



**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra kybernetiky**

**Vizuální lokalizace pro  
experimentaci v mobilní robotice**

**Bakalářská práce**

**Vedoucí práce: Ing. Libor Přeučil, CSc.**

**Autor: Tomáš Pivoňka, KYR, Robotika**

**květen 2016**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student:** Tomáš Pivoňka  
**Studijní program:** Kybernetika a robotika (bakalářský)  
**Obor:** Robotika  
**Název tématu:** Vizualní lokalizace pro experimentaci v mobilní robotice

### Pokyny pro vypracování:

Pro účely experimentace s mobilními roboty v laboratorních podmínkách je potřebné získávat jejich referenční polohu a orientaci v prostoru. Umístěním vhodných optických značek na tělo mobilního robotu, pohybujícího se v omezeném prostoru experimentální arény je výpočtem z jejich obrazů pořízených několika statickými kamerami možné určovat 6D polohu experimentálního robotu. Systém by měl pracovat v reálném čase experimentu.

Při vypracování postupujte podle následujících kroků:

1. Prostudujte principy řešení existujících systémů pro prostorovou vizualní lokalizaci objektů.
2. Seznamte se s existujícím SW systémem WhyCon pro detekci a měření vzdálenosti kruhových značek v reálném čase.
3. S využitím předchozího navrhnete vlastní koncept 6D lokalizace mobilního robotu v experimentální aréně o rozměrech cca 3x3m s ohledem na možnost jeho činnosti v reálném čase. Při návrhu analyzujte více alternativ pro určení úhlového natočení sledovaného robotu.
4. Proveďte základní citlivostní analýzu navrženého řešení a optimalizujte počet, umístění a rozlišení použitých kamer s ohledem na stanovenou cílovou přesnost lokalizace.
5. Řešení implementujte a experimentálně ověřte. Vyhodnoťte dosažené výsledky, zejména proveďte kvantitativní porovnání očekávaných a dosažených přesností systému.

### Seznam odborné literatury:

- [1] KRAJNÍK, Tomáš, Matias NITSCHKE, Jan FAIGL, Petr VANĚK, Martin SASKA, Libor PŘEUČIL, Tom DUCKETT a Marta MEJAIL. A Practical Multirobot Localization System. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. Springer Netherlands, 2014, 2014(3-4): 539-562. DOI: 10.1007/s10846-014-0041-x. ISSN 0921-0296.
- [2] HLAVÁČ, Václav a Milan ŠONKA. *Počítačové vidění*. L. vyd. Praha: Grada, 1992, 252 s. ISBN 80-85424-67-3.
- [3] ECKEL, Bruce. *Myslíme v jazyku C++: knihovna programátora*. Praha: Grada, 2000, 554 s. ISBN 80-247-9009-2.
- [4] JELÍNEK, Lukáš. *Jádro systému Linux: kompletní průvodce programátora*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2008, 686 s. ISBN 978-80-251-2084-2.
- [5] HARTLEY, Richard a Andrew ZISSERMAN. *Multiple view geometry in computer vision*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University, 2003, xvi, 655 s. ISBN 0-521-54051-8

**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Libor Přeučil, CSc.

**Platnost zadání:** do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

prof. Dr. Ing. Jan Kybic  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 15. 12. 2015

### **Prohlášení autora práce**

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

**Poděkování:**

Za pomoc a podporu při vypracování bakalářské práce děkuji celému týmu skupiny Inteligentní a mobilní robotiky CIIRC, zejména vedoucímu této práce Ing. Liboru Přeučilovi, CSc.

**Abstrakt:**

Cílem práce bylo navrhnout 6DoF vizuální lokalizační systém pro experimentální arénu, která je určena zejména pro pozemní mobilní roboty. Na začátku práce je přehled lokalizačních systémů rozdělených podle fyzikálního principu fungování. Pro každou skupinu jsou uvedeny základní vlastnosti i konkrétní příklady systémů. Dále se práce zabývá návrhem samotného lokalizačního systému, který byl postaven na systému WhyCon. Tento systém pracuje s jednou kamerou. Detekuje kruhové značky, pro něž určuje jejich polohu v uživatelem určené rovině. Pro toto 2D rozpoznávání byly navrženy a implementovány dva systémy, které z těchto dat dokáží pro vlastní značku určit polohu a natočení v 3D prostoru. Značka sestává ze čtyř v rovině pevně umístěných značek pro program WhyCon. První systém byl postaven na metodě výpočtu 3D polohy ze tří bodů ležících na přímce. Druhý využíval převzatý algoritmus pro výpočet P3P problému. Oba systémy byly testovány simulacemi i v reálných podmínkách.

**Klíčová slova:**

vizuální lokalizace, 6DoF lokalizace, WhyCon, P3P problém

**Abstract:**

The thesis focuses development of practical 6DoF visual localization system for experimentation in ground robotics. The thesis brings overview of existing localization systems and classifies these according to their functional principles. Basic properties and use cases of these systems are discussed for each of the groups. The main idea of the herein presented work builds on the top of a localization system entitled WhyCon. The system takes the advantage of a monocular camera and performs 2D positioning via detection of B/W roundel pattern in a plane, set by the user. The work comprises two solutions to the 6DoF localization problem. Both the solutions provide extend the WhyCon system for use for computation of 3D pose and rotation of a pattern landmark in space. The used landmark consists of 4 roundel patterns organized in a specific formation. As the first solution computes 3D pose from projections of three points which are in line, the other approach applies adopted P3P problem solver. Both the approaches are simulated, tested and evaluated in real conditions.

**Keywords:**

visual localization, 6DoF localization, WhyCon, P3P problem

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Systémy pro prostorovou lokalizaci .....	3
2.1	Inerciální systémy .....	3
2.2	Magnetické systémy .....	5
2.3	Mechanické systémy .....	6
2.4	Akustické systémy .....	7
2.5	Optické systémy .....	8
2.5.1	Optické systémy se snímáním pasivních značek .....	8
2.5.1.1	Monokulární systém s 6DoF lokalizací .....	10
2.5.2	Optické systémy využívající aktivní značky .....	11
2.5.3	Optické systémy pracující bez značek .....	11
3	WhyCon .....	13
3.1	Verze WhyConu .....	13
3.1.1	WhyCon-ROS .....	13
3.2	Algoritmus .....	14
3.2.1	Detekce značky .....	14
3.2.2	Výpočet 3D polohy .....	15
3.2.3	Výpočet 2D polohy .....	15
3.3	Udávané přesnosti .....	16
4	Návrh 6D lokalizace .....	17
4.1	Výpočet polohy kamery .....	17
4.2	P3P problém .....	18
4.3	Značka a rozpoznání jednotlivých bodů .....	19
4.4	Výpočet polohy tří bodů ležících na přímce .....	20
4.4.1	Odvození výpočtu $\sin(\varphi)$ .....	22
4.5	Dopočet polohy čtvrtého bodu a natočení .....	22
4.6	Výpočet s pomocí algoritmu řešícího P3P problém .....	23
4.7	Výpočet Eulerových úhlů .....	24
5	Implementace a experimentální ověření přesnosti .....	25
5.1	Implementace .....	25
5.1.1	Experimentální aréna .....	25
5.1.2	Kamera .....	25
5.1.3	Matice se značkami pro sledování .....	25

5.1.4	Odhad přesnosti .....	26
5.2	Experimentální ověření přesnosti .....	27
5.2.1	Přesnost určování polohy jedné značky .....	27
5.2.2	Přesnost lokalizace z polohy tří bodů ležících na přímce .....	28
5.2.3	Přesnost lokalizace s pomocí algoritmu řešícího P3P problém .....	29
6	Závěr .....	31
	Literatura .....	33
	Příloha – obsah CD: .....	36

## Seznam obrázků:

Obr. 1 Znárodnění MEMS akcelerometru (1 - horní křemíková destička, 2 - pružné tětiny, 4 - horní elektroda, 5 - spodní elektrody), zdroj [2] str. 40 .....	4
Obr. 2 Vibrační senzor úhlové rychlosti, zdroj [2] str. 43 .....	4
Obr. 3 Systém pro magnetickou lokalizaci. Vlevo je teoretická aplikace systému, vpravo nahoře fotografie vysílací cívky a dole přijímacích cívek, zdroj [5] str. 4900 a 4903.....	5
Obr. 4 Optoelektronický inkrementální senzor polohy, zdroj [3] str. 318 .....	7
Obr. 5 Schéma akustického lokalizačního systému pro měření polohy lodí, zdroj [8] str. 2 .....	7
Obr. 6 Experimentální aréna SyRoTek sledující 2D polohu dvoukolových robotů, zdroj <a href="https://syrotek.felk.cvut.cz/about/videos">https://syrotek.felk.cvut.cz/about/videos</a> .....	9
Obr. 7 Ukázka systému Vicon pro měření polohy robotu, zdroj [24] str. 1960 .....	9
Obr. 8 Různé značky pro monokulární systém s 6DoF lokalizací, zdroj [10] str. 79 .....	10
Obr. 9 Senzor a aktivní značka pro 6DoF lokalizační systém Certus HD, zdroj [12] .....	11
Obr. 10 Microsoft Kinect v2. Na obrázku je vyznačena barevná kamera, infračervená kamera a infračervený zářič, zdroj [14] str. 2.....	12
Obr. 11 Značka pro systém WhyCon .....	13
Obr. 12 Nastavování os pro 2D lokalizační program WhyCon a 2D lokalizace.....	15
Obr. 13 Znárodnění geometrie pro úlohu výpočtu polohy kamery z průmětu 5 bodů. ....	17
Obr. 14 Značka používaná pro 6DoF lokalizaci skládající se ze čtyř terčových značek pro program WhyCon .....	19
Obr. 15 Graf znázorňující průměty značek a vektory pro určení značky D .....	20
Obr. 16 Nákres geometrie úlohy určování 3D polohy z průmětu čtyř bodů do roviny.....	21
Obr. 17 Experimentální aréna s podstavou 3x3m a výškou 2,6m a upevnění kamery Elphel NC353L .....	25
Obr. 18 Ukázka měření lokalizačního systému s převzatým algoritmem řešícím P3P problém. Vpravo nahoře jsou zobrazeny výstupy měření. Vrchní vektor udává polohu [x, y, z] a vektor pod ním úhly [Yaw, Pitch, Roll]. Černé šipky znázorňují nastavenou souřadnou soustavu. ....	32



## Seznam tabulek:

Tabulka 1 Přehled verzí programu WhyCon a jejich vlastností (zdroj [19]).....	13
Tabulka 2 Maximální naměřená vzdálenost značky pro 16Mpx kameru ([18], str. 14).....	16
Tabulka 3 Naměřené přesnosti určení 3D polohy ([18], str. 16).....	16
Tabulka 4 Naměřené přesnosti určení polohy v rovině ([18], str. 16) .....	16
Tabulka 5 Tabulka rozhodování o průmětu bodu D na základě zjištěných rovnoběžných přímek dle Obr. 15.....	20
Tabulka 6 Testování metody s výpočtem polohy ze tří bodů ležících na přímce v programu Matlab .....	27
Tabulka 7 Testování metody s algoritmem řešícím P3P problém v programu Matlab.....	27
Tabulka 8 Měření přesnosti určování 2D polohy programu WhyCon. Poloha byla určena relativně vůči milimetrovému papíru. V každé poloze bylo měření provedeno 10x. ....	28
Tabulka 9 Porovnání naměřených relativních vzdáleností (Tabulka 8) se skutečnými a odchylka měření.....	28
Tabulka 10 Konfigurace umístění značky při měření přesnosti lokalizace s řešením polohy ze tří bodů ležících na přímce. ....	29
Tabulka 11 Přesnost měření polohy lokalizačního systému postaveného na řešení P3P problému tří bodů ležících v přímce. Přesnost byla pro každé měření (viz Tabulka 10) měřena 2x v sedmi různých polohách.....	29
Tabulka 12 Konfigurace umístění značky při měření přesnosti lokalizace s algoritmem řešícím P3P problém.....	29
Tabulka 13 Přesnost měření polohy lokalizačního systému postaveného na převzatém algoritmu, který řeší P3P problém. Přesnost byla pro každé měření (viz Tabulka 12) měřena 2x v sedmi různých polohách.....	29

## **Seznam použitých zkratk:**

6DoF – 6 stupňů volnosti (Degrees of freedom)

px – pixel

Mpx – rozlišení milion pixelů

FPS – počet snímků za sekundu

## 1 Úvod

Lokalizační systémy slouží k určování polohy (popřípadě natočení) sledovaného objektu v prostoru. Tyto systémy mohou fungovat na různých principech, které jsou podrobněji rozebrány v kapitole 2. Při vizuální lokalizaci je poloha určována z obrazu jedné či více kamer. Aby byl objekt v obraze snadněji rozpoznatelný, umisťují se na něj speciální značky, které jsou díky svým vlastnostem v obraze snadněji detekovatelné.

Cílem této práce je navrhnout a implementovat vizuální lokalizační systém pro experimentální arénu. Aréna o rozměru 3x3m je určena pro experimentování s mobilními roboty. Oproti některým podobným systémům je lokalizována plná 6DoF poloha robotu. Kromě tří kartézských souřadnic polohy jsou určovány ještě tři úhly, které jednoznačně definují natočení objektu. Cílové přesnosti byly stanoveny pod 10cm pro polohu a okolo 5° pro natočení.

Navrhované systémy byly stavěny jako rozšíření již existujícího lokalizačního systému WhyCon (kapitola 3), který je schopný určovat 2D nebo 3D polohu rovinných kruhových černobílých značek z obrazu jedné kamery. Obě řešení jsou nadstavbou 2D určování polohy značek, které dokáže s přesností pod 1mm měřit průmět značky do roviny, kterou si může uživatel sám nastavit.

Pro lokalizaci byla navržena vlastní značka, která sestává ze 4 kruhových značek určených pro program WhyCon ležících v jedné rovině. Více značek je potřeba, aby bylo možné určit z 2D průmětů 3D polohu celé značky a její orientaci v prostoru. Pro detekci této značky byla navržena a implementována dvě různá řešení. Obě řešení jsou založena na řešení problému tří bodů (kapitola 4.2). Jedná se o úlohu určení pozice středu promítání a orientace promítací roviny středového promítání, pokud známe prostorové souřadnice tří promítaných bodů.

První řešení (kapitola 4.4) je postaveno na původním řešení výpočtu polohy z průmětů tří bodů ležících na přímce. Výstupem tohoto řešení jsou pouze 3D pozice tří bodů a určit tak lze jen 2 natočení. Poslední natočení je proto počítáno z průmětu zbývající značky.

Druhé řešení (kapitola 4.6) využívá převzatý algoritmus řešení úlohy tří bodů, které již neleží v jedné přímce. Výstupem tohoto algoritmu je poloha a natočení kamery vůči prostorovým souřadnicím značky, které lze převést na požadovanou 3D polohu a natočení vůči kameře (zvolenému souřadnému systému). Čtvrtý bod slouží k výběru správného řešení, které obecně pro úlohu tří bodů není jednoznačné.

Oba lokalizační systémy byly přímo implementovány do verze programu WhyCon WhyCon-ROS a experimentálně proměřeny (kapitola 5.2). V experimentální části byla rovněž proměřena přesnost 2D lokalizace programu WhyCon.

