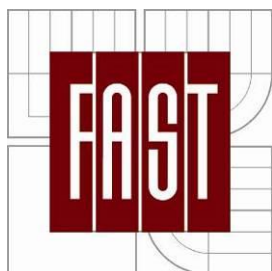


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF GEODESY

KALIBRACE SNÍMAČŮ PRO MULTISPEKTRÁLNÍ DATOVOU FÚZI V MOBILNÍ ROBOTICE

SENSOR CALIBRATION FOR MULTISPECTRAL DATA FUSION IN MOBILE ROBOTICS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Ph.D. THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. PETRA KOČMANOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF WEIGEL, CSc.

BRNO 2015

Abstrakt v českém jazyce

Tato práce se zabývá datovou fúzí, kalibrací sensorických systémů robotu Orpheus-X3 a mapovacího robotu EnvMap. Tyto roboty jsou součástí robotického systému Cassandra, který slouží pro průzkum člověku nebezpečných nebo nedostupných oblastí. V práci jsou určeny korekce měřených vzdáleností skenerů Velodyne HDL-64, Velodyne HDL-32 a dálkoměrné kamery SwissRanger SR4000. Dále je v práci popsán vytvořený program *MultiSensCalib* sloužící k určení prvků vnitřní orientace jednotlivých heterogenních kamerových snímačů sensorické hlavičky a pro určení vzájemné polohy a orientace těchto snímačů. V práci je navržen algoritmus datové fúze sensorické hlavičky skládající se ze stereovizního páru CCD kamer, stereovizního páru termovizních kamer a dálkoměrné kamery. Dosažené parametry kalibrace a datové fúze jsou ověřeny několika experimenty.

Abstract in English language

Thesis deals with data fusion and calibration of sensory system of Orpheus-X3 robot and EnvMap mapping robot. These robots are parts of Cassandra robotic system that is used for exploration of hazardous or inaccessible areas. Corrections of measured distances are determined for used laser scanners Velodyne HDL-64, Velodyne HDL-32 and range camera SwissRanger SR4000. Software *MultiSensCalib* has been created and is described. This software is used for determination of intrinsic parameters of heterogeneous cameras of the sensory head and for determination of mutual position and orientation of these sensors. Algorithm for data fusion of CCD camera stereo pair, thermal imager stereo pair and range camera is proposed. Achieved calibration and data-fusion parameters are evaluated by several experiments.

Klíčová slova v českém jazyce:

kalibrace kamery, datová fúze, korekce měřených vzdáleností, laserový skener, dálkoměrná kamera, CCD kamera, termovizní kamera, mobilní robot.

Key words in English:

camera calibration, data fusion, distance correction, laser scanner, range camera, CCD camera, thermal imagers, mobile robot.

Bibliografická citace VŠKP

KOČMANOVÁ, Petra. *Kalibrace snímačů pro multispektrální datovou fúzi v mobilní robotice: dizertační práce*. Brno, 2015. 118 s., 4 s. příl. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav geodézie. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Josef Weigel, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem dizertační práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

podpis autora

Poděkování:

Ráda bych tímto poděkovala doc. Ing. Josefu Weigelovi, CSc. a doc. Ing. Luďkovi Žaludovi, Ph.D. za odbornou pomoc, rady a připomínky při vypracování dizertační práce.

OBSAH

1. Úvod.....	8
2. Cíle dizertační práce	10
3. Teoretické základy	11
3.1 Mobilní robotika	11
3.2 Multispektrální měření.....	14
3.3 Snímače.....	18
3.3.1 CCD kamery.....	18
3.3.2 Termovizní kamery	19
3.3.3 TOF kamery (Range Cameras)	21
3.3.4 Terestrické laserové skenery	24
3.4 Algoritmy	26
3.4.1 Extrakce hran a rohů.....	26
3.4.2 Kalibrace kamery - určení prvků vnitřní a vnější orientace	30
3.4.3 Podmínkové vyrovnání s neznámými	35
4. Současný stav řešené problematiky.....	36
4.1 Kalibrace „TOF“ kamer	37
4.2 Kalibrace hybridních skenerů.....	39
4.3 Vzájemná kalibrace více snímačů	40
4.4 Stav multispektrální fúze pro teleprezenci a mapování v mobilní robotice.	42
5. Experimentální část.....	44
5.1 Robotický systém Cassandra	44
5.2 Kalibrace TOF kamery	48
5.2.1 Matematický model kalibrace	49
5.2.2 Postup pro kalibraci měřených vzdáleností dálkoměrné kamery v programu MultiSensCalib.....	52
5.2.3 Experiment	57
5.3 Kalibrace hybridních skenerů.....	62
5.3.1 Matematický model kalibrace	64
5.3.2 Experimenty	66

5.4	Vzájemná kalibrace více maticových snímačů.....	77
5.4.1	Optimální konfigurace snímků	80
5.4.2	Postup pro kalibraci senzorické hlavičky v programu MultiSensCalib...	82
5.5	Datová fúze	87
5.5.1	Simulace.....	90
5.5.2	Nezávislé ověření datové fúze	93
6.	Shrnutí dosažených cílů dizertační práce	98
7.	Závěr	100
	Použité zdroje.....	102
	Publikace autora vztahující se k dizertační práci	114
	Použité zkratky a symboly	117
	Seznam příloh.....	118

1. ÚVOD

V dnešní době je stále více lidských činností nahrazováno robotickými systémy od těch nejjednodušších, jako je automatické otevírání dveří a robotický vysavač, až ke značně složitým systémům, které by měly nahrazovat např. hasiče a záchranáře při nebezpečných akcích.

Úkoly řešené v této dizertační práci jsou použité v robotickém projektu Cassandra, jehož hlavním cílem je průzkum člověku nebezpečných nebo nedostupných oblastí. Tento projekt vzniká od roku 2003 na FEKT VUT v Brně a nyní je dále rozšiřován především v rámci výzkumného centra CEITEC.

