálenost mezi ním a člověkem opět nezvětší.

- Poslední možností je, že se člověk k robotu přiblíží na takzvanou kritickou vzdálenost. Toto se může stát například pokud člověk obchází robota a vrací se zpět směrem odkud přišel. Pokud tento případ nastane, robot se pouze otáčí, aby neztratil kontakt s člověkem. Využívá přitom pouze údaje o aktuální pozici člověka, nikoliv údaje o bodech trajektorie.

Zároveň dochází k vymazání paměti dosud uložených bodů a k resetování souřadnicové soustavy. Robot se tedy nyní nachází opět v počátku souřadnic. Tento krok slouží k tomu, aby se eliminovala chyba ve vzdálenostech a souřadnicích, která se postupně akumuluje. Tato chyba vzniká především nepřesností odometrie robota, ale také drobnými nepřesnostmi lokalizačního algoritmu. Vymazání paměti s body trajektorie se provádí proto, že pokud se člověk přiblíží až na minimální vzdálenost, lze předpokládat, že se nejspíše vrací nebo chce provést nějaké změny ve směru chůze. Proto není potřeba, aby robot projížděl body ve směru, odkud se člověk vrátil.

■ Předcházení srážkám

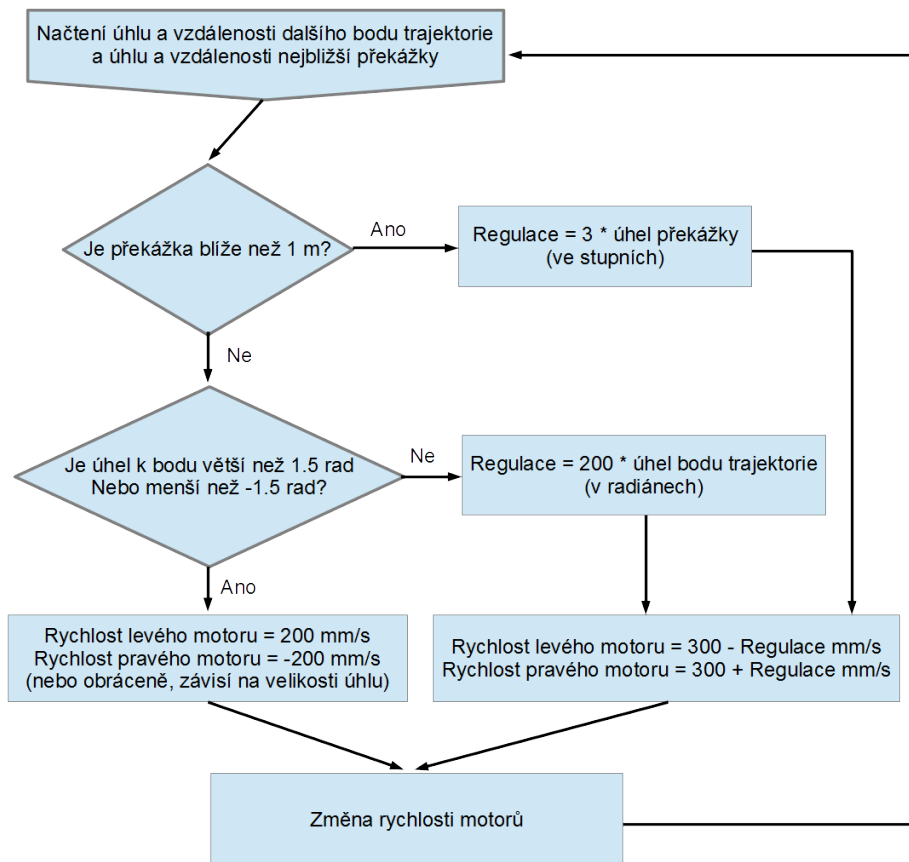


Obrázek 5.3: Základní princip funkce předcházení srážkám.

K detekci překážek se používá laserový dálkoměr. Tento dálkoměr kontroluje prostor 180 stupňů před robotem. Pokud je v cestě robota detekována překážka, provede se zásah do regulátoru tak, aby robot do překážky nenarazil. Collision avoidance je spuštěná pouze v případě, kdy je člověk ve větší než sledovací vzdálenosti a robot se pohybuje. Pokud robot stojí, je detekce překážek vypnutá, protože nehrozí nebezpečí, že robot do něčeho narazí. Navíc se vyhneme problému, kdy by robot detekoval člověka jako překážku a začal například couvat. V tom případě by totiž mohl narazit do překážky, která je za ním a nemůže být tudíž detekována.

