

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 526

ISSN 1213-418X

Luděk Žalud

**PRŮZKUMNÝ
ROBOTICKÝ SYSTÉM
CASSANDRA**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav automatizace a měřicí techniky

doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

PRŮZKUMNÝ ROBOTICKÝ SYSTÉM CASSANDRA
RECONNAISSANCE ROBOTIC SYSTEM CASSANDRA

TEZE PŘEDNÁŠKY
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
TECHNICKÁ KYBERNETIKA



BRNO 2015

KLÍČOVÁ SLOVA

mobilní robot, průzkum, teleprezence, sebelokalizace, autonomní navigace

KEYWORDS

mobile robot, reconnaissance, telepresence, self-localization, autonomous navigation

© Luděk Žalud, 2015

ISBN 978-80-214-5289-3

ISSN 1213-418X

Obsah

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	5
2 POPIS SYSTÉMU CASSANDRA	6
2.1 Mobilní roboty	10
2.1.1 <i>Orpheus</i>	10
2.1.2 <i>Perseus</i>	13
2.1.3 <i>Scorpio</i>	14
2.1.4 <i>envMap</i>	15
2.1.5 <i>Uranus</i>	15
3 ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA	16
3.1 Multispektrální datová fúze	16
3.2 Automatická tvorba multispektrálních map v multirobotických systémech.....	23
4 EXPERIMENTY	27
4.1 Měření intenzity záření gama ve vnějším prostředí	27
4.2 Přesná navigace v heterogenním multirobotickém systému	30
5 MÍSTO ZÁVĚRU	33
LITERATURA.....	35
ABSTRACT.....	37

PŘEDSTAVENÍ AUTORA



Luděk Žalud se narodil roku 1975 v Brně. V roce 1998 obhájil diplomovou práci *Antagonistic Control* vypracovanou na Vysokém učení technickém v Brně a Technical University of Denmark, Lyngby. V roce 2002 obhájil práci *Proximity Laser Scanner Cross-Correlation Based Methods for Cooperative Self-Localization and Map Building* a získal titul Ph.D. na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně v oboru Technická kybernetika. V roce 2006, opět na Vysokém učení technickém v Brně, úspěšně obhájil habilitační práci *Teleoperated Reconnaissance Robotic Systems* a získal titul docent v oboru Technická kybernetika.

Již 15 let se podílí na vědecko-výzkumné a pedagogické činnosti Ústavu automatizace a měřicí techniky, Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, kde od roku 2006 působí jako docent. Od roku 2007 je vedoucím odborné skupiny Robotika a umělá inteligence na Ústavu automatizace a měřicí techniky, od roku 2010 pracuje na částečný úvazek na projektu STI CEITEC ve skupině RG2-2 jako Senior Researcher a vedoucí Laboratoře teleprezence a robotiky. Od roku 2011 spolupracuje s Ústavem biomedicínského inženýrství v rámci projektu FNUSA-ICRC.

Odborně se autor dlouhodobě zabývá průzkumnou mobilní robotikou. Přesněji jde o mobilní roboty pro dálkový průzkum člověku nebezpečných či nedostupných oblastí. Hlavními oblastmi zájmu jsou vizuální teleprezence, konstrukce mechaniky a elektroniky pro extrémní podmínky, sensorické vybavení pro sebelokalizaci, tvorbu map a měření kontaminace prostředí, sebelokalizační a navigační techniky mobilních robotů. V posledních třech letech se autor rovněž zabývá biomedicínským inženýrstvím. Zde jsou to především oblasti multispektrálního prostorového snímání částí lidského těla, biofeedback a mechatronické systémy pro diagnostiku a rehabilitaci.

Autor byl a je hlavním řešitelem a spoluřešitelem několika grantů, včetně TAČR, MV, AV, GAČR, dvanáctým rokem spolupracuje na velkém projektu TAČR s názvem Centrum aplikované kybernetiky, kde již čtyři roky vede pracovní balíček. Zaměřuje se na praktické využití vyvíjených robotů a robotických technologií. Výsledkem jsou úspěšné komerční zakázky s firmami, jako VOP CZ, s.p., Vojenský výzkumný ústav, s.p. (dříve VTUO), Státní ústav radiační ochrany, v.v.i., Hasičský záchranný sbor Jihomoravského kraje, Bezpečnostní informační služba, atd. S těmito firmami byly uzavřeny smlouvy v hodnotě několika milionů Kč, výsledky výzkumu jsou využívány jak v civilní sféře, tak ve vojenské a bezpečnostní oblasti.

Do pedagogické činnosti Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií se autor zapojil ihned po nástupu na doktorské studium, zpočátku ve cvičeních, později i jako přednášející. V současné době se orientuje výhradně na výuku stacionární a mobilní robotiky. V současnosti je na Vysokém učení technickém garantem tří předmětů z oblasti robotiky – BROB, MRBT, LRBT, které pokrývají prezenční bakalářské a magisterské studium a dálkové magisterské studium. Autor vedl 100 (stav 08/2015) úspěšně obhájených bakalářských a diplomových prací. Dále autor dovedl k úspěšné obhajobě doktorské práce dva studenty, dalších sedm v současnosti vede. Rovněž se aktivně podílí na organizaci mimořádných výukových aktivit – několik krátkých výukových stáží s přednáškami z oblasti teleprezence a mobilní robotiky na Universidad de Malaga a Technische Universitat Dresden a na organizaci mezinárodní letní školy Summer School in Mechatronics pořádané společně Universidad de Malaga, Vysokým učení technickým a Technische Universitat Dresden.

1 ÚVOD

Mobilní robotika je progresivní obor lidské činnosti, který se dynamicky rozvíjí a je mu přičítána velká budoucnost. O potenciálu tohoto oboru svědčí nejen samotné výsledné produkty, se kterými se setkáváme v médiích a často již i v každodenním životě, ale také zájem velkých korporací o menší progresivní firmy z oblasti mobilní robotiky. Jako příklad je možné uvést nákup minimálně osmi významných robotických firem gigantem Google koncem roku 2013, mezi nimiž byla i firma Boston Dynamics proslulá robotem BigDog [13].

Původní představa o robotických pomocnících, jak ji lidé viděli již od dob iniciátora slova robot, Karla Čapka [1], byla spíše podobná člověku, šlo tedy o humanoidní stroje.

Pokud si však dnes uděláme přehled o prakticky využívaných i vyvíjených robotech, zjistíme, že jejich podoba je zcela jiná. Více než 90% robotů používaných v průmyslu jsou tzv. průmyslové manipulátory (viz obrázek 1).

Další velkou oblast robotiky představují již mobilní roboty, které však jsou naprosto přizpůsobeny činnosti, pro kterou jsou určeny. Jako pěkný praktický příklad můžeme uvést všem jistě dobře známý robotický vysavač. Ačkoli jde o robotický prostředek, který se dnes široce komerčně prosadil a je používán jako běžný nástroj v našich domácnostech, jeho tvar a celkové pojetí je rozhodně velmi vzdálené původní představě pomocníků s velikostí, tvarem a schopnostmi člověka. Důvodů je hned několik. Předně ještě zdaleka nemáme dostatečné technologie na to, abychom vytvořili stroj se schopnostmi člověka. To platí pro robot jako celek, ale i pro jednotlivé důležité vlastnosti či části, jako je mobilita, čidla, zdroje energie nebo umělá inteligence. Dále je v těchto praktických případech potřeba se přizpůsobit diktátu komerční efektivity i právních předpisů. V době, kdy byl uveden na trh první komerční robotický vysavač, jsem měl možnost mluvit s vývojáři, kteří na tomto projektu pracovali. Podle jejich odhadu věnovali více než 90% energie při vývoji bezpečnosti stroje. Ta zahrnovala nejen celkem pochopitelné vlastnosti – neublížit člověku nebo domácím zvířatům, ale kupodivu také například striktní zákaz vysát bankovky, který musel být splněn pro možnost prodeje na některých trzích. To ukazuje, že konstrukce komerčně nabízených robotů v dnešní době musí být podřízena požadovaným funkcím a bezpečnosti pro své okolí.



Obrázek 1: Ukázka typických průmyslových manipulátorů dneška.

Poslední, poměrně minoritní oblastí robotiky je ta, která se zabývá tzv. humanoidními nebo animoidními roboty – tj. takovými, které mají vypadat a fungovat podobně jako člověk nebo zvířata. Ačkoli jsou nedávné výsledky některých firem a univerzit velmi zajímavé, stále je možné tvrdit, že jde o značně okrajovou záležitost, která se nejspíše může prosadit až ve vzdálenější budoucnosti. Zdá se, že jedním z problémů, jehož řešení je prozatím v nedohlednu, je náhrada lidských svalů. Lidské svaly jsou velmi energeticky efektivní, mají vynikající poměr mezi výkonem a vlastní hmotností a navíc jde o lineární pohony ve srovnání s kontinuálně rotačním pohybem, který primárně vykonává většina současných motorů. Existují sice tzv. „umělé svaly“, například na bázi pneumatiky [14] nebo tzv. paměťových drátů [24], ale jejich skutečně praktické nasazení naráží vždy na velké technické obtíže.

Ukazuje se tedy, že pro současnou robotiku, má-li být rychle prakticky použitelná, je výhodné stavět úzce specializované roboty, které si leckdy mohou brát příklad z přírody, ale nesnaží se jí přímo kopírovat.

Tato práce se zabývá popisem robotického systému CASSANDRA, který představuje jednu velkou kapitolu mobilní robotiky u nás obvykle překládanou jako servisní robotika (v angličtině obvykle field robotics). Jde o stroje určené pro práci v běžném, neupraveném, světě – především ve vnějším prostředí, tedy v urbanistických oblastech i volné přírodě, ale také v obytných budovách nebo průmyslových provozech. Ačkoli oblasti použití takových robotických systémů jsou velmi široké (viz dále), je možné je principiálně rozdělit na dvě – práce v podmínkách pro člověka běžných a práce v podmínkách pro člověka nebezpečných či dokonce neslučitelných s jeho přítomností. Typickým příkladem první skupiny jsou roboty používané v zemědělství, druhou skupinu pak dobře reprezentují záchranné roboty. Je zřejmé, že pro práci v běžných podmínkách postačí méně sofistikované stroje a techniky. To také znamená, že v těchto oblastech se již dnes mnohem častěji setkáváme s autonomním chováním robotů než v případě průzkumných a záchranných robotů, které musí být schopny činnosti v širším spektru prostředí a podmínek.

Popisovaný robotický systém CASSANDRA byl zpočátku vyvíjen jako průzkumný prostředek pro záchranné složky. Postupně však byla jeho působnost rozšířena i do oblastí práce v běžných podmínkách. Systém CASSANDRA je vyvíjen ve skupině Umělé inteligence a mobilní robotiky na Ústavu automatizace a měřicí techniky Vysokého učení technického v Brně pod vedením autora tohoto textu.

V první části bude popsán samotný systém CASSANDRA a vybrané mobilní roboty, které jsou jeho součástí. V další kapitole budou popsány dvě důležité odborné partie, které jsou v současné době na systému řešeny. V kapitole 4 budou popsány některé zajímavé experimenty, které jsme v nedávné době se systémem CASSANDRA provedli.

2 POPIS SYSTÉMU CASSANDRA

CASSANDRA je multi-robotický, jedno- nebo multi-operátorový systém pro průzkum nebezpečných nebo nedostupných oblastí a práci v reálném prostředí. V současné době jsou roboty systému CASSANDRA rozděleny do následujících kategorií (obrázek 2):

- Větší průzkumný robot – stroj pro průzkum ve vnitřním nebo kombinovaně vnitřním a vnějším prostředí, který má nosnost a rozměry vhodné pro širší spektrum snímačů a může nést i dostatečně výkonné výpočetní jednotky. Typická hmotnost v rozsahu 10 - 70 kg, šířka menší než 600mm, aby byl schopen projet nejužšími standardními dveřmi. Pro roboty pracující ve vnitřním prostředí je výhodná schopnost zdolávat standardní schody.
- Menší průzkumný robot – stroj pro průzkum ve vnitřním nebo kombinaci vnitřního a vnějšího prostředí, který však má nosnost a rozměry omezeny na zakomponování minima snímačů a základní výpočetní jednotky. Typická hmotnost do 10 kg, rozměry opět omezeny pouze šířkou 600 mm.



Obrázek 2: Ideové schéma systému CASSANDRA.

- Létající robot – stroj schopný průzkumu ze vzduchu s tím, že je velký důraz kladen na schopnost tzv. „visu“, vertikálního startu a přistání a pohybu v omezených prostorách, ideálně i uvnitř budov. Nosnost se vzhledem k předpokladu teleprezenčního řízení předpokládá minimálně 200 g, v ideálním případě alespoň 1,5 kg. Je třeba upozornit na fakt, že v ČR, stejně jako v mnoha dalších státech EU a světa, není v současné době zcela dořešena legislativa ohledně praktického využití takových letových prostředků a je možné očekávat změny.
- Mapovací robot – pozemní robot určený pro tvorbu primární mapy zájmové oblasti. U tohoto stroje je kladen maximální důraz na co nejkvalitnější přístrojové vybavení pro vnitřní a vnější navigaci a mapování. Režim činnosti by měl být takový, že bude maximálně omezena možnost ztráty tohoto stroje, takže není kladen takový důraz na cenu. Dále v současnosti není předpoklad pohybu takového stroje v extrémních (počasí) a nebezpečných (zamoření, apod.) podmínkách.

Je třeba říci, že toto rozdělení nemusí být konečné. Systém CASSANDRA je velmi univerzální a je možné si v současnosti představit podstatně menší roboty s dostatečnou funkcí začleněné do systému, stejně jako stroje mnohem větší, viz příklad přibližně 1,5 tuny vážící vojenský robot TAROS 2 (viz obrázek 31 vlevo) začleněný do systému v rámci experimentu v kapitole 4.2. To rovněž ukazuje, že nemusí jít o stroje vyvíjené na našem pracovišti, obvykle je možné vytvořit příslušný interface.

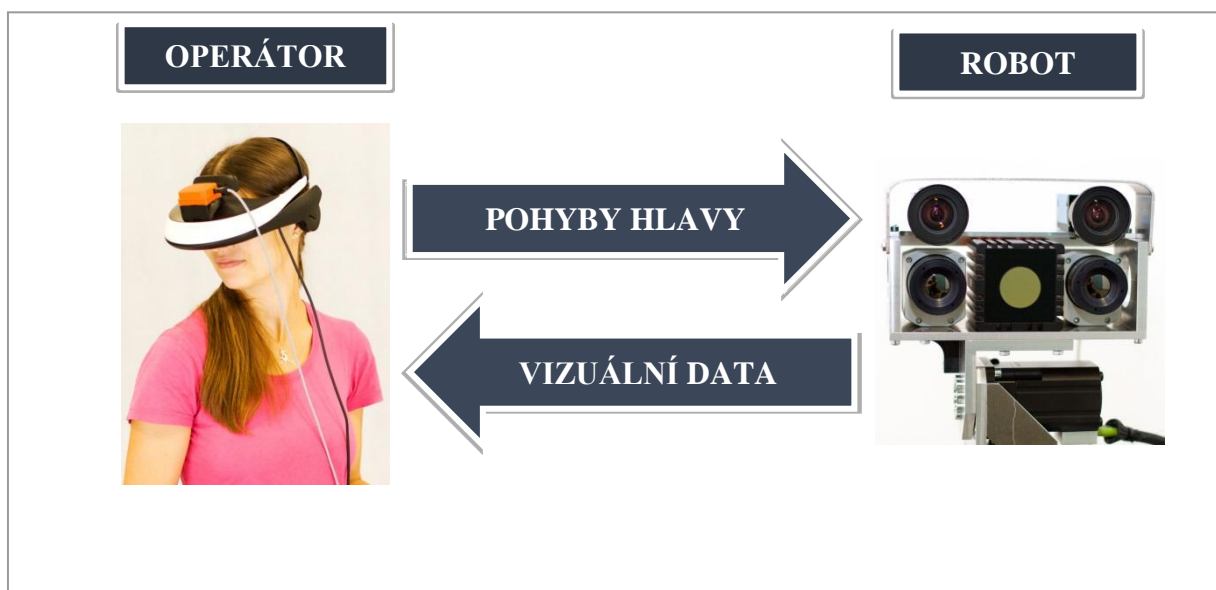
Ačkoli robotů kompatibilních se systémem CASSANDRA bylo vyvinuto podstatně více, z každé skupiny bude alespoň jeden představen v kapitole 2.1.