Cassandra je pokročilý robotický systém, který obsahuje různé typy robotů (Obr. 1) navržených tak, aby plnily různé důležité funkce v záchranných a průzkumných misích. Tento systém je složen z mapovacích robotů např. EnvMap, z menších robotů vážících v rozmezí 5-20 kg např. Perseus, Brontes, větších robotů vážících v rozmezí 20-80 kg např. Orpheus-X3, Orpheus-AC, Scorpio a létajících robotů typu multicopter např. Uranus-ALU.



Obr. 1 Roboty systému Cassandra: horní řada zleva – Orpheus-X3, EnvMap, Orpheus-AC, dolní řada zleva – Uranus Alu, Perseus, Scorpio, Brontes

Tato práce se zabývá senzory a systémy dvou robotů ze systému Cassandra, a to mapovacím robotem EnvMap a robotem Orpheus-X3.

Robot EnvMap má sloužit k získávání aktuální mapy okolí robotu. Pro tento účel je vybaven mimo jiné laserovým skenerem Velodyne HDL-64 nebo Velodyne HDL-32. Pro teleprezenční ovládání robotu Orpheus-X3 byl vyvinut zcela nový senzorický systém.

Tento systém je tvořen soustavou maticových snímačů, která obsahuje stereovizní pár barevných CCD kamer, stereovizní pár termovizních kamer a jednu dálkoměrnou kameru. Současným cílem je pomocí fúze dat ze jmenovaných snímačů sensorické hlavice umožnit věrné zobrazení běžného obrazu 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. Podmnožina jmenovaných snímačů (dálkoměrná kamera, jedna termovizní kamera, jedna barevná kamera) je navíc používána pro získávání nové, či doplňování aktuální mapy okolí.

Celkovým cílem je vytvoření velmi pokročilého uživatelského rozhraní založeného na tzv. rozšířené realitě tj. na kombinaci 3D mapy a aktuálního měření, kdy bude moci operátor nejen zkoumat prostředí, do kterých by se bez robotu nedostal, ale rovněž bude moci vnímat jevy, které by svými smysly vnímat nemohl. To vše dokonce z míst, na kterých se jeho robot nikdy nenacházel a pomocí senzorů, které jím aktuálně ovládaný robot nemá.

Pro úspěšné řešení mapování a datové fúze je dále nezbytné, aby skener na mapovacím robotu EnvMap a jednotlivé snímače na kamerové hlavici robotu Orpheus-X3 byly kalibrovány. Pro vznik dostatečně přesných lokálních digitálních prostorových map je nezbytná přesná kalibrace hybridního 3D skeneru Velodyne. Pro fúzi dat sensorické hlavice je nutná minimalizace chyb dálkoměrné kamery, kalibrace celého systému a také návrh algoritmu datové fúze, který musí být použitelný v reálném čase. Návrh, popis a testování těchto činností je obsahem mé dizertační práce.

Tato práce je rozdělena následovně. V kap. 2 jsou vytyčeny hlavní cíle dizertační práce. Kap. 3 popisuje teoretické základy, které jsou v práci dále využívány. Kap. 4 shrnuje současný stav řešených problematiky. Jádrem této práce je kap. 5, která popisuje návrh řešení, realizaci a ověření funkčnosti kalibrace dálkoměrných snímačů, společné kalibrace kamer sensorické hlavice a datovou fúzi. Kap. 6 shrnuje dosažené výsledky dizertační práce.

2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této dizertační práce je vyřešení tří dílčích úkolů týkajících se snímačů používaných v rámci robotického systému Cassandra:

1. zlepšení přesnosti měření dálkoměrných snímačů použitých na robotech systému Cassandra,
2. kalibrace kamer sensorické hlavice robotu Orpheus-X3,
3. multispektrální fúze dat ze snímačů sensorické hlavice robotu Orpheus-X3.

Zlepšení přesnosti měření dálkoměrných snímačů

V rámci této práce má být navržen postup kalibrace, určeny korekční parametry pro měření vzdáleností a ověřena přesnost měření pro dálkoměrné snímače použité na mapovacím robotu EnvMap a průzkumném robotu Orpheus-X3. Konkrétně se jedná o hybridní laserové skenery Velodyne HDL-64, Velodyne HDL-32 a dálkoměrnou kameru SwissRanger SR4000.

Kalibrace kamer sensorické hlavice robotu Orpheus-X3

Druhým dílčím cílem je určení prvků vnitřní orientace jednotlivých kamer sensorické hlavice a jejich vzájemná prostorová poloha a orientace. Pro kalibraci sensorické hlavice je důležitým krokem návrh kalibračního terče, který je použitelný pro vzájemnou kalibraci kamer měřících v různých spektrech. Dalším úkolem je návrh a vytvoření uživatelské aplikace pro kalibraci této sensorické hlavice včetně manuálu. Nedílnou součástí kalibrace umožňující rychlé provedení je určení optimální a spolehlivé konfigurace kalibračních snímků.

Multispektrální fúze dat ze snímačů sensorické hlavice

Dalším dílčím cílem je návrh algoritmu datové fúze pro dálkoměrnou kameru, stereovizní systém CCD kamer a stereovizní systém termovizních kamer pro získání korespondujících dat jak pro teleprezenci, tak pro mapování. Důležitou součástí je nezávislé otestování přesnosti tohoto algoritmu, které může potvrdit funkčnost metody a její použitelnost v praxi.