Regulátor

V regulátoru se provádí výpočet rychlostí jednotlivých motorů. Využívají se k tomu informace o vzdálenosti a úhlu dalšího bodu na trajektorii od robota. Jsou zde také zohledněna data o vzdálenosti a úhlu nejbližší překážky získaná z laserového dálkoměru. Vypočtené hodnoty otáček se poté posílají do řídicí jednotky robota pomocí funkce *setVel*.

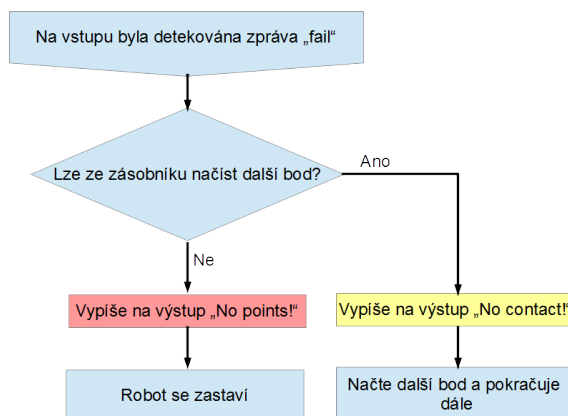


Obrázek 5.4: Funkce řídicího regulátoru robota.

5.3.2 Souřadnice byly načteny chybně

Pokud na vstup nepřišly z lokalizačního programu dvě souřadnice, lze předpokládat, že lokalizační program nezvládl detekovat značku. Pro ujištění o takovém stavu posílá WhyCon místo dvou souřadnic zprávu „fail“. Pokud

tedy řídicí algoritmus detekuje na vstupu zprávu „fail“, spouští se část kódu pro případ, že sledovaný člověk není v dohledu.



Obrázek 5.5: Chování robota v případě detekce zprávy „fail“.

V takovém případě robot vypíše na výstup informaci, že značka nebyla detekována. Dále se testuje, zda jsou v zásobníku ještě nějaké uložené body. Pokud ano, tak robot pokračuje, dokud nedojede na poslední bod v zásobníku. Pokud už žádné další body nezbývají, tak se vypíše informace, že nelze pokračovat ve sledování a robot se zastaví. Lokalizační program běží dále i poté co se robot zastaví a čeká, dokud není znovu navázán kontakt. Pokud dojde k tomu, že je značka znovu detekována, tak algoritmus pokračuje dále standardním způsobem.

Kapitola 6

Experimentální ověření algoritmu

Pro ověření správné funkce algoritmu je potřeba provést experimentální testování. Kromě toho lze také stanovit přesnost nebo případná omezení jednotlivých funkcí. Konkrétní experimenty prováděné s algoritmem pro sledování člověka navrženým v této práci byly rozděleny do několika částí. V první části bylo provedeno měření přesnosti a spolehlivosti lokalizačního programu WhyCon při použití konkrétního hardwaru využívaného v této práci. Ve druhé části se již testovaly funkce samotného algoritmu. Bylo navrženo několik experimentů, které mají ukázat, jak spolehlivý je sledovací algoritmus a jaké jsou jeho případné nedostatky.

6.1 Testování programu WhyCon

Při testování programu WhyCon byl ověřován vliv intenzity osvětlení okolního prostoru na přesnost lokalizace. Dále se zjišťovala vzdálenost, kdy je program ještě schopen rozpoznat značku. Měřily se i přesnosti souřadnic zjištěných při detekci. Konkrétní postupy měření i jejich výsledky jsou rozebrány v jednotlivých podkapitolách.

6.1.1 Použitý hardware

Při provádění experimentů s programem WhyCon byl použit následující hardware. Jako kamera pro zachycení okolí byla použita MOBIUS ActionCam. Kamera byla připojena do počítače pomocí rozhraní USB a využívána v módu webkamery. V tomto módu kamera poskytuje obraz v rozlišení 1280x720 pixelů s rychlostí 30 fps. Záběr kamery při použití speciálních širokoúhlých čoček je 132 stupňů.