## 1. Úvod

## 2 Systémy pro prostorovou lokalizaci

Motion capture systémy slouží k sledování pohybu daného objektu a určení jeho polohy. Jsou postaveny na lokalizačním systému, ze kterého získávají informace o poloze a natočení s dostatečně vysokou frekvencí tak, aby bylo možné z jejich dat rekonstruovat pohyb objektu. Tyto systémy mají široké využití napříč různými obory. V robotice slouží například robotům pracujícím ve spolupráci s člověkem, které musí sledovat pohyb člověka, aby mu nemohly ublížit. Dále se využívají u robotů pohybujících se v hejnech. Tato hejna jsou dnes nejčastěji tvořena kvadroptérymi. Systém bývá zpravidla umístěn na každém robotu, který musí snímat polohu robotů ve svém okolí, aby mohl držet požadovanou formaci. Využití nachází rovněž v experimentální robotice při tvorbě nových algoritmů a testování. V medicíně jsou tyto systémy důležité při operacích, kdy je třeba sledovat polohu nástrojů v těle pacienta. Dalším využitím v lékařství může být snímání pohybu člověka a jeho analýza. Podobné systémy nacházejí uplatnění také ve filmovém a herním průmyslu při animaci pohybu animovaných postav nebo při počítačové úpravě živých herců. Důležitou roli hrají i v odvětví virtuální reality, kde je pro realistický zážitek potřeba co nejpřesněji přenášet tělo hráče i okolní objekty do virtuální reality.

Metody pro snímání pohybu se nejčastěji člení podle fyzikálního principu, na kterém pracují. Hlavními vlastnostmi lokalizačních systémů jsou přesnost lokalizace a rychlost zpracování, která rozhoduje, zdali je možné jeho použití v real-time aplikacích. S rychlostí souvisí také výpočetní náročnost zpracování informace. Určování pozice může být relativní nebo absolutní. Relativní určení polohy umožňuje určit pouze změnu polohy vůči souřadné soustavě s neznámou absolutní polohou a orientací, zatímco absolutní určení polohy je určení vzhledem k pevně dané souřadné soustavě v prostoru. Jednotlivé principy s konkrétními příklady systémů a zhodnocením jejich vlastností budou rozebrány v následujících kapitolách.

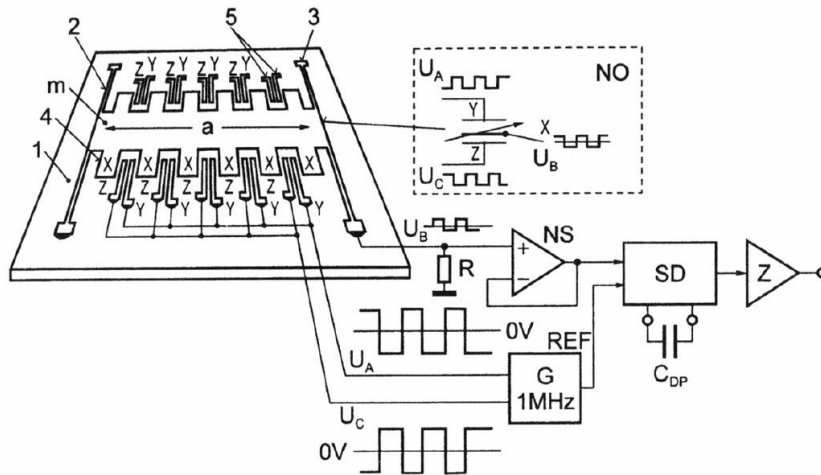
### 2.1 Inerciální systémy

Inerciální systémy určují polohu pomocí gyroskopů a akcelerometrů, ze kterých dostávají informaci o zrychlení a úhlové rychlosti. Polohu a natočení vypočítají integrováním rychlosti a zrychlení. Integrace má za následek neustálé sčítání chyby, kvůli kterému těmto systémům s postupem času klesá přesnost. Poloha je určována pouze relativně vůči počáteční poloze. Výhodou inerciálních systémů je, že přímo dávají informaci o zrychlení a rychlostech. Některé systémy také mají vysokou přesnost určení úhlu natočení.

Akcelerometry jsou senzory snímající zrychlení. Pro inerciální měření se používají zejména MEMS akcelerometry a akcelerometry s elektromechanickou zpětnou vazbou. MEMS akcelerometry (Obr. 1) se skládají ze dvou křemíkových destiček, z nichž horní je na pružných tětívách a při působení síly kmitá v jednom směru rovnoběžně s dolní destičkou. Horní destička má na stranách hřebínky a do každé jeho mezery zapadají dvě vedle sebe ležící elektrody na spodní destičce rovnoběžné se zuby hřebínku. Zuby hřebínku představují také elektrodu, která se při posuvu vždy od jedné spodní elektrody z dvojice vzdaluje a ke druhé přibližuje, což vede k poklesu jedné kapacity mezi elektrodou a hřebínkem a k nárůstu druhé. Dále je na horní elektrodu přiváděno demodulované napětí, které pomocí elektrostatických sil kompenzuje síly působící na akcelerometr. Výhody tohoto typu jsou zejména nízká cena a malé rozměry. U akcelerometrů s elektromechanickou zpětnou vazbou (sevoakcelerometrů) je hlavní část tvořena hmotným tělískem s elektrodou umístěným na pružině. Při působení sil, dochází ke

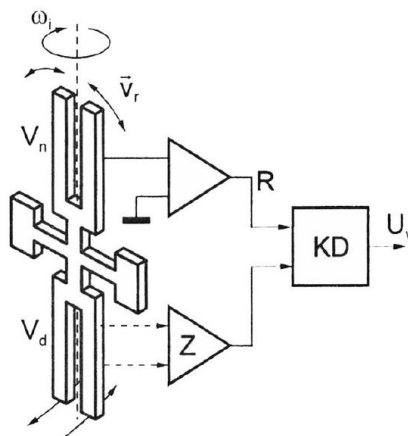
## 2. Systémy pro prostorovou lokalizaci

změně kapacity mezi elektrodou na pružině a pevně upevněnou elektrodou. Další součástí senzoru je magnet, do kterého teče proud úměrný změně kapacity (síle) a tím je vyvolána síla působící proti změně způsobené vnějšími silami. Servoakcelerometry mají vysokou linearitu a dosahují vysoké přesnosti až okolo miliontiny tíhového zrychlení.



Obr. 1 Znárodnění MEMS akcelerometru (1 - horní křemíková destička, 2 - pružné tětivy, 4 - horní elektroda, 5 - spodní elektrody), zdroj [2] str. 40

Úhlovou rychlost lze měřit vibračním senzorem úhlové rychlosti a optickým vláknovým gyroskopem. Vibrační senzor úhlové rychlosti (Obr. 2) využívá působení Coriolisovy síly. Senzor je tvořen dvěma proti sobě ležícími plochými vidlicemi nacházejícími se na ose otáčení. Jedna z vidlic je elektrostatickými silami buzena a kmitá v rovině vidlice. Při kmitání na ně působí Coriolisova síla, která způsobí periodicky se měnící krouticí moment. Tento moment zapříčiní kmitání i druhé vidlice, které je možné snímat jako změnu kapacity. Vidlice jsou vyráběny z krystalu křemene, který přináší výhody v podobě vysoké stálosti v čase i při změně teplot, malých rozměrů a nízké ceny. Optický vláknový gyroskop tvoří kruhové optické vlákno, ve kterém v opačných směrech obíhají světelné paprsky. Působením Sagnacova jevu se rychlost ve směru otáčení zvyšuje a naopak rychlost proti směru otáčení klesá. Z rozdílu času oběhu je možné vypočítat úhlovou rychlost. Tento způsob měření je stabilní vůči otřesům a gravitačním účinkům. Při nahrazení laseru diodou se může jednat o levné řešení postačující pro řadu aplikací. Pro náročnější aplikace lze dosáhnout i odchylky do  $0,001^\circ/\text{h}$ .



Obr. 2 Vibrační senzor úhlové rychlosti, zdroj [2] str. 43

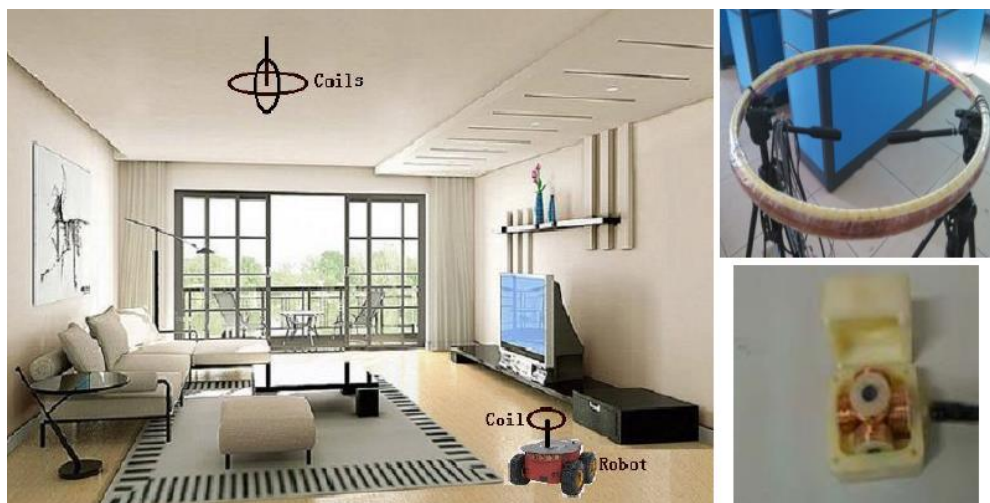
V [6] je ukázán inerciální motion capture systém rozšířený o magnetometr (viz kapitola 2.2) pro snímání pohybu lidské paže. Použité senzory měly v jednom pouzdře integrovaný trojosý akcelerometr, trojosý gyroskop a trojosý magnetometr. Výsledný systém sestával ze dvou propojených sond s dvěma senzory. Jedna sonda obsahovala navíc výpočetní jednotku. Měřeno bylo sedm úhlů – 3 v rameni, 2 v lokti a 2 na zápěstí. Systém počítal polohu za pomoci magnetometru i bez něj. Při dvouminutových měřeních byl přesnější výpočet bez magnetometru. Při delším měření (20 minut) však měl výpočet s magnetometrem přesnost výrazně vyšší. Průměrná směrodatná odchylka Motion capture systému s magnetometrem byla  $3,8 \pm 2,4^\circ$ .

## 2.2 Magnetické systémy

K určování polohy se používá u magnetických systémů měření okolního magnetického pole. Magnetické pole může být vytvářeno uměle, ale je možné použít i magnetické pole Země. Přesnost systémů bývá negativně ovlivněna kovovými předměty nacházejícími se v blízkosti přijímače. Odolnější vůči tomuto rušení jsou stejnosměrné systémy oproti systémům využívajícím střídavé pole.

Pro snímání magnetického pole se využívají zejména Hallovy sondy a AMR senzory. Hallova sonda sestává z polovodičové destičky, kterou napříč protéká známý proud. Kolmo na směr proudu jsou na destičku připevněny snímací elektrody, na kterých při působení magnetického pole kolmo na destičku vzniká Hallovo napětí. Toto napětí je přímo úměrné intenzitě magnetického pole. Hallova sonda je dnes nejrozšířenějším senzorem pro měření magnetické indukce. Dokáže snímat pole od 1mT do několika tesla. Anizotropní magnetoresistor (AMR) využívá anizotropní efekt, který říká, že elektrický odpor ve směru magnetizace je vyšší než ve směru kolmém ([4], str. 10). Oproti Hallovým sondám dosahuje desetinásobné citlivosti a využívá se u digitálních kompasů.

Poměrně jednoduchou ukázkou magnetické lokalizace je 2D lokalizace robotu pomocí jedné vysílací a tří přijímacích cívek viz [5] (Obr. 3). Přijímací cívky byly uspořádány do tříosého detektoru. Při testování byla vysílací cívka ve výšce jednoho metru a bylo testováno 22 pozic na ploše o rozměru 10x10m. Průměrná odchylka určené polohy byla okolo 9,8cm.



Obr. 3 Systém pro magnetickou lokalizaci. Vlevo je teoretická aplikace systému, vpravo nahoře fotografie vysílací cívky a dole přijímacích cívek, zdroj [5] str. 4900 a 4903

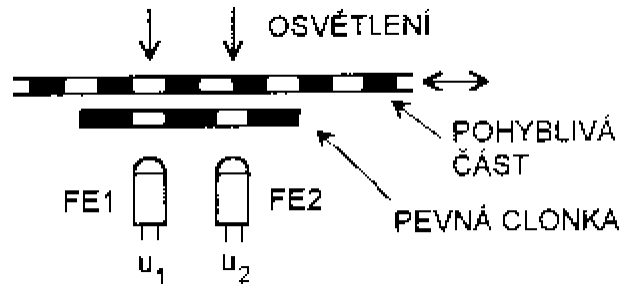
### 2.3 Mechanické systémy

Mechanické systémy snímají pohyb přímo na kloubech. Pro měření lze používat potenciometry nebo inkrementální senzory polohy. Snímání polohy je velmi přesné, protože měření je minimálně ovlivněno okolními podmínkami. Zpracování informace není náročné na výpočetní výkon a je velmi rychlé. Značným omezením mechanických systémů je relativní určování polohy. U pevně ukotvených robotů toto omezení nevádí, ale v mobilních aplikacích nedokáží stejně jako inerciální systémy určit absolutní polohu. Tyto systémy rovněž nedokáží detekovat některé události, které mohou způsobit značné nepřesnosti. Těmito událostmi mohou být například smyky nebo prokluzování kol. V prvním případě senzory nedetekují pohyb, ke kterému dochází. Ve druhém případě naopak systém pohyb předpokládá, ale nedochází k němu. Rovněž nedetekují možné skoky a pády robotu. Tyto nedostatky nebrání využití na exoskeletu se senzory pro snímání pohybu člověka, kde není absolutní poloha příliš důležitá. Zde však zpravidla dochází k omezování pohybu člověka, protože exoskelet se senzory není v porovnání s lidským tělem dostatečně flexibilní a také senzory nedokáží zachytit všechny pohyby lidského těla.

Potenciometry mohou měřit rotační i posuvný pohyb dle typu dráhy, po které se pohybuje jezdec potenciometru (kruhový, spirálovitý nebo přímočarý pohyb). Pro měření posuvu lze použít senzory s lankem, na kterých se lanko namotává na cívku s pružinou a rotujícím jezdcem potenciometru. Takto lze měřit posuv do 40m, s rychlostí do 2m/s a opakovatelností až 0,015% z rozsahu. Potenciometry mohou být vrstevné nebo vinuté. U vinutých jezdec přeskakuje mezi jednotlivými závitů, zatímco u vrstevných odpor přechází plynule. Vrstevné rezistory mají horší opakovatelnost pro stejné polohy jezdce. Nevýhodou vinutých je stupňovitá převodní charakteristika. Potenciometry mají vysokou linearitu, která může být u rotačních potenciometrů pod 0,002%. Nevýhodami mechanického kontaktu u potenciometrů jsou šum způsobený pohybem jezdce a postupné opotřebování. Existují také bezkontaktní potenciometry (s přesností okolo 1%), ve kterých magnetické senzory snímají otáčení permanentního magnetu.

Při inkrementálním měření polohy se senzor pohybuje podél struktury (nebo naopak), která je tvořena pravidelně se střídajícími značkami, ve kterých jsou zakódovány stavy 0 a 1. Pokud dojde ke změně stavu, senzor pozná, že došlo k pohybu. Polohu rozpozná podle počtu detekovaných značek. Nevýhodou tohoto kódování je, že nedokáže rozpoznat směr pohybu. Proto se přidává ještě jedna řada značek, která je o půl značky posunutá. Dohromady potom existují 4 různé stavy, ze kterých lze směr pohybu rozpoznat. Často bývá použita i třetí řada, na které je umístěna značka určující referenční polohu. Určování polohy může být i absolutní, pokud je použito více řad a každá poloha má vlastní kódové slovo. Optoelektronické inkrementální senzory (Obr. 4) tvoří děrovaná struktura (průsvitný pásek s neprůsvitnými značkami), na kterou z jedné strany svítí LED dioda a na druhé se nachází fotosenzor. Přesnosti optoelektronických senzorů bývají až 0,05 $\mu$ m pro posuvný pohyb a 0,18" pro rotační. Existují ale i jiné fyzikální principy inkrementálních senzorů, které používají například magnetické značky.





