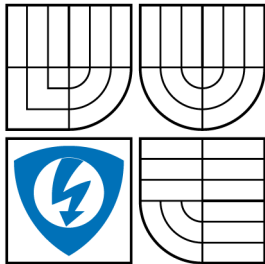


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

TVORBA MULTISPEKTRÁLNÍCH MAP V MOBILNÍ ROBOTICE

MULTISPECTRAL MAP BUILDING IN MOBILE ROBOTICS

ZKRÁCENÁ VERZE DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. FRANTIŠEK BURIAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2014

OBSAH

Úvod	3
1 Robotický systém CASSANDRA	5
1.1 Robot Orpheus-X3	6
2 Tvorba multispektrálních map	8
2.1 Reprezentace mřížky evidence v paměti	8
2.2 Reprezentace souboru s Octree mapou	9
3 Distribuce mapy mezi roboty	11
3.1 Začlenění map do robotického systému	11
3.2 Systém blokového dělení globální mapy	12
3.3 Interpretace dat uvnitř bloku	13
3.4 Systém distribuce mapy mezi více robotů	13
4 Zobrazení a prezentace dat	14
4.1 Fúzování video dat	14
4.2 Vykreslování mapy	15
5 Dosažené výsledky	16
5.1 Experiment	17
5.2 Tvorba Octree mapových podkladů	18
5.2.1 Vykreslování mapy	19
5.2.2 Výsledky fúze dat	21
6 Zhodnocení a závěr	23
Literatura	25

ÚVOD

Tato dizertační práce pojednává o využití multispektrálního optického měření v mobilní robotice. Hlavním cílem bylo vytvořit systém pro multispektrální datovou fúzi, kterou by bylo možné využít pro mapování a teleprezenční režim v multirobotickém systému.

Tato fúze je realizována nad daty tří typů snímačů – proximitního prostorového skeneru, termovizní kamery a barevné kamery ve viditelném spektru. Zde popsané metody jsou obecně použitelné pro jakýkoli typ prostorového (tzv. 3D) optického snímače, v našem případě byla vzhledem k rozměrům a snímkovací frekvenci použita tzv. dálkoměrná kamera.

Pomocí těchto snímačů je možné zaznamenat realitu okolí robotu, která zjednodušeně řečeno obsahuje prostotovou informaci, barevnou informaci a teplotu objektů. Tato informace se pak může použít jednak pro automatickou tvorbu digitálních map okolí robotu, a také pro přímé zobrazení operátorovi ve formě tzv. teleprezence. V obou případech je hlavní snahou a motivací podstatné rozšíření informační hodnoty pro operátora – ať už je hlavním cílem vyhledávání osob v neznámém terénu nebo například vyhodnocení kvality provedené stavby včetně tepelné izolace.

Důležitou součástí mé práce je dále optimalizace uložení a distribuce získaných map v robotickém systému. Zde je důležité si uvědomit, že systém sestává z několika vzdálených robotů, které spolu komunikují bezdrátově a mají tedy velmi omezený vzájemný datový tok. Proto jsem se obsírně zabýval nejen bezeztrátovou kompresí mapových dat, ale také poměrně sofistikovaným systémem umožňujícím efektivní výměnu dat mezi roboty a operátorskou stanicí s možností vzájemného doplňování nových informací.

Ke konci jsem se zabýval i zobrazením dat operátorovi. Zde se opět jako hlavní problém ukázalo především obrovské množství dat, která je třeba při zobrazování zpracovávat. Bylo tedy nutné přistoupit k masivní paralelizaci výpočtů, především pomocí nástrojů dostupných na moderních grafických kartách.

Algoritmy popsané v praktické části této práce byly prakticky realizovány na robotickém systému CASSANDRA, který je naší skupinou vyvíjen od roku 2010. Má práce je pouze součástí širšího celku. V práci uvedené algoritmy a postupy jsou však mým dílem, pokud není uvedeno jinak.

Text plné verze práce je rozdělen do následujících kapitol:

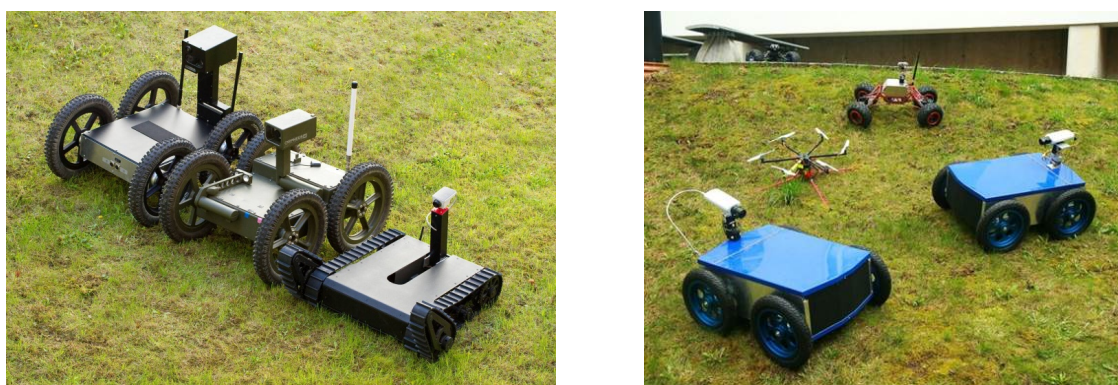
1. Bezdotykové měření vzdáleností v robotice – Kapitola pojednává obecně o měření vzdáleností optickými metodami v mobilní robotice s maximálním důrazem na parametry, které jsou důležité pro mou práci.
2. Tvorba map v mobilní robotice – Tato část se zabývá problematikou vhodné reprezentace dat optických proximitních snímačů a tvorby map z těchto dat.

Hlavní důraz je kladen na podrobný popis metod, které jsou implementovány v praktické části.

3. Robotický systém CASSANDRA – Kapitola popisuje zevrubně robotický systém, který naše skupina vyvíjí a pro který jsou jmenované metody vyvíjeny. Krátce jsou popsány všechny důležitější roboty i řídicí stanice. Hlavní důraz je kladen na popis robotu Orpheus-X3, který je použit v měřeních a experimentech této dizertační práce.
4. Tvorba multispektrálních map – V kapitole je popsán způsob uložení dat v multispektrální mapě který jsem zvolil a implementoval tak, aby bylo možné s nimi efektivně pracovat i při jejich obrovském množství.
5. Distribuce mapy mezi roboty – Zde popisují zvolený způsob dělení globální mapy do bloků a komplexní systém, který umožňuje efektivní distribuci obsáhlých map mezi jednotlivými roboty s přihlédnutím k faktu, že každý z robotů má jiné snímače, a vlastní výpočetní prostředky. Velmi důležitým faktem je také důraz kladený na minimalizaci datových toků mezi roboty, jelikož se předpokládá prakticky výhradně bezdrátová komunikace.
6. Zobrazení a prezentace dat – V této kapitole popisují způsob zobrazení fúze dat, a dále se věnují optimalizaci a masivní paralelizaci zobrazovacích algoritmů tak, aby bylo možné tato vysoce objemná data zobrazit i pomocí současných běžných výpočetních prostředků.
7. Dosažené výsledky – Zde shrnuji dosažené výsledky a provádím jejich analýzu.
8. Zhodnocení a závěr.