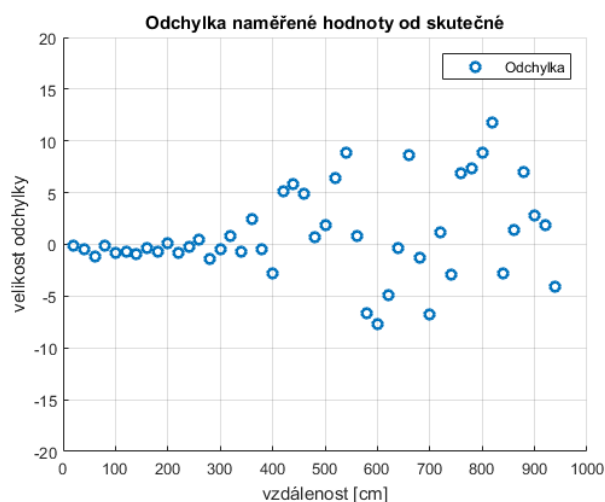
Obrázek 6.1: Akční kamera Mobius, převzato z: [22]

Pro spuštění programu a zpracování obrazu byl použit notebook Asus X555LB. Tento počítač disponuje dvoujádrovým procesorem Intel Core i5-5200U a operační pamětí 8GB. Operační systém Ubuntu 14.04 použitý při testování je založen na linuxovém jádře.

6.1.2 Měření přesnosti souřadnic

Cílem tohoto měření bylo zjistit průměrnou odchylku při určování souřadnic. Dále také maximální vzdálenost, kdy je program ještě schopen značku detekovat. Z důvodu přehlednosti výsledků a jednoznačnosti vypočtených odchylek byly měřeny pouze polohy s nulovou složkou y , tedy vzdálenosti od kamery na přímce s nulovým úhlem.

Při měření byla vždy provedena detekce značky, jejíž pozice se postupně vzdalovala od kamery. Počáteční vzdálenost byla 20 cm. Dále se značka oddalovala vždy o vzdálenost 20 cm. Takto se postupovalo až do doby, kdy program nebyl schopen značku detekovat. Intenzita osvětlení prostředí při tomto měření byla 703 Lux.



Obrázek 6.2: Hodnoty odchylek naměřených při osvětlení 703 Lux.

V grafu 6.2 je vidět, že všechny měřené odchylky kromě jedné mají hodnotu menší než 10 cm. Dokonce do vzdálenosti 400 cm mají všechny odchylky hodnotu menší než 3 cm. Průměrná hodnota všech měřených odchylek je 3,1 cm. Z grafu je rovněž zřejmé, že maximální vzdálenost, kdy program ještě dokázal detekovat značku, byla 940 cm.

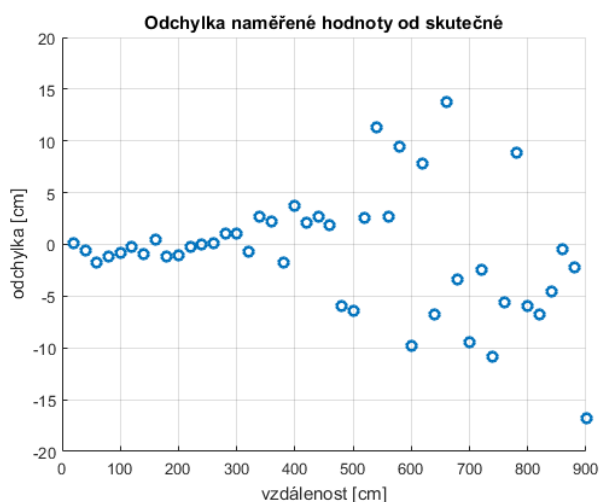
6.1.3 Vliv osvětlení na přesnost

Při tomto měření se postupovalo stejně jako v předchozím bodě. Došlo však ke změně intenzity osvětlení prostředí. Smyslem bylo porovnat zjištěné přesnosti a dosah lokalizačního programu za těchto zhoršených světelných podmínek. Hodnota intenzity osvětlení byla v tomto případě 25 Lux.