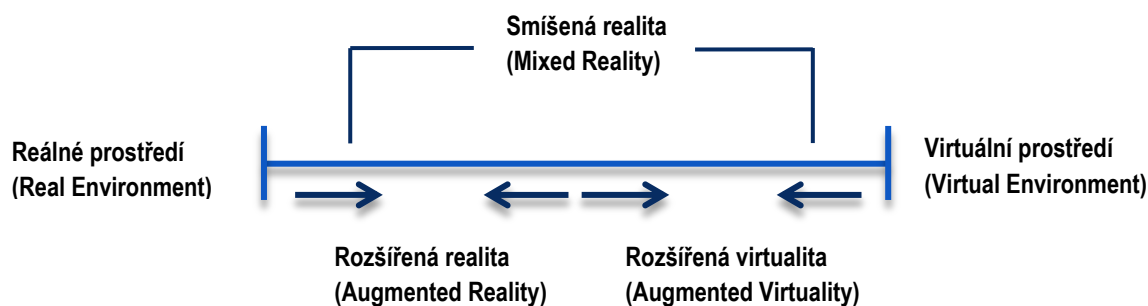
3. TEORETICKÉ ZÁKLADY

V úvodu této kapitoly jsou stručně popsány typy map používané v mobilní robotice, jejichž rozdělení je naprosto odlišné od klasického rozdělení map v geodézii. Dále je popsáno světlo jako elektromagnetické vlnění a vybrané fyzikální principy, které se týkají multispektrálního měření, protože v této práci jsou použity heterogenní snímače. V další části jsou popsány jednotlivé přístroje používané pro sběr dat, tj. CCD, termovizní, TOF kamery a terestrické laserové skenery. Na závěr jsou uvedeny některé v této práci použité algoritmy.

3.1 MOBILNÍ ROBOTIKA

V této podkapitole je čerpáno z [1]-[8] a budou zde popsány vybrané základní pojmy a jednotlivé typy map používané v mobilní robotice.

Virtuální prostředí (Virtual Environment) je definované jako 3D počítačová simulace reálného nebo imaginárního prostředí, ve kterém jsme schopni uživatele navigovat a ovlivňovat. **Smíšené prostředí** (Mixed Environment) představuje kombinaci reálného světa a virtuální reprezentace, můžeme je dále dělit na **rozšířenou realitu** (Augmented Reality) nebo **rozšířenou virtualitu** (Augmented Virtuality). Obr. 2 znázorňuje kontinuum mezi virtuálním prostředím a reálným prostředím. Reálný svět a virtuální prostředí ohraničují prostor smíšené reality.



Obr. 2 Milgramův spojitý prostor mezi realitou a virtualitou [3]

Teleprezence je souhrn technologií umožňující uživateli, aby se cítil být přítomen na jiném místě, než kde se nachází skutečně nebo aby uživatel mohl působit na jiném místě, než se skutečně nachází prostřednictvím telerobotiky. Teleprezence vyžaduje, aby na smysly uživatelů působily takové podněty, které vyvolají pocit, že se nachází na jiném místě.

Mobilní robot může mít rozdílnou míru autonomie od teleoperovaného až po plně autonomního. **Teleoperovaný** mobilní robot pouze vykonává příkazy lidského operátora.

Robot může být ovládán úplně nebo mohou být některé činnosti částečně autonomní. Takový robot bývá označován za **semiautonomní**. **Plně autonomní** robot je schopen provádět činnosti zcela bez lidského zásahu, případně je činnost lidského operátora omezena na zadávání cílů robotu, který sám volí nejlepší způsob dosažení zadaného cíle.

Mapování je v posledních desetiletích velmi intenzivně studovanou oblastí i v mobilní robotice. Pojem mapa v mobilní robotice označuje vnitřní model prostředí, který robot používá k plánování a lokalizaci. Mapa může být zadána z vnějšku nebo si ji robot autonomně buduje během svého pohybu v prostředí. Druhá varianta je výrazně častější, neboť mapy ve vhodném formátu nebývají k dispozici a téměř nikdy neodpovídají aktuálnímu stavu prostředí.

Mapy lze dělit do čtyř skupin:

- senzorická mapa,
- geometrická mapa,
- topologická mapa,
- symbolická mapa.

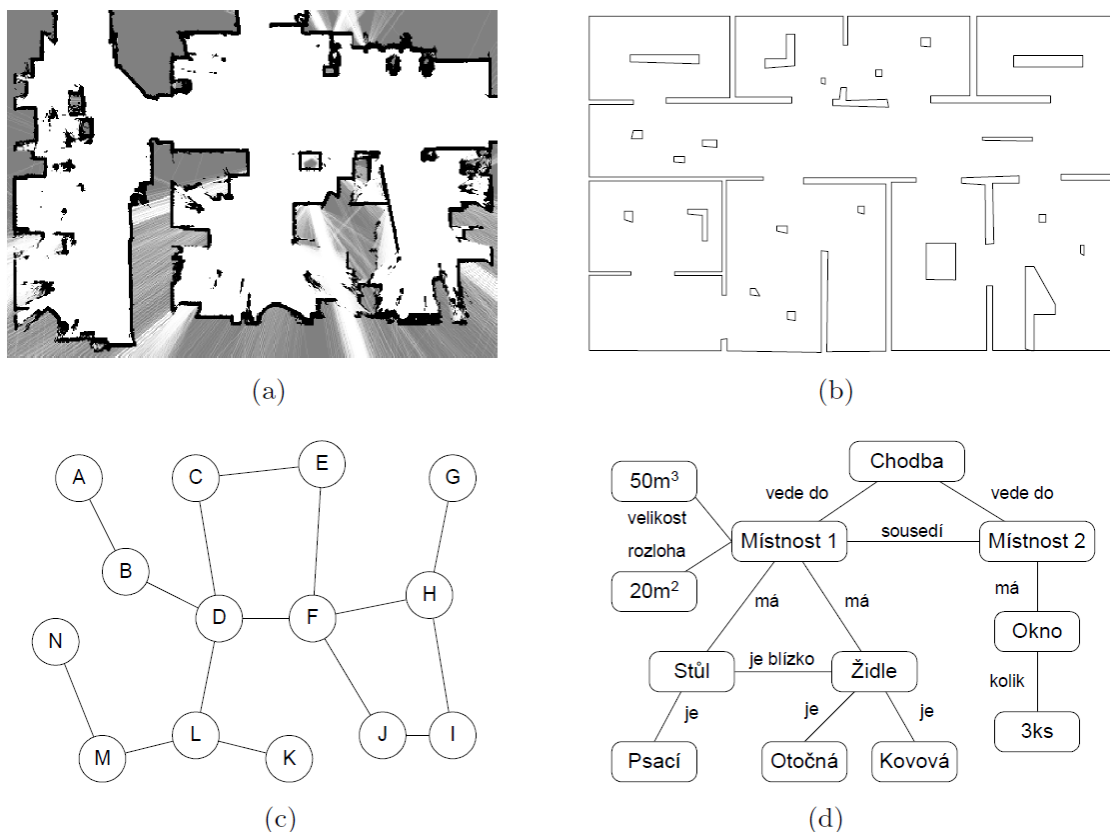
Senzorická mapa je nejnižší možná reprezentace prostředí (viz Obr. 3 a). Jedná se pouze o vhodně reprezentovaná a uchovaná senzorická data. Takovou senzorickou mapou je například mřížka obsazenosti. Prostředí je rozděleno na dílky uspořádané do mřížky. Každá buňka mřížky v sobě uchovává pravděpodobnost, že je prostor obsazený nějakou překážkou nebo je volný. Výhodou je snadná tvorba a možnost fúze dat přímo při tvorbě mapy. Nevýhodou je paměťová náročnost reprezentace. Navíc nemusí být taková reprezentace příliš vhodná pro další zpracování, jako je plánování trasy.