1 ROBOTICKÝ SYSTÉM CASSANDRA

CASSANDRA je (mobilní) robotický systém vytvářený na pracovištích ÚAMT FEKT VUT v Brně a CEITEC RG2-2 od roku 2010. Jde o systém obsahující několik mobilních robotů s různými vlastnostmi, který je ovládán jedním nebo více operátory. Typicky jde o jeden mapovací robot (např. envMAP), dva větší průzkumné pozemní roboty (Orpheus-X3, Orpheus-AC2), dva malé průzkumné roboty (Perseus, Bron-tes), a jeden létající robot (Uranus HEXA). Všechny části systému, tj. jednotlivé roboty i operátorské stanice, jsou vzájemně propojeny bezdrátovou nebo drátovou komunikační sítí.



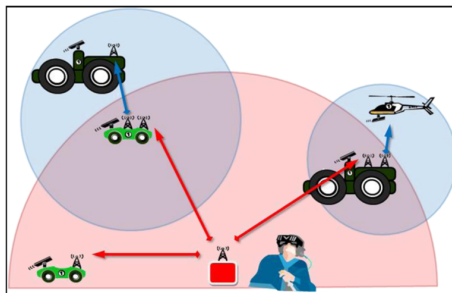
Obr. 1.1: Roboty v robotickém systému Cassandra

Systém je určen především pro vzdálený průzkum oblastí člověku nebezpečných nebo nedostupných. Snahou našeho týmu je vytvořit systém CASSANDRA jako velmi univerzální, přesto jsou definovány hlavní úlohy, které se pomocí něj snažíme řešit:

- Multispektrální mapování vnějších a vnitřních prostor.
- Měření environmentálních parametrů – například koncentrace látek ve vzduchu, kontaminace chemickými nebo biologickými látkami, radiace, šíření látek v čase a prostoru, apod.
- Automatické hlídání předem definovaného a známého prostoru – například hlídání koncentrací látek okolí chemického provozu nebo nukleárního zařízení v předem definovaných časových intervalech.
- Vyhledávání osob v nebezpečných nebo nedostupných oblastech – místa živelní katastrofy, bojiště, apod.
- Obecný průzkum neznámých oblastí.

Hlavním způsobem ovládání celého systému i jednotlivých robotů je v současnosti tzv. vizuální teleprezence, kterou je možné popsat na základě obrázku 1.2. Operátor

má na hlavě helmu/brýle virtuální reality se snímačem pohybů hlavy. Data z tohoto snímače jsou přenesena k robotu, který má kameru nebo kamerový systém umístěný na manipulátoru s alespoň dvěma rotačními stupni volnosti. Kamera na robotu tak kopíruje pohyby hlavy operátora, a protože obraz z kamery je přenášén do jeho brýlí, ten se cítí, jako kdyby byl na místě robotu.



Obr. 1.2: Robotický systém CASSANDRA

Jedním z hlavních cílů této práce je postupný přechod od teleprezenčního řízení k řízení v rozšířené realitě, kdy se snažíme uživateli prezentovat data, která by jinak nemohl sám vnímat - např. teploty, ale také možnost kombinovaného zobrazení 3D mapy prostředí a reality. Dalším důležitým cílem je postupný přechod od operátorského řízení strojů v reálném čase k alespoň částečné autonomnosti.

Projekt navazuje na několik předchozích projektů, které však vždy obsahovaly samostatné robotické jednotky. Nejdůležitějšími předchůdci systému CASSANDRA jsou roboty řady Orpheus, především Orpheus-X2 a armádní verze Orpheus-AC. Ve zkrácené verzi dizertační práce je popsán pouze nejdůležitější robot Orpheus-X3, popis ostatních robotů je uveden v plném textu práce.

1.1 Robot Orpheus-X3

Robot Orpheus-X3 má oproti ostatním robotům navíc senzoricou hlavici se třemi stupni volnosti (viz obrázek 2.1) s velmi přesnými motory a převodovkami – zákaznické AC motory TG-Drives s převodovkou harmonic drive od firmy Spinea, včetně speciálních měničů. Tato hlavice je velmi důležitá pro mou práci, protože umožňuje umístění senzorickeho systému o hmotnosti až 3kg a jeho velmi přesné a přitom rychlé polohování. Robot může komunikovat bezdrátově, stejně jako Orpheus-AC2, ale i přes dvě metalická propojení Ethernet s rychlostí až 1Gbit/s. Tato variabilita je velmi důležitá při různých typech experimentů.

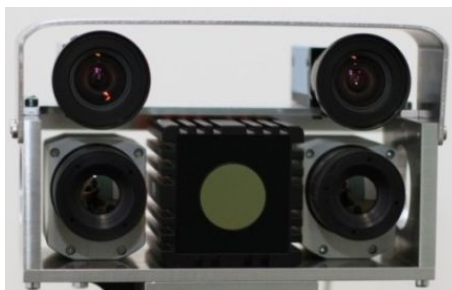


Obr. 1.3: Robot Orpheus-X3

Robot je vybaven dvěma tzv. embedded počítači s operačním systémem Microsoft Windows, aby bylo možné provádět i přímo na něm složité výpočty ve vyšších programovacích jazycích.

2 TVORBA MULTISPEKTRÁLNÍCH MAP

Pro měření multispektrálních dat byl použit robot Orpheus-X3 vybavený multispektrální stereovizní hlavicí, umístěnou na tříosém manipulačním rameni.



Obr. 2.1: Hlavice Orpheus-X3

Robot, vybavený touto hlavicí je schopen vytvořit trojrozměrný obraz okolí robotu. Omezení pozorovacího úhlu jednotlivých kamer je možné rozšířit za pomoci manipulačních motorů.

Pro zachování přesnosti mapování je nutné zajistit, aby přesnost manipulace s kamerami byla vyšší, než je rozlišení nejjemnějšího snímače. Bylo ověřeno experimentem, že regulační smyčka nastavování motorů je sice nepřesná díky hysterezi, avšak měření okamžité absolutní polohy je velmi přesné (řádově s přesností na tisícinu stupně). Během experimentu bylo též zjištěno, že přejezd do nové polohy včetně ustálení na poloze trvá regulátoru motorů dobu 1 sekundu. Tento čas je nutné též zohlednit při měření.

Se zohledněním výše uvedených zjištění byl navržen systém měření, ve kterém robot stojící v definované poloze periodicky sejme data ze všech senzorů, pokaždé při jiném natočení hlavice. Systém zajišťuje, že řízený pohyb hlavice pokryje během 36 měření celou kulovou plochu okolí robotu, s patřičnými překryvy snímků senzorů. Doba mezi pohybem hlavice a měřením byla zvolena o hodnotě 2 sekundy, aby se hlavice stihla po pohybu ustálit na nastavené hodnotě.

Celý systém je tak schopen měřit v celém rozsahu kulové plochy teplotu, barvu i vzdálenost. Zanášení těchto informací do mapy popisuje následující kapitola.