V grafu 6.3 je vidět, že oproti předchozímu případu překračují měřené odchylky hodnotu 10 cm. V tomto případě se maximální hodnota odchylky blíží 17 cm. Průměrná hodnota měřených odchylek je 4,05 cm. Maximální detekovaná vzdálenost je 900 cm.

6.2 Testování sledovacího algoritmu

Pro samotné experimenty s algoritmem pro sledování člověka bylo navrženo několik situací, které měly za úkol otestovat spolehlivost algoritmu. Algoritmus



Obrázek 6.3: Hodnoty odchylek naměřených při osvětlení 25 Lux.

musí být především schopen udržet kontakt se sledovanou osobou. Dále byla ověřována správná funkce Collision Avoidance. Robot by se měl vyhýbat překážkám, které jsou detekovány v jeho okolí. Při případné ztrátě kontaktu se sledovanou osobou by nemělo dojít k nepředvídatelnému chování robota a robot by měl být schopen pokračovat ve sledování v případě, že je sledovaná osoba znovu detekována.

6.2.1 Použitý hardware

V těchto experimentech byl použit stejný hardware jako při testování lokalizačního programu WhyCon 6.1.1. Tedy kamera MOBIUS ActionCam a počítač Asus X555LB.

Pro Collision Avoidance, tedy detekci okolních překážek, byl použit laserový dálkoměr Hokuyo URG-04LX-UG01. Tento dálkoměr má rozsah až 240 stupňů, přičemž úhlové rozlišení je 0,352 stupně. Detekuje předměty až do vzdálenosti 5,6 m s přesností 3 %. K jeho ovládání se používá veřejně přístupná knihovna Hokuyo Aist. Senzor je k počítači připojen pomocí USB rozhraní.

Jako robot zajišťující pohyb a převoz všech potřebných zařízení byl použit Pioneer 3-AT. V přední části robota je umístěn laserový dálkoměr Hokuyo. Nad laserovým dálkoměrem je připevněna kamera Mobius. Oba tyto senzory tak zabírají prostor před robotem. Na vrchní části robota je umístěn řídicí počítač, ke kterému jsou připojeny všechny senzory i samotný robot. Z důvodů bezpečnosti robota, senzorů i okolního prostředí byla při testování omezena

rychlost robota na 300 mm/s. Aby byly výsledky vypovídající, musí se i sledovaná osoba pohybovat podobnou rychlostí.



Obrázek 6.4: Laserový dálkoměr Hokuyo, převzato z: [23]

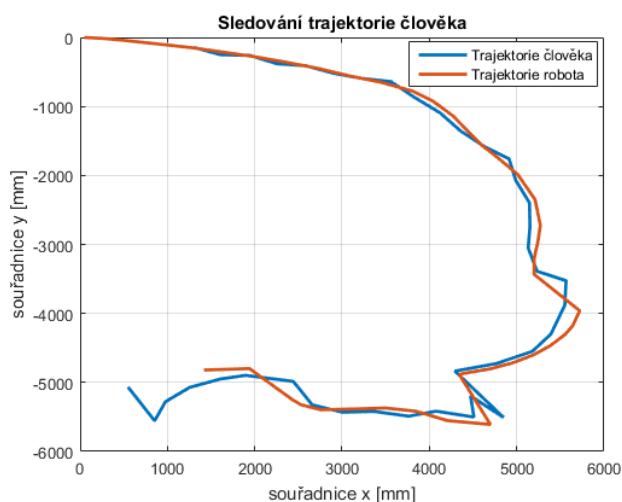
6.2.2 Sledování v prostoru bez překážek

První experiment testuje funkci sledovacího algoritmu při sledování člověka ve volném prostoru. V tomto prostoru nejsou kromě samotného člověka a robota žádné jiné objekty. Sledovaná osoba se pohybuje buď po přímce nebo po obloukovité trajektorii. Robot by měl kopírovat pohyby provedené člověkem. Při tomto experimentu byla rovněž měřena okamžitá vzdálenost robota od člověka.