Roboty systému CASSANDRA byly původně řízeny operátorem v reálném čase – nešlo tedy o autonomní roboty s využitím prvků tzv. umělé inteligence, ale roboty ovládané člověkem. Důvodem byla především extrémní složitost záchranných misí, které se v praxi odehrávají v neznámém a často velmi složitém terénu, v časovém stresu, v předem nespécifikovaných podmínkách (viditelnost, kontaminace, atd.). V posledních třech letech však dochází k postupnému doplňování tzv. autonomních funkcí, které umožní lepší fungování systému CASSANDRA jako celku ve vnějším i vnitřním prostředí. Některé roboty se tak umí automaticky vrátit na místo, ze kterého vyjely, nebo například s definovaným rozestupem postupně projet

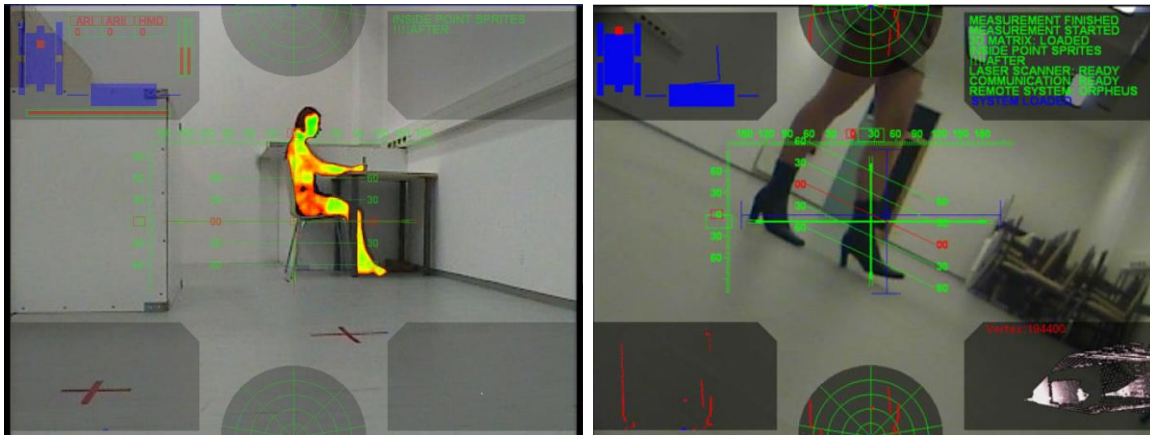
oblast definovanou čtyřmi hraničními body. Dlouhodobým cílem je postupně přidávat další automatické funkce, které operátorovi usnadní práci a celkově zvýší variabilitu využití systému.

Specialitou systému CASSANDRA je intuitivní způsob ovládání pomocí tzv. vizuální teleprezence (viz obrázek 3). Operátor má na hlavě helmu/brýle virtuální reality s příslušným snímačem pohybů hlavy, každý z robotů je pak vybaven minimálně jednou kamerou s pohybem ve dvou stupních volnosti. Kamera kopíruje pohyby hlavy operátora a ten se pak cítí být na místě robotu. Tato technika je v rámci projektu CASSANDRA využívána již více než 10 let a je dále rozvíjena.

Pro teleprezenční ovládání nyní vyvíjíme zcela nový multispektrální sensorický systém. Jde o soustavu maticových snímačů, která obsahuje stereovizní pár barevných CCD kamer, stereovizní pár termovizních kamer a dálkoměrnou (v našem případě tzv. TOF – time of flight) kameru. Tyto snímače jsou umístěny na pohyblivé hlavici robotu Orpheus se třemi stupni volnosti, která umožňuje díky svým mechanickým a elektrickým parametrům velmi rychlé a přesné sledování pohybů hlavy operátora (headtracking) při vizuální teleprezenci. Současným cílem je pomocí fúze dat ze jmenovaných snímačů umožnit věrné zobrazení běžného obrazu (tj. z barevných CCD kamer) s přidanou informací o teplotě a dalšími doplňkovými informacemi, například informací o průjezdnosti terénu – to vše do jednoho plynulého stereoskopického obrazu předloženého v reálném čase operátorovi, obvykle do brýlí virtuální reality. Tato technika bude podrobněji popsána v kapitole 3.1.



Obrázek 3: Princip vizuální teleprezence.



Obrázek 4: Snímky obrazovky jedné z verzí programu CASSANDRA.

Systém CASSANDRA představuje nejen hardware, tj. samotné roboty a jejich elektroniku, ale také programové vybavení a systémový návrh. Do programového vybavení patří především obslužný program Cassandra-WPF (viz obrázek 4) vyvinutý v programovacím jazyce Microsoft Visual C#, který tvoří základní uživatelské rozhraní mezi roboty a operátorem (případně více operátory). Jde však pouze o ovládací a zobrazovací program. Pro další činnosti, jako je sebelokalizace, mapování či datová fúze, byly vyvinuty další programy, které mohou pracovat buď samostatně nebo jsou navázány na program Cassandra-WPF. Pro praktické ovládání v misích byla dále vyvinuta jednodušší verze obslužného programu pro mobilní telefony se systémem Windows Phone. Systémovým návrhem jsou myšleny především komunikační protokoly a určitá minimální sestava funkcí, kterou musí každý robot disponovat.

Z hlediska infrastruktury je velmi důležitá komunikace, která obvykle probíhá bezdrátově. Systém CASSANDRA je připraven na široké spektrum komunikačních možností, nicméně běžně je nyní využíván systém podobný bezdrátovým sítím WiFi. Zajímavou funkcí je retranslace signálu, kterou CASSANDRA podporuje. V případě, že se některý z robotů ocitne v oblasti, kde ztratí signál, je možné vypustit další stroj, který se dostane do oblasti signálově dostupné jak operátorovi, tak robotu a je schopen přeposílat data a tím zvětšit komunikační dosah.

Nově pracujeme v širším měřítku s navigačními nástroji umožňujícími přesnou navigaci. Především jde o RTK GNSS (Real-time Kinematics Global Satellite Navigation System). Tento systém v našem případě zahrnuje jak samotné vybavení na robotu ve formě přijímače se dvěma anténními vstupy a vstupem pro korekce, tak potřebnou infrastrukturu ve formě tzv. základnové stanice, která je typicky součástí operátorské stanice a vysílá korekční data jednotlivým robotům. Navigační systém může být doplněn o inerciální navigační jednotky, může používat odometrii, apod. V současnosti také pracujeme na sebelokalizačním systému založeném na laserových skenerech, a to jak ve 2D tak i ve 3D oblasti – jde o připravovanou dizertační práci ing. Aleše Jelínka.

Vzhledem k tomu, že celý systém je často potřeba ovládat v tzv. polních podmínkách, zabýváme se také problematikou přenosných operátorských stanic, viz obrázek 5 vlevo a vprostřed a tzv. nositelné elektroniky, tedy nositelné operátorské stanice, viz obrázek 5 vpravo.



Obrázek 5: Zodolněná operátorská stanice (vlevo), snímek uživatelského rozhraní této stanice (vprostřed), nositelná operátorská stanice včetně teleprezenčního modulu (vpravo).

2.1 MOBILNÍ ROBOTY

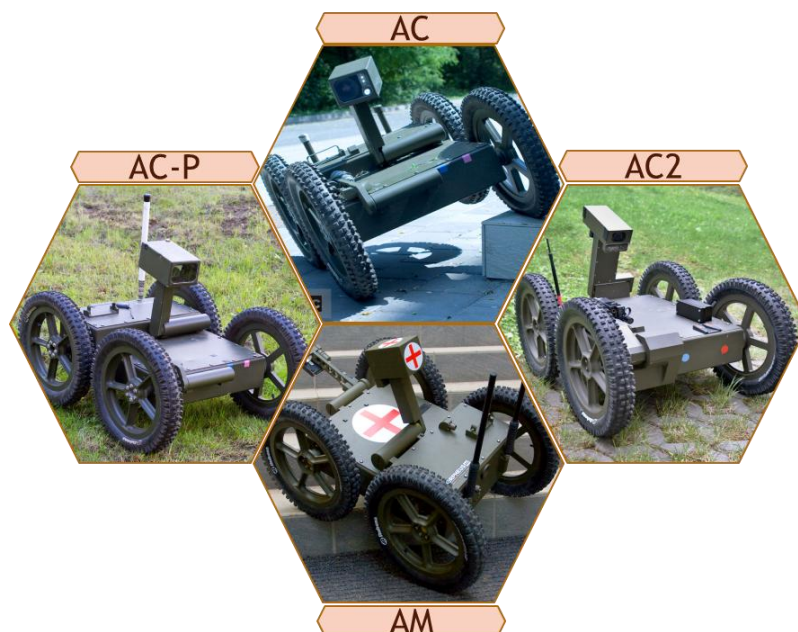
V této podkapitole bude popsáno několik robotů, které byly vyvinuty na našem pracovišti jako součást robotického systému CASSANDRA. Výčet robotů rozhodně není úplný, snahou bylo popsat z každé skupiny robotů alespoň jeden. Pro podrobnější popis jednotlivých strojů je možno odkázat na publikace [2], [3], [4], [9], na moji habilitační práci [6] a dizertační práce mých studentů [10], [11], [12].

2.1.1 Orpheus

Vývoj robotů Orpheus započal na našem pracovišti roku 2003, tedy před vývojem systému CASSANDRA. Od té doby bylo uvedeno celkem 11 robotů. Je možné sledovat dvě hlavní řady – vojenská a výzkumná.



Obrázek 6: Experimentální roboty Orpheus.



Obrázek 7: Vojenské roboty Orpheus.

Výzkumná řada obsahuje roboty Orpheus X1 až X4 (stav 08/2015), robot Orpheus-EXPLORER, Orpheus-HOPE a Orpheus-XTA – viz obrázek 6.

Vojenská řada je reprezentována roboty Orpheus-AC-P, Orpheus-AC, Orpheus-AM a Orpheus-AC2 – viz obrázek 7.

Pro všechny roboty Orpheus je shodná základní koncepce podvozku – roboty mají čtyři kola, každé s jedním aktivním stupněm volnosti. Zatáčení je realizováno rozdílem rychlosti otáčení kol na jedné a druhé straně. To znamená, že je možné zatáčet jak při jízdě vpřed či vzad, tak také na místě, vždy však při zatáčení dochází k prokluzu kol. Jako všechny typy podvozků, i tento má svoje výhody a nevýhody. Výhodou je především mechanická jednoduchost při dobré průchodivosti terénem. Z jednoduchosti konstrukčního řešení plyne značná robustnost a spolehlivost. Velkou nevýhodou je již zmiňovaná nutnost zatáčení smykem. To s sebou nese i řádově vyšší spotřebu při zatáčení, a tedy i velmi obtížnou predikovatelnost spotřeby energie v závislosti na ujeté vzdálenosti. Dalším problémem je i to, že všechny elektrické i mechanické části pohonného systému, tedy zejména měniče motorů, motory a převodovky, musí být patřičně dimenzovány. Tento typ konfigurace podvozku je také velmi nevýhodný pro techniky sebelokalizace založené na odometrii. Poměrně dobré zkušenosti máme v případě těchto podvozků s kombinovanou technikou zvanou gyrodometrie, kdy pro úhel natočení je použito inerciálních snímačů a pro lineární pohyb údajů o natočení kol v čase.

Dále se vybavení a konstrukce těchto dvou skupin robotů liší podle účelu, ke kterému jsou stavěny. Obecně lze říci, že experimentální roboty jsou méně odolné a jejich konstrukce je připravena na časté konstrukční změny. Všechny roboty experimentální řady mají ocelový rám pokrytý plechy z hliníkových slitin. Elektronická a senzorická výbava těchto robotů je značně variabilní a odpovídá jejich aktuálnímu použití.

Vzhledem k tomu, že v poslední době se náš tým již více zaměřuje na praktické využití robotů než na samotnou konstrukci platform, je naším cílem co nejvíce zužitkovat naše stávající roboty. Typickým příkladem je robot Orpheus-X4, který byl do současné doby využit při vývoji a experimentech na třech dizertačních pracích a při několika nezávislých praktických experimentech (např. přesná navigace, měření radiace, convoying). Vnitřní výbava pohonného subsystému je u novějších typů (Orpheus-X3 a novější) i přes značně vyšší cenu zcela shodná s výbavou vojenské



Obrázek 8: Orpheus-AC2 - robot (vlevo), zadní část CBRN vozidla se záchytným systémem (vprostřed), kokpit vozidla s displejem operátorské stanice (vpravo).

verze Orpheus-AC2 (hlavní parametry viz tabulka 1). Hlavní motivací k tomuto kroku byla snaha o co největší podobnost podvozků a potenciální přenositelnost nových technologií vyzkoumaných na řadě X směrem k armádním verzím A.

Vojenské roboty jsou ve všech případech založeny na samonosném šasi svařeném z lehkých slitin. Vzhledem k tomu, že tyto roboty jsou určeny především pro práce v potenciálně kontaminovaných oblastech (radiace, biologické či chemické nebezpečné látky), bylo naší snahou je navrhnout tak, aby byly co nejvíce vodotěsné a nejsnáze dekontaminovatelné. To s sebou nese celou řadu konstrukčních opatření od samotného tvaru robotu, přes použité materiály šasi, spojovacích prvků a těsnění až po povrchovou úpravu. Roboty Orpheus-AC a Orpheus-AC2 byly vytvořeny na zakázku pro využití především v chemickém vojsku Armády České republiky. Tomu mimo jiné odpovídají i zkoušky, kterými tyto stroje musely projít – viz tabulka 2. Jde o zkoušky z několika nezávislých oblastí (elektromagnetická kompatibilita, environmentální vlivy, ...), které jsou uznány v rámci armád NATO.

Vojenský robot Orpheus-AC2 je zamýšlen jako průzkumný prostředek pro CBRN (Chemical, Biological, Radiological and Nuclear defense) vozidlo, viz obrázek 8. Je určen primárně pro dvě mise – počáteční průzkum oblasti s vysokým rizikem kontaminace a jízda před CBRN vozidlem. Z toho důvodu je robot vybaven čtveřicí speciálních senzorů – beta a gama sonda, chemický analyzátor nebezpečných látek ve vzduchu a sorbční trubička pro laboratorní analýzu vzduchu. Kromě posledního jmenovaného předávají všechny tyto snímače data v reálném čase operátorovi i nadřazeným složkám, neboť robotický komplet Orpheus-AC2 je plně integrován do elektronického systému CBRN vozidla.

Tabulka 1: Hlavní parametry robotu Orpheus-AC2.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozměry (dxšxv) složený	881x590x426	mm
Průměr kola	426	mm
Hmotnost	48	kg
Výdrž baterie	90 – 300	minut
Maximální rychlost	15	km/h
Max. výška překážky	20	cm
Komunikační dosah (přímá viditelnost)	300	m

Tabulka 2: Zkoušky robotů Orpheus-AC/AC2.

Zkoušený parametr	Norma
Prostředí	STANAG 2895 – A2, A3, C1 COS 999905 – 302, 303, 304, 309, 310, 312, 313, 314
Vibrace, rázy	STANAG 2914 COS 999902 – 401, 403
EMC vyzařování	COS 599902:2002 – RE102, RE103
EMC odolnost	COS 599902:2002 – CS114, CS115, CS116, RS103
Speciální	Dekontaminovatelnost, odolnost na chemické látky, manipulace

Kromě toho robot obsahuje řadu dalších čidel, jako jsou kamery, včetně infračerveného a bílého přisvícení, dálkoměrný snímač, inerciální snímače, atd. Na robotu jsou dále dva manipulátory, každý se dvěma stupni volnosti. Kamerový manipulátor slouží k natáčení hlavní kamery s tím, že umožňuje i její úplné složení na tělo robotu tak, že nepřesahuje siluetu kol. Sensorický manipulátor nese gama sondu, další kameru, dálkoměrný snímač a zařízení pro odběr vzorků vzduchu. Tento manipulátor má dva stupně volnosti z důvodu nutnosti měřit gama záření přesně kolmo na vyzařující objekt.