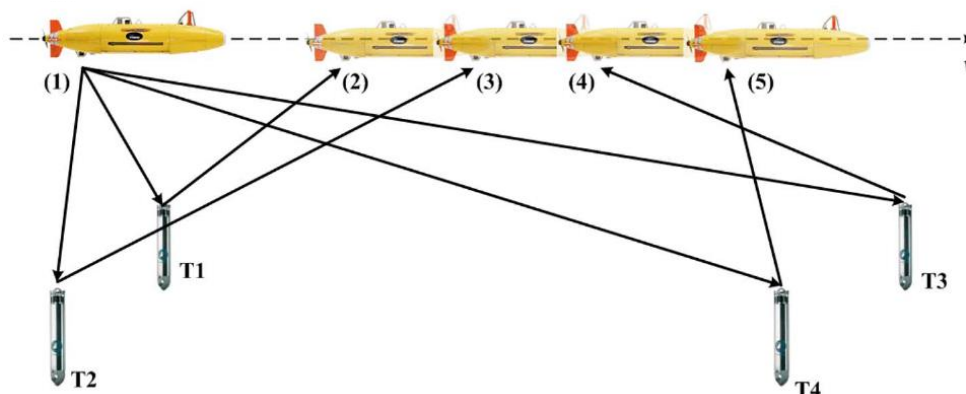
Obr. 4 Optoelektronický inkrementální senzor polohy, zdroj [3] str. 318

V článku [7] je ukázka implementace měření polohy pomocí inerciálních senzorů. Poloha nebyla odměřována na kolech robotu, ale nacházela se na speciální konstrukci. Konstrukce se pohybovala na diferenciálním podvozku se dvěma kolečky (průměr 2,37cm, vzdálené 10cm), který byl připevněn pomocí svislé osy k tělu robotu. Měřeno bylo natočení kol a osy. Při testování na trajektorii dlouhé 1,5m s pravoúhlou zatáčkou byla výsledná chyba 8,7mm pro polohu a 1,3° pro natočení.

## 2.4 Akustické systémy

Akustické systémy využívají pro určování polohy šíření zvuku. Nejčastěji se jedná o ultrazvukové signály. Poloha je určována na mikrofonech z naměřené intenzity zvuku od více vysílačů. Obvykle měření vyžaduje přímou cestu zvuku od přijímače k vysílači. Proto jej není možné použít ve spoustě aplikací, kde hrozí, že tělo robotu nebo jiný objekt cestu zakryje. Při zakrytí dochází k poklesu intenzity, aniž by se měnila poloha robotu. Negativní vliv na měření může mít také okolní hluk či vítr při venkovních aplikacích.

Tyto systémy mohou rovněž pracovat pod vodní hladinou. Metoda snímání polohy plavidel kompenzovaná o pohyb lodi je popsána v [8]. Kromě simulací byl systém otestován i v reálných podmínkách na jezeře, kde byly pod hladinou umístěné 4 vysílače odpovídající na signál z lodi. Měřena byla poloha lodi s přijímačem i vysílačem signálu na ploše o rozměrech 300x300m. Pokud se loď nacházela mezi vysílači, pohybovala se průměrná odchylka okolo 4cm. Mimo vysílače bylo určení polohy přesné o něco méně, ale průměrná chyba zůstala stále pod 20cm.



Obr. 5 Schéma akustického lokalizačního systému pro měření polohy lodí, zdroj [8] str. 2

### 2.5 Optické systémy

Optické systémy využívají pro lokalizaci elektromagnetické záření. Často pracují ve spektru viditelného světla, které umožňuje používání běžných kamer, ale lze se setkat i se systémy pracujícími v oblasti infračerveného světla či mikrovln. Určení polohy probíhá zpravidla na základě rozpoznání měřeného objektu v obraze jedné či více kamer. Z obrazových dat při znalosti parametrů kamery lze dopočítat polohu tělesa v prostoru. Aby bylo možné daný objekt rozpoznat, umísťují se na objekty značky, které jsou v obraze snadněji detekovatelné. Podle typu použitých značek lze systémy dále rozdělit na systémy s pasivními značkami, aktivními značkami a systémy pracující bez značek. Kromě snadnější detekce se značky využívají i pro zakódování informace, která slouží například pro rozpoznání více jinak stejně vypadajících objektů od sebe. Zejména pokud systémy pracují v jiné oblasti spektra, než je viditelná a infračervená oblast, mohou využívat jiné techniky určování polohy než je zpracování obrazu (například triangulace podle intenzity přijatého signálu) a dále uváděné vlastnosti pro ně nemusí platit.

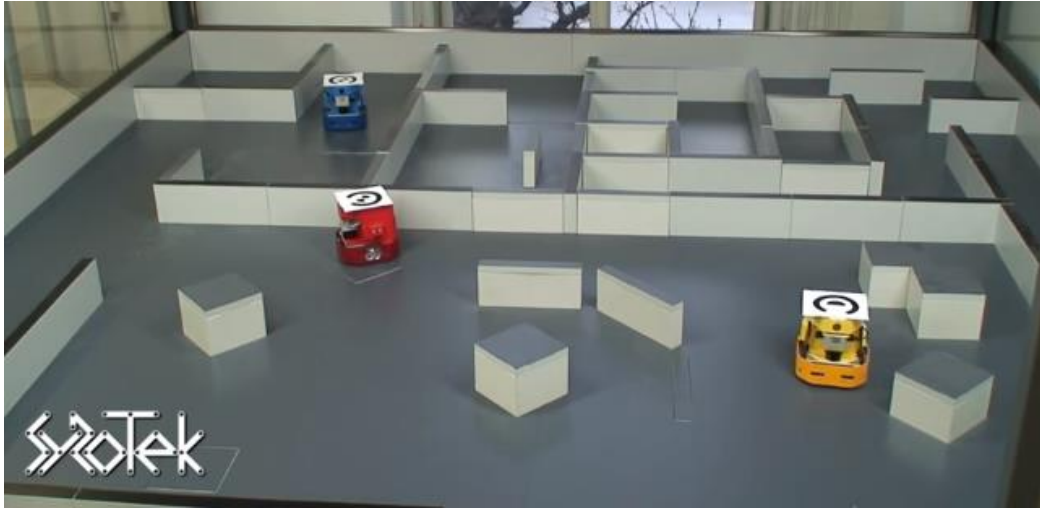
Pokud jsou známy pozice kamer, určují optické systémy polohu absolutně. Přesnost závisí zejména na rozlišení použitých kamer a klesá s narůstající vzdáleností. Na kratší vzdálenosti do několika metrů tyto systémy dosahují velmi vysokých přesností. Velikost pracovního prostoru systému je dána ohniskovou vzdáleností objektivu kamery. Použitím více kamer lze pracovní prostor rozšířit, ale u systémů počítajících polohu z více kamer, může být naopak jeho velikost průnikem pracovních prostorů těchto kamer. Pro určení polohy je rovněž vyžadována přímá viditelnost objektu od kamery. Do jisté míry lze zákryty obejít použitím více kamer. Měření může být také negativně ovlivněno okolními podmínkami, jako jsou změny okolního osvětlení či vibrace způsobující chvění kamery. Určování polohy z obrazu je velmi náročné na výpočetní výkon. Výpočetní náročnost stoupá zejména s velikostí rozlišení kamery a počtem kamer. Roste ale i s počtem sledovaných objektů. Vše potom ovlivňuje maximální frekvenci lokalizace a zpoždění, které rozhodují o možnosti použití v real-time aplikacích, jakou je například zpětnovazební řízení.

#### 2.5.1 Optické systémy se snímáním pasivních značek

Pasivní značky neemitují vlastní světlo a pouze odrážejí okolní osvětlení. Detekovány bývají v obraze na základě svého tvaru a barvy. Na sledovaném objektu se nemusí nacházet speciální elektronika starající se o vysílání světla, což kladně ovlivňuje cenu a složitost systému. Značka proto může být vytištěna i na běžné kancelářské tiskárně. Tyto systémy jsou ale více závislé na okolním osvětlení, které může ovlivnit i přesnost systému. K tomu například dochází, pokud jsou rozpoznávány okraje podle intenzity odraženého světla. Při změnách intenzity osvětlení dochází k mírnému posouvání okraje. Proto je potřeba u řady těchto systémů zajistit stálé světelné podmínky. Na principu lokalizace s pasivními optickými značkami pracuje i program WhyCon (kapitola 3), který je základem lokalizace popisované v této práci.

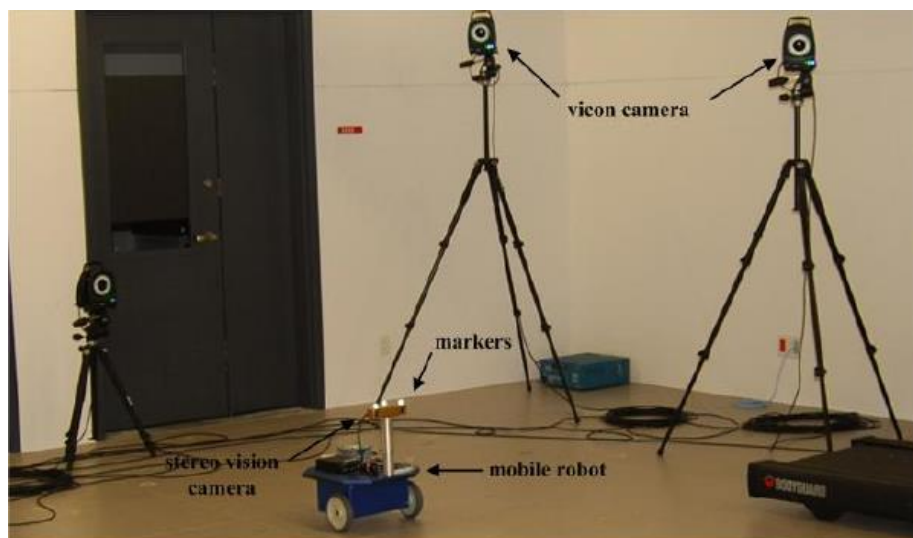
Optický systém s pasivními značkami je používán pro sledování polohy robotů v experimentální aréně projektu SyRoTek [9]. Kolové roboty se pohybují po rovné desce arény s velikostí 3,5x3,8m, a proto je jejich pohyb dvourozměrný a stačí měřit pouze 2D polohu a orientaci. Jedná se o dvoukolé roboty s diferenciálním podvozkem a s tělem o rozměrech 17,4x16,3cm a s výškou 18cm. Pasivní značka je umístěná na střeše každého robotu. Skládá se ze dvou vykrojených mezikruží. Vnější mezikruží s jedním výřezem slouží k určení polohy a natočení,

které je určováno z polohy výřezu. U vnitřního je ve výřezích zakódované číslo robotu. Značky jsou sledovány jednou kamerou umístěnou nad středem arény. Použitá kamera má rozlišení 1600x1200 pixelů a rychlost snímání je 12 FPS. Lokalizace má přesnost 3mm pro pozici a 5° pro natočení.



Obr. 6 Experimentální aréna SyRoTek sledující 2D polohu dvoukolových robotů, zdroj <https://syrotek.felk.cvut.cz/about/videos>

Komerčními systémy pracujícími s pasivními značkami jsou motion capture systémy od firmy Vicon [11]. Lokalizace probíhá v prostoru sledovaném několika infračervenými kamerami. Tyto kamery také nasvěčují v infračerveném spektru pasivní značky. Přesné parametry systému závisí na jeho konfiguraci (počet použitých kamer, vzdálenosti atd.), ale obecně tyto systémy dokáží pracovat s přesností pod 1mm. Vzhledem k vysoké přesnosti lze tento systém použít pro sledování pohybů lidského těla i pohybů obličeje. Hlavní nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady.

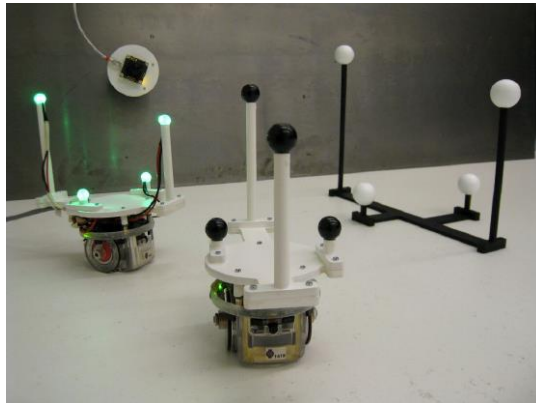


Obr. 7 Ukázka systému Vicon pro měření polohy robotu, zdroj [24] str. 1960

## 2. Systémy pro prostorovou lokalizaci

### 2.5.1.1 Monokulární systém s 6DoF lokalizací

Ve článku [10] je popsána plná 6DoF lokalizace za použití jedné kamery. Systém byl vyvíjen pro aplikace s více roboty, kde každý robot musí být schopný určit svou polohu vůči ostatním. Všechny roboty jsou tedy vybavené kamerou a prostorovou značkou. Doporučené je používat všesměrovou kameru, aby bylo možné vždy lokalizovat ostatní roboty. Značka (Obr. 8) se skládá ze čtyř menších kulových značek s pevně daným geometrickým uspořádáním, které jsou lokalizovány v obraze samostatně. Poloha značky je počítána ze vzájemných poloh menších značek ve dvourozměrném obraze. Jednotlivé malé značky není možné na začátku výpočtu od sebe v obraze rozlišit. Algoritmus proto při výpočtu vyzkouší všechny variace přiřazení obrazu značky ke skutečné, kterých je 24. Pro každou variaci z prvních tří značek určí přes řešení problému tři bodů (viz kapitola 4) až čtyři možná řešení. Pomocí čtvrtého bodu vypočte odchylku vypočteného a skutečného průmětu. Nakonec vybere napříč všemi variacemi řešení s nejmenší odchylkou. Pokud by do měření nevstupovaly žádné chyby, bude toto řešení vždy tím správným.



Obr. 8 Různé značky pro monokulární systém s 6DoF lokalizací, zdroj [10] str. 79

Přesnost systému byla testována několika experimenty. Při prvním byla měřena pozice a náklon kvadroptéry s kamerou, která sledovala na zemi pevně umístěnou značku. Rozlišení kamery bylo 752x480px a průměr kulových značek byl 3cm. Prostorová značka měla nejdelší vzdálenost mezi protilehlými značkami 30cm. Měření byly dva lety. Při prvním letu byla manipulace prováděna ručně a vzdálenost kamery od značky se pohybovala mezi 67,7 až 174,1cm. Poloha byla určena s chybou v rozmezí od 0.1 cm do 12.2 cm. Průměrná chyba byla 1,7cm se směrodatnou odchylkou 0,7cm. Chyba natočení se pohybovala mezi 0,1° a 4,5° s průměrnou hodnotou 1,2° a směrodatnou odchylkou 0,4°. Maximální odchylky navíc nastaly vždy v případech, kdy byly viditelné pouze tři body. Druhé měření probíhalo již za letu, při kterém vzdálenost nepřesáhla 3 metry. Dosaženo bylo průměrné přesnosti 2,2cm a 1°.