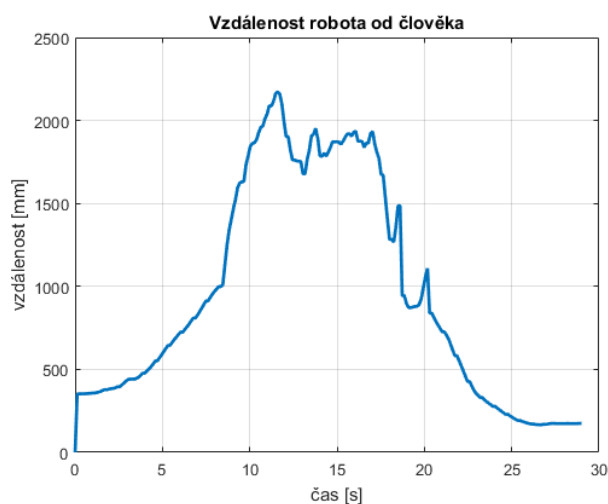


Obrázek 6.5: Testovací prostor.

Graf 6.6 zobrazuje porovnání trajektorie člověka s trajektorií projetou robotem. Je vidět, že rozdíl trajektorií je minimální. V grafu 6.7 jsou vynešeny okamžité vzdálenosti robota od člověka. Tyto vzdálenosti se pohybují okolo 2000 mm, přestože sledovací vzdálenost byla nastavena na 1000 mm. Důvodem je omezení rychlosti robota během testování na pouhých 300 mm/s. Proto nebyl tento parametr u dalších experimentů sledován, protože nemá dostatečnou vypovídající hodnotu.



Obrázek 6.6: Naměřené trajektorie.



Obrázek 6.7: Okamžitá vzdálenost robota od člověka.

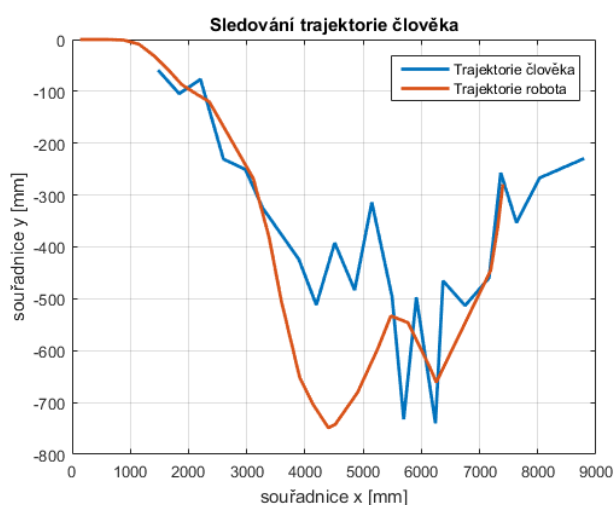
6.2.3 Sledování v prostoru s překážkou

Druhý experiment je zaměřen spíše na testování Collision Avoidance. Člověk a robot se pohybují prostorem, ve kterém se nachází jedna nebo více překážek. Člověk se snaží pohybovat co nejbližší jednotlivým překážkám. Robot by se měl při sledování člověka úspěšně vyhýbat všem překážkám v cestě.

Trajektorie zachycené v grafu 6.9 ukazují situaci objíždění překážky. Překážka obdélníkového půdorysu v tomto případě zabírá prostor přibližně 4500 mm až 5500 mm v ose x a 0 mm až -200 mm v ose y . V grafu je vidět, že trajektorie člověka prochází v těsné blízkosti překážky, zatímco robot se



Obrázek 6.8: Testovací prostor.



Obrázek 6.9: Naměřené trajektorie.

překážce vyhýbá ve větší vzdálenosti.