2.1.2 Perseus

Perseus (viz obrázek 9) je malý průzkumný robotický prostředek. Vznikl jako nástupce jednoduchého a levného robotu Brontes, který na našem pracovišti používáme již pouze pro demonstrační účely. Značnou výhodou tohoto typu podvozku je dobrá průchodivost terénem při zachování nízké hmotnosti. Jde o typ podvozku původně konstruovaný NASA pro průzkum cizích planet. Podvozek tohoto robotu nebyl vyvinut na našem pracovišti, je však vybaven naší řídicí elektronikou, která je kompatibilní se systémem CASSANDRA. Rovněž komunikační moduly jsou prakticky shodné jako v robotech Orpheus, což zaručuje relativně dobrý dosah signálu a velmi širokou parametrizaci komunikačního kanálu i v průběhu mise. Robot je dále vybaven kamerou s manipulátorem se dvěma stupni volnosti tak, aby bylo možné jej ovládat teleprezenčně pomocí helmy virtuální reality. V současné době je vyvíjena druhá generace tohoto robotu, která místo původní řídicí jednotky s procesorem Freescale Coldfire V2 používá výkonnější a dostupnější procesorovou jednotku Raspberry Pi 2.

Hlavní parametry robotu Perseus první generace jsou v tabulce 3.



Obrázek 9: Robot Perseus.

Tabulka 3: Hlavní parametry robotu Perseus.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozměry (dxšxv)	550x450x350	mm
Hmotnost	9	kg
Maximální rychlost	3	km/h
Výdrž baterie	45	minut

2.1.3 Scorpio

Robot Scorpio (viz obrázek 10) byl vyvinut jako demonstrátor průzkumného stroje vhodného pro pohyb uvnitř budov. Robot je vybaven tzv. děleným pásovým podvozkem s předními „flipy“, které umožňují říditelné natáčení v rozsahu 360°. Díky tomu je stroj schopen vystoupat standardní schody, což je jedním z nejdůležitějších požadavků pro bezproblémovou funkčnost uvnitř budov. Zároveň je tento stroj díky plastové konstrukci a použitému vybavení velmi lehký. Snahou bylo dosáhnout co nejkompaktnější konstrukce, proto jsme robot vybavili výklopnou kamerovou hlavicí se dvěma stupni volnosti, kterou je možné zaparkovat do těla robotu. Kamera přitom navíc může být otočena směrem vzhůru. Díky tomu jsme dosáhli nízkého profilu s výškou 175 mm, díky kterému může robot například zajet pod vozidlo nebo do štěrbiny a vestavěnou kamerou tento objekt zespodu prozkoumat.



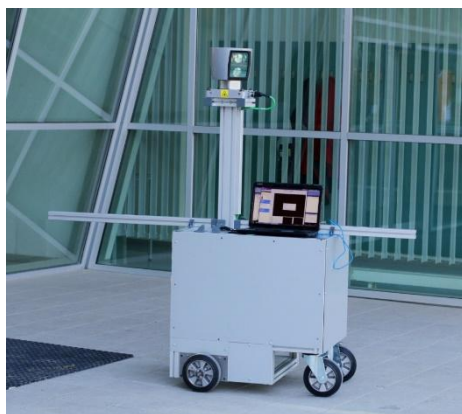
Obrázek 10: Robot Scorpio.

Robot je vybaven dvěma nezávislými LiPol akumulátory, které mu umožní bez nabíjení operovat až dvě hodiny. Mechanika podvozku byla zakoupena, jde o platformu Dr. Robot Jaguar. Naše pracoviště vybavilo stroj vlastní elektronikou, kamerovým manipulátorem, bateriemi a komunikačním modulem tak, aby se robot stal součástí systému CASSANDRA.

Hlavní parametry robotu Scorpio jsou v tabulce 4.

Tabulka 4: Hlavní parametry robotu Scorpio.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozměry (dxšxv)	650 x 700 x 175	mm
Hmotnost	21	kg
Maximální rychlost	4	km/h
Schopnost zdolávat schody	ANO	-
Výdrž baterie	2 x 60 (dva nezávislé kusy)	minut



Obrázek 11: Robot envMap.

2.1.4 envMap

Robot envMap (viz obrázek 11) byl na našem pracovišti vytvořen jako demonstrátor robotu určeného pro automatické digitální mapování, především ve vnějším prostředí. Tomu odpovídá konstrukce z hliníkových profilů, která sice není příliš vhodná do těžšího terénu, na druhou stranu obsahuje značné množství využitelného vnitřního prostoru a je možné ji snadno modifikovat. Robot je vybaven velmi pokročilým a nákladným měřicím vybavením – např. laserový 3D skener (lidar) Velodyne HDL-64 nebo kombinovanou navigační jednotku iMar iTraceRT-F400E s optickými gyroskopy a vektorovou RTK GNSS.

Podvozek robotu envMap je diferenciální se dvěma elektromotory s planetovou převodovkou. Robot je napájen olověnými akumulátory 2 x 12 V.

Robot envMap byl použit při několika experimentech ověřujících parametry navigačních systémů, kde jsme využili jeho variabilitu, nosnost a robustnost. Výhodou je dále i rozměrná hliníková konstrukce umožňující současné použití několika rozměrných GNSS antén současně, což umožňuje například srovnání jednotlivých navigačních modulů současně.

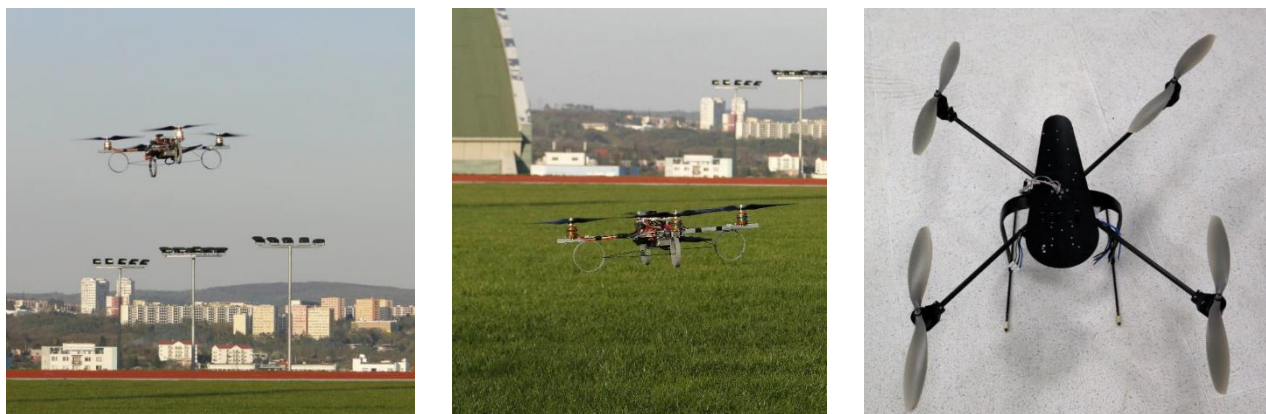
Hlavní parametry robotu envMap jsou v tabulce 5.

Tabulka 5: Hlavní parametry robotu envMap.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozměry bez antén (dxšxv)	800 x 750 x 1750	mm
Hmotnost	85	kg
Maximální rychlost	1,5	km/h
Výdrž baterie	180	minut

2.1.5 Uranus

Naše pracoviště vyvíjí také multirotorové letové prostředky s názvem Uranus. První letuschopný kus s názvem Uranus Alu ukazuje obrázek 12 vlevo. Jde o stroj od základu vyvinutý na našem pracovišti s vlastní řídicí elektronikou i mechanickou konstrukcí. Rovněž tento stroj je možné začlenit do systému CASSANDRA a ovládat jej pomocí stejnojmenného programu vyvinutého na našem pracovišti. Hlavním posláním dronu Uranus Alu je testování řídicích algoritmů a elektroniky. Velký důraz je kladen na bezpečnost – jednak bezpečnost obsluhy, ale i neseného vybavení, které bude v případě příští generace značně nákladné. Stroj je tedy ovládán zabezpečeným komunikačním protokolem a disponuje funkcí automatického přistání v případě ztráty signálu. Největší nevýhodou současné generace je nízká nosnost přibližně 200 g.



Obrázek 12: Létající roboty Uranus, Uranus Alu (vlevo a vprostřed), Uranus Carb (vpravo).

V současnosti je již vyvíjen nový dron s nosností minimálně 1,5 kg. Jde o šestirotorový stroj pro zajištění větší spolehlivosti – stroj by měl být schopen bezpečného přistání i v případě ztráty dvou motorů. Hlavní činností, kterou by tyto stroje měly vykonávat, je 3D skenování budov a objektů ve vnějším prostředí. Z toho důvodu bude nový Uranus Hexa vybaven miniaturní inerciální jednotkou, přijímačem GNSS se dvěma vstupy pro výpočet azimutu, kvalitní kamerou s vysokým rozlišením a termovizní kamerou.

Hlavní parametry současné generace Uranus Alu obsahuje tabulka 6.

Je třeba zmínit problémy se současnou legislativou ohledně letových prostředků v České republice, která na několik měsíců velmi omezila další vývoj v této oblasti.

Tabulka 6: Hlavní parametry robotu Uranus alu.

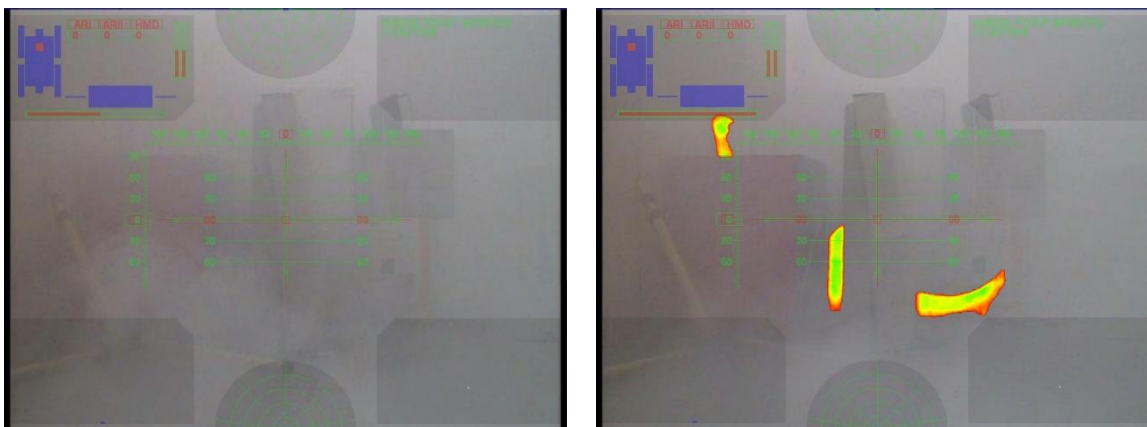
Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozměry bez vrtulí (Øxv)	500 x 220	mm
Hmotnost	1050	g
Maximální rychlost	nezjištěna	km/h
Výdrž baterie	12	minut

3 ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA

Dále budou popsány vybrané odborné problémy, které jsou v rámci Skupiny umělé inteligence a robotiky a Laboratoře teleprezence a robotiky na projektu CASSANDRA řešeny. Je třeba říci, že výčet zdaleka není kompletní, zde uvedená dvě témata jsou však již dostatečně rozpracována a současně je možné předpokládat jejich další pokračování.

3.1 MULTISPEKTRÁLNÍ DATOVÁ FÚZE

Zcela původní motivace pro tento projekt je dobře patrná z jednoho z raných experimentů s robotem Orpheus-X2, viz obrázek 13. Jde o dva reálné snímky vnitřního testovacího polygonu, který byl silně zakouřen. Na levém obrázku je scéna snímána pouze běžnou kamerou, vpravo pak je použita kombinace barevné kamery a termovizní kamery. Jde o názornou ukázkou užitečnosti kombinace více spekter v jednom zobrazení.

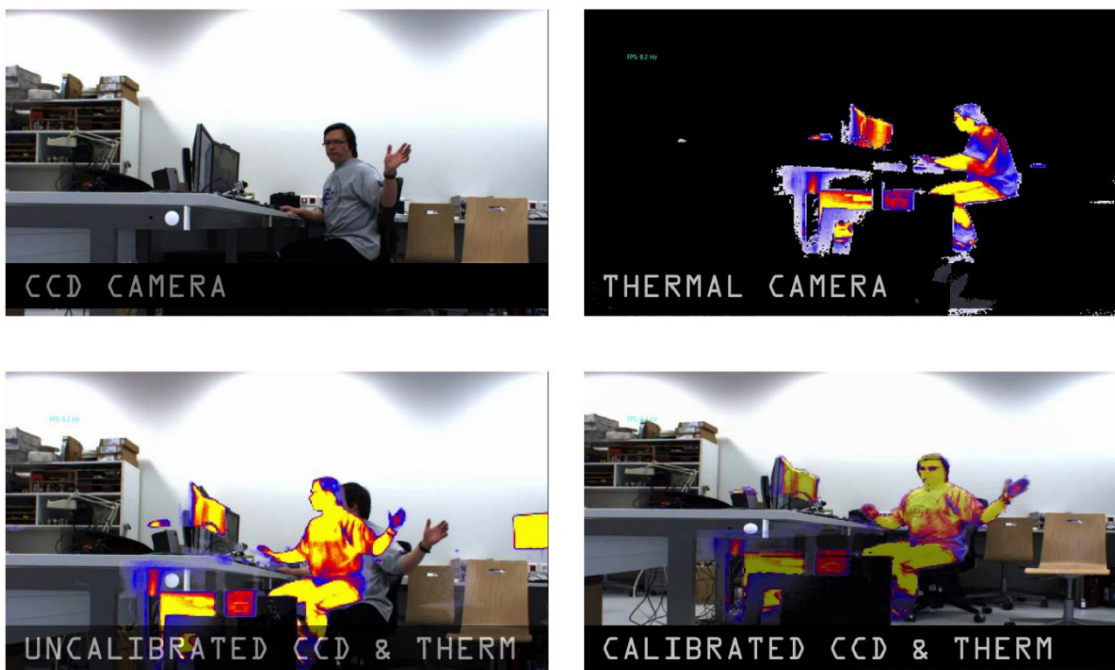


Obrázek 13: Snímky obrazovky robotu Orpheus-X2, snímáno pouze pomocí běžné barevné kamery (vlevo), snímáno kombinací barevné kamery a termovizní kamery (vpravo).

V průzkumné mobilní robotice je častým úkolem vyhledávání živých osob. Ať již jde o oběti živelní katastrofy, kriminální živly či teroristy při nezákonné činnosti nebo raněné vojáky na bojišti, je vždy společným znakem snaha najít osoby, které jsou naživu. Zde je možné s výhodou použít vyhledávání pomocí tepelného obrazu, protože živý člověk má přibližně teplotu 37°C , zatímco okolí má obvykle teplotu nižší. Vyhledávání pomocí termoobrazu má smysl dokonce i pro hasiče v extrémně teplém prostředí, protože i zde se živý lidský organizmus snaží udržet fyziologickou teplotu. Pro vyhledávání osob je tedy velmi vhodné použít teplotní obraz, například z nechlazeného mikrobolometru termovizní kamery. Zde je však problém v tom, že jde o data, která člověk svými vlastními „čidly“ není schopen vnímat. To znamená, že je problematické zobrazení těchto dat člověku tak, aby pro něj byla snadno interpretovatelná. Dále je zde problém v běžném prostředí, kdy má většina objektů přibližně stejnou teplotu a je tedy opět obtížné teplotní data zobrazit tak, aby měla pro operátora vhodnou vypovídací hodnotu například pro navigaci v neznámém prostředí. Naopak velkou výhodou termovizní techniky je to, že pracuje prakticky stejně dobře za světla i ve tmě – za tmy dokonce může dávat termovize lepší výsledky. Vzdálené infračervené spektrum v typicky používané oblasti $8 - 14 \mu\text{m}$ také oproti běžnému světlu mnohem lépe proniká mlhou, kouřem, párou, apod.