2.1 Reprezentace mřížky evidence v paměti

V případě robotických map použitých v této práci je nutné ukládat do mřížky evidence informaci o obsazenosti daného voxelu (koncový bod mřížky evidence), o teplotě daného voxelu a o jeho barvě (RGB).

Integrabilita obsazenosti je daná definicí, integrability teploty je dosaženo za pomoci jednoduchého průměrovacího filtru uvedeného v rov. 2.1, kde T_t odpovídá hodnotě teploty uložené v buňce před příchodem měření, T_{t+1} hodnotě v buňce po příchodu měření, T_m je měřená hodnota teploty a K je konstanta filtru která určuje rychlost konvergence teploty k nové hodnotě. Během měření byla použita konstanta $K=4$.

$$T_{t+1} = \frac{T_m + KT_t}{1 + K} \quad (2.1)$$

Integrabilitu barvy je velmi obtížné zajistit. Během měření byla integrabilita zajištěna převodem z RGB modelu do HSV modelu, integrací průměrem po složkách H,S,V a zpětnou konverzí do RGB pro uložení do mřížky evidence.

Jeden voxel tedy má následující strukturu, uvedenou v tabulce 2.1

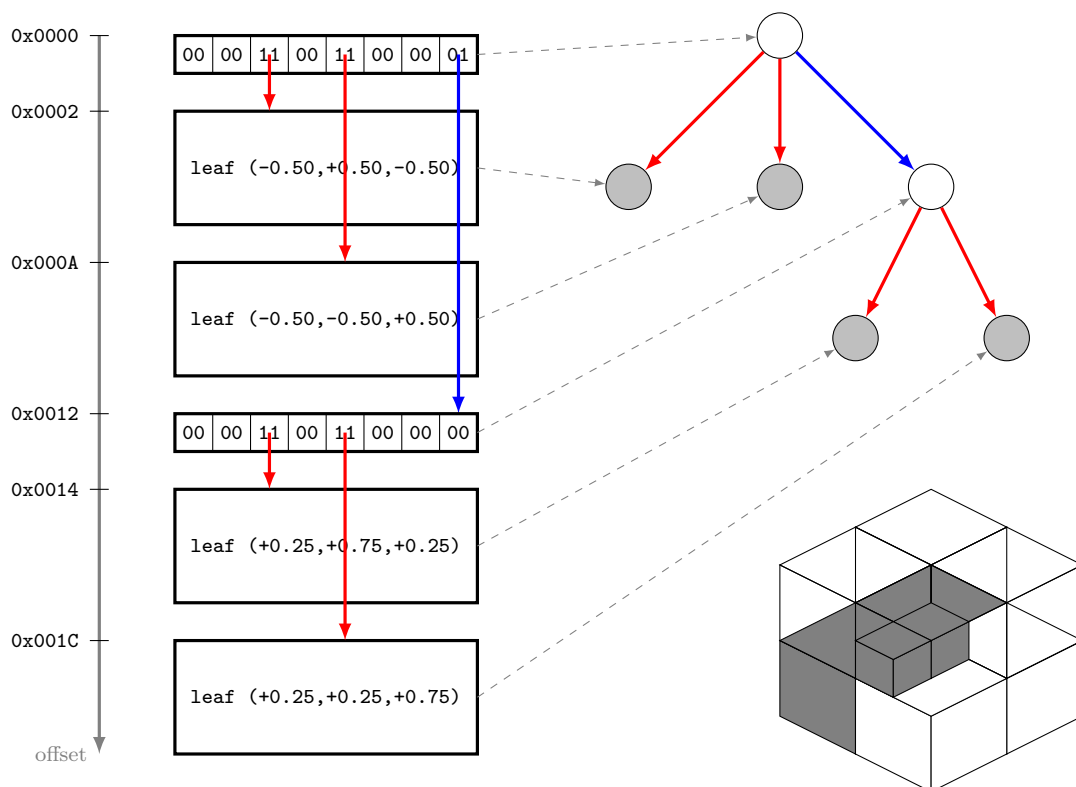
Tab. 2.1: Struktura jednoho voxelu mřížky evidence

Offset	Délka	Typ	Název	Popis
0	4B	float	Probability	Log odds hodnota pravděpodobnosti obsazenosti.
4	1B	int	Temperature	Teplota daného bodu (0 – 255°C)
5	3B	int	Color	RGB hodnota barvy daného bodu.

Budoucí verze mřížky evidence již počítají s ukládáním hodnot HSV modelu, čímž odpadne náročný výpočet převodu mezi modely.

2.2 Reprezentace souboru s Octree mapou

V práci je v této kapitole popsána metoda adresování jednotlivých buněk mapy, včetně popisu bezztrátové komprese a formátu souborů s mapou na paměťovém médiu.



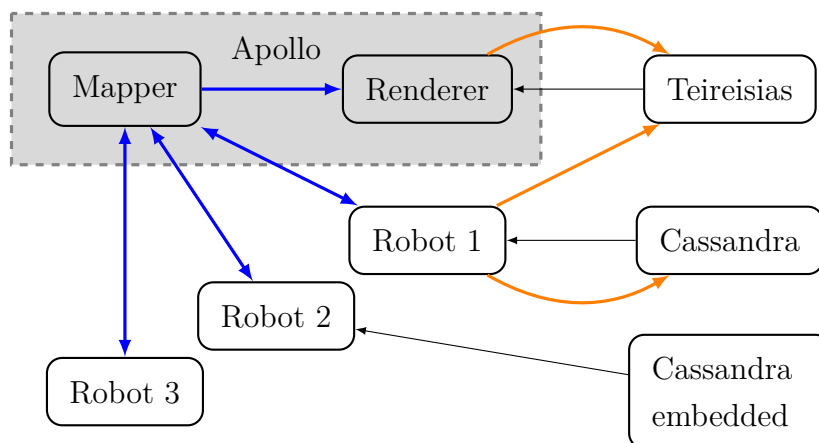
Obr. 2.2: Formát serializovaného Octree, vlevo binární datový stream uložený v souboru, vpravo nahoře síťová reprezentace dat, vpravo dole výsledná rekonstruovaná mapa

3 DISTRIBUCE MAPY MEZI ROBOTY

Mapu, vytvořenou jedním robotem s pomocí metod popsanych v předcházející kapitole je nutné distribuovat mezi ostatní roboty, aby i tyto roboty měly informace o měřeních. Systém distribuce map musí zajistit validní začlenění všech měření do globální mapy, a tuto pak distribuovat zpět robotům. Specifickým problémem je omezený datový tok v důsledku použití bezdrátové komunikace.

3.1 Začlenění map do robotického systému

Robotický systém sestává z několika částí, které spolu spolupracují (viz obrázek 3.1). Sada mobilních robotů doplněná o mobilní ovládací stanici „*Cassandra embedded*“ tvoří základní hardwarovou část systému.



Obr. 3.1: Spojení mezi aplikacemi

Aplikace „*Cassandra*“ slouží pro vizuální teleprezenční ovládání robotu, dokáže robot řídit i zpracovávat obrazová data z něj. Tato aplikace je určena zejména pro průzkum s použitím pouze jedné kamery.