Geometrická mapa reprezentuje prostředí geometrickými primitivy, jako jsou přímky, polygony, kružnice, oblouky, spliny apod. Příklad geometrické mapy je uveden na Obr. 3 b. Takto vystavěná mapa má určitou míru abstrakce. Abstrahuje model od přílišných detailů. Tvorba takové mapy je už výpočetně náročnější, neboť je třeba najít takové geometrické primitivum, které nejlépe modeluje naměřená data. Je ovšem přívětivější pro další práci a pro plánování trajektorie. Také díky abstrakci není tak náročná na paměťový prostor.

Topologická mapa je ještě abstraktnější model prostředí než geometrická mapa (viz Obr. 3 c). Prostředí je modelováno grafem, ve kterém uzly reprezentují jednotlivá místa, která jsou pro robot nějakým způsobem význačná či zajímavá. Hrany uzlu reprezentují způsob, jak se robot přemístí z jednoho místa do druhého. Topologické mapy nemusí obsahovat žádnou geometrickou informaci. Typickou ukázkou topologické mapy je mapa linek pražského metra. Stavba takové mapy klade vysoké nároky na zpracování

senzorických dat, ve kterých je nutné rozpoznat význačná místa. Pro plánování je možné použít symbolické metody plánování nebo algoritmy z teorie grafů.

Symbolické mapy se používají pro komunikaci na nejvyšším stupni abstrakce (viz Obr. 3 d). Obsahují informace, které robot nemůže zjistit svými senzory, ale pomocí kterých lze zadávat příkazy v přirozeném jazyce.



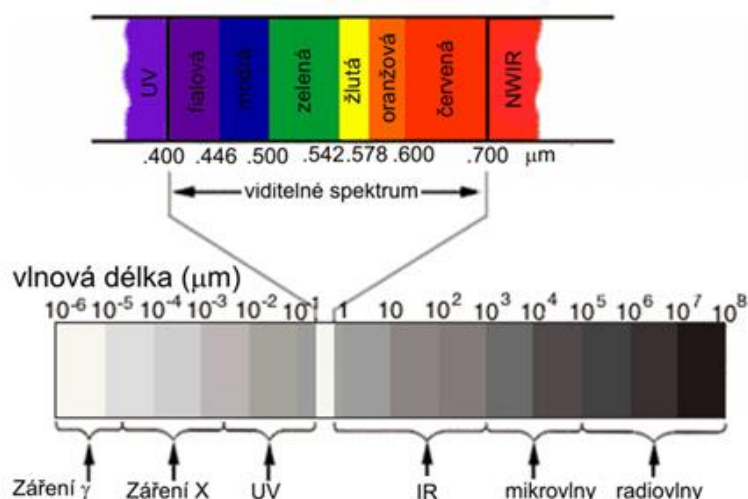
Obr. 3 Typy map v robotice a) senzorní mapa – mřížka obsazenosti, b) geometrická mapa – polygonální; c) topologická mapa; d) symbolická mapa [8]

3.2 MULTISPEKTRÁLNÍ MĚŘENÍ

Zdroji použitými v této podkapitole jsou [9] - [14]. Vzhledem k použití heterogenních senzorů, které snímají různé vlnové délky elektromagnetického záření, je v této podkapitole stručně popsáno světlo jako elektromagnetické vlnění.

Světlo je elektromagnetické vlnění a jeho zdrojem jsou přeměny energie v atomech a molekulách svítícího tělesa. Získá-li atom větší energii (např. při vyšší teplotě), může tuto energii vyzářit v podobě elektromagnetického vlnění. Elektromagnetické vlnění je charakterizované vlnovou délkou, která určuje jeho fyzikální vlastnosti.

Podle vlnové délky (resp. frekvence) elektromagnetického vlnění lze rozlišit několik druhů elektromagnetického záření. Přehledně jsou všechny druhy vyznačeny ve spektru elektromagnetického záření (viz Obr. 4). Hranice mezi jednotlivými druhy elektromagnetického záření není ostrá, přechody jsou plynulé nebo se oblasti jednotlivých druhů záření i překrývají.