Z předchozího srovnání je jasně patrné, že kombinace běžného viditelného světla s vlnovými délkami přibližně $380 - 740 \text{ nm}$ a vzdáleného infračerveného s vlnovými délkami přibližně $8 - 14 \mu\text{m}$ je pro průzkum s přednostním vyhledáváním osob velmi výhodná. Ve své habilitační práci [6] v kapitole 4.4 jsem se zabýval především vhodným způsobem zobrazení jednotlivých spekter tak, aby vypovídací hodnota pro operátora byla co největší.

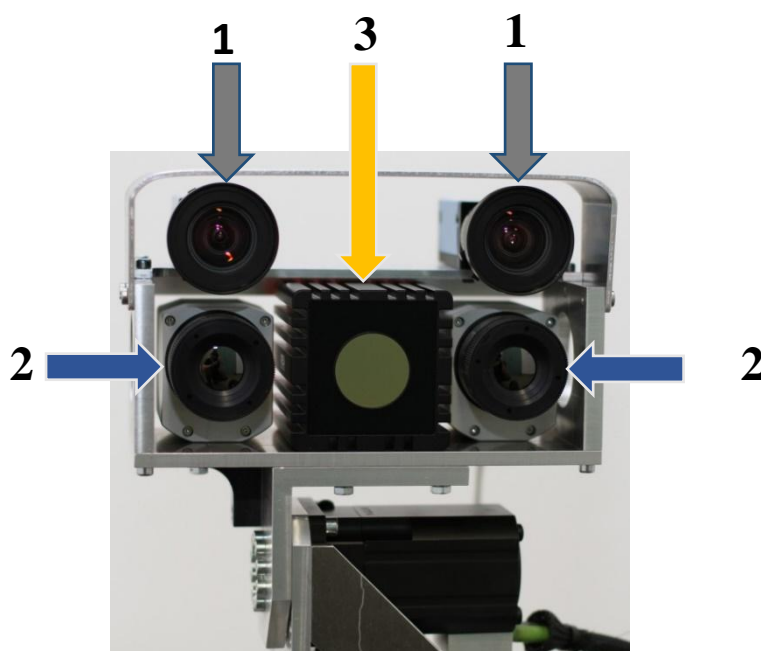
Hlavním tématem našeho dalšího výzkumu v této oblasti byla především snaha fúzovat data z jednotlivých kamer tak, aby si data vzájemně přesně odpovídala. Při použití běžných CCD a termovizních kamer totiž dojde k tomu, že vzhledem k jejich fyzickému umístění do jiného místa (kamery se nemohou nacházet ve stejném bodě v prostoru) je nemožné přesně sesouhlasit obrazy z kamer pouhými geometrickými 2D transformacemi – viz obrázek 14. Existují však dva zásadní důvody mít tato data přesně vyrovnána. Je to velmi výhodné pro operátora používajícího vizuální teleprezenci, kdy je typicky používán obraz CCD kamery jako základ a pouze objekty s vybranými teplotami (například kolem teploty lidského těla) jsou výrazně zobrazeny přes tento obraz. V nemenší míře je potřeba mít data exaktně fúzována pro tzv. multispektrální mapování vnitřních a vnějších prostor, kterým se naše pracoviště rovněž zabývá.



Obrázek 14: Zachycení stejné scény v jednom časovém okamžiku, CCD kamera (nahore vlevo), termovizní kamera (nahore vpravo), nekalibrované zobrazení obrazu CCD kamery a termovize (dole vlevo), kalibrované zobrazení obrazu CCD kamery a termovize (vpravo dole).

Je několik způsobů jak dosáhnout přesného sesazení snímků. Jedním z nich je přístup, kdy pomocí optického filtru dosáhneme rozdělení optického paprsku podle požadovaných frekvencí. To je předmětem mé patentové přihlášky s názvem „Systém pro snímání infračerveného záření bez paralaxy“ podané v červenci 2015 na Úřad průmyslového vlastnictví. Další možností je snaha vyhledat v obrazech termovizní kamery a barevné kamery shodné objekty za pomoci matematických operací z oblasti počítačového vidění nebo pomocí přístupů tzv. umělé inteligence a tyto na sebe vzájemně sesadit. Tento přístup však má řadu nepříjemných omezení – jednak si obrazy v různých spektrech vzájemně nemusí příliš dobře odpovídat (viz např. obrázek 13), dále také v obraze nemusí být dostatečné množství identifikovatelných objektů.

Metoda, kterou jsme navrhli na našem pracovišti, spočívá v kombinaci dat ze tří snímačů – barevné kamery pracující ve viditelném spektru, termovizní kamery a tzv. dálkoměrné kamery (obrázek 15). Princip činnosti fúzovacího algoritmu je možné zjednodušeně popsat následujícím způsobem: dálkoměrná kamera změří vzdálenosti objektů ve scéně a díky známému vzájemnému posunutí a natočení jednotlivých kamer vůči sobě je možné vzájemně přepočítat pixely jedné z kamer do obrazových informací jiné z kamer.

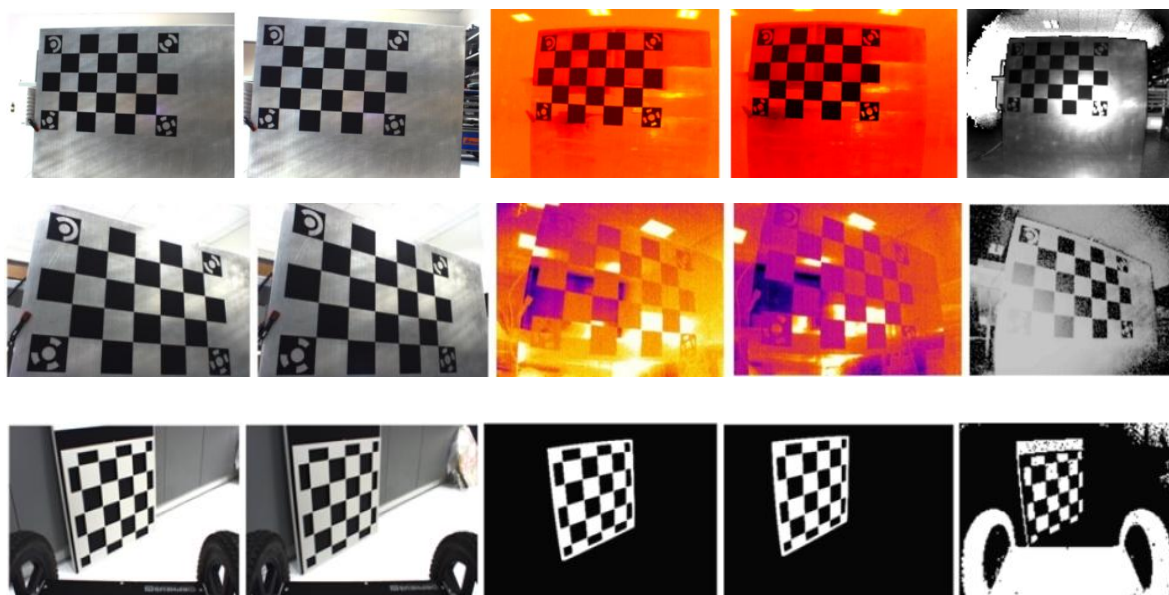


Obrázek 15: Multispektrální sensorická hlavice umístěná na robotu Orpheus-X3, legenda: 1 – barevné CCD kamery, 2 – termovizní kamery, 3 – dálkoměrná kamera.

Základem pro správnou činnost tohoto postupu je tedy velmi přesná kalibrace kamer. Je nutné provést geometrické opravy optiky jednotlivých kamer a dále přesně zjistit posunutí a natočení významných bodů kamer mezi sebou v šesti osách v jednotném referenčním systému.

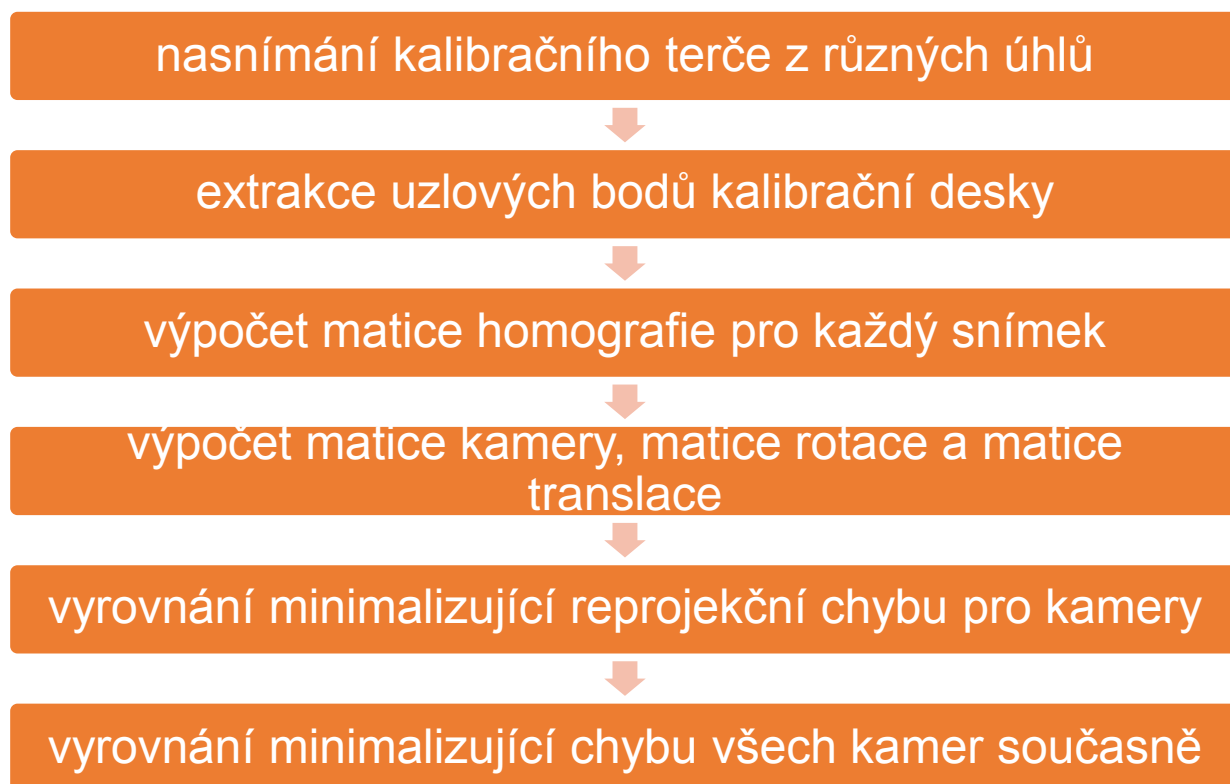
Prvním důležitým krokem byla kalibrace dálkoměrného snímače, která je podrobněji řešena v našem článku [2], případně jinými týmy, například [15], [16].

Jedním z problémů, které bylo nutno vyřešit pro bezproblémovou funkci, byl návrh a výroba vhodného kalibračního obrazce. Na tento obrazec bylo kladeno několik požadavků. Především musel být dobře viditelný ve všech použitých spektrech – tedy vzdáleném infračerveném, blízkém infračerveném a viditelném. To se ukázalo jako netriviální problém. Jako nejjednodušší řešení se nám jevilo použít materiály s výrazně odlišnými emisivitami – to by při stejné teplotě materiálu znamenalo dobré vykreslení na termovizní kameře. Ukázalo se však, že tato změna emisivity musí být v praxi značná, což pro praktickou realizovatelnost znamenalo použít lesklý kov. Značně nižší emisivita však znamená podstatně větší odrazivost (přesněji kombinaci propustnosti a odrazivosti, změna propustnosti však pro nás nemá praktický význam) a ta s sebou nese riziko odrazů okolních objektů. Proto jsme dospěli k řešení, kdy je použita matovaná deska z hliníkových slitin, na které je vyřezán testovací obrazec. Tato deska je umístěna několik milimetrů nad matnou tmavou dřevěnou deskou. Hliníková deska je rovnoměrně vyhřívána pomocí odporového plechu. Toto řešení se v praxi velmi osvědčilo a stalo se předmětem další patentové přihlášky. Výsledný obraz z jednotlivých kamer zobrazuje obrázek 16. Zde každá série obsahuje snímky z pěti kamer – zleva doprava jsou to tyto: levá CCD kamera, pravá CCD kamera, levá termovizní kamera, pravá termovizní kamera, dálkoměrná kamera. Horní a prostřední série snímků ukazuje jednu z prvních verzí kalibračního obrazce, jejímž základem byla deska z hliníkových slitin s nalepenou průhlednou fólií, na které je inkoustem vytištěn testovací obrazec. Při přibližně kolmém pohledu kamer je situace v pořádku a i na termovizní kameře je možné dobře identifikovat rohy čtverců kalibračního pole (viz. obrázek 16 nahoře). Pokud však stejný terč snímáme pod ostřejším úhlem, vzniknou v obraze z termokamery silné odlesky, které často znemožní automatickou detekci rohů kalibračního obrazce (viz. obrázek 16 vprostřed). Námi navržený vyhřívaný kalibrační modul těmito problémy netrpí.



Obrázek 16: Kalibrační terče vyvinuté na našem pracovišti, nevyhříváný terč s adhezivní průhlednou fólií – kolmý pohled (nahore), stejný kalibrační terč při pohledu z boku (vprostřed), konečná podoba terče s vyhřívanou deskou (dole).

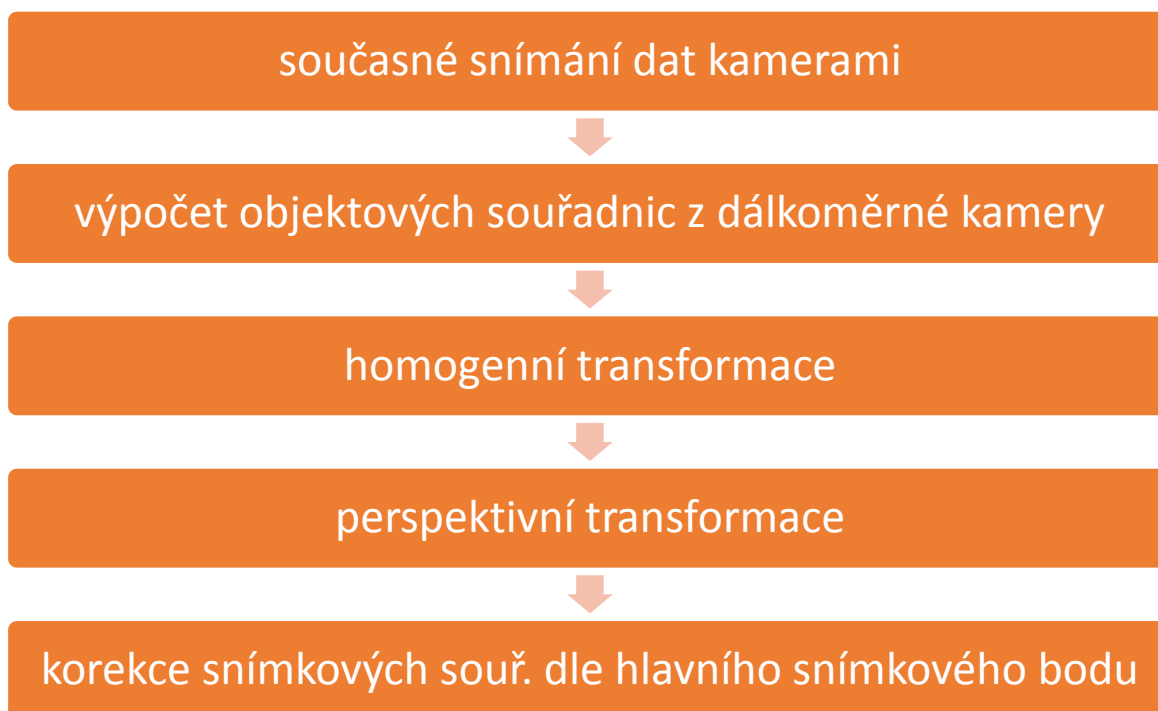
Principiální průběh kalibrace zobrazuje obrázek 17. Celý proces datové fúze potom schematicky znázorňuje obrázek 18.