Aplikace „*Teireisias*“ slouží jako platforma pro napojení na stereovizní vidění, dokáže pouze stereovizně zobrazovat obrazová data z robotu Orpheus-X3 (jako jediný je vybaven stereovizním párem kamer), a z virtuálního robotu mapovací aplikace. Aplikace v současné době provádí i fúzi dat CCD kamery a termokamery s pomocí 3D kamery. Vše v reálném čase. V současné době aplikace umožňuje vzdáleně ovládat pouze virtuální robot, v budoucnu se počítá s plným rozhraním kompatibilním s ostatními roboty.

Aplikace „*Apollo*“ je základním pilířem pro mapovací funkce systému. V současnosti je tato aplikace vnitřně sestavena ze dvou částí, které budou v budoucnosti

odděleny do separátních aplikací z důvodu lepšího využití dedikovaných výpočetních prostředků a možnosti spuštění více instancí části programu. První část, tzv. „*Renderer*“ zprostředkovává rozhraní virtuálního robotu aplikacím Cassandra a Teireisias. Spojení s aplikací Cassandra není v okamžiku psaní práce dokončeno. *Renderer* tedy prezentuje mapové podklady stejně, jako by se jednalo o reálný robot. Druhou částí programu Apollo je vlastní mapovací jádro, tzv. „*Mapper*“. Tato část programu je zodpovědná za integraci naměřených mapových podkladů jednotlivými roboty do globální mapy, distribuci změn globální mapy a vlastní úložiště pro globální mapu. Po vyjmutí z aplikace Apollo bude možné tuto instanci spustit na počítači s nižším výkonem, zejména bez výkonné grafické karty. To umožní spustit tuto instanci přímo na dedikovaném robotu EnvMap, jehož úkolem je podpora mapovacích procesů.

3.2 Systém blokového dělení globální mapy

Základním požadavkem na mapovací subsystém robotu je jeho škálovatelnost při zachování přesnosti. Tyto parametry je nutné volit s přihlédnutím k použití mapy pro vizualizaci i pro strojové vnímání prostředí robou.

Venkovní prostory jsou dobře popisovány výškovou mapou (leveled map) [6] zatímco prostory uvnitř budov je výhodné popisovat za pomoci mapy obsazenosti (Occupancy grid) [3]. Tento rozdílný formát dat vede na rozdílné, vzájemně nekompatibilní formáty uložení mapy. Za předpokladu, kdy není dopředu specifikováno, zdali se robot bude pohybovat uvnitř nebo vně budov, nebo dokonce plynule přecházet mezi těmito oblastmi je nutné vytvořit hybridní mapu, která umožňuje současné uložení těchto různých mapových podkladů do jednoho heterogenního úložiště.

V této práci byl zvolen systém, kdy se globální mapa rozdělí na očíslované oblasti s pevně danou délkou hrany. Každá z těchto oblastí může obsahovat žádný, jeden nebo více mapových podkladů současně uložených v nezávislých souborech. Tím je zajištěna škálovatelnost systému za předpokladu, že se velikost mapy dynamicky mění. Za předpokladu, že je zvolena délka hrany lokální oblasti dostatečně velká vzhledem k maximálnímu možnému měření robotu, pak není nutné, aby byla mapa uložena v paměti celá, stačí zpracovávat pouze nejbližší oblasti v okolí robotu, což vede k výrazné redukci zpracovávaných dat, a tím pádem ke zvýšení rychlosti odezvy tohoto systému na měření.

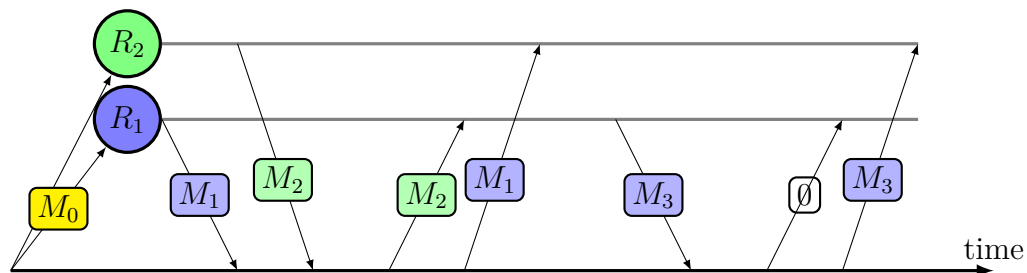
3.3 Interpretace dat uvnitř bloku

Každý blok dat umožňuje mít uloženo několik typů mapy právě pro možnost koexistence externích a interních měření. Pro srovnání jsou zde uvedeny některé typy map, které je do daného bloku možné uložit (vždy pouze jednu od daného typu)

- Výšková mapa (Leveled Map)
- Mřížka obsazenosti (Occupancy Grid)
- Mřížka evidence (Evidence Grid)
- Mapa význačných bodů (Feature Map)

3.4 Systém distribuce mapy mezi více robotů

Distribuce mapy byla inspirována verzovacím systémem GIT [10] [2], avšak s přihlédnutím k předpokladu, že je třeba znát pouze poslední aktuální verzi, bez nutnosti znát celou historii mapování.



Obr. 3.2: Popis distribuce mapy mezi roboty

Celý proces distribuce znázorňuje obrázek 3.2. Mapový server nejprve distribuuje základní mapu M_0 všem připojeným robotům. Následně přijme sadu měření M_i od robotu R_i . Mapový subsystém následně spočítá, že robotu R_2 chybí sada měření M_1 a robotu R_1 chybí sada měření M_2 . V části synchronizace se pokusí dodat chybějící data každému robotu.

V obecném pohledu na tento systém lze pohlížet na jednotlivá měření M_i jako na agregované soubory změn mapy, identicky jako GIT pohlíží na agregované difference souborů. Při hlubším zkoumání se objeví nutnost online výpočtu difference mezi hlavní mapou, a starší verzí této mapy, což lze jednoduše zajistit fixováním dané mapy v jiné větvi grafu úplně stejným způsobem, jakým GIT provádí větvení repozitáře. S výhodou lze využít faktu, že difference map budou z velké části obsahovat prázdná místa, a tudíž budou mít vysoký kompresní poměr při kompresi která se snaží nevyplněná místa neukládat (Octree).

4 ZOBRAZENÍ A PREZENTACE DAT

V této kapitole jsou popsány jednotlivé dílčí optimalizace, provedené v rámci této disertační práce, související s vykreslováním nasbíraných dat. Tato optimalizace je nutná vzhledem k předpokládanému použití celého systému v reálném čase.

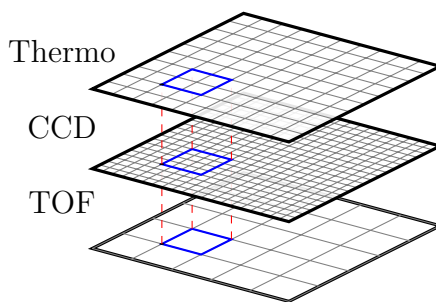
Tab. 4.1: Parametry kamer

Kamera	Rozlišení	Rychlost	Bitů/pixel	Obrazový tok
TheImagingSource DFK23G445 (2x)	1280x960	30Hz	8	295 Mbps
MicroEpsilon TIM 450 (2x)	382x288	30Hz	16	53 Mbps
Mesa Imaging SR4000 (1x)	176x144	30Hz	64	48 Mbps

Z tabulky 4.1 je patrné, že celkový datový tok všech obrazových dat (bez režie IP protokolu) ze sensorické hlavičky dosahuje hodnoty 744 Mbps. Se započítáním režie síťových vrstev a ostatní datové komunikace s robotem je tato hodnota 916 Mbps. Tyto hodnoty dokazují nutnost masivních optimalizací na výpočetní a zobrazovací straně.