Obr. 4 Spektrum elektromagnetického záření [9]

Podrobněji je popsáno infračervené záření, protože v rámci této práce je využíváno snímání termovizních a Time-of-Flight (TOF) kamer. Při pohlcování infračerveného záření probíhá tepelná výměna a ozářené těleso se zahřívá. Pro infračervené záření platí stejné zákony jako pro světlo. Infračervené záření vyzařují prakticky všechna tělesa, proto je lze použít mimo jiné i k pozorování ve tmě.

Infračervené záření se dále dělí na jednotlivá pásma. Existuje ovšem více přístupů k tomuto dělení. Podle ISO 20473:2007 [10] je infračervené záření rozdělené do 3 skupin:

- blízké infračervené záření (**NIR**) s vlnovou délkou 0,78–3 μm,
- střední infračervené záření (**MIR**) s vlnovou délkou 3–50 μm,

- vzdálené infračervené záření (**FIR**) s vlnovou délkou 50–1000 μm .

Další variantou je následující dělení do 5 skupin:

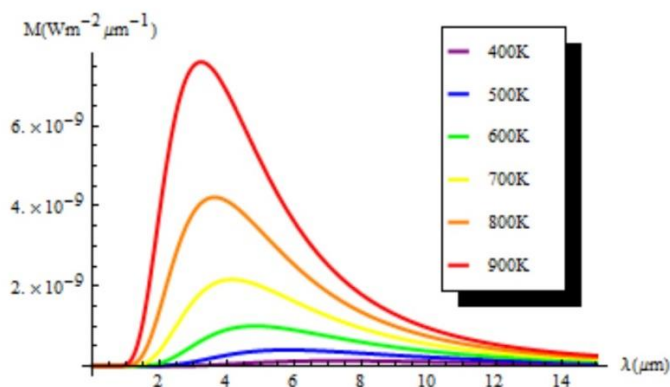
- **NIR** s vlnovou délkou 0,76–1,4 μm ,
- IR krátké vlnové délky (**SWIR**) s vlnovou délkou 1,4–3 μm ,
- IR střední vlnové délky (**MWIR**) s vlnovou délkou 3–8 μm ,
- IR dlouhé vlnové délky (**LWIR**) s vlnovou délkou 8–15 μm ,
- **FIR** s vlnovou délkou 15–1000 μm .

V další části této podkapitoly jsou popsány některé vybrané fyzikální zákony popisující elektromagnetické záření.

Tepelné záření absolutně černého tělesa je popsáno **Planckovým vyzařovacím zákonem** (viz Obr. 5). Tento zákon popisuje závislost spektrální intenzity záření absolutně černého tělesa při absolutní teplotě T a vlnové délce λ . Jelikož vyzařování absolutně černého tělesa není závislé na směru šíření, lze jeho spektrální intenzitu vyzařování $M(\lambda, T)$ vyjádřit vzorcem:

$$M(\lambda, T) = \pi L_{e,\lambda}(\lambda, T), \quad (1)$$

kde $L_{e,\lambda}(\lambda, T)$ je spektrální měrná zářivost.

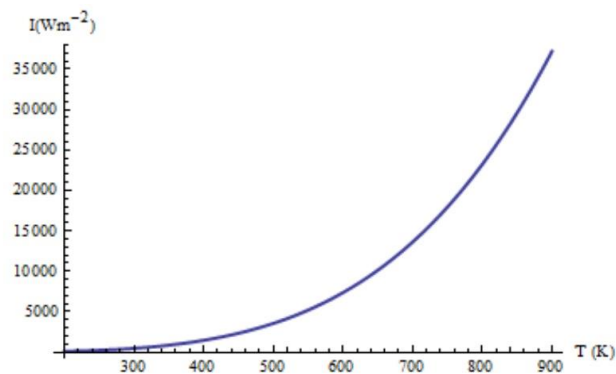


Obr. 5 Grafické vyjádření Planckova vyzařovacího zákona [11]

Stefan-Boltzmannův zákon (viz Obr. 6) popisuje celkový zářivý výkon (intenzitu záření) absolutně černého tělesa, jenž je vyzářen z jednotky plochy zdroje na všech vlnových délkách při dané teplotě:

$$I = \varepsilon \sigma T^4, \quad (2)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, T je termodynamická teplota a ε emisivita, která pro reálné těleso nabývá hodnot $0 < \varepsilon < 1$ a pro absolutně černé těleso $\varepsilon = 1$.



Obr. 6 Grafické vyjádření Stefan-Boltzmanova zákona [11]

Zářivý tok, který dopadá na povrch nějakého tělesa, se částečně odrazí, částečně prostupuje a částečně je absorbován tělesem. V optice jsou definovány **odrazivost** (reflexivita) povrchu ρ , **propustnost** (transmisivita) τ a **absorpci** α . Obecně platí:

$$\rho + \tau + \alpha = 1. \quad (3)$$

Emisivita je definovaná jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Emisivita tak určuje schopnost tělesa vyzařovat teplo. Je to bezrozměrná veličina. Emisivita obecně pro daný povrch není konstantní, ale je funkcí řady parametrů, např.: teploty objektu, vlnové délky, barvy povrchu apod.

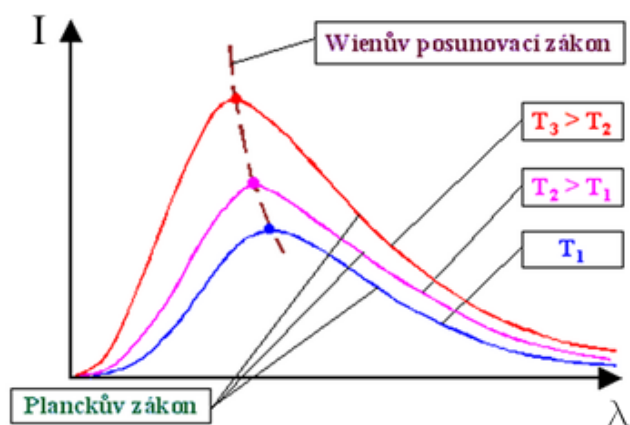
Pro neprůhledné těleso platí, že $\tau = 0$, takže absorpce látky lze určit jako $\alpha = 1 - \rho$. Za předpokladu, že záření tělesa je v termodynamické rovnováze s okolím, pak v souladu s Kirchhoffovým zákonem se spektrální emisivita rovná absorpci.