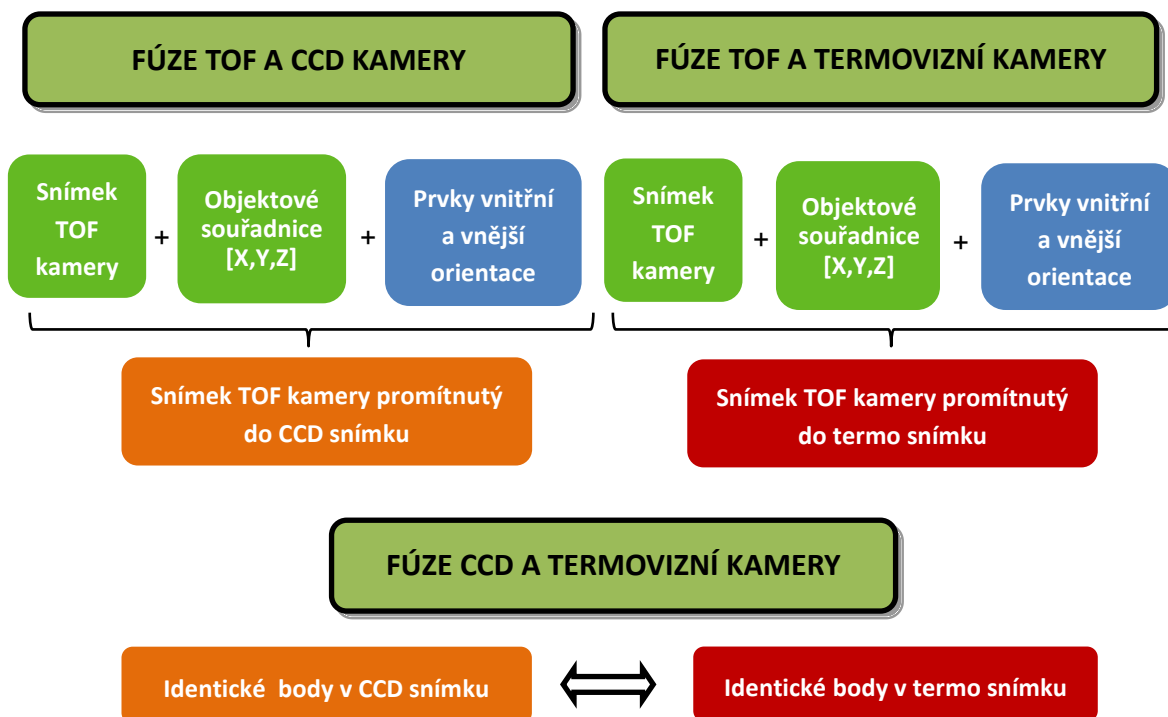
Obrázek 17: Schéma kalibrace snímačů pro multispektrální datovou fúzi.

Jak je patrné, samotný princip fúze je poměrně jednoduchý – po nasnímání dat a převedení dálkoměrných dat do objektových souřadnic je hlavní činností provedení homogenní transformace, která jednotlivé pixely v prostoru posune a otočí v závislosti na datech získaných z kalibrace. Dále již je provedena pouze perspektivní transformace pro správné zobrazení uživateli a geometrická korekce. Je však třeba upozornit na fakt, že jde o pouhé zjednodušené schéma postupu fúze mezi dvěma kamerami za předpokladu znalosti vzdálenostní mapy pro danou scénu. O něco lepší obrázek o komplexnosti úlohy dává obrázek 19. I zde však jde pouze o fúzi mezi jednou CCD kamerou a termovizní kamerou. V našem případě jsou však pro teleprezenci tyto výpočty prováděny dvakrát – jednou pro levé, podruhé pro pravé oko operátora. Celkově jde tedy o úlohu značně výpočetně náročnou, kterou je potřeba, minimálně pro teleprezenci, provádět v reálném čase při snímkové frekvenci v řádu desítek Hz. Dále je třeba si uvědomit, že tyto výpočty musí probíhat přímo na mobilní platformě, protože hrubá data představují v našem případě datový tok přibližně 1,7 Gbit/s, což je hodnota v reálných podmínkách bezdrátově nedosažitelná. Veškerá fúze je tedy prováděna na počítačích uvnitř robotu s tím, že k operátorovi je zaslán pouze již fúzovaný kompresovaný obraz. Výhodou je pak datová náročnost shodná se samotným obrazem z kamer, nevýhodou je principiální nárůst latence vlivem prováděných výpočtů.

Jedním z velkých problémů tohoto postupu je různé pixelové rozlišení jednotlivých použitých kamer, viz obrázek 20. Zde je schematicky zobrazen stav, ke kterému dochází v našem případě, ale je možné jeho obdobu očekávat ve většině praktických aplikací. Z obrázku je patrné, že největší pixelové rozlišení má barevná CCD kamera (v našem případě The Imaging Source DFK23G445 s rozlišením 1280 x 960 pixelů), podstatně nižším rozlišením disponuje termovizní kamera (MicroEpsilon TIM 450 s rozlišením 382 x 288 pixelů) a zdaleka nejnižší rozlišení má dálkoměrná kamera (SwissRanger SR4000 s rozlišením 176 x 144). Kamery byly zvoleny tak, aby měly přibližně shodný zorný úhel, který je navíc poměrně široký. Ačkoli zejména v oblasti nechlazených termovizních kamer dochází v posledních letech k prudkému vývoji, je možné předpokládat, že tyto poměry budou přibližně zachovány. Určitou možností je použití jiné než TOF (time-of-flight) kamery pro měření vzdáleností objektů, jako příklad lze uvést zařízení typu Microsoft Kinect One, které však je prozatím pro vnější použití nevýhodné.

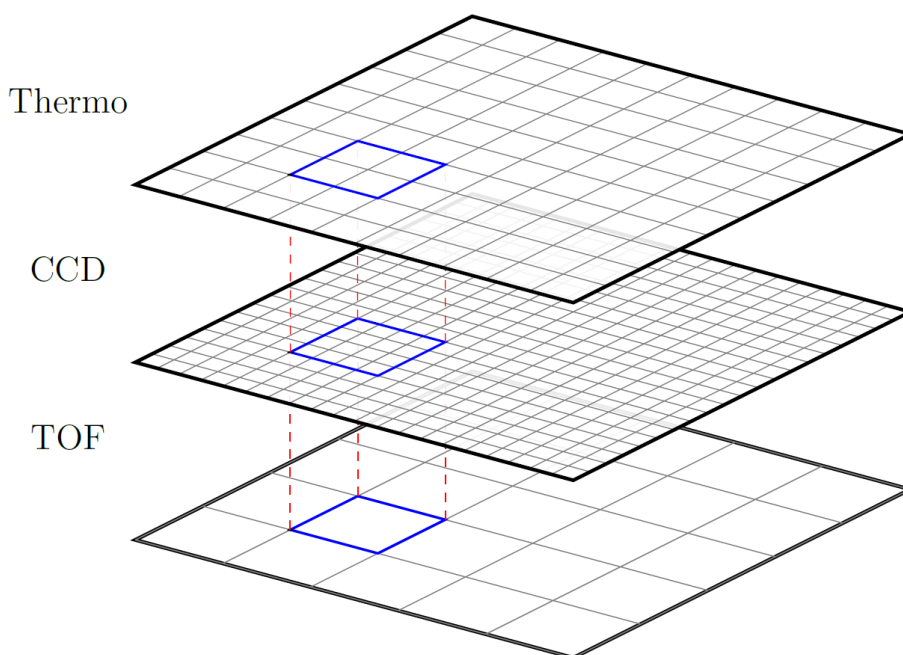


Obrázek 18: Schéma multispektrální datové fúze mezi dvěma kamerami.



Obrázek 19: Schéma multispektrální datové fúze mezi více kamerami.

Celý systém je i nadále vyvíjen a optimalizován. Hlavním současným praktickým problémem je různá latence jednotlivých snímačů způsobující zjednodušeně řečeno určitý posun mezi zobrazením termovizních dat a dat z CCD kamer. To je řešeno časovými značkami při snímání hrubých dat a zpracováním pouze vzájemně si odpovídajících snímků. Stejně algoritmy je možné použít i pro měření ve zcela odlišných měřítkách. V současnosti například pracujeme na multispektrálním skenování částí lidského těla pro medicínské účely [8].



Obrázek 20: Fúze dat - problém s různým pixelovým rozlišením jednotlivých snímačů.

3.2 AUTOMATICKÁ TVORBA MULTISPEKTRÁLNÍCH MAP V MULTIROBOTICKÝCH SYSTÉMECH

Společnou vlastností potřebnou v několika typech misí jmenovaných v úvodní kapitole je multiplatformnost. Jak již bylo řečeno, není se současnými technologiemi možné vytvořit univerzální mobilní robot schopný širokého spektra řešených úkolů, čemuž je přizpůsoben i systém CASSANDRA. Zde použité roboty se neliší pouze vnějšími rozměry a hmotností, ale také elektronickým vybavením. Například velký mapovací robot envMap (viz obrázek 11) je vybaven nákladným a těžkým lidarem Velodyne HDL-64, který v současnosti představuje špičku pro mobilní robotické systémy a přesnou sebelokalizační jednotkou iMar. Naopak malý robot Perseus (viz Obrázek 9) nebo dokonce létající stroj Uranus (viz obrázek 12) nemůže být vybaven takto těžkými a objemnými přístroji – nejen, že není možné je na tyto stroje umístit, ale ani nemají dostatečně výkonné výpočetní nástroje na účelné zpracování dat z takových snímačů.

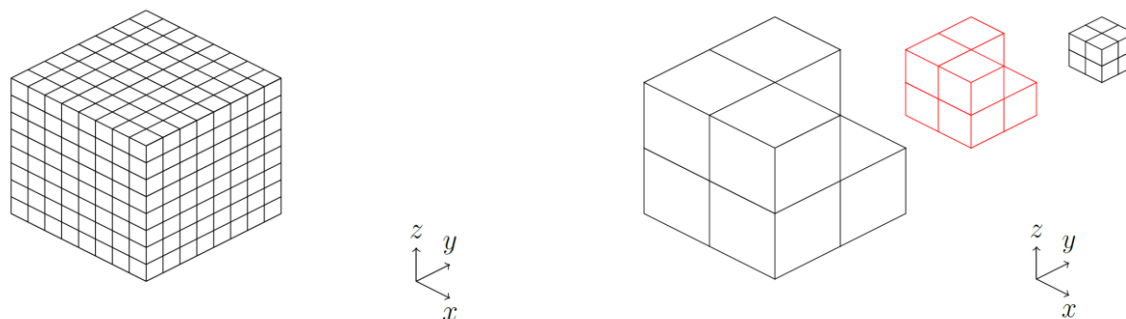
Jedním z dlouhodobých cílů sledovaných v rámci vývoje systému CASSANDRA je tvorba mapovacího subsystému, který umožní vhodným způsobem kombinovat (fúzovat) data z různých typů snímačů umístěných na jednotlivých robotech tak, aby vznikla co nejkomplexnější a nejrobustnější mapa s co nejširším využitím. Jako základní požadavek jsme vzali schopnost vhodným způsobem uchovávat informaci z multispektrálního optického měření popsaného v předchozí kapitole. Cílem však je mít možnost v budoucnu rozšířit tyto informace o další části spektra, ale i o zcela rozdílné veličiny, jako například intenzitu radiace, výskyt nebezpečných chemických látek, ale i výskyt osoby, apod.

Počáteční úvahy nás vedly k velmi široce používané metodě 3D mřížek obsazenosti, přesněji technice Robot Evidence Grids – viz obrázek 21 (vlevo) a [20]. Zde jsme použili pravděpodobnostní vyjádření překážky za pomoci tzv. bayesovského přístupu [18]. Mapovaný trojrozměrný prostor je rozdělen na kubické jednotky zvolené velikosti. V našem případě při mapování vnitřních prostor obvykle používáme rozlišení 1 cm až 5 cm, v případě potřeby však může být rozlišení v jednotlivých osách různé.

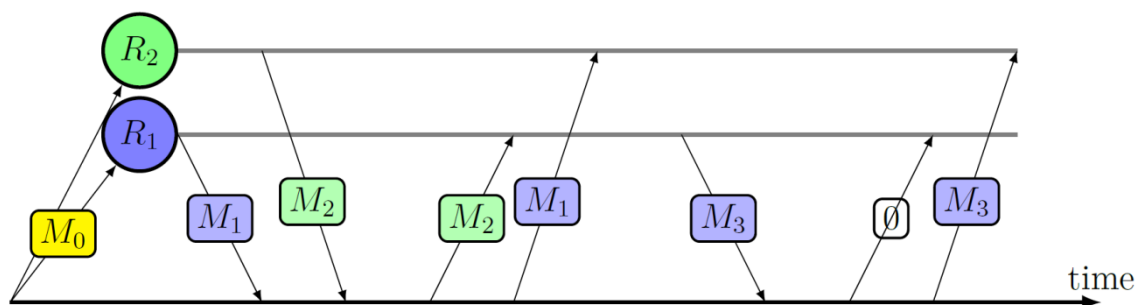
Každá jednotlivá buňka prostoru obsahuje následující informace (v závorce typ proměnné a počet bajtů potřebných pro uložení):

- (float, 4B) pravděpodobnost obsazenosti překážkou,
- (int, 1B) teplota,
- (int, 3B) barva v barevném prostoru RGB.

Z předchozího popisu je evidentní, že takové mapy jsou extrémně datově objemné a přitom je matice, která je reprezentuje, velmi řídká, protože většina prostoru je prázdná. Na druhou stranu jde o reprezentaci extrémně výhodnou pro rychlé zpracování neboť vzdálenost v prostoru je kódována pouhým indexem.



Obrázek 21: Schematické znázornění mapovací metody Robot Evidence Grids (vlevo) a Octree (vpravo).



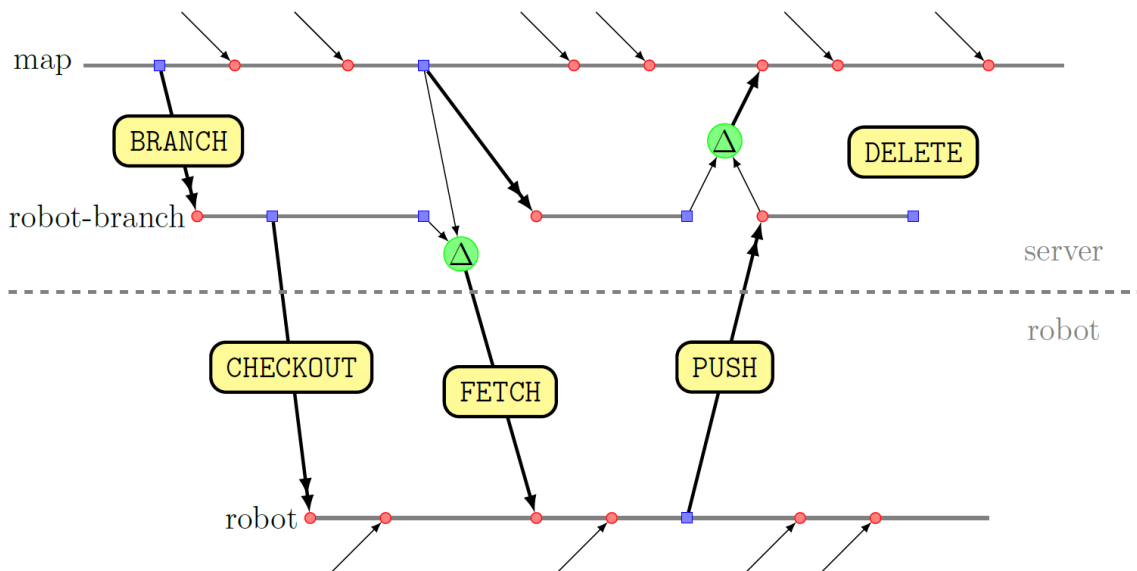
Obrázek 22: Princip distribuce mapy mezi roboty – obecné schéma.