Ve druhém experimentu byly lokalizované dva roboty. První se pohyboval po podlaze a druhý po stěně kolmé k podlaze. Celá scéna byla snímána kamerou s rozlišením 1280x960px umístěnou ve výšce 2,3m nad podlahou. Na první robotu byla umístěna značka s rozměry 30x42cm. Rozměry značky na druhém robotu byly 25x21cm. Robot také nesl druhou kameru s rozlišením 752x480 pixelů. Přesnost určení pozice z první kamery byla pro robot na podlaze 1cm a pro robot na stěně 1,7cm. Z druhé kamery byly tyto přesnosti 3,3cm a 7,8cm. Kromě pasivních značek bylo vyzkoušeno i umístění aktivní značky na robot na podlaze. K viditelné změně přesnosti systému touto záměnou nedošlo.

### 2.5.2 Optické systémy využívající aktivní značky

Aktivní značky na rozdíl od značek pasivních světlo přímo vyzařují. Jedná se nejčastěji o záření ve viditelné nebo infračervené části spektra. Výhodou těchto systémů je možnost multiplexování, kdy nemusí vyzařovat všechny značky společně a podle pořadí je lze od sebe rozeznat. Také jsou méně náchylné na změny okolních podmínek. Nevýhodou je nutnost zajištění napájení značky.

S aktivními značkami v infračerveném oboru spektra pracuje komerčně vyráběný systém Certus HD [12]. Ke snímání využívá podlouhlý senzor dlouhý 112,5cm, na kterém jsou umístěné tři infračervené kamery. Systém dokáže najednou detekovat až 512 bodových značek nebo 170 prostorových značek, které se skládají ze tří bodových značek a slouží pro 6DoF lokalizaci. Pracovní prostor sahá do vzdálenosti až 6m od senzoru. Velikost plochy záběru je 2,7x3,7m. Přesnost systému klesá se vzdáleností. Ve vzdálenosti 2m dosahuje přibližně přesnosti 0,2mm (0,1mm vertikálně a horizontálně, 0,15mm hloubka). Ve vzdálenosti 6m je přesnost okolo 0,6mm (0,25mm vertikálně a horizontálně, 0,45mm hloubka). Rychlost snímání je až 4500 značek za sekundu.



Obr. 9 Senzor a aktivní značka pro 6DoF lokalizaci systému Certus HD, zdroj [12]

Motion capture systém pro snímání lidského pohybu pracující ve viditelném světle je popsán v [13]. Ke snímání jsou používány dvě vysokorychlostní kamery s rozlišením 656x490 pixelů a frekvencí snímání 100Hz. Jako značky byly použity 3mm LED diody. Součástí systému byla rovněž konstrukce s rozmístěnými značkami, která sloužila pro kalibraci kamer. Systém při statických podmínkách dosahoval průměrné přesnosti 0,2698mm. Při nízkých rychlostech byla přesnost téměř totožná se statickými podmínkami. Při nejvyšší testované rychlosti 9km/h byla přesnost 1,1mm.

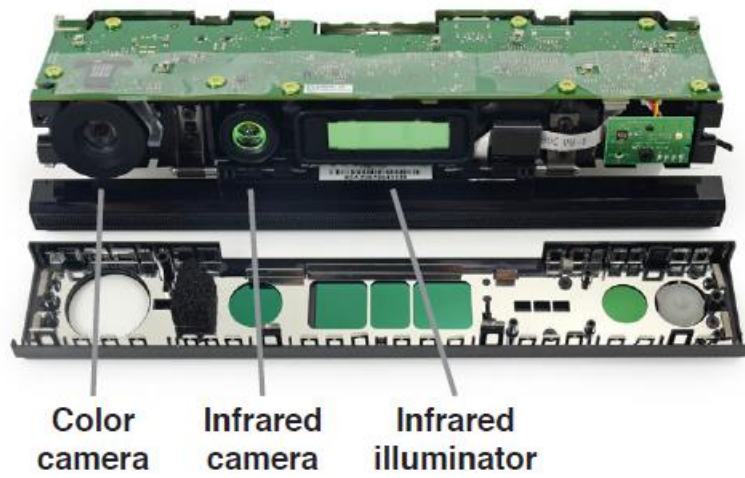
### 2.5.3 Optické systémy pracující bez značek

Optické systémy pracující bez značek určují polohu ze samotného obrazu objektu, který dokáží samy rozpoznat. Hlavní předností těchto systémů je, že sledování není omezeno jen na předem připravené objekty se značkou, ale lze rozpoznat a určit polohu libovolného objektu v záběru.

Rozšířeným senzorem, který se dnes využívá pro stavbu těchto systémů je Microsoft Kinect [14]. Toto zařízení je primárně určeno a vyvíjeno pro herní konzole, díky čemuž je cenově dostupné. Kinect se využívá zejména v motion capture systémech pro sledování lidského těla. V robotice ho lze použít i jako hlavní senzor robotu pro snímání okolí. Může tak vytvářet například 3D mapy okolí nebo se sám v prostoru lokalizovat. Ve verzi Kinect v2 je senzor vybaven barevnou kamerou s Full HD rozlišením, infračervenou kamerou s rozlišením 512x424 pixelů a infračerveným zářičem. Hloubku obrazu určuje z času letu infračerveného světla od zářiče do kamery. Objekty je schopný sledovat od 0,5 do 4,5 m. Ve článku [15] byla experimentálně ověřena přesnost detekce hloubky na vzdálenostech od 0,6m do 4,5m.

## 2. Systémy pro prostorovou lokalizaci

Průměrná chyba se pohybovala okolo 3mm se standardní odchylkou 1mm. Proměřena byla i starší verze Kinectu, jejíž přesnost byla pouze 1,7cm se standardní odchylkou 1,2cm.

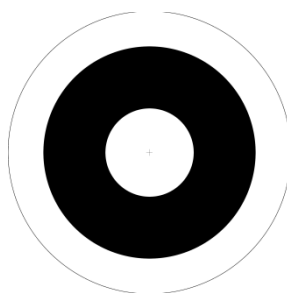


Obr. 10 Microsoft Kinect v2. Na obrázku je vyznačena barevná kamera, infračervená kamera a infračervený zářič, zdroj [14] str. 2

### 3 WhyCon

WhyCon ([16], [17], [18], [19]) je open-source vizuální lokalizační systém vyvíjený ve spolupráci mezi University of Buenos Aires, Českým vysokým učením technickým v Praze a University of Lincoln (UK). K lokalizaci využívá pouze jednu kameru pracující ve viditelném světle, kterou detekuje černobílé kruhové značky. Program je psaný pro unixové systémy. Systém nevyžaduje žádné speciální komponenty, které u jiných systémů výrazně navyšují cenu, ani neklade příliš mnoho omezení na kvalitu kamery nebo výpočetní výkon. Samozřejmě ale použité komponenty přímo ovlivní vlastnosti systému, jako jsou přesnost nebo rychlost. Výhodou WhyConu je poměrně nízká výpočetní náročnost algoritmu, což umožňuje jeho použití i na jednodeskových počítačích. Důležitá je také schopnost mapovat velké množství značek, která umožňuje použití v kolektivní robotice.

Používané značky jsou pouze dvourozměrné. Každá sestává z bílého kruhu, na který navazuje černé a bílé mezikruží (vzhledem připomíná terč). Velikosti ani poměry velikostí průměrů kruhu a mezikruží nejsou pevně stanovené a mohou se v různých aplikacích lišit. Vždy je však potřeba algoritmu informace o velikostech předat před startem lokalizace. Rozdílné poměry mohou být také využité jako identifikátor značky pro jejich rozlišení. Značky lze díky dvourozměrné struktuře vyrobit na běžné kancelářské tiskárně.



Obr. 11 Značka pro systém WhyCon

#### 3.1 Verze WhyConu

Systém WhyCon je vyvíjen v několika různých verzích:

WhyCon version	Application	Main features
WhyCon-ROS	general	2D, 3D, ROS + lightweight
WhyCon-Mini	general	2D, 3D, lightweight, autocalibration
SwarmCon	$\mu$ -swarms	2D, individual IDs, autocalibration
Caspa-WhyCon	UAVs	embedded, open HW-SW solution
Social-card	HRI	orientation translated to commands

Tabulka 1 Přehled verzí programu WhyCon a jejich vlastností (zdroj [19])

##### 3.1.1 WhyCon-ROS

V této práci byla použita verze WhyCon-ROS, která byla zvolena zejména pro snadnou implementaci IP kamery pomocí knihovny OpenCV a větší uživatelskou přívětivost kódu. Nastavení lokalizace probíhá pouze při spouštění programu a oproti verzi WhyCon-orig do ní není možné dále zasahovat. Další nevýhodou oproti verzi WhyCon-orig je, že není možné nastavení vlastní souřadné soustavy pro 3D lokalizaci. Tato verze může být kompilována jako sdílená knihovna pro ROS nebo samostatně. V této práci byla vždy používána druhá možnost.

### 3. WhyCon

Program má dva odlišné módy běhu. První je mód, ve kterém jsou nastavovány osy pro 2D určování polohy. Do záběru se umístí do čtverce 1x1m čtyři značky. Po spuštění se nastavení spustí stiskem pravého tlačítka myši. Program sám detekuje značky a vypočte matici H, kterou s dalšími parametry uloží do souboru. Druhým módem je samotné sledování, u kterého je potřebné zadat počet sledovaných značek. Zde se vybírá mezi 2D a 3D lokalizací. Pro 2D lokalizaci je potřeba zadat jméno souboru s nastavením. Spouštění lokalizace probíhá rovněž stiskem pravého tlačítka myši v případě použití grafického výstupu, který je možné vypnout. Potom se lokalizace spouští automaticky se spuštěním programu. V otevřeném okně programu zobrazuje aktuální obraz kamery. Do detekovaných značek vykresluje elipsu s poloosami a vedle vypisuje souřadnice a číslo značky.

Před startem je možné zvolit zdroj videa, kterým může být kamera, video nebo sekvence obrázků. U kamery je potřeba jako parametr předat její ID. U videa a sekvence se programu předává cesta k souboru. U sekvence musí být navíc definován formát pojmenovávání obrázků.

Dalším vstupem je soubor s kalibrací kamery (.xml nebo .m). Součástí WhyCon-ROS je ještě program camera-calibrator, který umí na základě snímků černobílé šachovnice vygenerovat xml soubor s parametry kalibrace. Druhou možností je použít kalibrační soubor vytvořený pomocí Calibration Toolbox for Matlab [20]. Na vstupu lze nastavit také rozlišení kamery a velikosti značky.

Výstupem lokalizace je textový soubor se změřenými souřadnicemi jednotlivých značek a video soubor s grafickým výstupem.

## 3.2 Algoritmus

### 3.2.1 Detekce značky

Detekce značky začíná vyhledáváním černých oblastí ve snímku. Pokud nemá informaci o tom, kde by se mohla černá oblast značky nacházet, prochází snímek pixel po pixelu. Pokud již má algoritmus informaci, kde se nacházela značka při minulém měření, použije ji jako výchozí polohu. Když najde jeden černý pixel, začne prozkoumávat všechny okolní pixely, dokud nezíská celou černou ohraničenou oblast. Následně otestuje, zdali černá oblast odpovídá značce. Prvním testem je porovnání velikosti v pixelech s minimální velikostí. Pokud je tato podmínka splněna, vypočte parametr zaoblení. Tento parametr porovná s teoreticky určeným, a pokud je odchylka dostatečně malá, pokračuje ve výpočtu. V dalším kroku provede stejný test pro vnitřní bílý kruh. Pokud je i tento test úspěšný, považuje algoritmus značku za rozpoznanou.

Důležitou vlastností algoritmu je schopnost měnit prahovou hodnotu, na základě které je rozlišováno mezi černým a bílým segmentem. Pokud není žádná značka rozpoznána, zkouší postupně měnit prahovou hodnotu, dokud nedojde k rozpoznání. Pokud naopak značka je rozpoznána, aktualizuje podle ní prahovou hodnotu, jako průměr hodnot světlé a tmavé oblasti.

Polohu středu program určí z poloh všech detekovaných bodů. Protože se ve středovém promítání kružnice zobrazí na elipsu, je možné z kruhové značky určit natočení a délku poloos elipsy. Tyto hodnoty jsou počítány z vlastních hodnot a vlastních vektorů kovarianční matice



polohy bodů. Elipsa je na závěr znovu otestována výpočtem parametru zaoblení, který je nyní počítán z délky poloos elipsy.

Pro výpočet polohy je důležité i správné určení průměru elipsy. Poloha okraje je ovlivňována i nepřesnostmi, jako jsou chromatická aberace, nelineární citlivost kamery, kvantizační šum nebo komprese obrazu. Proto je součástí algoritmu i kompenzace, která opravuje špatně určené pixely na základě znalosti průměrů značky. Přesnost se kompenzací zlepší přibližně o 15%.

Při měření nemusí být v celém záběru stejné světelné podmínky, a proto je při sledování více značek využívána pro každou značku vlastní prahová hodnota. Zároveň tím dochází ke zvýšení přesnosti lokalizace. Algoritmus musí mít rovněž ošetřené, aby nedetekoval jednu značku vícekrát. Proto je po úspěšné detekci značky obraz v místě značky modifikován.

### 3.2.2 Výpočet 3D polohy

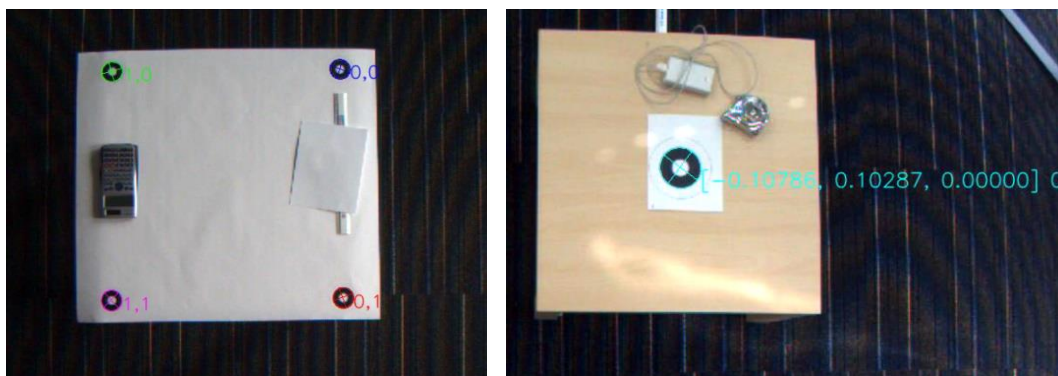
Z obdržných parametrů elipsy je dále počítána poloha značky v prostoru. Nejprve jsou poloha středu a poloosy transformovány do kanonických souřadnic kamery. Při této transformaci je kompenzována radiální distorze na základě dat z kalibrace kamery. Z transformovaných parametrů je sestavena matice rovnice elipsy. Z vlastních hodnot a vektorů této matice je určena 3D poloha značky v souřadném systému orientovaném dle kamery. Ve verzi WhyCon-orig je tato poloha ještě transformována do uživatelem zvoleného souřadného systému. Tento systém je určen při kalibraci prováděné na základě tří do pravého úhlu umístěných značek.