4.1 Fúzování video dat

Celý proces kalibrace a fúzování dat byl dokumentován v článkách [1], [7] a v [8].

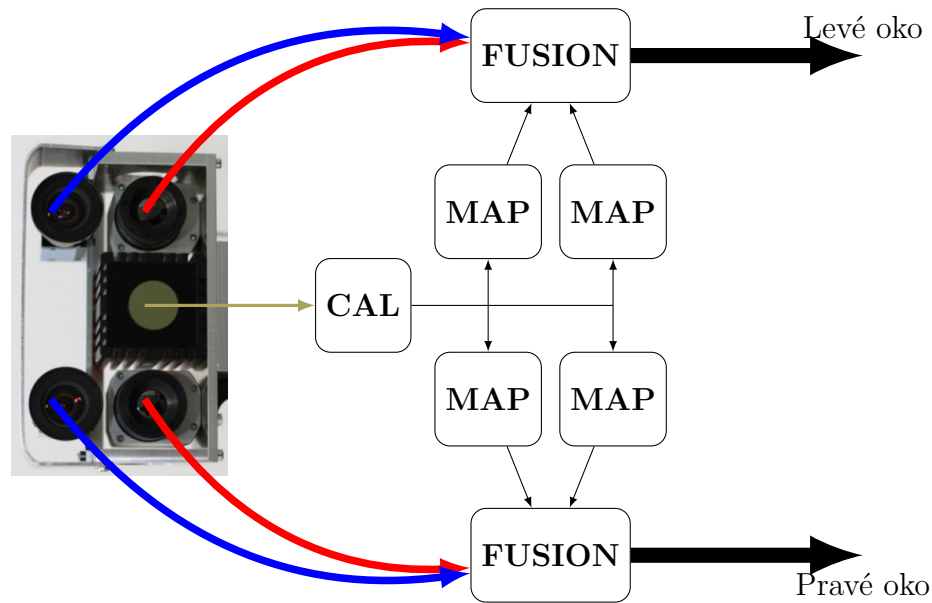


Obr. 4.1: Ideové schéma fúze dat

Rovnice uvedené v těchto článkách byly nadále optimalizovány na paralelizaci pro získání vyšších přenosových rychlostí a výkonů. Celý proces fúze dat názorně popisuje obrázek 4.2.

Jednotlivé bloky provádějí následující činnosti:

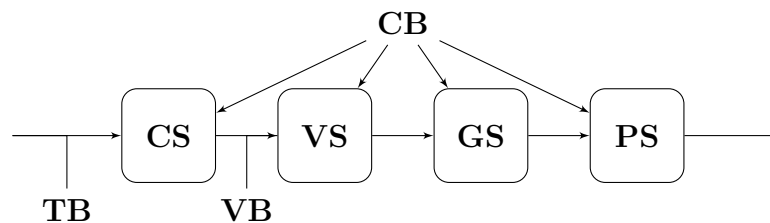
- Kalibrace paprsků TOF kamery
- Mapování paprsků TOF na CCD kameru resp. termokameru
- Výsledná fúze dat termokamery a CCD kamery



Obr. 4.2: Fúzování video dat

4.2 Vykreslování mapy

Pro vykreslování bylo použito karty nVidia plně kompatibilní s DirectX 11. Díky použití tohoto rozhraní bylo možné spouštět určité části vykreslovacích algoritmů přímo na grafické kartě, čímž se dosáhlo vysokých výkonů při vykreslování.



Obr. 4.3: DirectX 11.0 pipeline

Jednotlivé fáze grafické pipeline jsou popsány v plné verzi práce:

- CS** Compute shader (filtrace a normalizace dat)
- VS** Vertex shader (Transformace souřadnic)
- GS** Geometry shader (Tvorba zobrazovacích primitiv)
- PS** Pixel shader (Osvětlení scény)
- TB** Texture buffer (Obsahuje mřížku obsazenosti)
- VB** Vertex buffer (Obsahuje souřadnice obsazených bodů)
- CB** Constant buffer (Obsahuje předpočítané mezivýsledky)

5 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Výsledky, uvedené v této kapitole jsou změřeny na sadě dat, která byla kompletně vytvořena robotem Orpheus-X3. Všechna zpracovávaná data od fáze skenování do mračna bodů a ukládání snímků kamer, přes následnou integraci změřených dat do mřížky Evidence Grid, kompresi této mřížky do formátu Octree, přenos Octree mapy mezi počítači, ukládání na mapovém serveru, rendering získané mapy z pohledu virtuálního robotu, mapování kamer na sebe a volitelné přepínání vizualizace mezi reálným robotem a virtuálním robotem v mapě jsou plně pod naší kontrolou.

Dříve uvedené výpočty byly vytvořeny a optimalizovány v jazyce C# autorem práce bez použití knihoven třetích stran s výjimkou knihovny SlimDX [4] pro práci s DirectX rozhraním a knihovnami pro příjem dat z vizuálních snímačů [5]. Použité knihovny však byly pro použití s tzv. Managed kódem neefektivní, proto autor některé z nich pro použití v systému upravil.

Pro srovnávání výsledků bylo použito výpočetní techniky uvedené v tab. 5.1. Parametry komponent byly získány za pomoci programů GPU-Z, CPU-Z a příslušných katalogových listů příslušných výrobců.

Tab. 5.1: Parametry počítačů použitých pro dynamické měření

	PC1	PC2
<i>Grafická karta</i>		
Rodina	<i>nVidia® GeForce™</i>	
Typ	GTX580	GTX570
Paměť	1536 MiB	1280 MiB
Frekvence jádra	795 MHz	780 MHz
Frekvence shaderů	1590 MHz	950 MHz
Frekvence paměti	2004 MHz	1560 MHz
Propustnost paměti	192.4 GiB/s	152.4 GiB/s
<i>Počítač</i>		
Rodina	<i>Intel®</i>	
Typ	Core™ i7 950	Core™ i7 4930K
Počet jader	4 (× 2 HT)	8 (× 2 HT)
Paměť	24 GiB	16 GiB
Frekvence jádra	3.1 GHz	3.4 GHz
Frekvence sběrnice	533 MHz	633 MHz
Operační systém	Windows 7 Pro	Windows 8.1
<i>Úložiště č. 1 (data/data+operační systém)</i>		
Typ	WDC WD2002FAEX	WDC WD10EALX
Velikost	2 TB	1 TB
Připojení	SATA III 6 GiB/s	SATA III 6 GiB/s
Vyrovnávací paměť	64 MiB	32 MiB
Latence	4.2 ms	5.5 ms
Rychlost zápisu	138 MiB/s	126 MiB/s
<i>Úložiště č. 2 (operační systém)</i>		
Typ	-	Samsung SSD 840 Pro
Velikost	-	256 GiB
Připojení	-	SATA III 6 GiB/s
Vyrovnávací paměť	-	512 MiB
Latence	-	0.8 ms
Rychlost zápisu	-	450 MiB/s

5.1 Experiment

Mapa byla tvořena v laboratořích a chodbách budovy Technická 12, Brno (viz obrázky 5.1 nasnímané v průběhu měření robotem Orpheus-X3.). Celá mapa byla vytvořena během jednoho cyklu měření ve večerních a nočních hodinách vzhledem ke konstantnosti osvětlení.