Pro rozumné využití v mobilní robotice je nutné mapy nebo alespoň jejich části přenášet – jednak mezi jednotlivými roboty, ale také mezi roboty a operátorskou stanicí. Vzhledem k tomu, že tento přenos je obvykle bezdrátový, je zde velký tlak na dostatečnou kompresi map při zachování jejich dostatečné kvality, v ideálním případě by komprese dat měla být bezztrátová. Proto jsme zvolili jako sekundární metodu uložení map - tzv. oktalové stromy, tedy octree (viz. obrázek 21 vpravo) a [19]. V octree je prostor rekurzivně dělen na poloviny ve všech osách a tím je vytvořen strom. Pro naše použití je důležité to, že jsou ukládány pouze neprázdné buňky stromu, což značně sníží datovou náročnost.

Základem přístupu, který jsme zvolili a který je rozpracován v dizertační práci ing. Františka Buriana [10], [4], je rychlý přechod mezi jmenovanými dvěma reprezentacemi – tedy evidence grids a octree. Díky nim je možné efektivně sdílet části map mezi jednotlivými roboty v rámci stejného referenčního prostorového systému a přitom efektivně provádět operace nad mapami. Výhodou je možnost použití stejných datových struktur pro kódování dat v rámci jedné elementární buňky (v našem případě pravděpodobnost výskytu překážky, barva, teplota) a poměrně snadná rozšiřitelnost o další měřené veličiny.

Vzhledem k tomu, že jedním ze základních požadavků na systém map je jejich škálovatelnost při zachování definované přesnosti, zvolili jsme systém, kdy je globální mapa rozdělena na očíslované oblasti s pevně danou délkou hrany. Každá z těchto oblastí pak může obsahovat žádný, jeden nebo více mapových podkladů uložených v nezávislých datových souborech. To umožní mimo jiné i dynamicky měnit velikost mapy podle aktuálních potřeb, což je dalším důležitým požadavkem v praktických misích. Na druhou stranu tento přístup umožňuje rychlé zpracování na úrovni jednotlivých buněk.

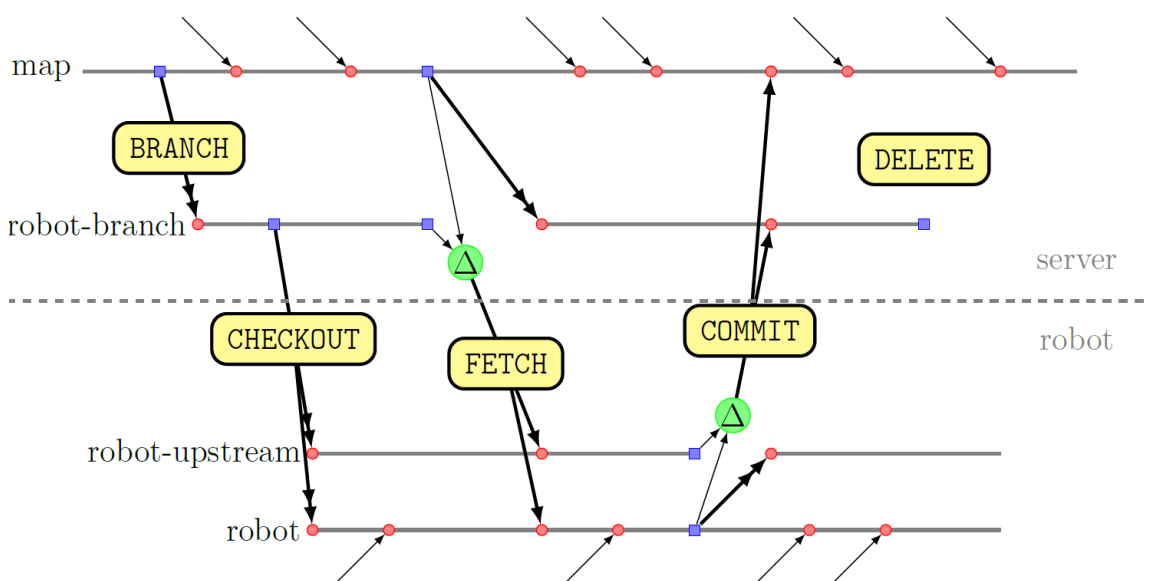
Komplikovaným problémem je distribuce map mezi roboty případně mezi roboty a operátorskými stanicemi. Použili jsme přístup inspirovaný verzovacím systémem GIT běžně používaným v informatice, viz [21], [22]. Hlavním rozdílem je fakt, že v našem případě potřebujeme znát pouze poslední verzi a není třeba znát celou historii mapy.



Obrázek 23: Základní operace pro distribuci mapy robotu.

Proces distribuce znázorňuje obrázek 22. Základní mapa M_0 je nejdříve distribuována mapovým serverem všem dostupným robotům. Následně server přijme sadu měření M_i od robotu R_i . Mapový server následně spočítá rozdíly mezi verzemi a chybějící sady (z obrázku např. M_2 pro robot R_1) odešle příslušným robotům. Z toho vyplývá, že je nutný rychlý výpočet difference mezi jednotlivými mapami – přesněji mezi mapou a její starší verzí. To provádíme fixováním dané mapy v jiné větvi grafu způsobem, jakým systém GIT provádí větvení (branch) s tím, že nepotřebujeme kompletní historická data, ale pouze poslední verze v hlavní a všech vedlejších větvích.

Jak bylo řečeno, počítání diferencí mezi mapami vyžaduje uložení i starší verze mapy, což znamená značný nárůst potřebné paměti. Vzhledem k tomu, že mobilní roboty obvykle nedisponují příliš výkonnými výpočetními prostředky, zavedli jsme dvě sady nástrojů pro distribuci map – méně pokročilou pro stroje s nedostatkem paměti a pokročilou sadu pro stroje s dostatečným množstvím paměti.



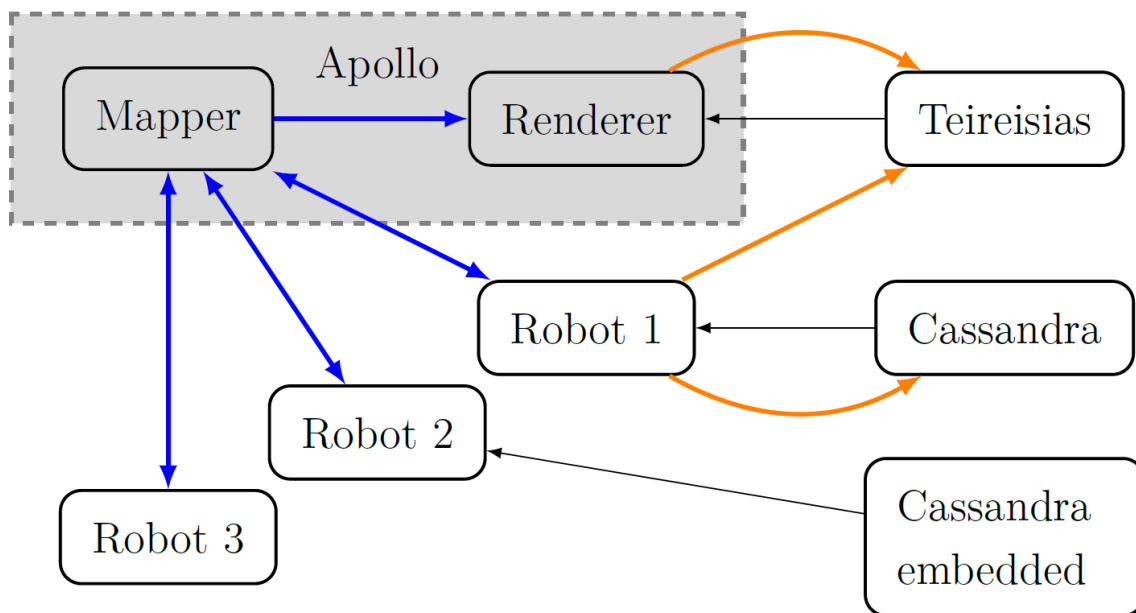
Obrázek 24: Pokročilé operace pro distribuci mapy robotu.

Celé řešení vyžaduje mapový server, který zpřístupňuje obsah globální mapy všem ostatním subjektům v síti. Komunikace robotů s mapovým serverem probíhá na bázi protokolu HTTP na portu 8081 pro odlišení od standardního protokolu HTTP.

Byla vytvořena soustava atomických operací nad mapami: Branch, Delete, Checkout, Fetch, Push, Commit. Jejich použití v robotu s menší dostupnou operační pamětí znázorňuje obrázek 23 a v systému s větší dostupnou operační pamětí (mapovací robot, operátorská stanice) ukazuje obrázek 24.

Kompletní schéma práce celého mapovacího systému i se zobrazením dat operátorovi v současné podobě znázorňuje obrázek 25. Pro operace nad mapami je určen program Mapper. Modul Renderer slouží k vykreslení viditelné části mapy do obrazu (vrstvy) na základě dané polohy a orientace virtuální kamery a nastavení parametrů pro zobrazení mapy, tj. například viditelnost teplotního zobrazení, apod. Tento modul může vytvořit i dva snímky ze vzájemně mírně posunutých virtuálních kamer pro stereoskopické zobrazení. Theireisias je další námi vyvinutý programový modul, který je určen pro zobrazení dat operátorovi. Umožňuje zobrazení na běžných monitorech i na většině tzv. 3D zobrazovačů. Původně byl modul určen pro multispektrální fúzi dat kamerových snímačů pro teleprezenční režim, později byl doplněn o zobrazení obrazu map. V tomto modulu bude v budoucnu možné kombinovat fúzovaná data z multispektrální kamerové hlavičky s daty vyrenderovanými z digitální mapy. Jednotlivé programové moduly mohou operovat na samostatných počítačích nebo i na jednom výkonném stroji. Je oprávněné předpokládat, že toto schéma bude v průběhu dalšího vývoje poněkud pozměněno.

V rámci vývoje a testování popsaných algoritmů jsme nasníмали data ve třech robotických laboratořích na ÚAMT FEKT VUT v Brně v integrovaném objektu na Technické 12 v Brně. Ukázkou výsledné multispektrální mapy sestavené výše popsanými algoritmy z jedné z laboratoří zobrazuje obrázek 26.



Obrázek 25: Spojení mezi aplikacemi pro mapování



Obrázek 26: Ukázka zobrazení výsledné multispektrální mapy.

4 EXPERIMENTY

V této kapitole budou popsány dva zajímavé komplexnější experimenty, které byly s částmi systému CASSANDRA provedeny v letech 2014 a 2015. Snahou je ukázat jednak univerzálnost systému, ale také praktické aplikace i nutnost multioborového přístupu a spolupráce mezi více odbornými subjekty.

4.1 MĚŘENÍ INTENZITY ZÁŘENÍ GAMA VE VNĚJŠÍM PROSTŘEDÍ

Na podnět Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i. (SURO) byly provedeny následující dva experimenty týkající se měření intenzity záření gama ve vnějším prostředí pomocí robotických prostředků:

- vyhledání epicentra výbuchu radioaktivní látky,
- vyhledání „ztracených“ radiačních zdrojů.

První experiment byl z hlediska robotického poměrně nezajímavý. Ve vojenském prostoru byla za kontrolovaných podmínek odpálena výbušnina s radioaktivním Lanthanem La-140. Na robot Orpheus byl umístěn snímač intenzity záření gama. Robot byl dálkově ovládán operátorem a cílem bylo lokalizovat místo odpalu nálože, což se podařilo. Vzhledem k pohybu stroje v oblasti zasažené radioaktivním prachem bylo nutné jej ošetřit proti vniknutí kontaminovaného prachu – viz obrázek 27. Poločas rozpadu použitých radioaktivních částic byl krátký a vyzářované intenzity nízké, přesto bylo nutné z bezpečnostních důvodů robot pečlivě kontrolovat pomocí dozimetrů. I přes ovládání operátorem jsme použili přesnou RTK GNSS jednotku s vlastní základnovou stanicí (base-station), abychom měli přesná poziční data pro tvorbu intenzitní mapy.

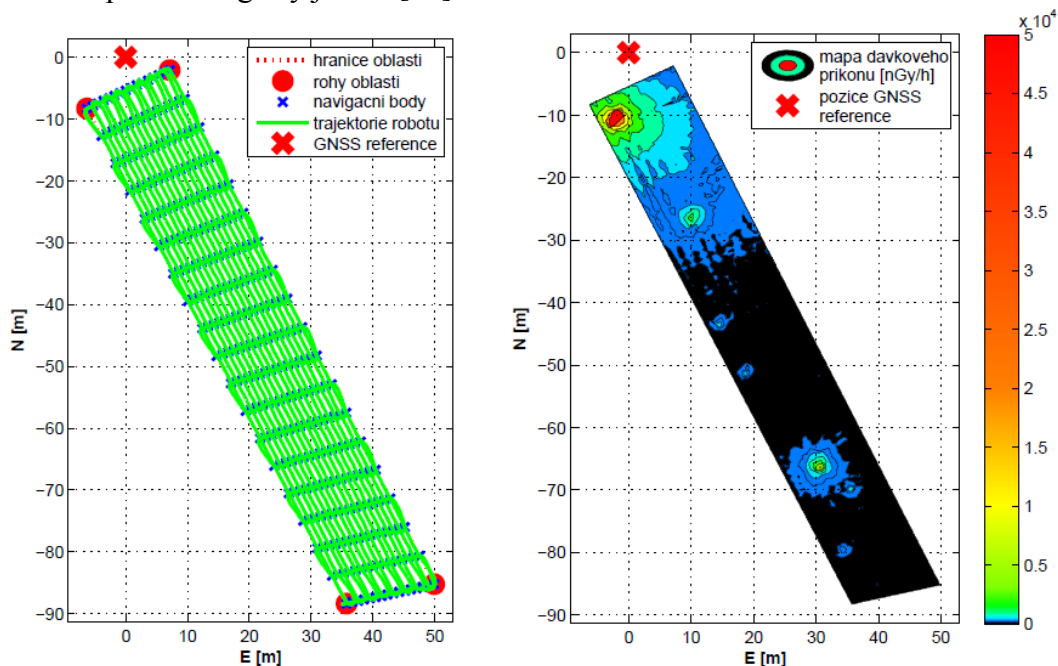
Druhý experiment byl mnohem komplexnější. V předem definované oblasti (čtyři body pomyslného čtyřúhelníku) byly náhodně umístěny různě silné miniaturní zdroje gama záření. Cílem bylo zcela autonomně sestavit intenzitní mapu záření gama a na jejím základě lokalizovat ztracené radiační zdroje.



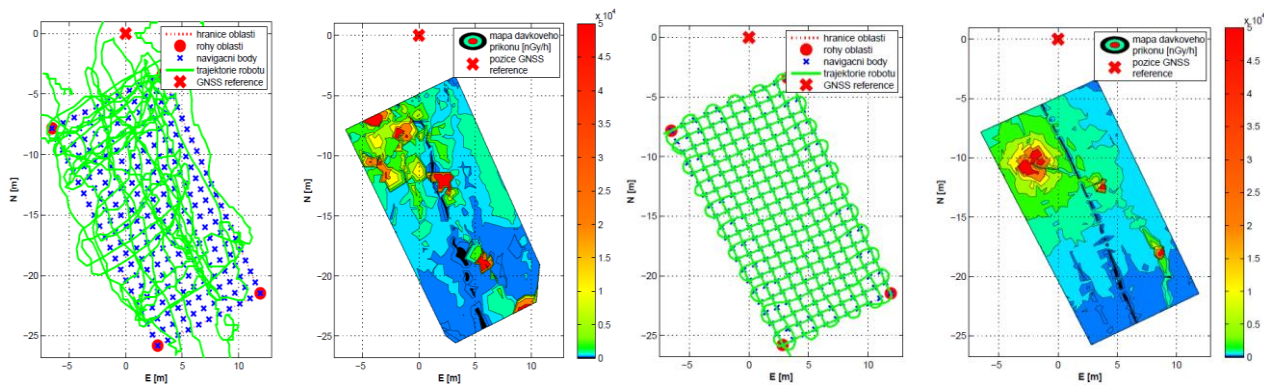
Obrázek 27: Robot Orpheus-X3 upravený pro měření gama záření (vlevo), průběh experimentu včetně referenční stanice GNSS a vymezení nebezpečné zóny (vpravo).