6.2.4 Průjezd zúženým prostorem

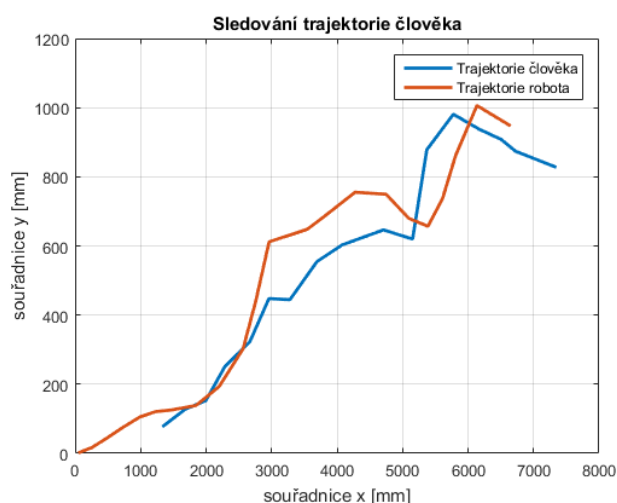
Další experiment má za cíl testovat chování robota při průjezdu zúženým prostorem. Tento prostor je tvořen dvěma překážkami v relativně malé vzdálenosti od sebe. Tato vzdálenost nesmí být samozřejmě menší, než rozměry samotného robota. Sledovaný člověk projde přímo mezi oběma překážkami. Robot by ho měl následovat tak, aby nenařazil ani do jedné z překážek. Tento test také ukazuje, zda není Collision Avoidance příliš silná. V tom případě by totiž snaha vyhnout se překážkám zabránila robotu projet mezi nimi.

Graf 6.11 zobrazuje průjezd robota mezi dvěma překážkami. Průjezd mezi

oběma překážkami je zachycen přibližně v úseku 3000 mm až 5000 mm v ose x . V tomto úseku se zvětšuje vzdálenost trajektorie člověka a robota. Člověk během experimentu prošel blíže k jedné z překážek, zatímco robot projíždí přibližně středem volného prostoru mezi překážkami.



Obrázek 6.10: Testovací prostor.



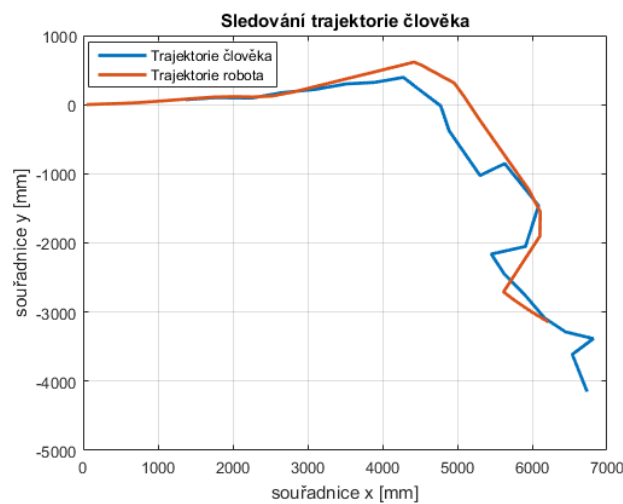
Obrázek 6.11: Naměřené trajektorie.

6.2.5 Ztráta kontaktu

V tomto experimentu je simulována situace, kdy člověk zajde za velkou neprůhlednou překážku a dojde tak ke ztrátě kontaktu robota s člověkem. Robot tedy nedetekuje žádnou značku ve svém okolí a musí pokračovat dále pouze podle dříve uložených bodů trajektorie. Ve chvíli, kdy robot dojde na místo, kde naposledy detekoval sledovanou osobu, mohou nastat dva případy. Buď dojde k opětovnému navázání kontaktu v případě, že je člověk v dohledu, nebo se robot zastaví a bude čekat, dokud se pro něj sledovaná osoba nevrátí.



Obrázek 6.12: Testovací prostor.



Obrázek 6.13: Naměřené trajektorie.

V grafu 6.13 je vidět situace, kdy člověk zachází za roh překážky a ztrácí se z dohledu robota. Překážka má podobu stěny, kterou si lze v grafu představit jako přímkou přibližně mezi body $[4000, -500]$ a $[5000, -3000]$.

6.3 Vyhodnocení experimentů

Přesnost programu WhyCon je velmi vysoká na vzdálenosti do 400 cm, kde dosahuje podle měření maximální odchylky 3 cm. Na vzdálenosti od 4 m se odchylka postupně zvyšuje až na hodnoty okolo 10 cm. Jako hraniční detekovatelná vzdálenost byla naměřena hodnota 940 cm. Podle provedených měření má intenzita okolního osvětlení vliv na kvalitu a přesnost lokalizace. U měření při horším osvětlení byly zjištěny obecně vyšší odchylky než při původním měření s vysokou intenzitou okolního osvětlení. Výrazný je především roz-

díl při větších vzdálenostech, kde maximální odchylka měla hodnotu 17 cm. Rovněž celkový dosah systému byl přibližně o 40 cm nižší. Průměrné zjištěné odchylky byly 3,1 cm při měření s dobrým osvětlením a 4,05 cm při měření se slabým osvětlením.