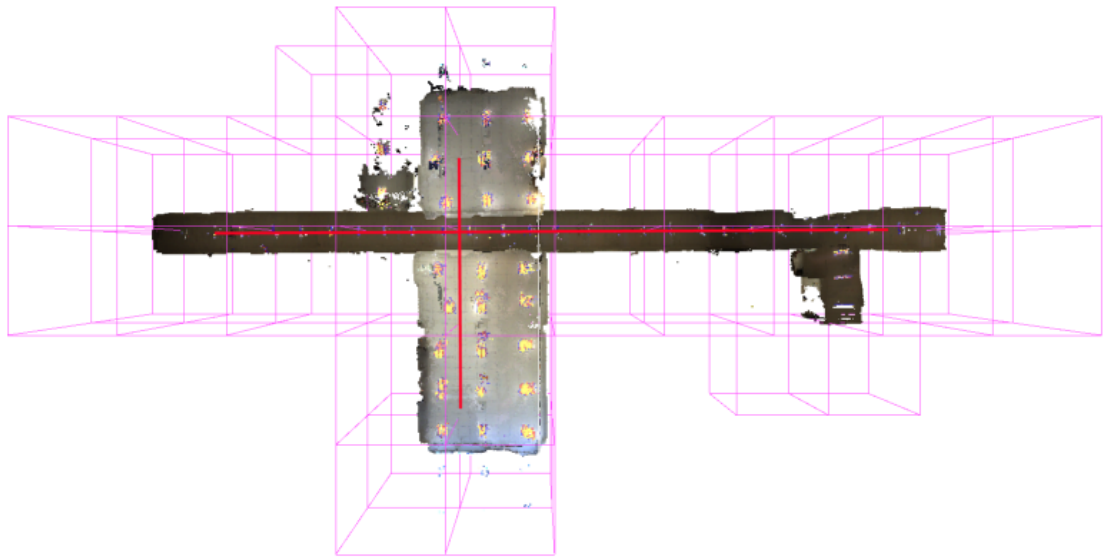
Obr. 5.1: Měření mapy

Měření bylo rozděleno do dvou vzájemně kolmých úseků (vyznačeny červeně v obr. 5.2) po kterých se robot Orpheus-X3 pohyboval po přímce a měřil vzdálenost od konce chodby pro každý naměřený scan. Robot byl připojen dvěma gigabitovými ethernetovými kabely, které jsou na některých snímcích mapy viditelné.

Při pohledu dovnitř místnosti v mapě na obrázku 5.3 je názorně vidět oblast, ve které paprsky použité TOF kamery nasnímalý prázdný prostor a oblasti, kde nedošlo k dotyku s žádným objektem, a vznikla tam tedy bílá neobarvená obast. Z obrázku 5.3 je též patrná trajektorie robotu během měření (mírně obarvená čára na podlaze způsobená nedokonalostí ořezu měřených dat).

Během měřicího experimentu bylo nasnímáno více než 16 GiB surových dat, uložených zejména jako snímky obrazu videokamer a matice hodnot ostatních snímačů v separátních souborech. Tato data byla následně zpracovávána pro vytvoření mapy a její kreslení.

Během experimentu byly též v reálném čase snímány data z obrazových snímačů a prezentovány operátorovi do stereovizních brýlí virtuální reality.



Obr. 5.2: Pohled na měřenou scénu shora s červeně vyznačenou trajektorií robotu



Obr. 5.3: Mapa - Pohled do jedné z měřených laboratoří

5.2 Tvorba Octree mapových podkladů

Všechna surová data naměřená v experimentu sloužila jako zdroj pro tvorbu mapy. Mapa byla sestavena z oblastí o velikosti 5.12m. Měření bylo sestaveno tak, že hrany buněk se nacházejí uprostřed místností.

Buňky, které obsahovaly extrémně málo informace byly pro účely srovnání zahozeny. Po eliminaci těchto buněk byla vybrána množina 52 shodných oblastí pro různé úrovně Octree stromu. Jejich srovnání udává tabulka 5.2

Tab. 5.2: Statické výsledky

<i>Buňka</i>			
Délka hrany	5.12 m		
Dělení hrany	256 voxelů	128 voxelů	64 voxelů
Hloubka octree	8 bitů	7 bitů	6 bitů
Rozlišení	2 cm/voxel	4 cm/voxel	8 cm/voxel
Zábor paměti	64 MiB/buňku	8 MiB/buňku	1 MiB/buňku
<i>Mapa</i>			
Pokrytá plocha	~13421 m ² (25.6 m × 51.2 m × 10.2 m [š × d × v])		
Počet buněk	52		
Celkový zábor paměti	3328 MiB	416 MiB	52 MiB
Neprázdné voxely	4389419 voxelů	1493079 voxelů	350574 voxelů
<i>Octree mapa</i>			
Celkový zábor paměti	43 MiB	14 MiB	2 MiB
Kompresní poměr	1:77	1:29	1:26

Dále byla důsledně zkoumána rychlost práce s octree mapou, jmenovitě její komprese a dekomprese. Pro testy byl použit počítač PC1 z důvodu velkého množství paměti RAM a velkého disku. Měřil se čas načítání a ukládání každé buňky mapy zvlášť a z těchto vstupních dat vznikl statistický přehled zobrazený na obrázku 5.4. V grafu hodnoty více vpravo odpovídají ukládání do octree, hodnoty vlevo odpovídají načítání z octree. Statistika byla provedena ze všech dat.

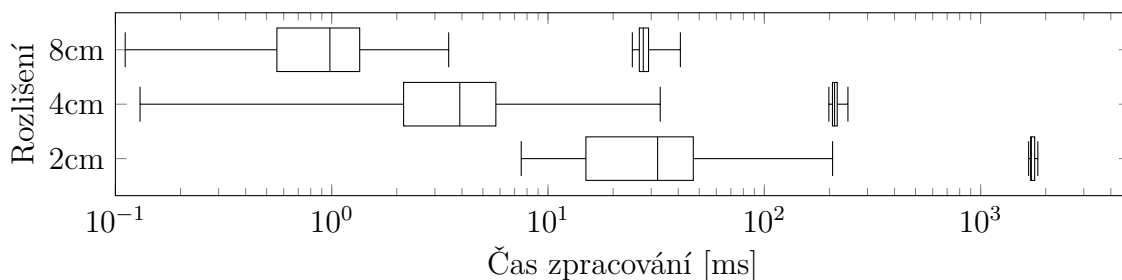
Z grafu na obrázku 5.4 plyne, že časová náročnost komprese je o více než řád vyšší než dekomprese. To je dáno algoritmem procházení mapy, kdy pro kompresi je nutné projít a otestovat všechny body, ale pro dekompresi stačí projít pouze body, které byly předtím obsazeny. Poměr doby ukládání a načítání je blízký zaplněnosti mapy.