Jedním z cílů tohoto experimentu bylo rovněž otestování nového typu scintilačního detektoru. Původní představa zadavatele byla taková, že bude využit běžný GPS přijímač umístěný v detektoru – měla být pouze logována data z tohoto snímače a na jejich základě vzniknout intenzitní mapa. Po analýze problému jsme usoudili, že tento přístup by podal velmi nepřesné výsledky – zjednodušeně řešeno je přesnost určení pozice běžného GPS přijímače horší než dosah měření gama sondy u slabších zdrojů radiace (do 3 m).

Úlohu jsme tedy zpracovali podstatně komplexněji. Pro navigaci jsme použili přesný vektorový GNSS přijímač. Byl použit modul Trimble BD982, který je schopen v naší konfiguraci přijímat data od NAVSTAR GPS i GLONASS na dvou frekvencích L1 a L2. Přijímač má dva vstupy pracující v režimu RTK (real-time kinematics) s určením azimutu. Výsledná typická přesnost při použití vlastní referenční stanice je v řádu milimetrů nebo centimetrů navíc s opakovací frekvencí 50 Hz. Díky takto přesné známé poloze jsme mohli vytvořit systém pro přesné kopírování trajektorie, která byla vypočítána na základě definovaných okrajů zájmové oblasti a požadovaného rozestupu mezi měřeními – viz. obrázek 28 vlevo nebo obrázek 29 třetí zleva. Zde jsou vždy modře zakresleny vypočítané navigační body a zeleně skutečně projetá trajektorie v průběhu experimentu. Lépe čitelné grafy jsou v [12].



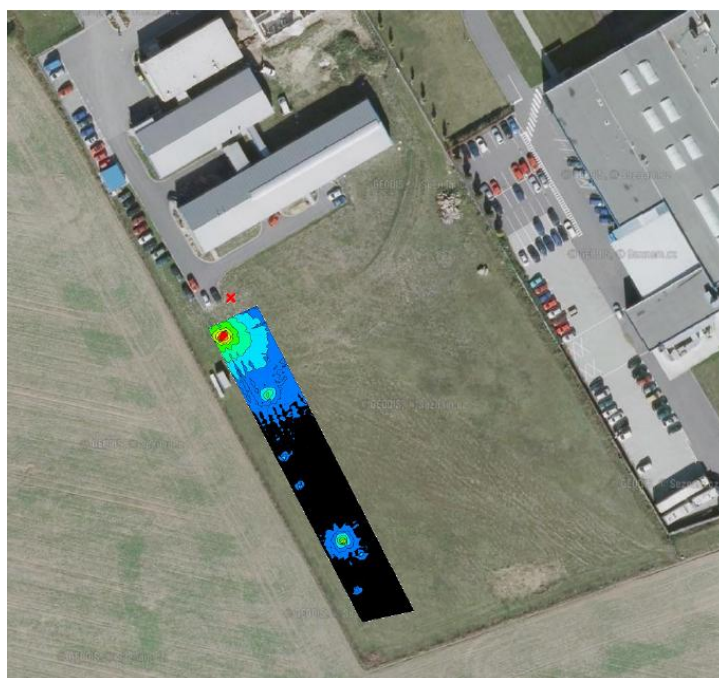
Obrázek 28: Skutečná trajektorie při hrubém mapování (vlevo), výsledná intenzitní mapa záření gama (vpravo).



Obrázek 29: Srovnání projeté trajektorie a výsledné intenzitní mapy při použití běžného GPS přijímače uvnitř snímače záření gama (dvojice grafů vlevo) a přesného RTK GNSS přijímače Trimble BD982 (dvojice grafů vpravo).

Při realizaci jsme se setkali s jedním větším problémem. Robot Orpheus má kolový podvozek typu tank, tj. každé kolo má jen jeden rotační stupeň volnosti, takže robot zatáčí smykem. Při automatické jízdě po velkém množství navigačních bodů docházelo vlivem potřebné vysoké přesnosti k častým opravám kurzu robotu, což například v travnatém terénu vedlo k extrémní zátěži použitých převodovek a zvýšené energetické spotřebě. Při jednom z experimentů dokonce z tohoto důvodu došlo k mechanické závadě. Bylo tedy nutné začít řešit i omezení dané konfigurace podvozku a počítání s jeho dynamikou. To se nakonec ukázalo jako velká výhoda i v pozdějších experimentech s přesnou navigací v heterogenní robotické skupině popisovaných v kapitole 4.2.

Po uvedených úpravách byl experiment úspěšný. Výslednou intenzitní mapu studované oblasti ukazuje obrázek 28 vpravo. V tomto grafu jsou dobře patrné jednotlivé zdroje záření i jejich intenzita. Dále bylo provedeno podrobnější měření menší oblasti – viz obrázek 29, grafy vpravo.



Obrázek 30: Mapa intenzity záření gama integrovaná do leteckého snímku, ukázka praktického výstupu celého systému.

Provedli jsme srovnání s daty, která by byla k dispozici v případě výhradního použití běžného GPS přijímače uvnitř scintilačního gama detektoru. Obrázek 29 ukazuje toto srovnání formou grafů – pouhým okem je jasně viditelný přínos přesné sebelokalizace. Vzhledem k použitému globálnímu souřadnicovému systému je možné získanou intenzitní mapu umístit jako vrstvu do leteckého snímku – viz obrázek 30.

4.2 PŘESNÁ NAVIGACE V HETEROGENNÍM MULTIROBOTICKÉM SYSTÉMU

Dále popsané experimenty vznikly jako kombinace samostatného výzkumu přesných sebelokalizačních a navigačních metod naší skupiny a spolupráce na projektu Orpheus-TAROS v rámci nově založeného národního centra CAFR (Centre for Applied Field Robotics) ve spolupráci s VOP s.p., ČVUT Praha a Univerzitou obrany v Brně.

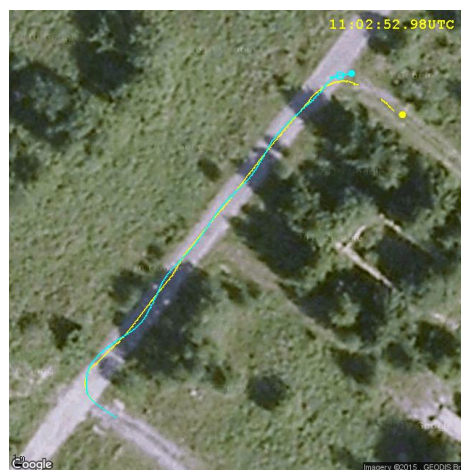
Celkovým cílem finálního experimentu bylo demonstrovat možnost přesné autonomní navigace v kombinovaném vnitřním a vnějším prostředí ve skupině robotů s odlišnými typy podvozků. Vzhledem k široké spolupráci mezi pracovišti bylo rozhodnuto použít roboty Orpheus a TAROS v2 (viz obrázek 31 vlevo).

Finálnímu experimentu však předcházela řada experimentů jak na našem pracovišti, tak společných s ostatními týmy.

Nejdříve bylo potřeba upravit stávající robot Orpheus tak, aby mohl i s novým vybavením, především RTK GNSS přijímačem a anténou, jezdit i v náročnějším terénu než tomu bylo v případě dříve popsaných experimentů měření radiace. To je dobře vidět na srovnávacích fotografiích – viz obrázek 32 vlevo a vpravo.

Dále bylo potřeba podstatným způsobem modifikovat algoritmy pro řízení podvozku tak, aby mohly být použity nezávisle na použité platformě. Podvozek robotu TAROS V2 je šestikolý s tím, že každé kolo má dva rotační stupně volnosti. Tento podvozek má tedy diametrálně odlišnou kinematiku od námi vyvinutého robotu Orpheus.

V další fázi bylo potřeba otestovat přesnost sebelokalizace a navigace jednoho robotu. To jsme provedli v blízkosti našeho pracoviště s robotem Orpheus. Zde se jako hlavní problém při takto přesné navigaci ukázala latence mezi změřením pozice a provedením akčního zásahu. Postupně bylo nutné algoritmy optimalizovat a přenést jejich výpočty na samotný robot, protože vzhledem k podstatně komfortnějšímu ladění byly tyto původně prováděny na řídicím počítači mimo robot.



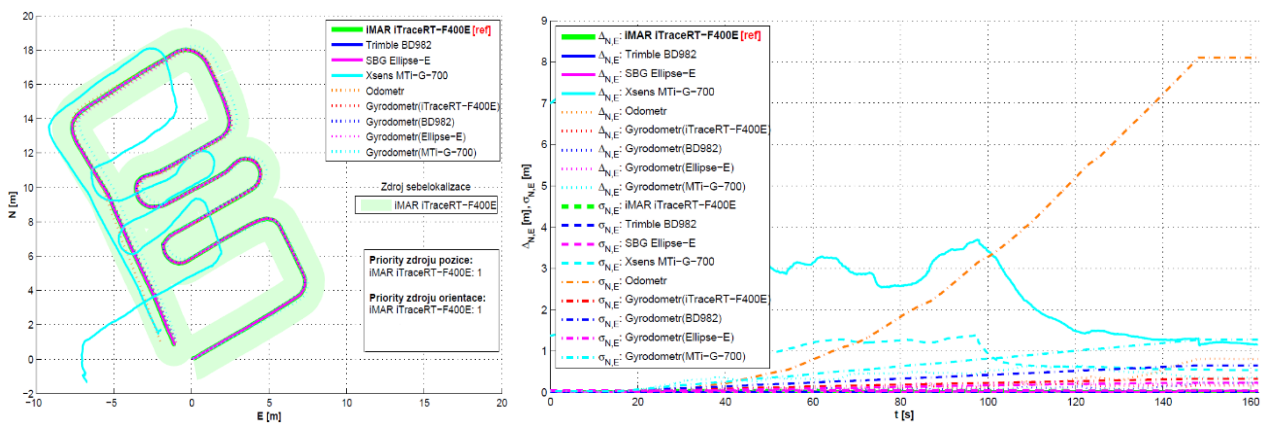
Obrázek 31: Roboty Orpheus a Taros těsně před experimentem (vlevo), trajektorie projatá v režimu convoyingu (vpravo).



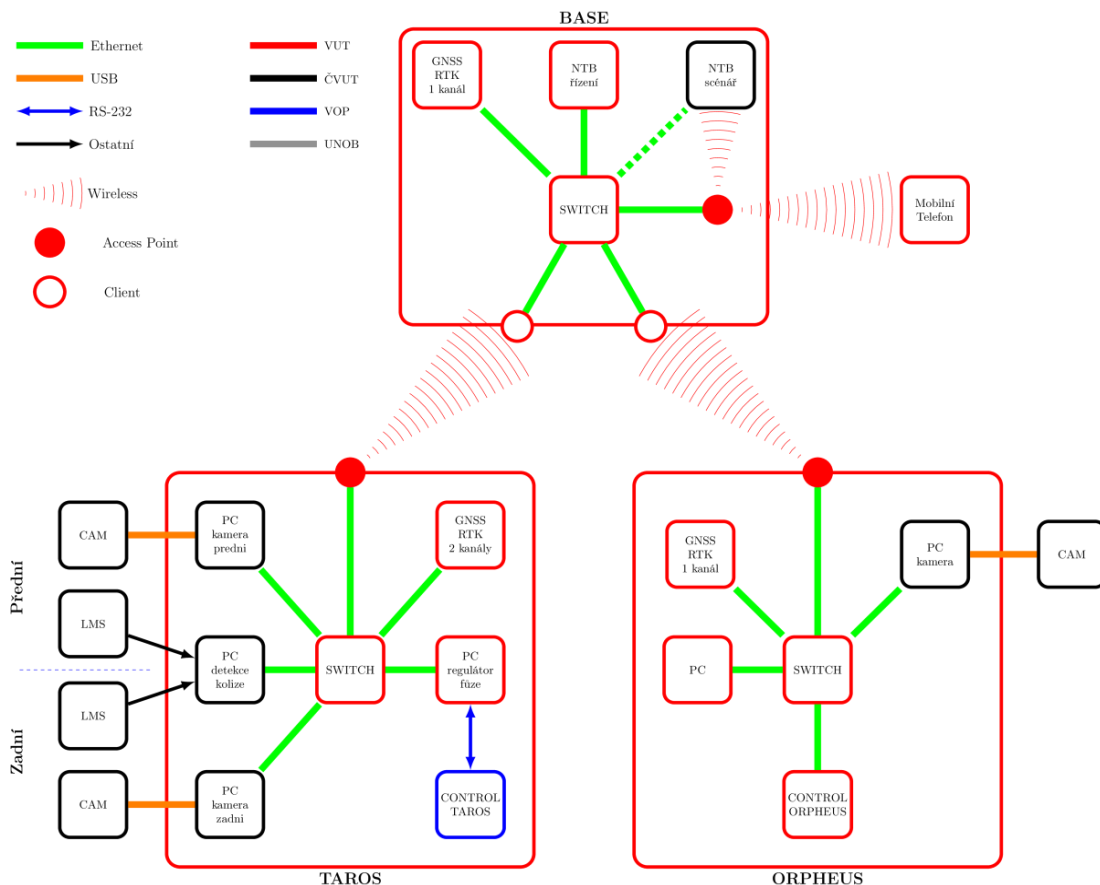
Obrázek 32: Robot Orpheus při vývoji a ověřovacích experimentech (vlevo) a při finálním experimentu s operátorem (vpravo).

Z hlediska snímačů použitých při kombinované navigaci uvnitř a vně budov je v současné době pro robustní a přesné řešení sebelokalizace prakticky nevyhnutelné použít fúzi dat z různých senzorů. Proto jsme navrhli systém, který v reálném čase vyhodnocuje přesnost a spolehlivost jednotlivých zdrojů sebelokalizačních dat a je schopen mezi nimi podle potřeby přepínat. Pro naše vlastní testování jsme vybrali následující zdroje dat: odometrie, gyrodometrie (kombinace gyroskopů pro měření azimutu a odometrie pro měření translace), vektorový RTK GNSS přijímač a sofistikovanou kombinovanou navigační jednotku s optickými gyroskopy a vektorovým RTK GNSS přijímačem. S těmito snímači jsme provedli sérii 28 experimentů, přičemž přesnost sebelokalizace a navigace byla vyhodnocována jednak samostatně pro jednotlivé přístroje, ale i v různých kombinacích – viz obrázek 33, všechny experimenty jsou v [12]. Tyto experimenty se staly podstatnou součástí dizertační práce mého doktoranda ing. Tomáše Jílky.

Dříve jmenovaný systém pro vyhodnocování spolehlivosti a přesnosti navigačních metod se stal základem pro inferenční mechanismus použitý ve finálním experimentu se dvěma roboty. Celkový setup tohoto experimentu však byl technicky poměrně značně komplikovaný – viz obrázek 34.



Obrázek 33: Ukázka výsledků jednoho z ověřovacích experimentů, pozice mobilního robotu v horizontální rovině (vlevo), naměřené odchylky a predikované směrodatné odchylky jednotlivých řešení 2D pozice mobilního robotu v horizontální rovině (vpravo).