Výsledky testování samotného sledovacího algoritmu jsou dobré. Provedené experimenty ukazují, že robot je schopen sledovat člověka při kopírování původní trajektorie. Odchylky trajektorií člověka a robota jsou zpravidla menší než 300 mm, což je hodnota nastavená jako tolerance robota při průjezdu jednotlivých bodů.

Funkce collision avoidance funguje správně, protože během testování robot ani jednou nenarazil do překážky a to ani při experimentu s průjezdem úzkého prostoru. Úspěšně byla rovněž ověřena funkce navázání ztraceného kontaktu v případě, kdy se člověk ztratí za překážkou.

Bohužel během testování bylo zjištěno i několik nedostatků. První z nich je chyba lokalizace v případech, kdy se sledovaný objekt nachází na okraji zorného úhlu kamery. Problém je pravděpodobně způsoben právě použitou kamerou s širokoúhlou čočkou. Tato čočka zřejmě způsobuje deformaci obrazu v krajních úhlech a proto je lokalizace nepřesná. Druhým problémem byla náhodná detekce jiných objektů, než sledované značky. Tento problém byl však odstraněn úpravou algoritmu ukládání trajektorie, kdy se nově kontrolují vzdálenosti nově ukládaných bodů od posledních bodů trajektorie.

Kapitola 7

Závěr

V úvodní části této práce byl zpracován přehled základních lokalizačních metod používaných v robotice. U všech zmíněných metod byl uveden základní princip funkce a příklady využití. Zvláštní pozornost byla věnována optickým lokalizačním systémům a to proto, že tento princip byl použit i v této práci. Konkrétně byl použit program WhyCon, což je optický lokalizační systém založený na detekci pasivní značky v podobě soustředných kruhů a mezikruží.

Další část práce se zaměřuje na pozemní roboty a jejich použití při sledování člověka. V této kapitole byl vypracován přehled nejčastějších podvozků používaných u robotů. Použitý způsob řízení má vliv na možnosti použití daného robota v různých prostředích. Ve stejné kapitole jsou rovněž uvedeny některé konkrétní projekty zabývající se vývojem robotů pro sledování člověka. Zmíněny jsou i základní specifikace robota Pioneer 3-AT, což je robot použitý při testování v této práci.

Cílem této práce bylo vytvoření algoritmu pro sledování člověka robotem. Jak už bylo uvedeno, tak k lokalizaci člověka slouží optický lokalizační systém WhyCon. Požadavkem na konečný systém bylo rovněž kopírování původní trajektorie člověka. Návrhem koncepce řešení a rozбором některých problematických situací při sledování člověka se zabývá čtvrtá kapitola. Základní nestandardní situací, ke které může dojít, je dočasná ztráta kontaktu mezi robotem a sledovaným člověkem. Tyto případy a způsoby jejich řešení jsou v této kapitole podrobně zpracovány. Navržena byla také metoda pro detekci a vyhýbání se překážkám. Jako detekční senzor se zde používá laserový dálkoměr.

Následuje popis implementace navrženého algoritmu. V jednotlivých podkapitolách je detailně popsán princip funkce celého programu. Některé kódové změny byly provedeny v programu WhyCon. I tyto úpravy jsou v této kapitole popsány. Výsledný program se skládá z několika oddělených částí. První částí je samotný lokalizační systém. Druhou část tvoří implementovaný algoritmus pro sledování člověka. Třetí částí je krátký program, který slouží ke spuštění a propojení obou předchozích programů.

Funkce algoritmu byla otestována pomocí několika experimentů, které měly prověřit především správné řešení problematických situací. Zároveň byla realizována měření přesností a dosahu lokalizačního programu. Všechny experimenty i jejich výsledky jsou popsány v šesté kapitole. Celkové dosažené funkcionality jsou vesměs uspokojivé. Detekce člověka i ukládání trajektorie funguje správně. Pohyb robota po uložené trajektorii je relativně přesný. Přesto byly zjištěny i některé nedostatky. Jedním z nich je problém s programem WhyCon, který někdy detekuje mimo sledované značky i cizí předměty.