Z rozptylu hodnot napříč celou mapou lze soudit na vysokou závislost doby načítání na zaplněnosti mapy a naopak malou závislost doby ukládání na zaplněnosti mapy.

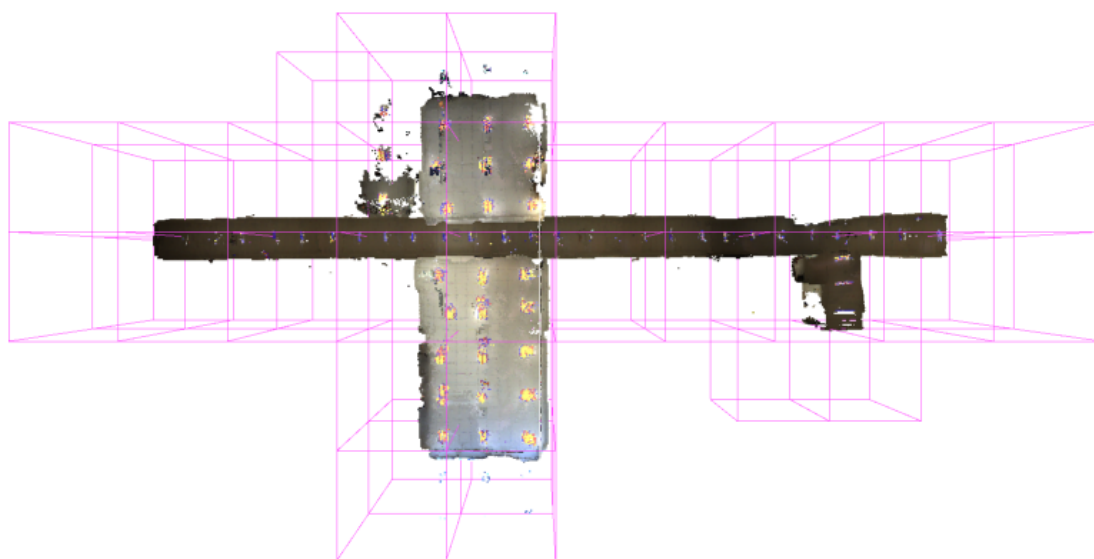
Úroveň komprese souborů odpovídá teoretickým předpokladům odvozeným v kapitole 4.2 v plné verzi práce, kdy velikost souboru je cca o 7% větší než součet velikostí paměti všech obsazených bodů.

5.2.1 Vykreslování mapy

Výsledná mapa (na obrázku 5.5) byla následně podrobena zkoumání rychlosti vykreslování navrženým algoritmem.



Obr. 5.4: Časová náročnost konverze mapy mezi Octree a Evidence Grids v závislosti na rozlišení.



Obr. 5.5: Pohled na celou vytvořenou mapu shora

Měření doby vykreslování obrazu probíhalo na sekvenci pohledů, které obsahovaly různé části mapy, s různým pokrytím, pohled na celou mapu, jakož i pohledy na detailní části mapy. Měření probíhalo s přesností 1 ms. Srovnání s mapou bez optimalizace je pouze orientační, určité optimalizované algoritmy není možno v současné verzi vypnout a jsou přítomny v obou měřeních.

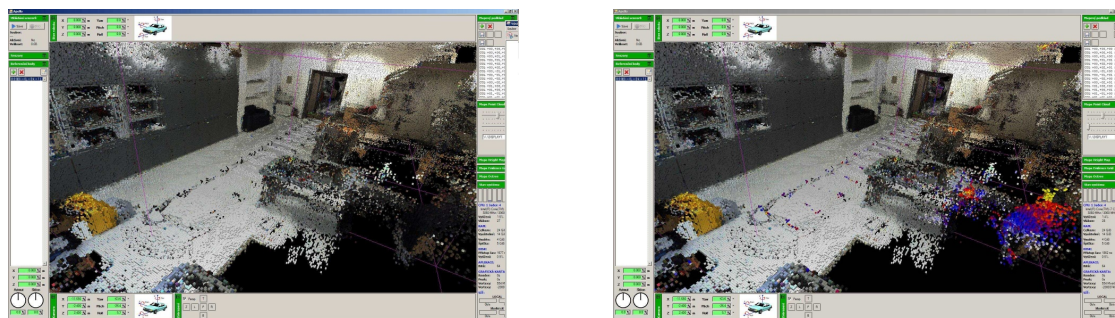
Z tabulky 5.3 je zřejmé, že došlo k optimalizaci zejména průměrných a minimálních časů kreslení, tedy že výsledná optimalizace pokrývá pouze část zobrazení. Pro optimalizaci těžko optimalizovatelných procesů, jako například kreslení celé scény, by bylo zapotřebí přistoupit k úplně jinému způsobu vykreslování, jakým je například raytracing, popisovaný v [9].

Na obrázku 5.6 je vidět způsob zobrazení teplot okolí při uživatelem nastavené

Tab. 5.3: Vliv optimalizace vykreslování celé mapy

	2 cm/voxel		4 cm/voxel		8 cm/voxel	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
<i>Vykreslování úplné mapy před optimalizací</i>						
Využitá paměť grafiky	1464 MiB	1160 MiB	592 MiB	745 MiB	235 MiB	381 MiB
Vytížení GPU procesoru	92 %	92 %	86 %	92 %	80 %	80 %
Vytížení GPU paměti	1 %	2 %	12 %	15 %	10 %	15 %
Čas na vykreslení(min)	3.0 s	1.8 s	16 ms	11 ms	7 ms	6 ms
Čas na vykreslení(průměrně)	5.0 s	2.8 s	18 ms	17 ms	8 ms	7 ms
Čas na vykreslení(max)	11.0 s	4.5 s	39 ms	24 ms	17 ms	10 ms
<i>Vykreslování úplné mapy po optimalizaci</i>						
Využitá paměť grafiky	1464 MiB	1197 MiB	601 MiB	721 MiB	237 MiB	357 MiB
Vytížení GPU procesoru	89 %	92 %	87 %	92 %	78 %	78 %
Vytížení GPU paměti	4%	2 %	11 %	14 %	11 %	12 %
Čas na vykreslení(min)	1.0 s	1.9 s	8 ms	14 ms	8 ms	6 ms
Čas na vykreslení(průměrně)	3.0 s	2.4 s	12 ms	16 ms	10 ms	7 ms
Čas na vykreslení(max)	11.0 s	4.8 s	31 ms	34 ms	12 ms	13 ms

nízké průhlednosti teplot (vpravo) a vysoké průhlednosti teplot (vlevo). Teplotní mapa byla vybrána taková, aby zvýrazňovala teploty blízké teplotě lidského těla. Je vidět zvýraznění místa, kde se při experimentu nacházel člověk.