### 3.2.3 Výpočet 2D polohy

Kromě 3D polohy umožňuje WhyCon určování polohy značky v uživatelem definované rovině (Obr. 12). K nastavení se používají čtyři do čtverce rozmístěné značky ležící v této rovině. Z těchto značek je určena matice  $H$  o rozměru  $3 \times 3$ , pomocí které lze převést 3D polohu značky, na 2D polohu v této rovině. Pokud značka v této rovině přímo neleží, je vypočtená 2D poloha jejím středovým průmětem do definované roviny. 2D poloha  $\vec{p}_{2D} = [x_{2D}, y_{2D}]$  je vypočítána z 3D polohového vektoru  $\vec{p}_{3D} = [x_{3D}, y_{3D}, z_{3D}]$  a matice  $H$  v následujících dvou krocích [19]:

$$\vec{u} = H \cdot \vec{p}_{3D} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_{2D} \\ y_{2D} \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\vec{u}(3)} \cdot \vec{u} \quad (2)$$



Obr. 12 Nastavování os pro 2D lokalizaci programu WhyCon a 2D lokalizace

### 3.3 Udávané přesnosti

Ve článku [18] byl systém WhyCon experimentálně proměřen s různými kamerami. Jako první byla měřena vzdálenost, do které je systém schopný značku rozpoznat, jestliže je její natočení 0° nebo 40°. Pro 16MPx kameru Olympus VR-340 a značky o průměrech černého mezikruží 2,5, 5 a 7,5 cm byly maximální vzdálenosti:

Průměr značky (cm)	Max. vzdálenost (m) pro 0°	Max. vzdálenost (m) pro 40°
2,5	6,8	6,2
5,0	13,2	11,4
7,5	19,8	16,8

Tabulka 2 Maximální naměřená vzdálenost značky pro 16Mpx kameru ([18], str. 14)

Dále byla měřena přesnost určení 3D polohy pro kamery Creative Live! webcam, Olympus VR-340 a Canon 550D s rozlišením 1280×720, 4608×3456 a 5184×3456 pixelů. Kamery byly umístěné do dvou pozic, ve kterých sledovaly na podlaze pravidelně rozmístěné matice shora a mírně ze strany. Přesnost umístění značek byla přibližně 0,6cm.

Rozlišení	Pohled	Průměrná odchylka (cm)	Maximální odchylka (cm)
1280×720	ze strany	5,7	19,5
1280×720	shora	3,7	12,1
4608×3456	za strany	1,9	6,5
4608×3456	shora	3,2	11,0
5186×3456	shora	2,5	7,4

Tabulka 3 Naměřené přesnosti určení 3D polohy ([18], str. 16)

Pro stejné kamery a rozmístění značek byla změřena i přesnost určení polohy v rovině (2D).

Rozlišení	Pohled	Průměrná odchylka (cm)	Maximální odchylka (cm)
1280×720	ze strany	0,23	0,62
1280×720	shora	0,18	0,68
4608×3456	za strany	0,64	1,40
4608×3456	shora	0,68	2,08
5186×3456	shora	0,15	0,33

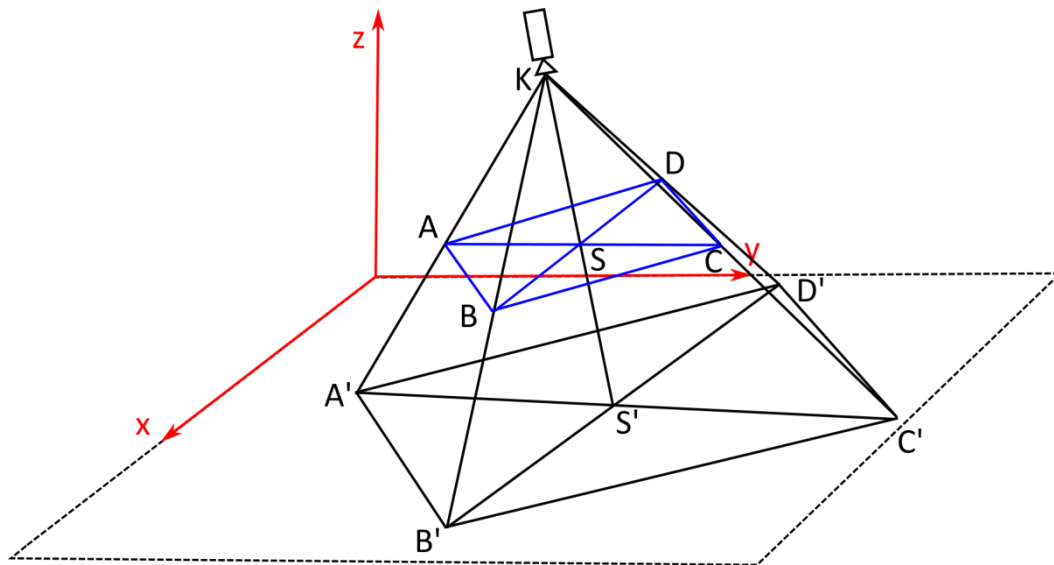
Tabulka 4 Naměřené přesnosti určení polohy v rovině ([18], str. 16)

## 4 Návrh 6D lokalizace

### 4.1 Výpočet polohy kamery

6D lokalizace byla navrhována jako nadstavba 2D určení polohy v programu WhyCon, kterému přidává osu  $z$  kolmou na nastavené osy  $s$  kladnou částí na straně kamery. Z původní lokalizace dostáváme přesné průměty bodů do roviny. V takto rozšířeném systému jsou 2D průměty považovány za trojrozměrné vektory se  $z = 0$ . Reálné body leží na spojnici mezi průmětem značky a kamerou, jejíž polohu je potřeba znát pro obě metody výpočtu polohy popsané dále v této kapitole. Vypočítat ji lze přímo z matice  $H$  (viz kapitola 3.2.3). Protože je matice  $H$  určována pouze při nastavování os, stačí tento výpočet provádět také jen po jejím nastavení. Poloha kamery bude dále označována jako  $\vec{K} = [K_x, K_y, K_z]$ .

O 3D souřadnicích kamery víme, že  $\vec{K} = [0, 0, 0]$ . Pro tento bod neexistuje průmět do definované roviny. Jeho pozici tedy určíme nepřímou na základě průmětů 5 zvolených bodů (dále značených  $A, B, C, D, S$  s průměty  $A'$  atd.). Tyto body jsou vrcholy a středem podstavy pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholem v bodě  $K$  (znázorněno na Obr. 13). V jehlanu, který vznikne mezi průměty bodů a bodem  $K$ , jsou všechny úhly s vrcholem  $K$  stejné, jako v jehlanu původním.



Obr. 13 Znárodnění geometrie pro úlohu výpočtu polohy kamery z průmětu 5 bodů.

Použitím podobného algoritmu jako v kapitole 4.4 lze získat postupně pro trojice bodů v přímce  $A'SB'$  a  $C'SD'$ , vzdálenosti těchto bodů od  $K$ . Při znalosti všech vzdáleností a úhlů s vrcholem  $K$  lze spočítat i úhly  $\sphericalangle B'A'K$  a  $\sphericalangle C'A'K'$ . Dalším krokem bude určení vektoru  $\vec{n} = c \cdot \vec{A'K} = [n_x, n_y, n_z]$ , kde  $c \in \mathbb{R}$ . Na základě známých parametrů a vlastností skalárního součinu, pro  $\vec{n}$  platí rovnice:

$$\frac{\vec{A'B'} \cdot \vec{n}}{|\vec{A'B'}| \cdot |\vec{n}|} = \cos(\sphericalangle B'A'K) \quad (3)$$

#### 4. Návrh 6D lokalizace

$$\frac{\overrightarrow{A'C'} \cdot \vec{n}}{|\overrightarrow{A'C'}| \cdot |\vec{n}|} = \cos(\sphericalangle C'A'K)$$

Po roznásobení skalárního součinu z obou rovnic vypadne souřadnice  $n_z$ , protože z-ová souřadnice vektorů  $\overrightarrow{A'B'}$  a  $\overrightarrow{A'C'}$  je rovna nule. Po vykrácení obou rovnic pravou stranou získáváme pouze jednu rovnici, kde zavedeme koeficienty:

$$\begin{aligned} [A_1, A_2, 0] &= \frac{\overrightarrow{A'B'}}{|\overrightarrow{A'B'}| \cdot \cos(\sphericalangle B'A'K)} \\ [C_1, C_2, 0] &= \frac{\overrightarrow{A'C'}}{|\overrightarrow{A'C'}| \cdot \cos(\sphericalangle C'A'K)} \end{aligned} \quad (4)$$

Výsledná rovnice je:

$$A_1 n_x + A_2 n_y = C_1 n_x + C_2 n_y \quad (5)$$

Protože u vektoru  $n$  je důležitý pouze směr, zvolíme  $n_z = 1$ . Nyní si z rovnice (5) vyjádříme závislost  $n_y$  na  $n_x$ , kterou označíme jako  $X$  a bude platit, že:

$$n_y = \frac{A_1 - C_1}{C_2 - A_2} \cdot n_x = X \cdot n_x \quad (6)$$

Společně s  $n_z$  ji dosadíme do rovnice (3) za pomoci koeficientů z rovnice (4), čímž dostáváme pro  $n_x$  vztah:

$$n_x = \pm \sqrt{\frac{1}{(A_1 + A_2 \cdot X)^2 - (1 + X^2)}} \quad (7)$$

Tím získáme dvě řešení pro hodnotu  $n_x$ , ze kterých vypočteme hodnotu  $n_y$ . Polohu kamery vypočteme po dosazení  $\vec{n}$  do následující rovnice:

$$\vec{K} = \vec{A'} + \vec{n} \cdot \frac{|A'K|}{|\vec{n}|} \quad (8)$$

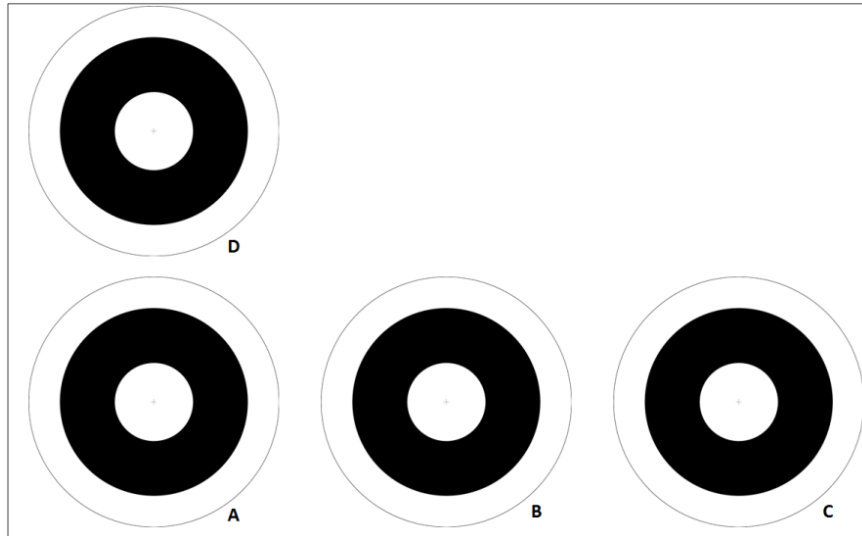
Na základě porovnání vzdálenosti  $|C'K|$  se vzdáleností spočtenou výše vybereme správné řešení pro polohu kamery. Při výpočtu také může nastat situace, kde je jeden z cosinů v rovnici (4) roven nule, v tom případě  $n_x$  a  $n_y$  odpovídá kolmici k vektoru  $\overrightarrow{A'B'}$  nebo  $\overrightarrow{A'C'}$  a  $n_z$  lze vypočítat z jedné z rovnic (3). Pokud jsou nulové oba, je  $\vec{n} = [0,0,1]$ . Pokud se v rovnici (5)  $A_2 = C_2$ , tak  $n_x = 0$  a  $n_y$  lze vypočítat z jedné z rovnic (3).

#### 4.2 P3P problém

Problém tří bodů (The Perspective-Three-Point problem) je matematická úloha často řešená v oboru počítačového vidění, která na základě tří známých pozic bodů v prostoru a jejich obrazu (středového průmětu do roviny) dokáže určit pozici a natočení kamery. Pokud je naopak známá pozice kamery, lze úlohu formulovat jako určení prostorových souřadnic bodů z jejich středových průmětů. P3P problém má až čtyři možná řešení. Aby bylo řešení pouze jedno, přidává se průmět dalšího bodu. Úloha s  $n$  body se obecně nazývá PnP problém. Pro 4 a více bodů má úloha až na speciální případy pouze jedno řešení.

### 4.3 Značka a rozpoznání jednotlivých bodů

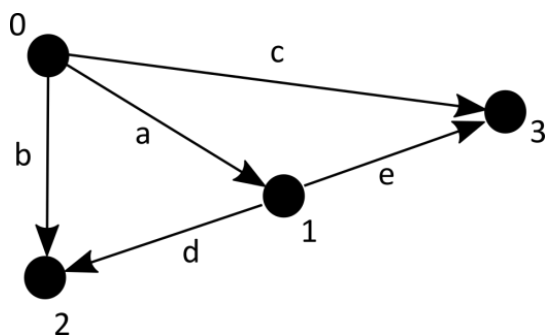
Používaná značka (viz Obr. 14) sestává ze tří terčových značek ležících v přímce (značeny A, B, C) a jedné ležící na kolmici k této přímce, která vede ze středu A (značena D). Značka je pro oba způsoby výpočtu stejná. Určovanými parametry značky jsou 3D poloha bodu B a 3 úhly natočení podle systému Yaw, Pitch, Roll ([21], str. 11). Poloha a úhly Yaw a Pitch jsou určeny vždy jednoznačně. Úhel Roll nemá jednoznačné řešení v případě, kdy se rovina tvořená přímkami  $\leftrightarrow AK$  a  $\leftrightarrow DK$  zobrazí na přímku. Tuto nejednoznačnost lze vyřešit přidáním pátého bodu nebo posunutím bodu C tak, aby neležel v přímce s body A a B. Na takovou značku by ale nebylo možné použít algoritmus popsany v kapitole 4.4.



Obr. 14 Značka používaná pro 6DoF lokalizaci skládající se ze čtyř terčových značek pro program WhyCon

Před samotným výpočtem polohy je nutné přiřadit konkrétní značku naměřeným průmětům. Při lokalizaci předpokládáme pevnou strukturu značky a sledování pouze z jedné strany. Nepředpokládáme ani situaci, kdy by se všechny značky zobrazily do přímky, protože již předtím by selhalo rozpoznávání terčů z programu WhyCon. Rozpoznání začíná nalezením 3 bodů ležících v přímce (tedy A, B, C). Protože průmětem přímky ve středovém promítání je opět přímka, lze tyto body hledat pouze z 2D průmětů. Pouze s 2D průměty těchto bodů počítá i celý dále popsany algoritmus.

Po nalezení přímky můžeme již jednoznačně určit, která ze značek je D. Na začátku algoritmu máme průměty značek 0 až 3 (viz Obr. 15). Pokud zvolíme pět přímek, které jsou určeny různými dvojicemi středů značek, budou mezi nimi určitě dvě, které jsou rovnoběžné. Důkazem tohoto tvrzení je, že rovnoběžné nejsou pouze tři přímky procházející bodem D. Nyní budeme hledat dvě přímky, které svírají nulový úhel. Body ležící v těchto přímkách budou A, B a C.