Algoritmus může být i nadále upravován a vylepšován. Vhodným vylepšením by bylo například použití lokalizačního systému, který by dokázal rozlišovat mezi jednotlivými značkami. Dalo by se tak například měnit nastavení sledovacích parametrů podle čísla detekované značky. Možná by byla také úprava řídicího regulátoru robota, který by mohl místo sledování diskrétních bodů trajektorie provádět aproximaci pomocí proložené křivky. Tato změna by umožnila plynulejší a rychlejší pohyb robota za člověkem.

Příloha A

Literatura

- [1] JOHN J. LEONARD a HUGH F. DURRANT-WHYTE. *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*. Boston, MA: Springer US, 1992. ISBN 9781461536529.
- [2] Edwin Olson: *AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011. Dostupné z: <https://april.eecs.umich.edu/papers/details.php?name=olson2011tags>
- [3] KRAJNÍK, 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. 2017-05-24]. DOI: 10.1109/ICAR.2013.6766520. ISBN 978-1-4799-2722-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6766520/>
- [4] KRAJNÍK, Tomáš, Matías NITSCHKE, Jan FAIGL, Petr VANĚK, Martin SASKA, Libor PŘEUČIL, Tom DUCKETT a Marta MEJAIL. *A Practical Multirobot Localization System*. Journal of Intelligent and Robotic Systems [online]. 2014, 76(3-4), 539-562 [cit. 2017-05-24]. DOI: 10.1007/s10846-014-0041-x. ISSN 0921-0296. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10846-014-0041-x>
- [5] M. Nitsche, T. Krajník et al.: *WhyCon: An Efficient, Marker-based Localization System*. IROS Workshop on Open Source Aerial Robotics, 2015. Dostupné z: <https://github.com/lrse/whycon>
- [6] Takafumi Sonoura, Takashi Yoshimi, Manabu Nishiyama, Hideichi Nakamoto, Seiji Tokura and Nobuto Matsuhira (2008). *Person Following*

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: František Brandštýl
Studijní program: Kybernetika a robotika (bakalářský)
Obor: Robotika
Název tématu: Sledování člověka robotem

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s možnostmi automatického sledování pohyblivého cíle pozemním mobilním robotem. Soustředte se na postupy založené na zpracování vizuální informace z palubní kamery robotu a pozorování scény se sledovaným člověkem, resp. vhodných markerů na jeho obraze.
2. Navrhněte systém, který umožní sledování operátora/člověka robotem z předem dané vzdálenosti a za podmínek, že může dojít k dočasnému omezení vzájemné viditelnosti. Zohledněte požadavek kopírování původní trajektorie vykonané operátorem/člověkem a ošetřete možné kolize robotu s objekty podél realizované trajektorie využitím laserového dálkoměru.
3. Realizujte příslušný laboratorní demonstrátor s reálným robotem, navrhněte vhodná hodnotící kritéria řešení, ověřte jej a kvantitativně vyhodnoťte dosažené funkcionality. Experiment zdokumentujte krátkým videozáznamem.

Seznam odborné literatury:

- [1] T. Krajník, M. Nitsche, J. Faigl, T. Duckett, M. Mejail, and L. Preucil: External localization system for mobile robotics, in: proceedings of the 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 2013
- [2] Takafumi Sonoura, Takashi Yoshimi, Manabu Nishiyama, Hideichi Nakamoto, Seiji Tokura and Nobuto Matsuhira: Person Following Robot with Vision-based and Sensor Fusion Tracking Algorithm, in: Computer Vision, Xiong Zhihui (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/6161, 2008.
K dispozici na: http://www.intechopen.com/books/computer_vision/person_following_robot_with_visionbased_and_sensor_fusion_tracking_algorithm
- [3] Endo G, Allan B, Iemura Y, Fukushima EF, Iribe M, Takubo T, Ohira M: Mobile follower robot as an assistive device for home oxygen therapy-evaluation of tether control algorithms. ROBOMECH Journal vol.2/6, 2015.
- [4] <http://robots.mobilerobots.com/wiki/ARIA>

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 11. 1. 2017