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) = 1 - \rho(\lambda, T). \quad (4)$$

Wienův posunovací zákon (viz Obr. 7) popisuje jev, kdy s rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T},$$

kde $b = 2,898 \text{ mm}\cdot\text{K}$ je Wienova konstanta a λ_{max} je vlnová délka odpovídající záření, které má při dané teplotě největší intenzitu.



Obr. 7 Grafické znázornění Wienova posunovacího zákona [12]

3.3 SNÍMAČE

V této podkapitole budou stručně popsány některé snímače použité pro sběr dat v mobilní robotice tj. CCD, termovizní, dálkoměrné kamery a terestrické laserové skenery.

3.3.1 CCD KAMERY

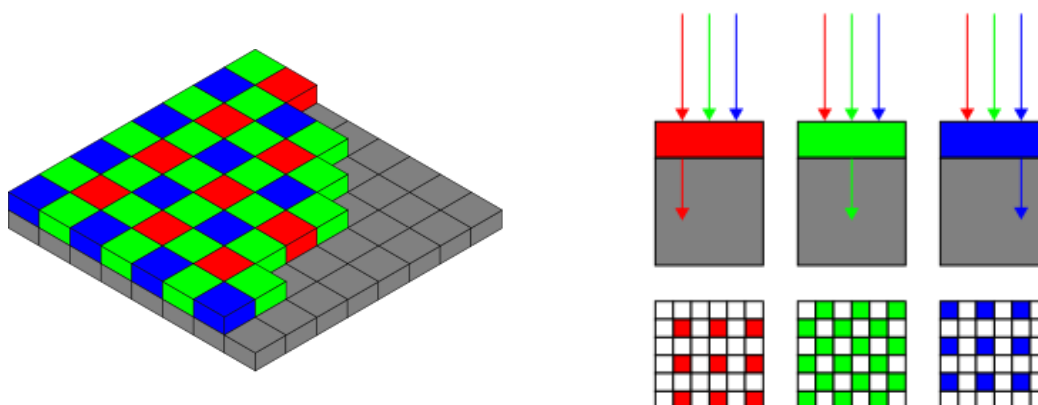
V této kapitole bylo čerpáno z [15]-[19]. Každý CCD čip je tvořen mnoha elementárními snímacími prvky (pixely) nepatrné velikosti (řádově mikrometry) vyznačujícími se aktivním fotoelektrickým jevem. Každý takový prvek převádí energii dopadajících fotonů na elektrický náboj, který je přímo úměrný intenzitě dopadajícího světla. Samotný princip CCD snímačů tedy využívá fotocitlivé prvky pro zaznamenání dopadající intenzity světla.

Primárně CCD čipy snímají černobíle. Abychom vytvořili barevný obraz, potřebujeme před pixely předřadit barevné filtry a tak snímat zvlášť ve třech barvách RGB modelu. CCD snímač je citlivý kromě viditelného spektra i na oblast NIR.

V principu lze filtry k vytvoření barevného obrazu použít dvěma způsoby:

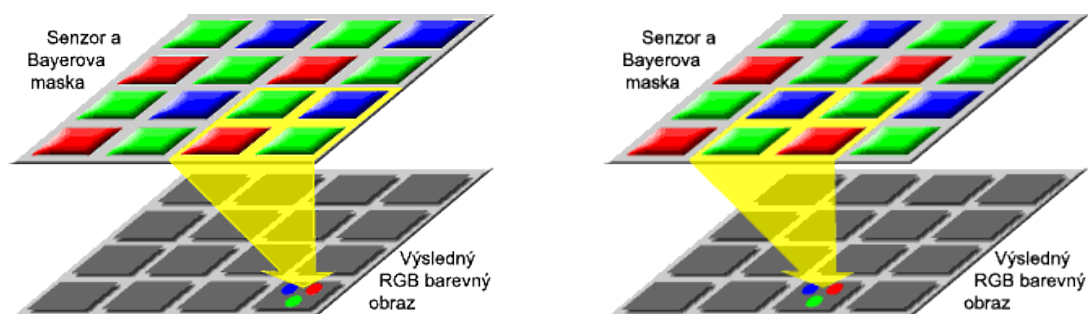
- exponovat samostatné snímky s monochromatickým čipem přes červený, zelený a modrý filtr,
- aplikovat filtry přímo na CCD pixely => barevný obraz je pak možné získat jedinou expozicí.

Dnešní barevné CCD čipy používají druhé varianty a tzv. **Bayerovy masky**. Průchod světla Bayerovou maskou a barevný vzor, který se zaznamená na CCD snímači, je zobrazen na Obr. 8. Bayer vycházel z faktu, že lidské oko je přibližně dvakrát více citlivé na světlo zelené barvy, než na světla zbývajících dvou barev (červené a zelené) RGB modelu. Proto Bayerova maska obsahuje pixely červené, zelené a modré barvy v poměru 1:2:1 (viz Obr. 8).