Obr. 5.6: Mapování thermo

5.2.2 Výsledky fúze dat

Pro testování fúze dat v reálném čase byl použit PC2, protože jako jediný má dostatečnou síťovou konektivitu (2x 1Gbps síťová karta). Všechny kamery jsou do algoritmů přenášeny v plné rychlosti 30 snímků za sekundu.

Výsledky fúze dat nejlépe prokazuje video, zachycené z reálného běhu aplikace, přiložené na datovém nosiči. V následujících obrázcích jsou uloženy snímky z tohoto videa.

Nižší snímková rychlost kolem 8 snímků za sekundu je způsobená vyšší latencí TOF kamery při daném osvětlení.



Obr. 5.7: Fúze dat (snímky z videa na přiloženém datovém nosiči)

6 ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

Jak již bylo řečeno v úvodu, hlavním cílem mé dizertační práce bylo vytvořit systém pro multispektrální datovou fúzi, kterou by bylo možné využít pro mapování a teleprezenční režim v multirobotickém systému – v našem případě v systému CASSANDRA, který společně vyvíjíme na našem pracovišti. Ačkoli je třeba upozornit, že současný stav jak mé práce, tak celého systému CASSANDRA, rozhodně není možné považovat za konečný, jsou zde prezentované algoritmy funkční a použitelné.

Navržený způsob reprezentace fúzovaných dat pro mapování se osvědčil, jeho výhodou je i možnost rozšiřitelnosti v budoucnu.

Pro další vývoj je zásadní možnost kombinace několika typů map (především Octree a Evidence Grid) a z toho vyplývající šetření výpočetních a paměťových prostředků a optimalizace pro bezdrátový přenos dat mezi roboty a operátorskou stanicí. Pozitivní vliv „bezeztrátové komprese dat“ pomocí Octree je dobře patrný z výsledků v předchozí kapitole. Přitom je však poměrně dobře vyřešen i problém s distribucí dat i z robotů, které nemají dostatečný výpočetní výkon na to, aby převáděly mapy do Octree.

Tento způsob reprezentace dat, uložení map a jejich správy v rámci multirobotického systému považuji za unikátní a doposud jsem se v literatuře nesetkal s podobným řešením. Na základě výsledků předchozí kapitoly je přitom možno říci, že jde o systém funkční a za běžných podmínek velmi efektivní.

Dále jsem se zabýval optimalizací zobrazení map pro operátora, což je další velmi důležitá součást celku, bez které by celý systém nebyl kompletní a konečný uživatelský zážitek by nebyl dobrý. Na základě analýzy je opět možno říci, že díky masivní paralelizaci a optimalizaci se podařilo vytvořit systém, který může i na dnešním hardware v reálném čase zobrazovat extrémní množství dat, které multispektrální mapy s vysokým rozlišením jednoznačně představují. Ačkoli při vysokém rozlišení mapy ještě obecně nedosahujeme zcela plynulého zobrazení (60Hz a více), je současný stav pro práci přijatelný s tím, že předpokládám další optimalizace a zrychlení při použití nadcházející generace grafických karet.

Jak již bylo řečeno, práce na systému nepovažuji za dokončené. V nejbližší době se budu zabývat následujícími činnostmi:

- Paralelizace přepočtů kalibrace z jednotlivých snímačů i vzájemný prostorový přepočet pomocí homogenních transformací pomocí výpočetních prostředků grafické karty.
- Časová synchronizace získaných dat, což jednak podstatně vylepší uživatelský zážitek, ale také podstatně zrychlí proces získávání dat při automatickém mapování.

- Testování distribuce mapy mezi dvěma zcela odlišnými roboty (Orpheus-X3 a envMap) se zcela rozdílným sensorickým vybavením.

Poděkování

Tato práce vznikla v rámci CEITEC - Středoevropského technologického institutu s pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem CZ.1.05/1.1.00/02.0068 z Evropského fondu regionálního rozvoje, za podpory Technologické Agentury České Republiky projektem č. TE01020197 „Centrum Aplikované Kybernetiky 3“ a grantu VG 2012 2015 096 „Kooperativní robotický průzkum nebezpečných oblastí“ Ministerstva Vnitra České Republiky, v rámci programu „Programu bezpečnostního výzkumu České republiky v letech 2010 až 2015“ (BV II/2-VS).

LITERATURA

- [1] Burian, F.; Kocmanova, P.; Zalud, L.: Robot Mapping with Range camera, CCD Cameras and Thermal Imagers. In *In Proc. of the 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, 2014.
- [2] Chacon, S.: *Pro Git*. Berkely, CA, USA: Apress, první vydání, 2009, ISBN 1430218339, 9781430218333.
- [3] Elfes, A.: *Occupancy Grids: A probabilistic framework for robot perception and navigation*. Dizertační práce, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 1989.
- [4] Group, S.: SlimDX DirectX wrapper library. 2014.
URL <http://slimdx.org/>
- [5] ImagingSource: IC Imaging Control .NET. 2014.
URL http://www.theimagingsource.com/en_US/support/documentation/icimagingcontrol-dotnet/
- [6] Jež, O.: 3D Mapping and Localization Using Leveled Map Accelerated ICP. In *European Robotics Symposium 2008*, 2008, ISBN 978-3-540-78315-2, s. 343–353.
- [7] Kocmanova, P.; Zalud, L.: Spatial Calibration of TOF Camera, Thermal Imager and CCD Camera. In *Mendel 2013: 19th International Conference on Soft Computing. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering*, 2013, ISBN 978-80-214-4755-4, s. 343–348.
- [8] Kocmanova, P.; Zalud, L.; Burian, F.: Multispectral Texture Mapping for Telepresence and Autonomous Mobile Robotics. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics. Prague, Czech Republic*, 2014, s. 158–1–158–9.
- [9] Romisch, K.; Moller-Nielsen, P.: *Sparse Voxel octree Ray Tracing on the GPU*. Dizertační práce, Aarhus University, Aarhus, Denmark, 2009.
- [10] Torvalds, L.: Git distributed version control system. 2014.
URL <http://git-scm.com/>

ABSTRAKT

Dizertační práce pojednává o využití multispektrálního optického měření pro datovou fúzi, kterou je možné využít pro vizuální teleprezenci a mapování uvnitř budov i ve vnějším prostředí v systému složeném z heterogenních mobilních robotů. Pro fúzi jsou použity dálkoměrné optické snímače, termovizní kamery a barevné kamery. Popsané algoritmy jsou optimalizovány pro práci v reálném čase a implementovány na robotický systém CASSANDRA vytvořený naší robotickou skupinou.

KLÍČOVÁ SLOVA

mobilní robot, termovize, multispektrální datová fúze, 3D mapování, vykreslování, octree

ABSTRACT

The dissertation deals with utilisation of multispectral optical measurement for data fusion that may be used for visual telepresence and indoor/outdoor mapping by heterogeneous mobile robotic system. Optical proximity sensors, thermal imagers, and tricolour cameras are used for the fusion. The described algorithms are optimised to work in real-time and implemented on CASSANDRA robotic system made by our robotic research group.

KEYWORDS

mobile robot, Thermovision, multispectral data fusion, 3D mapping, rendering, octree

BURIAN, František *Tvorba multispektrálních map v mobilní robotice*: dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2014. 26 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.