Obr. 15 Graf znázorňující průměty značek a vektory pro určení značky D

Abychom nemuseli počítat všechny kombinace přímek, lze zvolit pouze čtyři z nich. Těmi jsou všechny tři vytvořené z přímek sestavených z bodu 0. Pouze pro bod D nebude ani jedna z dvojic svírat úhel nula. Přidáme proto ještě kombinaci vytvořenou ze dvou ještě nepoužitých přímek. Protože během měření úhly vlivem odchylky měření nevychází přesně rovné nule, vybereme za výsledek dvojici s nejmenším úhlem. Na základě dvojice rovnoběžných přímek lze určit bod D dle tabulky:

Rovnoběžná dvojice	Značka D
a - b	3
a - c	2
b - c	1
d - e	0

Tabulka 5 Tabulka rozhodování o průmětu bodu D na základě zjištěných rovnoběžných přímek dle Obr. 15

Ze zbývajících trojic nyní určíme bod B. Pro každý z těchto bodů vypočteme součet vzdáleností ke zbývajícím bodům. Tuto vzdálenost má nejmenší právě bod B.

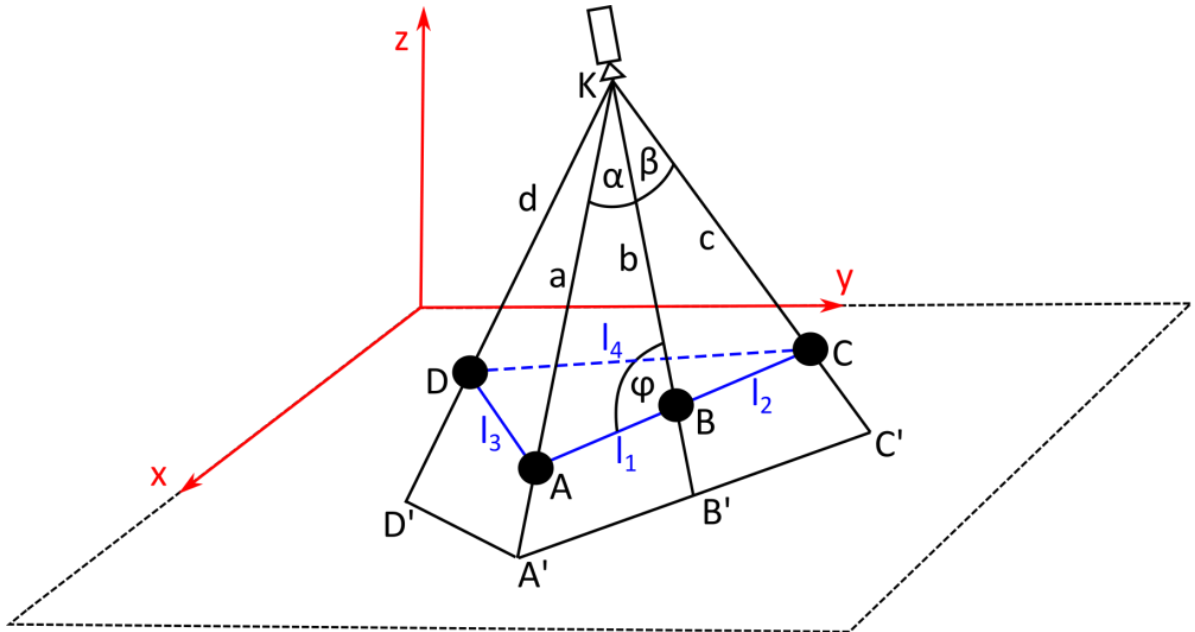
Pro zbývajících dva body spočteme velikost úhlu mezi vektory vedenými z bodu D do těchto bodů. Podle znaménka úhlu lze rozhodnout o přiřazení A a C. Při nastavování os program WhyCon nedodrhuje pevnou orientaci os x a y, která rozhoduje o znaménku při přiřazování. Orientaci os je možné spočítat z matice H (promítnu teoreticky zvolený známý úhel ve 3D a zkoumám, zdali je ve 2D průmětu kladný nebo záporný). Vyjádřena byla jako parametr nabývající hodnot  $\{-1, 1\}$ , kterým je velikost úhlu vektorů z bodu D vynásobena a výpočet je potom univerzální pro obě možné orientace souřadné soustavy. Vzhledem k existenci pouze dvou možností, byla závislost přiřazení na znaménku úhlu určena experimentálně.

#### 4.4 Výpočet polohy tří bodů ležících na přímce

6DoF poloha je počítána z obrazu značky u které známe 2D průměty jednotlivých bodů. Jako první bude určena poloha tří bodů ležících v přímce. Jedná se o speciální případ řešení problému tří bodů, který však dává jednoznačné řešení při podmínkách lokalizace popsanych v kapitole 4.3. Při výpočtu bude značení průmětů bodů  $A', B', C'$  a skutečných 3D poloh značek  $A, B, C$ . Vzdálenosti  $|AB|$  a  $|BC|$  budou značeny  $l_1$  a  $l_2$ . Ve výpočtu budou dále použity úhly  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\varphi$ , pro které platí:

$$\begin{aligned}\alpha &= \sphericalangle AKB = \sphericalangle A'KB' \\ \beta &= \sphericalangle BKC = \sphericalangle B'KC' \\ \varphi &= \sphericalangle ABK = 180^\circ - \sphericalangle ABK = \sphericalangle CBK\end{aligned}\tag{9}$$

Vzdálenosti z bodu K (bod kamery viz kapitola 4.1) do bodů A, B, C jsou označeny a, b, c. Geometrický náčrtek s vyznačenými používanými symboly je zobrazen na Obr. 16.



Obr. 16 Náčrtek geometrie úlohy určování 3D polohy z průmětu čtyř bodů do roviny.

Před samotným výpočtem je potřeba spočítat hodnoty  $\sin(\alpha)$ ,  $\sin(\beta)$  a  $\cos(\alpha + \beta)$ :

$$\sin(\alpha) = \frac{|\vec{KA}' \times \vec{KB}'|}{|\vec{KA}'| \cdot |\vec{KB}'|}$$

$$\sin(\beta) = \frac{|\vec{KB}' \times \vec{KC}'|}{|\vec{KB}'| \cdot |\vec{KC}'|} \quad (10)$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \frac{|\vec{KA}' \cdot \vec{KC}'|}{|\vec{KA}'| \cdot |\vec{KC}'|}$$

Nyní máme všechny potřebné hodnoty pro výpočet  $\sin(\varphi)$  určeného rovnicí (odvozeno níže v této kapitole):

$$\sin(\varphi) = \sqrt{\frac{(l_1 + l_2)^2}{\frac{l_1^2}{\sin^2(\alpha)} + \frac{l_2^2}{\sin^2(\beta)} - \frac{2l_1l_2\cos(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta)}}} \quad (11)$$

Po dosazení hodnoty  $\sin(\varphi)$  do následujících rovnic dostaneme hodnoty délek a a c:

$$a = \frac{l_1 \cdot \sin(\varphi)}{\sin(\alpha)}$$

$$c = \frac{l_2 \cdot \sin(180^\circ - \varphi)}{\sin(\beta)} = \frac{l_2 \cdot \sin(\varphi)}{\sin(\beta)} \quad (12)$$

Pomocí těchto hodnot nyní určíme výsledné 3D souřadnice bodu A a C:

$$\begin{aligned}\vec{A} &= \vec{A}' + \vec{A'K} \cdot \frac{|\vec{A'K}| - a}{|\vec{A'K}|} \\ \vec{C} &= \vec{C}' + \vec{C'K} \cdot \frac{|\vec{C'K}| - c}{|\vec{C'K}|}\end{aligned}\quad (13)$$

Výsledná poloha bodu B je určena jako střed úsečky  $|AC|$ :

$$\vec{B} = \frac{\vec{A} + \vec{C}}{2}\quad (14)$$

#### 4.4.1 Odvození výpočtu $\sin(\varphi)$

Výpočet byl odvozen z kosinové věty pro  $\Delta ACK$  ve tvaru:

$$a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(\alpha + \beta) = (l_1 + l_2)^2\quad (15)$$

Do této rovnice dosadíme za  $a$  a  $b$  podle rovnic (12):

$$\frac{l_1^2 \cdot \sin^2(\varphi)}{\sin^2(\alpha)} + \frac{l_2^2 \cdot \sin^2(\varphi)}{\sin^2(\beta)} - \frac{2l_1l_2 \sin^2(\varphi)}{\sin(\alpha) + \sin(\beta)} \cdot \cos(\alpha + \beta) = (l_1 + l_2)^2\quad (16)$$

Hodnotu  $\sin(\varphi)$  nyní můžeme vyjádřit:

$$\sin(\varphi) = \pm \sqrt{\frac{(l_1 + l_2)^2}{\frac{l_1^2}{\sin^2(\alpha)} + \frac{l_2^2}{\sin^2(\beta)} - \frac{2l_1l_2 \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha) + \sin(\beta)}}}\quad (17)$$

Protože velikost úhlu  $\varphi$  leží na intervalu  $(0, 180^\circ)$ , je velikost  $\sin(\varphi)$  vždy kladná. Proto lze dále uvažovat jen kladné řešení. Záporné řešení také není možné použít, jelikož by hodnoty délek  $a$  a  $b$  v rovnicích (12) vycházely záporné.

#### 4.5 Dopočet polohy čtvrtého bodu a natočení

V předchozí kapitole byl popsán výpočet poloh bodů  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Poloha  $D$  je počítána taktéž z jeho průmětu a ze znalosti vzdáleností  $|AD|$  a  $|CD|$  značených  $l_3$  a  $l_4$ . Jako první je určen  $\cos(\sphericalangle A'KD')$ :

$$\cos(\sphericalangle A'KD') = \frac{|\vec{KA'} \cdot \vec{KD'}|}{|\vec{KA'}| \cdot |\vec{KD'}|}\quad (18)$$

Dále jsou spočteny dvě možné polohy bodu D ležící na přímce  $\leftrightarrow KD'$  na základě kosinové věty pro  $\Delta ADK$ , kde jedinou neznámou je vzdálenost  $d$ :

$$d = a \cdot \cos(\sphericalangle A'KD') \pm \sqrt{a^2 \cdot \cos^2(\sphericalangle A'KD') - (a^2 - l_3)^2}\quad (19)$$

3D polohy jsou spočteny obdobně jako pro body A a C v rovnicích (13). Na základě porovnání vzdáleností D od bodu C s  $l_4$  vybereme výslednou polohu značky D. Vlivem nepřesností



vstupujících do měření může vycházet hodnota pod odmocninou v rovnici (19) záporná. Hodnota odmocniny je v tomto případě považována za nulovou.

Z 3D poloh bodů můžeme určit i všechny úhly natočení:

$$\begin{aligned} \text{Yaw} &= \text{atan2}(C_y - A_y, C_x - A_x) \\ \text{Pitch} &= \pm \arccos\left(\frac{\sqrt{(A_x - C_x)^2 + (A_y - C_y)^2}}{l_1 + l_2}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

Funkce atan2 je rozšířenou funkcí arcus tangens, které se nepředává podíl odvěsen, ale dvourozměrný vektor. Výsledkem je orientovaný úhel tohoto vektoru vůči vektoru [1,0]. Znaménko úhlu Pitch je zvoleno na základě porovnání  $A_z$  a  $C_z$ , kde kladné je voleno pro  $C_z > A_z$ . Tento krok je nutný z důvodu, že funkce cosinus je sudá a funkce arccos vrací pouze hodnoty od 0 do 180°. Úhel Roll je počítán ve dvou krocích za použití pomocného vektoru  $\vec{n}$ :

$$\begin{aligned} \vec{n} &= (0,0,1) \times \overrightarrow{CA} \\ \text{Roll} &= \pm \arccos\left(\frac{\vec{n} \cdot \overrightarrow{AD}}{|\vec{n}| \cdot |\overrightarrow{AD}|}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

Podobně jako pro úhel Yaw je znaménko úhlu Roll zvoleno porovnáním  $A_z$  a  $D_z$ , kde kladné je voleno pro  $D_z > A_z$ .

#### 4.6 Výpočet s pomocí algoritmu řešícího P3P problém

Tato metoda výpočtu 6DoF polohy byla inspirována řešením popsaném v kapitole 2.5.1.1 nebo [10], která pro řešení P3P problému používá algoritmus popsaný v [22]. K tomuto algoritmu existují zdrojové kódy (s licenci FreeBSD), které byly použité v této práci. Vstupem algoritmu jsou normované vektory směřující od středu kamery k třem průmětům bodů v promítací rovině a prostorové souřadnice sledovaných bodů. Výstupem jsou až čtyři možné 3D polohy kamery a matice jejich natočení o velikosti 3x3.

Na rozdíl od [10] pracuje tato metoda s průměty do vlastní nastavené roviny. Pro řešení P3P problému budou použité značky A,B,D (Obr. 14). Zbývající značka C slouží k výběru správného řešení z algoritmu [22]. Prostorové souřadnice (značené  $X_p$ ) předávané algoritmu byly zvoleny následovně (značení viz Obr. 16):

$$\begin{aligned} A_p &= [0, 0, 0] \\ B_p &= [l_1, 0, 0] \\ D_p &= [0, l_3, 0] \end{aligned} \quad (22)$$

Vstupní normované vektory se spočítají vydělením vektoru vedoucího z polohy kamery (kapitola 4.1) do průmětu bodu jeho délkou. Algoritmus následně vypočte možná řešení P3P problému (vektory a matice  $t_{p1}, R_{p1}$  až  $t_{p4}, R_{p4}$ ). Tím však dostáváme polohu a natočení zvoleného souřadného systému vůči sledované značce a jejímu souřadnému systému. Polohu vůči kameře a natočení (značení t a R) souřadného systému značky získáme převodními vztahy ([10], str. 83):

$$\begin{aligned} R &= R_p^T \\ t &= -R \cdot t_p \end{aligned} \quad (23)$$

Takto dostaneme až čtyři různé výsledky, ze kterých pro každý spočítáme teoretickou polohu bodu C a jejího průmětu. Teoreticky určené průměty porovnáme se změřeným a za výsledné zvolíme řešení s nejmenším rozdílem teoretické a naměřené hodnoty. Pro výpočet polohy průmětu potřebujeme znát polohu bodu C v prostorových souřadnicích značky. Ta je spolu s teoretickou polohou a průmětem určena následujícími rovnicemi:

$$\begin{aligned} C_p &= [l_1 + l_2, 0, 0] \\ C &= K + t + R \cdot C_p \\ C' &= C + \overrightarrow{KC} \cdot \frac{-C_z}{C_z - K_z} \end{aligned} \quad (24)$$

Poslední vztah byl odvozen jako výpočet polohy bodu na přímce procházející bodem C se směrem  $\overrightarrow{KC}$ , pro který je souřadnice  $z = 0$ .

Poloha bodu B se spočte z výsledného R a t za použití vztahu:

$$B = K + t + R \cdot B_p \quad (25)$$

#### 4.7 Výpočet Eulerových úhlů

Úhly Yaw, Pitch, Roll (značeny také  $\alpha, \beta, \gamma$ ) lze označit za Eulerovy, což jsou 3 úhly definující jednoznačné natočení v prostoru. Určují proto i podobu rotační matice, která má pro úhly Yaw, Pitch, Roll následující podobu ([21], str. 10):

$$R = \begin{vmatrix} \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) & R_{12} & R_{13} \\ \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) & R_{22} & R_{23} \\ -\sin(\beta) & \sin(\gamma) \cdot \cos(\beta) & \cos(\gamma) \cdot \cos(\beta) \end{vmatrix} \quad (26)$$

Výsledné úhly je proto možné získat přímo z rotační matice R:

$$\begin{aligned} \text{Pitch} &= \beta = -\arcsin(R_{31}) \\ \text{Yaw} &= \alpha = \text{atan2}\left(\frac{R_{21}}{\cos(\beta)}, \frac{R_{11}}{\cos(\beta)}\right) \\ \text{Roll} &= \gamma = \text{atan2}\left(\frac{R_{32}}{\cos(\beta)}, \frac{R_{33}}{\cos(\beta)}\right) \end{aligned} \quad (27)$$

## 5 Implementace a experimentální ověření přesnosti

### 5.1 Implementace

#### 5.1.1 Experimentální aréna

Lokalizační systém byl navrhován pro experimentální arénu (Obr. 17) s plochou o rozměrech 3x3m a výškou 2,6m. Aréna by měla sloužit pro experimenty s pozemními mobilními roboty, u kterých se nepředpokládá, že by plně využívaly výšku arény. Naopak se předpokládá, že terén nemusí být vždy rovný a nemusí se jednat jen o kolové roboty. Proto nestačí pouze 2D lokalizace polohy a jedno natočení jako v [9], ale je potřeba plná 6DoF lokalizace.