Obr. 8 Bayerova maska a její princip [16]

Získání plnohodnotné (tj. barevné) informace se pak provádí pomocí metod interpolace. Ze čtyř navzájem nejbližších pixelů senzoru se dopočítá jeden barevný pixel obrazu. Další barevný pixel obrazu se počítá z další čtveřice pixelů, která je oproti minulé posunuta o jeden pixel (viz Obr. 9). Každý pixel snímače (kromě těch na okrajích snímače) je tedy použit celkem čtyřikrát. Tato metoda odpovídá bilineární interpolaci. Běžně se používá i bikubická interpolace (výpočet se provádí na základě 16 pixelů rozložených v matici 4 x 4 pixely) nebo další metody interpolace.



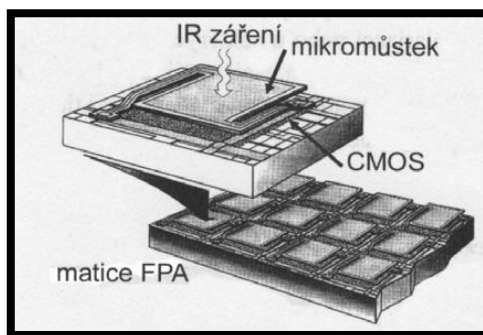
Obr. 9 Postup bilineární interpolace plnohodnotné barevné informace [17]

Existuje i mnoho modifikací Bayerova filtru jako například RGBE filtr, kde jeden zelený senzor je zaměněn za senzor smaragdové barvy (emerald), CYGM filtr, který je variací na Bayerův filtr se zachováním jednoho zeleného filtru a použitím barev CMY modelu, RGBW filtr, kde je jeden zelený senzor zaměněn za jeden panchromatický a další.

3.3.2 TERMOVIZNÍ KAMERY

V této podkapitole bylo čerpáno ze zdrojů [11], [20]-[22]. Termovizní kamera je přístroj, který nekontaktním způsobem snímá vyzařované IR záření a transformuje lidským okem neviditelný reliéf teplotního pole na povrchu snímaného objektu na viditelný obraz.

Vlastní měření záření emitovaného povrchem objektu se provádí pomocí **bolometru**. Bolometry jsou senzory pro bezdotykové měření teploty pracující na principu **pyrometrie**, tzn. měření celkového vyzářeného tepelného výkonu prostřednictvím IR záření.



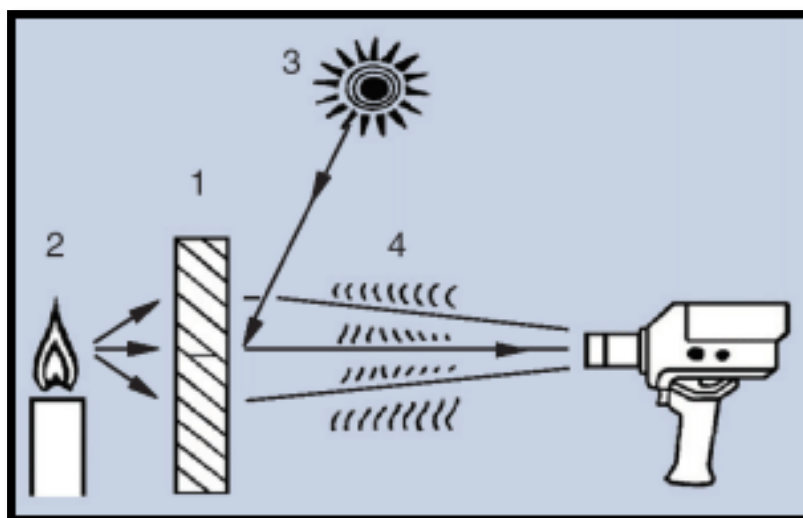
Obr. 10 Matice mikrobolometrů (FPA - Focal Plane Array) [22]

V moderních termovizních kamerách se využívá struktura **mikrobolometrového pole**. Jedná se o větší množství bolometrů na jednom senzoru vytvářející obdélníkovou (čtvercovou) strukturu – 2D pole. Dané maticové uspořádání reprezentuje množství pixelů ve výsledném termografickém snímku.

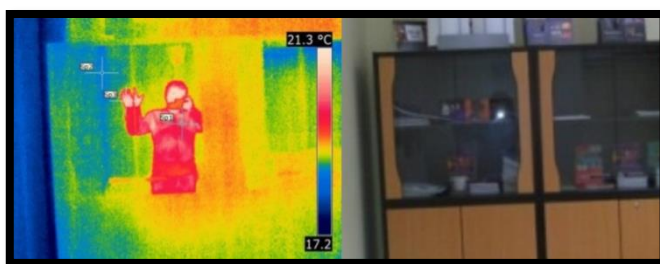
Detekované záření bývá v rozmezí vlnových délek od $0,4 \mu\text{m}$ do $25 \mu\text{m}$, přičemž do hodnoty $0,78 \mu\text{m}$ se jedná o viditelné spektrum. Pokud převedeme vlnové délky na jim odpovídající teploty, dostaneme přibližný teplotní rozsah od -40°C do $10\,000^\circ\text{C}$. V zásadě v oblasti viditelného spektra a v oblasti blízké infračerveného spektra (do $3 \mu\text{m}$) nedochází k detekci teplot z důvodů rušení aplikacemi pracujícími například s infračerveným přenosem dat. K detekci běžných teplot se využívá atmosférických infračervených oken, tj. pásem $3 \mu\text{m}$ až $5 \mu\text{m}$ nebo $8 \mu\text{m}$ až $14 \mu\text{m}$.

Hlavní zdroje chyb při měření teploty bezdotykovými teploměry jsou schematicky znázorněny na Obr. 11:

- charakter povrchu měřeného objektu (1 viz Obr. 11) může být velmi rozdílný (lesklý, drsný, barevný, černý nebo také průhledný), přičemž tyto vlastnosti se při měření uplatňují rozdílně,
- za průhledným měřeným objektem se může v některých případech nacházet zdroj rušivého záření (2 viz Obr. 11),
- významným zdrojem rušení může být odraz záření pocházejícího z rušivého zdroje např. sluneční záření (3 viz Obr. 11) nebo odražená teplota lidského těla (viz obr Obr. 12)
- prostředí (4 viz Obr. 11) mezi měřeným povrchem a termovizní kamerou může mít různou prostupnost pro IR záření (např. vodní pára, prach aj.)