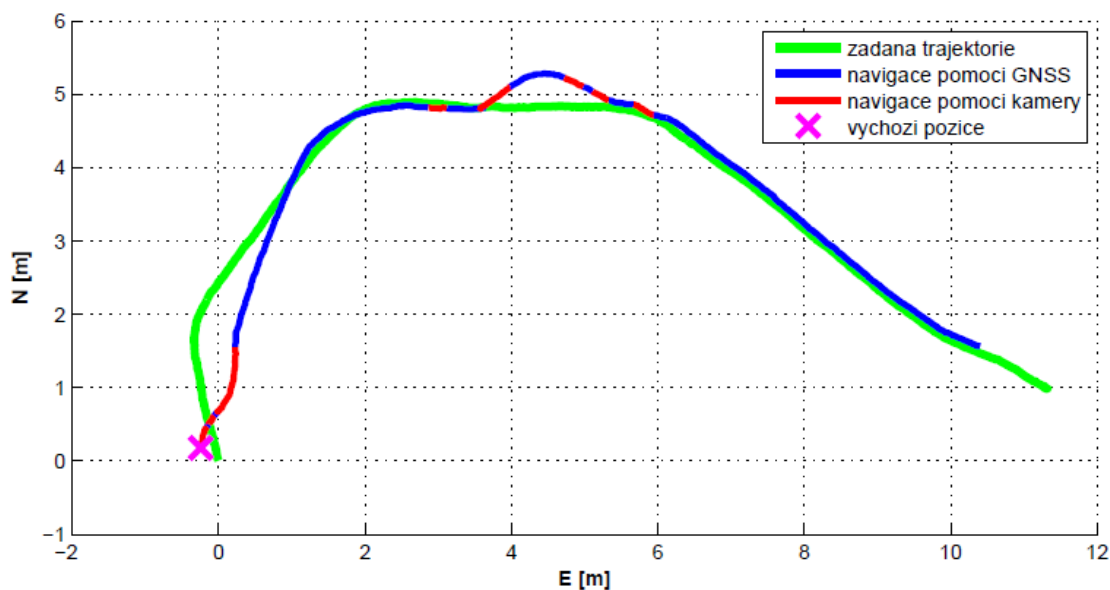
Obrázek 34: Blokové schéma zapojení a uspořádání robotických systémů v průběhu experimentu, červeně jsou označeny části, za které zodpovídalo naše pracoviště.

Jednotlivé roboty bylo možné řídit pomocí dedikovaného notebooku umístěného v batohu operátora. K ovládání byl použit program modifikovaný Cassandra. Součástí této mobilní ovládací jednotky byl dále komunikační modul, který mohl být připojen buď bezdrátově k řízenému robotu (v tomto případě pouze Orpheus) nebo k základnové stanici. Pro ovládání chodu celého systému byla dále vyvinuta nová aplikace pro mobilní telefon, který měl operátor připnutý na zápěstí – viz. obrázek 32 vpravo. Elektronika na jednotlivých robotech pak byla řešena jako ethernetová síť s dedikovanými výpočetními jednotkami – viz obrázek 34.

Experiment proběhl tak, že byl nejdříve pomocí dálkového ovladače prováděn průzkum pomocí menšího robotu Orpheus. V momentě, kdy bylo dosaženo zájmového bodu, byl pomocí ovladače v mobilním telefonu přivolán větší robot TAROS. Ten automaticky zopakoval stejnou trajektorii jako Orpheus a bezpečně dojel na zájmové místo. Po dojetí a novém příkazu se větší robot opět zcela automaticky vrátil zpět na místo začátku experimentu.

Celý tento experiment byl pro větší vypovídací hodnotu laikům proveden jako záchrana raněné osoby. Vojíci tedy prováděli průzkum pomocí robotu Orpheus a našli při tom raněnou osobu. Přivolali si tedy větší robot TAROS, který dojel na místo nálezů. Zde na něj naložili raněného a jedním příkazem poslali robot i s osobou zpět na „základnu“. Již v době, kdy se robot TAROS vracel zpět, mohli vojíci dále pokračovat v průzkumné misi pomocí robotu Orpheus a v případě potřeby si opět zavolat pomocný větší robot.

Šlo tedy o praktickou demonstraci funkce celého, poměrně značně komplikovaného systému. V rámci jednoho experimentu byla otestována přesná navigace pomocí RTK GNSS, a to u dvou velmi odlišných robotů, přičemž jeden z nich dokonce nebyl vyvinut na našem pracovišti a matematický model podvozku musel být vytvořen identifikací.



Obrázek 35: Přebíhání navigačních metod v průběhu experimentu.

Dále byla ověřena navigace obou robotů pomocí vizuálních markerů, kterou vyvinuli kolegové ze skupiny Libora Přeučila na ČVUT v Praze. Zde bylo několik zajímavých problémů. Novinkou v odborné oblasti je samotné přeposílání obrazových příznaků z jednoho robotu do druhého, přičemž úloha byla komplikovanější faktem, že každý z robotů měl kameru umístěnu v jiné výšce (problémy v trávě, ...). Dále jsme ověřili možnost přepínání mezi dvěma naprosto odlišnými metodami navigace – exaktní s globálním satelitním navigačním systémem a mnohem méně deterministickou, s pomocí kamerového systému a příznaků v obraze. Přepínání mezi jednotlivými typy navigace v průběhu jedné z ověřovacích jízd zobrazuje obrázek 35.

Velmi zajímavé zjištění jsme udělali v průběhu příprav na tento experiment. V rámci navigace v mobilních multirobotických systémech je jedním z často řešených problémů tzv. convoying - situaci, kdy jeden robot je obvykle řízen operátorem a další roboty za ním následují automaticky. Jde o úlohu, která může mít značný praktický dopad jak v civilní, tak ve vojenské sféře. Při rozboru systémového návrhu jsme zjistili, že představený systém je schopen convoyingu, a to zcela bez jakýchkoli úprav. To jsme rovněž experimentálně ověřili, viz obrázek 31 vpravo.

5 MÍSTO ZÁVĚRU

Cílem tohoto textu bylo ukázat současný stav robotického systému CASSANDRA vyvíjeného v mé odborné skupině na Ústavu automatizace a měřicí techniky FEKT VUT v Brně. Tento systém je nepřetržitě intenzivně vyvíjen již několik let a navíc plynule navazuje na předchozí systém ARGOS budovaný od počátku mého odborného působení na VUT. Je proto nemožné všechny aspekty tohoto systému popsat v požadovaném rozsahu. Cílem bylo především ukázat směřování a snad i určitý filozofický podtext celého projektu a předvést zajímavé techniky, které se nám podařilo realizovat, včetně zajímavých experimentů. Je nutné konstatovat, že ačkoli hlavní myšlenka systému – tedy provádět robotický průzkum člověku nebezpečných nebo nedostupných oblastí zůstala zachována od samého počátku vývoje projektu, jednotlivé cíle se postupně měnily. Dříve byl hlavním cílem samotný vývoj robotických platforem pro speciální průzkum v čele s vojenskými roboty řady Orpheus. Postupně se však začalo ukazovat, že jde o činnost dlouhodobě těžko obhajitelnou jako hlavní bod výzkumu odborné skupiny, a to hned z několika důvodů. Jednak se podařilo skupinu podstatným způsobem rozšířit a tím i odborně více diferencovat

jednotlivé členy týmu, dále se v posledních letech podstatně změnil způsob přidělování peněz na vědu a výzkum od dlouhodobějších úkolů pro jednotnější skupiny směrem ke kratším úkolům směřovaným především k multioborovému přístupu. To mimo jiné znamená, že pro skupinu je velmi nevýhodné pracovat na projektech s minimálními veřejnými výstupy bez potřebné zpětné vazby od odborné komunity. Nově se tedy snažíme více prosazovat i v civilní oblasti, především pak související s bezpečností obyvatelstva. Cílem je však i nadále pracovat na praktických problémech, které mohou přinést skutečný užitek uživatelům. Tato myšlenka je snad dostatečně podpořena množstvím částí systému CASSANDRA realizovaných v rámci smluvního výzkumu. Snahou je však nezapomínat i na dlouhodobější výzkum a širší spolupráci s ostatními odbornými týmy.

Z hlediska technického je nyní jednoznačnou prioritou dosáhnout větší praktické využitelnosti přesné navigace ve vnějším prostředí, neboť zde se jeví značné možnosti použití v oblasti bezpečnosti, ale například i v zemědělství, geologii, geodézii, apod. Další oblastí, kde se snažíme o větší rozvoj, je obecně oblast automatického skenování prostoru, včetně multispektrálního.

System CASSANDRA tedy rozhodně nepovažuji za ukončený a pevně doufám, že budu mít možnost společně se svým týmem na projektu dále pracovat.



LITERATURA

- [1] ČAPEK K., R.U.R. – Rossum's Universal Robots, nakladatelství Artur 2005, 3. vydání, ISBN 8086216462
- [2] ŽALUD, Luděk, Petra KOČMANOVÁ, František BURIAN, Tomáš JÍLEK, Petr KALVODA a Lukáš KOPEČNÝ. Calibration and Evaluation of Parameters in a 3D Proximity Rotating Scanner. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2015, str. 3-12. DOI: 10.5755/j01.eee.21.1.7299. ISSN 2029-5731. Dostupné také z: <http://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/7299>
- [3] NEJDL, L.; KUDR, J.; ČÍHALOVÁ, K.; CHUDOBOVÁ, D.; ŽŮREK, M.; ŽALUD, L.; KOPEČNÝ, L.; BURIAN, F.; RUTTKAY-NEDECKÝ, B.; KŘÍŽKOVÁ, S.; NOVOTNÁ, M.; HYNEK, D.; KOPEL, P.; PRÁŠEK, J.; ADAM, V.; KIZEK, R. Remote- controlled robotic platform ORPHEUS as a new tool for detection of bacteria in the environment. *Electrophoresis*, 2014, vol. 35, no. 14, p. 2333-2345. ISSN: 0173- 0835.
- [4] ŽALUD, Luděk, Tomáš JÍLEK, Petra KOČMANOVÁ, Jan HELEBRANT, Lubomir GRYC a Irena CESPIROVÁ. Field Gamma Radiation Measurement Using Orpheus Robotic System Equipped with RTK GNSS. In: *Družicové metody v katastru a geodézii*. Brno, 2015.
- [5] ŽALUD, Luděk, Petra KOČMANOVÁ, František BURIAN a Tomáš JÍLEK. Color and Thermal Image Fusion for Augmented Reality in Rescue Robotics. In: *The 8th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing & Power Applications: Innovation Excellence Towards Humanistic Technology*. Singapore: Springer, 2014, s. 47-55. DOI: 10.1007/978-981-4585-42-2_6. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-981-4585-42-2_6
- [6] Žalud L, Teleoperated Reconnaissance Robotic Systems, Vysoké učení technické v Brně 2005, habilitační práce
- [7] KOČMANOVÁ, P.; BURIAN, F.; ŽALUD, L. Multispectral Texture Mapping for Telepresence and Autonomous Mobile Robotics. In 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics (ICMEM'14). 2014. p. 158- 1 (158-9 p.) ISBN: 978-1-927877-05- 0.
- [8] CHROMÝ, A.; ŽALUD, L. Novel 3D Modelling System Capturing Objects with Sub- Millimetre Resolution. *Advances in Electrical and Electronic Engineering - internetový časopis*, (<http://advances.utc.sk>), 2014, vol. 12, no. 5, p. 476-487. ISSN: 1804- 3119.
- [9] ŽALUD, L.; BURIAN, F.; KOPEČNÝ, L.; KOČMANOVÁ, P.; JÍLEK, T. Remote Robotic Exploration of Contaminated and Dangerous Areas. In *Proceedings of INTERNATIONAL CONFERENCE ON MILITARY TECHNOLOGIES 2013*. Brno: Military Academy, Czech Republic, 2013. p. 1309-1316. ISBN: 978-80-7231-918- 3.
- [10] Burian F., Tvorba multispektrálních map v mobilní robotice, Vysoké učení technické v Brně 2014, dizertační práce.
- [11] Kocmanová P., KALIBRACE SNÍMAČŮ PRO MULTISPEKTRÁLNÍ DATOVOU FÚZI V MOBILNÍ ROBOTICE, Vysoké učení technické v Brně 2015, dizertační práce.
- [12] Jílek T., POKROČILÁ NAVIGACE V HETEROGENNÍCH MULTIROBOTICKÝCH SYSTÉMECH VE VNĚJŠÍM PROSTŘEDÍ, Vysoké učení technické v Brně 2015, dizertační práce.

- [13] Raibert, M. (2008). Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. In Chung, M. J., editor, Proceedings of the 17th IFAC World Congress, 2008, volume 17.
- [14] KOPEČNÝ, L. Thermodynamic of Pneumatic Muscle Actuator. In MOSIS 2009. 2009. p. 231-236. ISBN: 978-80-86840-45- 1.
- [15] LICHTI, Derek D., Denis ROUZAUD. Surface-dependent 3D range camera self-calibration</title>. Proceedings of SPIE Three-Dimensional Imaging Metrology [online]. 2009, č. 7239, s. 72390A-72390A-10 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.1117/12.805509. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=811528>
- [16] KAHLMANN, T., F. REMONDINO a H. INGENSAND. Calibration for Increased Accuracy of the Range Imaging Camera Swissranger™. In: *ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'* [online]. 2006 [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/KAHL_647.pdf
- [17] ROSTEN, E. a T. DRUMMOND. Fusing points and lines for high performance tracking. Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1. IEEE, 2005, 1508-1515 Vol. 2. DOI: 10.1109/ICCV.2005.104. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1544896>
- [18] Elfes, A.: *Occupancy Grids: A probabilistic framework for robot perception and navigation*. Dizertační práce, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 1989.
- [19] Romisch, K.; Moller-Nielsen, P.: *Sparse Voxel octree Ray Tracing on the GPU*. Dizertační práce, Aarhus University, Aarhus, Denmark, 2009.
- [20] Martin M., Moravec H., Robot Evidence Grids, Carnegie Mellon University, 1996. Dostup.: <https://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/project.archive/robot.papers/1996/RobotEvidenceGrids.pdf>
- [21] Torvalds, L.: Git distributed version control system. 2014. URL <http://git-scm.com/>
- [22] Chacon, S.: Pro Git. Berkely, CA, USA: Apress, první vydání, 2009, ISBN 1430218339, 9781430218333.
- [23] SCHLOERB, David W. A Quantitative Measure of Telepresence. Presence [online]. 1995, roč. 4, č. 1 [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/schloerb/www/publications/schloerb-6.pdf>
- [24] VAŠINA, M., ŠOLC, F. SMART MATERIAL IN ROBOTICS – SHAPE MEMORY ALLOY. In *Robotics in Alpe-Adria- Danube region*. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, s.r. o Brno, 2004. str. 140, ISBN: 80-7204-341- 2.
- [25] KULICH, Miroslav. Lokalizace a tvorba modelu prostředí v inteligentní robotice. Praha, 2003. Dostupné z: <http://labe.felk.cvut.cz/~kulich/diser-kulich.pdf>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to describe CASSANDRA mobile robotic system developed by Group of Mobile Robotics and Artificial Intelligence on Department of Control and Instrumentation, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Brno University of Technology under the supervision of the author.

CASSANDRA is a single-operator, multi-robot reconnaissance system for various missions. The underlying idea is to operate several robots exhibiting different features related to their size and weight, locomotion capabilities, sensors and on-board computation capabilities. All these robots share one common characteristic: they are intended as “observation” robots only and cannot change their environment. We started to structure the system from the basic levels; thus, some robots are manufactured in our laboratories inclusive of the mechanical components, while others contain only our electronics. We also have designed a complete set of system features, starting from low-level communication protocols and moving up to the high-level polymorphic code object for easy integration of the different robots into the unified control software. In the past, we utilized real-time control of the robots via visual telepresence. Currently, however, the hardware part of the system is more or less completed, and the main task thus consists of making the behavior of the robots more autonomous to significantly improve the overall performance of the combined human-robot system. At present, two general problems are being pursued: multispectral data-fusion algorithms for mapping and telepresence and automatic map-building in heterogeneous multi-robotic systems. Furthermore, two experiments made with CASSANDRA system are discussed and evaluated in this thesis.