Obr. 17 Experimentální aréna s podstavou 3x3m a výškou 2,6m a upevnění kamery Elphel NC353L

#### 5.1.2 Kamera

Lokalizační systém byl postaven pouze s jednou kamerou. Možnost použití více kamer byla zvažována, zejména kvůli dosahované přesnosti některých komerčních systémů (viz kapitola 2.5). Hlavní motivací pro použití pouze jedné kamery byly výrazně nižší náklady na jeho vybudování. Při použití více kamer by navíc stoupla složitost celého systému a výpočetní náročnost. Reálnost použití pouze jedné kamery naznačovali přesnosti dosahované samotným programem WhyCon a hlavně systémem popsaným v kapitole 2.5.1.1.

Pro lokalizaci byla použita kamera Elphel NC353L s rozlišením čipu 2592x1944px [23]. Kamera komunikuje přes Ethernet s maximální rychlostí 100Mbit/s. Přes ethernetový kabel je rovněž napájena 48V. Při maximálním rozlišení by měla být schopná poskytovat rychlost snímkování až 15 FPS.

Kamera byla umístěna na vrchní konstrukci arény přibližně ve výšce 2,6m nad středem arény. Použitý objektiv neumožnil zabrat celou plochu arény, a proto v jedné ose byla velikost záběru snížena přibližně na 2,25m.

#### 5.1.3 Matice se značkami pro sledování

Geometrie použité značky (Obr. 14) je popsána v kapitole 4.3. Její rozměry vyplynuly z rozměrů šestinohého robotu, na kterém by měla být umístěna. Velikost plochy pro umístění značky je přibližně 21x12,5cm. Pro zvolený systém značky byla vybrána co největší možná velikost terčových značek, která měla vnější průměr 6cm. Průměr černé oblasti byl 4,5cm a vnitřní bílé

## 5. Implementace a experimentální ověření přesnosti

1,9cm. Vzdálenosti středů značek A, B, C ležících v přímce byly 6,95cm. Vzdálenost středu značky D (umístěna na kolmici k přímce AC procházející bodem A) od A byla 6,5cm. Geometrie značky byla navržena pro určování polohy ze tří bodů ležících v přímce (kapitola 4.4). Kvůli horší stabilitě tohoto řešení byl ale implementován i druhý způsob lokalizace (kapitola 4.6). Pro možnost lepšího porovnání obou způsobů byl vzhled značky zachován.

Zvažovány byly i jiné varianty značek. Jako první byla zkoumána možnost použití 3D lokalizace z programu WhyCon a určování úhlů z jejího eliptického průmětu. Z průmětu by však nebylo možné vzhledem ke kruhovému tvaru značky určit natočení v ose x a y. Bylo by proto potřeba rozšířit rozpoznávání o nějaký další indikátor natočení, který by navíc musel být implementován mimo značku, aby nerušil rozpoznávání kruhových značek v programu WhyCon. Také přesnost určení v ose z počítaná pouze z průměru značky při experimentování se systémem WhyCon nebyla příliš přesná. Tvar elipsy může také negativně ovlivňovat změna světelných podmínek.

Další zvažovanou variantou bylo použití dvou terčových značek, kde by se již dvě natočení počítala místo z elipsy z polohy dvou značek vůči sobě. 3D poloha by však stále musela být určována pomocí 3D lokalizace programu WhyCon. Aby bylo natočení určeno jednoznačně, musel by být systém navíc schopen značku od sebe rozpoznat. K tomu by byly nejspíše použity různé poměry průměrů černé a vnitřní bílé oblasti značky.

Proto byla zvolena možnost použití čtyř značek. Pevná struktura ze čtyř značek dovoluje použít stejné značky a není potřeba zasahovat do rozpoznávání programu WhyCon. Stačí tak provádět pouze měření více značek a rozlišit je až na základě poloh jejich průmětů. Výpočet z-ové souřadnice také může být pro tři a více značek určen výpočtem z 2D poloh, čímž lze obejít její přímé určování z průměru značky. Rovněž lze určit všechny úhly na základě vzdáleností značek namísto určování natočení z elipsy. Využívání 2D lokalizace v programu WhyCon-ROS rovněž umožňuje vlastní nastavení souřadného systému.

### 5.1.4 Odhad přesnosti

Základním odhadem přesnosti je velikost oblasti promítnuté do jednoho pixelu. Při záběru 3m a rozlišení 2592px, vychází rozměr na jeden pixel 1,16mm. Přesnost programu WhyCon může být větší, protože počítá střed z více pixelů. Velký vliv na přesnost má rovněž správné provedení kalibrace kamery.

Protože je analytické určení vlivu odchylky u první metody obtížné na výpočet a druhá metoda byla převzatá a její matematický model nebyl přesně známý, bylo testování vlivu odchylky provedeno experimentálně v programu Matlab. Obě metody zde byly implementovány a ověřeny pro různé úhly natočení a polohy. Testování probíhalo na 31 752 různých pozicích. Chyba byla simulována zavedením náhodné chyby generované funkcí rand() do x-ových a y-ových souřadnic. Velikost této chyby se pohybovala od -0,25mm do 0,25mm. Obě metody byly testovány se zavedením chyby i bez ní.

Výsledky pro metodu s výpočtem polohy ze tří značek ležících na přímce (kapitola 4.4) jsou zobrazeny v Tabulka 6. Důležitým údajem je také čas výpočtu, který byl 5,33s pro 31 752 pozic. Pro jednu pozici tedy výpočet trvá přibližně 0,168ms na PC s procesorem Intel® Core™ i7-2630QM.

	Testování s nulovou chybou		Testování s náhodnou chybou	
	Průměrná odchylka	Maximální odchylka	Průměrná odchylka	Maximální odchylka
poloha [m]	0.0000	0.0000	0.1056	9.0704
x [m]	0.0000	0.0000	0.0266	3.6477
y [m]	0.0000	0.0000	0.0263	3.3441
z [m]	0.0000	0.0000	0.0965	7.6015
Yaw [°]	0.0000	0.0000	1.3045	32.9540
Pitch [°]	0.0000	0.0000	3.5660	73.6452
Roll [°]	0.0000	0.0000	6.8022	162.7291

Tabulka 6 Testování metody s výpočtem polohy ze tří bodů ležících na přímce v programu Matlab

Výsledky testování metody využívající převzatého algoritmu řešícího P3P jsou zobrazeny v Tabulka 7. Výpočet pro všechny pozice trval 17,368s, tedy 0,547ms pro jednu polohu. V některých polohách algoritmus nedokázal nalézt správné řešení ani při testování s nulovou chybou zanesenou do průmětů a docházelo k velkým odchylnám. Při zanesení odchylky je ale tato metoda daleko stabilnější a dává přesnější výsledky.

	Testování s nulovou chybou		Testování s náhodnou chybou	
	Průměrná odchylka	Maximální odchylka	Průměrná odchylka	Maximální odchylka
poloha [m]	0.0027	5.3532	0.0007	0.0553
x [m]	0.0000	0.0002	0.0002	0.0226
y [m]	0.0008	2.4839	0.0002	0.0170
z [m]	0.0026	4.7421	0.0005	0.0475
Yaw [°]	0.0020	2.5656	0.2115	14.7800
Pitch [°]	0.0076	4.8845	0.4846	87.7773
Roll [°]	0.1142	72.7554	2.2339	154.9841

Tabulka 7 Testování metody s algoritmem řešícím P3P problém v programu Matlab

## 5.2 Experimentální ověření přesnosti

### 5.2.1 Přesnost určování polohy jedné značky

Protože zejména metoda s vlastním řešením P3P je náchylná na chyby, je potřeba, aby program WhyCon dosahoval při určování průmětů do roviny přesností pod 1mm. Měření popsaná v kapitole 3.3 neměla polohy určované s dostatečnou přesností (pouze 0,6cm), a proto byl systém proměřen znovu. Měření probíhalo v experimentální aréně, aby podmínky byly stejné jako v systémech, pro které je lokalizace navrhována. Použité značky měly průměr černé oblasti 4cm. Přesnost pod 0.5mm byla zajištěna umístěním značek na milimetrovém papíře.

Měření probíhalo s přesností programu WhyCon nastavenou na 0,01mm. Poloha byla určována pouze relativně vůči milimetrovému papíru, který byl umístěn na dvou pozicích různě vzdálených od středu kamery. Pro každou polohu bylo provedeno 10 měření pro zjištění stability určování polohy (Tabulka 8).

## 5. Implementace a experimentální ověření přesnosti

	Poloha	Relativní souřadnice [cm]	Průměr x [cm]	Směrodatná odchylka x [cm]	Průměr y [cm]	Směrodatná odchylka y [cm]
První poloha – blíže ke kameře	A	[0, 0]	8,6468	0,0018	23,1324	0,0044
	B	[0, 5]	8,5880	0,0022	28,1673	0,0030
	C	[0, -5]	8,6233	0,0025	18,1737	0,0043
	D	[0, -10]	8,6744	0,0027	13,1908	0,0039
	E	[-5, 0]	3,6247	0,0025	23,1549	0,0024
	F	[5, 0]	13,5943	0,0025	23,1799	0,0044
Druhá poloha – dále od kamery	K	[0, 0]	101,4051	0,0036	3,743	0,0038
	L	[0, -5]	98,5795	0,0024	-0,3607	0,0067
	M	[0, 5]	104,1739	0,0039	7,8471	0,0040

Tabulka 8 Měření přesnosti určování 2D polohy programu WhyCon. Poloha byla určena relativně vůči milimetrovému papíru. V každé poloze bylo měření provedeno 10x.

Na základě dat z Tabulka 8 byly spočítány vzdálenosti jednotlivých bodů (Tabulka 9):

Měřená úsečka	Naměřená vzdálenost [cm]	Skutečná vzdálenost [cm]	Chyba [cm]
A – B	5,035	5	0,035
A – C	4,959	5	0,041
C – D	4,983	5	0,017
A – E	5,022	5	0,022
A – F	4,948	5	0,052
K – L	4,982	5	0,018
K – M	4,951	5	0,049
průměr:	4,983	-	0,034

Tabulka 9 Porovnání naměřených relativních vzdáleností (Tabulka 8) se skutečnými a odchylka měření

Program WhyCon dosahoval průměrné přesnosti určení polohy 0,34mm a maximální odchylka byla 0,52mm. Na základě tohoto měření lze usoudit, že použití této 2D lokalizace je vhodným základem pro implementované lokalizační systémy.

### 5.2.2 Přesnost lokalizace z polohy tří bodů ležících na přímce

Při lokalizaci byla použita značka, která je detailněji popsána v kapitole 5.1.3. Aby byla zajištěna přesná poloha a natočení, byla umístěna na konstrukci ze stavebnice LEGO. Jako kolejnice pro konstrukci posloužila hliníková lať dlouhá 180cm, na které byly naměřené polohy s rozestupy 25cm. Lať byla umístěna podle čtvercové matice sloužící k nastavení souřadného systému programu WhyCon. Odhadovaná přesnost určení polohy je 0,5cm pro polohu a 3° pro úhel.

Měření probíhalo pro 2 způsoby natočení, kde každá poloha byla měřena dvakrát. Konstrukce byla při opakovaném měření znovu umístěna. Každé natočení se měřilo v sedmi polohách (rozsah 150cm) umístěných na diagonále k souřadné soustavě. Většina měření probíhala pouze v jednom kvadrantu souřadné soustavy, protože v ostatních kvadrantech by měl být výsledek měření podobný. Nastavení os bylo pro všechny měřené polohy stejné. Konkrétní hodnoty nastavení soustavy jsou v následující tabulce:

	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]	Yaw [°]	Pitch [°]	Roll [°]
Měření 1	49,1 až -56,3	7,1 až 113,1	19,63	45	0	22,15
Měření 2	51,7 až -54,4	8,4 až 114,5	19,36	-45	29,4	0

Tabulka 10 Konfigurace umístění značky při měření přesnosti lokalizace s řešením polohy ze tří bodů ležících na přímce.

V Tabulka 11 jsou zachycené naměřené přesnosti. Hodnoty jsou zapsány ve formátu: průměrná hodnota absolutních hodnot odchylek  $\pm$  směrodatná odchylka těchto absolutních hodnot.

	Měření 1	Měření 2	Celkem	Max
Chyba X [cm]	0,314 $\pm$ 0,316	0,379 $\pm$ 0,293	0,346 $\pm$ 0,306	1,2
Chyba Y [cm]	0,550 $\pm$ 0,258	0,550 $\pm$ 0,293	0,525 $\pm$ 0,277	1,2
Chyba Z [cm]	1,598 $\pm$ 0,580	3,154 $\pm$ 2,240	2,376 $\pm$ 1,812	8,94
Chyba polohy [cm]	1,785 $\pm$ 0,521	3,254 $\pm$ 2,225	2,520 $\pm$ 1,775	9,04
Chyba Yaw [°]	1,014 $\pm$ 1,020	0,121 $\pm$ 0,108	0,568 $\pm$ 0,852	3,7
Chyba Pitch [°]	3,893 $\pm$ 1,333	1,750 $\pm$ 1,001	2,821 $\pm$ 1,594	6,8
Chyba Roll [°]	13,701 $\pm$ 12,317	3,811 $\pm$ 4,686	8,756 $\pm$ 10,549	37,5

Tabulka 11 Přesnost měření polohy lokalizačního systému postaveného na řešení P3P problému tří bodů ležících v přímce. Přesnost byla pro každé měření (viz Tabulka 10) měřena 2x v sedmi různých polohách.

Systém dosahoval poměrně dobré přesnosti při určování polohy, která byla v průměru pod 3cm. V některých polohách měl však problémy se správným určením pozice bodu D, což vedlo k velkým odchylkám pro úhel Roll.

### 5.2.3 Přesnost lokalizace s pomocí algoritmu řešícího P3P problém

Tento systém byl měřen ve dvou krocích. První dvě měření byla téměř identická k měřením z předchozí kapitoly (5.2.2). Navíc bylo přidáno měření (Měření 3), kde souřadný systém byl více vychýlen vůči souřadnicím čipu kamery a lať byla umístěna rovnoběžně s jednou z os. Měřeno bylo sedm poloh a jedno natočení s úhlem 43°. Konfigurace poloh ve všech měřeních byly následující:

	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]	Yaw [°]	Pitch [°]	Roll [°]
Měření 1	42,93 až -63,14	49,80 až -56,26	19,63	-45	0	22,15
Měření 2	41,06 až -65,01	52,23 až -53,83	19,36	-135	29,4	0
Měření 3	78,08 až -71,92	-5,13	20,13	90	0	43,37

Tabulka 12 Konfigurace umístění značky při měření přesnosti lokalizace s algoritmem řešícím P3P problém.

Přesnost měření je zobrazena v Tabulka 13. Chyba měření je spočítána jako průměr absolutních hodnot naměřených odchylek  $\pm$  jejich směrodatná odchylka.

	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Celkem	Max
Chyba X [cm]	0,390 $\pm$ 0,073	0,420 $\pm$ 0,202	0,234 $\pm$ 0,200	0,351 $\pm$ 0,187	0,81
Chyba Y [cm]	0,166 $\pm$ 0,133	0,026 $\pm$ 0,204	0,188 $\pm$ 0,194	0,204 $\pm$ 0,155	0,73
Chyba Z [cm]	0,617 $\pm$ 0,275	1,604 $\pm$ 0,516	1,699 $\pm$ 0,547	1,297 $\pm$ 0,673	2,73
Chyba polohy [cm]	0,772 $\pm$ 0,162	1,694 $\pm$ 0,451	1,766 $\pm$ 0,563	1,402 $\pm$ 0,621	2,85
Chyba Yaw [°]	0,229 $\pm$ 0,202	0,271 $\pm$ 0,144	0,549 $\pm$ 0,303	0,345 $\pm$ 0,264	1
Chyba Pitch [°]	0,840 $\pm$ 0,630	1,396 $\pm$ 1,548	2,202 $\pm$ 0,360	1,462 $\pm$ 1,141	5,3
Chyba Roll [°]	3,305 $\pm$ 2,653	0,607 $\pm$ 0,406	0,078 $\pm$ 0,069	1,361 $\pm$ 2,114	8,25

Tabulka 13 Přesnost měření polohy lokalizačního systému postaveného na převzatém algoritmu, který řeší P3P problém. Přesnost byla pro každé měření (viz Tabulka 12) měřena 2x v sedmi různých polohách.

## *5. Implementace a experimentální ověření přesnosti*

System dosáhl oproti předchozímu systému (kapitola 5.2.2) ve všech souřadnicích lepších výsledků. Polohu dokázal určovat s průměrnou přesností pod 1,5cm, přičemž nepřesáhl hranici 3cm. Hlavně ale potvrdil svou větší stabilitu a maximální chyba určování úhlu byla 8,25° pro úhel Roll. Průměrná chyba určení všech úhlů zůstala pod hranicí 1,5°. Změřena byla dále u programu rychlost snímkování, která se ale odvíjí zejména od vlastností programu WhyCon. Program WhyCon umožňuje ukládat data z lokalizačního systému jako video, ale dochází tím ke snížení rychlosti na 7 FPS. Bez ukládání do videa systém zvládá zpracovat snímky rychlostí 11 FPS.



## 6 Závěr

V úvodu práce (kapitola 1) je přehled lokalizačních systémů rozdělených na základě funkčního principu. Pro každou skupinu jsou popsány základní vlastnosti systémů a uvedeny konkrétní příklady. Nejpodrobněji jsou rozebrány optické systémy, protože vizuální lokalizační systém byl vyvíjen i v této práci. Uvedeny jsou jak komerčně vyráběná řešení, tak systémy spíše experimentální. Komerční systémy zpravidla dosahují velké přesnosti snímání, ale hlavní překážkou pro jejich nasazování jsou vysoké pořizovací náklady.

Cílem práce bylo navrhnout systém pro lokalizaci mobilního robotu v experimentální aréně o rozměru 3x3m. Navrhován byl primárně pro šestinožý robot, jehož poloha bude určována z pasivní značky umístěné shora na těle robotu. Jako základ lokalizačního systému posloužil program WhyCon (kapitola 3), který dokáže detekovat kruhové terčové značky. Na základě rozpoznání kruhové značky počítá polohu jejího průmětu v uživatelem určené rovině nebo 3D polohu v souřadné soustavě s rovinou xy, která je rovnoběžná s čipem kamery. Osu z určuje z průměru detekované značky.

Pro lokalizační systém byla zvolena varianta určování polohy pouze z jedné kamery. Použití více kamer by sice přineslo zvýšení přesnosti, ale zároveň by výrazně navýšilo cenu systému. Navíc přesnost lokalizace v podobném systému [10] s jednou kamerou dosahovala dostatečných přesností (pod 10cm na polohu a 5° pro natočení). Kamera byla umístěna na vrchu arény přesně nad středem, aby bylo pokrytí co nejvíce rovnoměrné. Zároveň je v této poloze nejmenší pravděpodobnost zákrytu značky jinými objekty. Pro sledování byla vybrána IP kamera Elphel NC353L s rozlišením čipu 2592x1944px. Rozlišení bylo voleno tak, aby se základní přesnost určení polohy pohybovala maximálně v jednotkách milimetrů.

Zváženo bylo několik možných rozpoznávání polohy postavených na programu WhyCon. Z verzí programu byla zvolena verze WhyCon-ROS, protože oproti verzi WhyCon-orig umožňovala připojení IP kamery přes OpenCV. První možností byla lokalizace pouze pomocí jedné značky, za použití 3D lokalizace programu WhyCon a určování natočení z detekované elipsy. Takto by systém měřil pouze dva úhly a pro měření třetího by bylo nutné značku rozšířit o přidání indikátoru natočení. Takovým indikátorem by mohlo být použití další značky, které by navíc umožnilo určovat z jejich vzájemné polohy dva úhly. Samotná poloha by však stále byla určována 3D rozpoznáváním polohy programu WhyCon, jehož hlavní nevýhodou ve verzi WhyCon-ROS je nemožnost nastavení vlastních os a nižší přesnost lokalizace.

Proto bylo k rozpoznávání použito více kruhových terčových značek. Jako první byla navržena metoda výpočtu z polohy průmětů tří značek ležících na přímce. Hlavní výhodou je možnost analytického řešení této úlohy, které má navíc jednoznačné řešení, pokud se středy značek nezobrazí do jednoho bodu. Výstupem je poloha a dvě natočení. Proto musí být přidána čtvrtá značka, ze které je možné určit zbývající úhel. Pro odhad přesnosti byla použita implementace řešení v programu Matlab, do které byly zavedeny náhodné odchylky. Pro polohu byla odhadovaná přesnost 10cm. Naměřená přesnost byla  $2,520 \pm 1,775$ cm. Při měření však docházelo k chybnému určení polohy poslední značky, což vedlo k chybnému určování úhlu Roll a jeho průměrné přesnosti 8°.

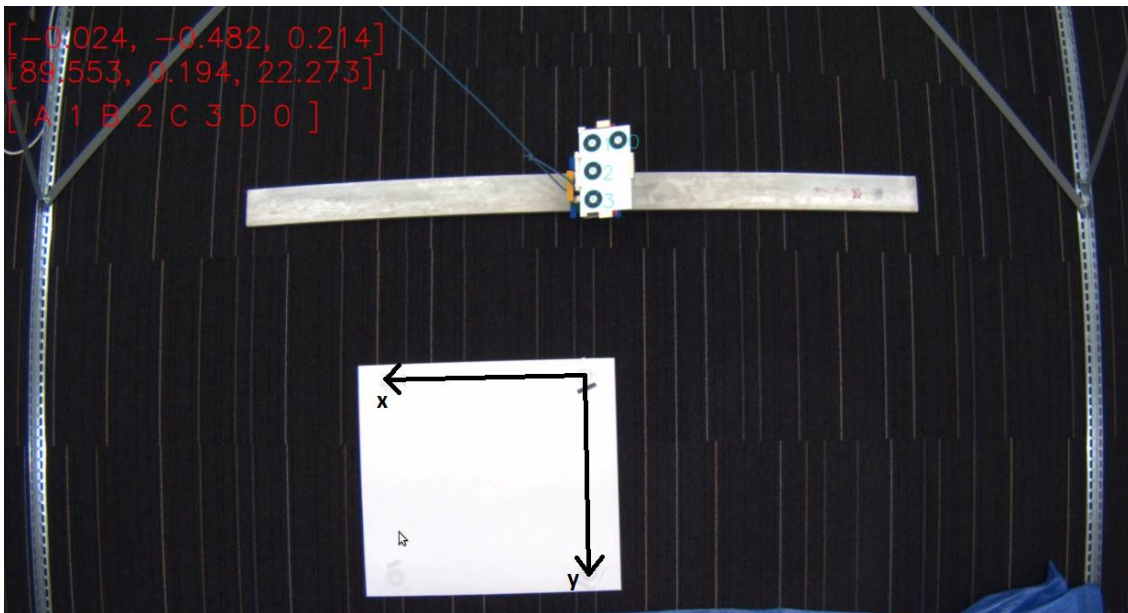
Protože metoda byla méně stabilní, byla aplikována metoda, která využívala algoritmus řešící P3P problém. Použitá byla stejná značka, jako pro první metodu. Při testování v programu

## 6. Závěr

Matlab algoritmus nedokázal nalézt správné řešení pro některé polohy a vznikala poměrně velká chyba. Po zanesení odchylky však byla jeho přesnost vyšší než v první metodě. V simulaci byla přesnost určení polohy 0,5mm. V reálných podmínkách tato chyba narostla na  $1,402 \pm 0,621$ cm. Průměrná chyba natočení byla pro všechny úhly pod  $1,5^\circ$ . Rychlost lokalizace byla okolo 11 FPS, což již umožňuje použití v real-time aplikacích. Hlavním omezením rychlosti systému je rychlost přenosu dat z kamery a samotná detekce značek programem WhyCon. Konečný výpočet polohy na rychlost systému téměř nemá vliv.

Oba systémy splnily podmínky stanovené pro přesnost lokalizace. První metoda nedokázala určovat úhly dostatečně přesně, zejména kvůli jednomu z natočení. Tento nedostatek byl odstraněn ve druhé metodě. Velkou výhodou je ponechání možnosti vlastního nastavení os, které se provádí pomocí do čtverce rozmístěných značek. To umožňuje provést nastavení na míru experimentu a snadno opravit případné pohnutí s kamerou. Zároveň v systému byly plně zachovány všechny původní vlastnosti programu WhyCon. To je důležité i z hlediska, že původní program WhyCon neumí pracovat s IP kamerou.

Systém lze dále rozvíjet ošetřením nejednoznačných určení polohy a případnou změnou geometrie značky pro jejich úplné odstranění. Místo pro optimalizaci je rovněž v rychlosti přenášení informace z kamery do výpočetní jednotky. Rozšířením může být i přidání další kamery pro zpřesnění lokalizace, které by ovšem znamenalo kompletní přestavbu celého systému popsaného v této práci.



Obr. 18 Ukázka měření lokalizačního systému s převzatým algoritmem řešícím P3P problém. Vpravo nahoře jsou zobrazeny výstupy měření. Vrchní vektor udává polohu  $[x, y, z]$  a vektor pod ním úhly  $[\text{Yaw}, \text{Pitch}, \text{Roll}]$ . Černé šipky znázorňují nastavenou souřadnou soustavu.

## Literatura

- [1] FIELD, Matthew, David STIRLING, Fazel NAGHDY a Zengxi PAN. Motion capture in robotics review. In: 2009 IEEE International Conference on Control and Automation [online]. IEEE, 2009, s. 1697-1702 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1109/ICCA.2009.5410185. ISBN 978-1-4244-4706-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5410185>
- [2] RIPKA, Pavel. Senzory a převodníky. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [3] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. Elektrická měření: přístroje a metody. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01717-6.
- [4] RIPKA, Pavel. 5. Magnetické senzory: Magnetická měření, Napěťový a proudový transformátor, Bezkontaktní senzory el. proudu [online]. 2011. Dostupné z: [http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/05\\_Magneticke-V2.pdf](http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/05_Magneticke-V2.pdf)
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] USHIMI, N., M. YAMAMOTO a A. MOHRI. Two wheels caster type odometer for omnidirectional 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>
- [8] LI, Zhao, Stan E. DOSSO a Dajun SUN. Motion-Compensated Acoustic Localization for Underwater Vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering [online]. , 1-12 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1109/JOE.2015.2503518. ISSN 0364-9059. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7403852>
- [9] CHUDOBA Jan, Jan FAIGL, Miroslav KULICH, Tomáš KRAJNÍK, Karel KOŠNAR a Libor PŘEUČIL. A Technical solution of a robotic e-learning system in The SyRoTek project. In Proc. of 3rd international conference on computer supported education. 2011. Dostupné z: <https://syrotek.felk.cvut.cz/data/files/csedu11.pdf>
- [10] BREITENMOSER, A., L. KNEIP a R. SIEGWART. A monocular vision-based system for 6D relative robot localization. In: 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [online]. IEEE, 2011, s. 79-85 [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094851. ISBN 978-1-61284-456-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6094851>
- [11] Vicon Motion Systems [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.vicon.com/>

- [12] NDI Measurement [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.ndigital.com/>
- [13] PANJKOTA, Ante, Ivo STANCIC a Tamara GRUJIC SUPUK. Design, development and evaluation of optical motion-tracking system based on active white light markers. *IET Science, Measurement & Technology* [online]. 2013, 7(4), 206-214 [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1049/iet-smt.2012.0157. ISSN 1751-8822. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-smt.2012.0157>
- [14] FANKHAUSER, Peter, Michael BLOESCH, Diego RODRIGUEZ, Ralf KAESTNER, Marco HUTTER a Roland SIEGWART. Kinect v2 for mobile robot navigation: Evaluation and modeling. In: 2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR) [online]. IEEE, 2015, s. 388-394 [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/ICAR.2015.7251485. ISBN 978-1-4673-7509-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7251485>
- [15] 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>
- [16] KRAJNIK, 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. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/ICAR.2013.6766520. ISBN 978-1-4799-2722-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6766520>
- [17] 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 & Robotic Systems* [online]. 2014, 76(3-4), 539-562 [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1007/s10846-014-0041-x. ISSN 0921-0296. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10846-014-0041-x>
- [18] NITSCHKE, M., T. KRAJNÍK, P. ČÍŽEK, M. MEJAIL, and T. DUCKETT. WhyCon: An Efficient, Marker-Based Localization System. In: IROS 2015: Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Hamburg, 2015-09-28/2015-10-02. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2015, ISSN 2153-0858. ISBN 978-1-4799-9994-1. Dostupné z: [http://eprints.lincoln.ac.uk/18877/1/2015\\_irososar\\_whycon.pdf](http://eprints.lincoln.ac.uk/18877/1/2015_irososar_whycon.pdf)
- [19] NITSCHKE, Mathias a Tomáš KRAJNÍK. WhyCon localization system [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://github.com/lrse/whycon>
- [20] BOUGUET, Jean-Yves. Camera Calibration Toolbox for Matlab [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)
- [21] SMUTNÝ, Vladimír. Robotika: Popis polohy tělesa [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/geometry-notecz.pdf>
- [22] KNEIP, Laurent, Davide SCARAMUZZA a Roland SIEGWART. A novel parametrization of the perspective-three-point problem for a direct computation of absolute camera position and orientation. In: CVPR 2011 [online]. IEEE, 2011, s. 2969-2976 [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/CVPR.2011.5995464. ISBN 978-1-4577-0394-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5995464>

[23] NC353L. Inc. Elphel<sup>®</sup> [online]. 2013. Dostupné z: <http://www3.elphel.com/nc353>

[24] SHAN, Jinjun a Xiaogang WANG. Experimental study on mobile robot navigation using stereo vision. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) [online]. IEEE, 2013, s. 1958-1965 [cit. 2016-05-23]. DOI: 10.1109/ROBIO.2013.6739756. ISBN 978-1-4799-2744-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6739756>

**Příloha A – obsah CD:**

Přiložené CD obsahuje elektronickou verzi této práce (Bakalářská práce.pdf) a zdrojové kódy programu WhyCon-ROS rozšířené o implementované metody. Kód pro metodu výpočtu 6DoF polohy z průmětu tří bodů ležících na přímce je ve složce „whycon-master“ a pro metodu s převzatým algoritmem řešícím P3P problém ve složce „whycon-master2“.