Obr. 11 Hlavní zdroje chyb při bezdotykovém měření teploty [22]



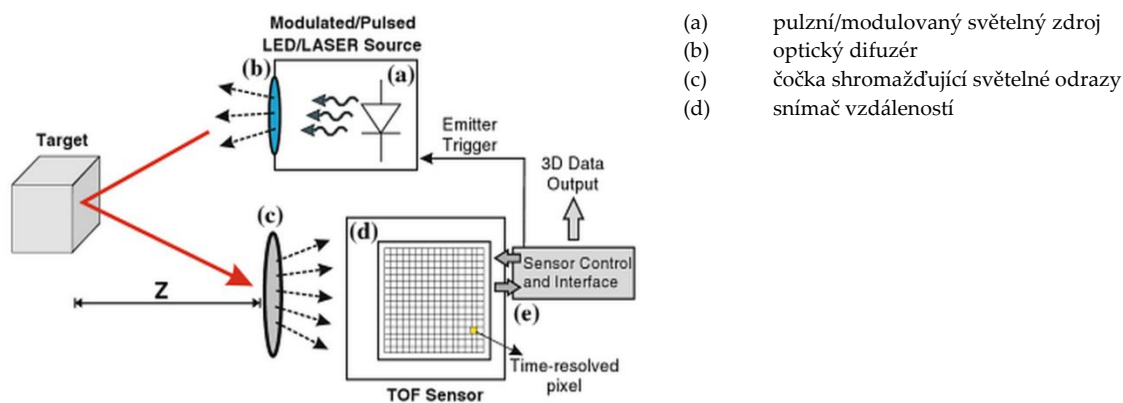
Obr. 12 Příklad zdánlivé odražené teploty: vlevo - termovizní snímek, vpravo – foto [11]

3.3.3 TOF KAMERY (RANGE CAMERAS)

V této podkapitole bylo čerpáno z následujících zdrojů [23] – [29]. TOF kamery jsou novou generací aktivních kamer vzniklou spojením dvou odlišných technologií. Integrují měření vzdáleností se zpracováním obrazu. Měření vzdáleností je založeno na principu měření tranzitního času (TOF – time-of-flight). Vzdálenosti jsou určeny současně pro každý pixel 2D pole senzoru TOF kamery. Hlavní výhodou dálkoměrných kamer proti laserovým skenerům je nepřítomnost mechanického skenovacího mechanismu a proti digitálním kamerám potřeba pouze jediného obrazu pro získání úplných 3D dat celé snímané scény – data jsou tedy získána prakticky v jednom časovém okamžiku. Nevýhodou TOF kamer může být charakteristické nízké rozlišení senzoru (nízký počet pixelů) s přesností měření vzdáleností v řádech centimetrů.

Typický TOF měřicí systém je zobrazen na Obr. 13 a skládá se z několika bloků:

- pulzní/modulovaný světelný zdroj, většinou založený na LED zdroji v infračervené části spektra,
- optický difuzér rozptylující emitované světlo na scénu,
- čočka (objektiv) zaměřená na shromáždění světelných odrazů od cíle. Optická propust přesně naladěná na frekvenci zdroje, která potlačuje šum pozadí,
- TOF senzor složený z pole fotodetektorů (pixelů) schopných měření přímým nebo nepřímým způsobem.

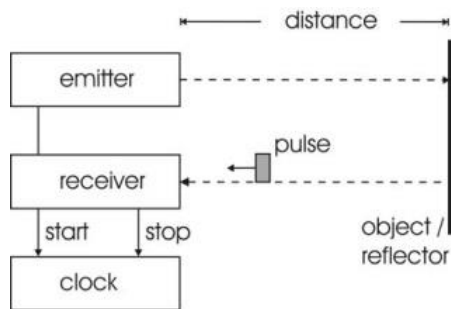


Obr. 13 Princip měření TOF kamerou [23]

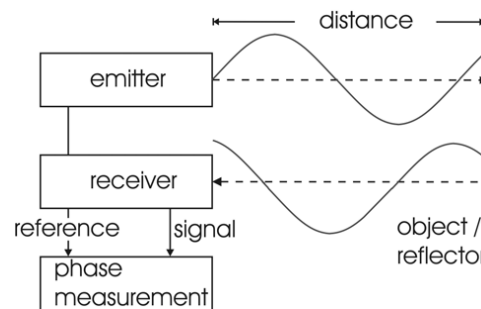
Existují dva hlavní přístupy pro technologie TOF kamer (Obr. 14, Obr. 15). První technologie používá přímé měření doby lety světelného pulzu (D-TOF), druhá technologie používá amplitudově modulované světlo a získává informace o vzdálenosti z fázových posunů mezi referenčním a odraženým signálem (I-TOF). Vzdálenost cíle d je v obou případech určena z následující rovnice:

$$d = \frac{\tau_{TOF}}{2} c, \quad (5)$$

kde $c = 2.9979 \times 10^8$ m/s je rychlost světla ve vakuu a τ_{TOF} doba letu.



Obr. 14 Přímé měření doby lety (D-TOF) [26]



Obr. 15 Nepřímé měření doby lety (I-TOF) [26]

Pro D-TOF jsou nutné velice přesné hodiny. Pokud chceme získat přesnost měřené vzdálenosti několik milimetrů, musí být hodiny schopné měřit s přesností v řádech pikosekund.

Pro I-TOF s měřením fázového posunu nepotřebujeme tak přesné hodiny. Dále bude popsán případ amplitudové modulace sinusoidy. Odražené modulované světlo je demodulováno pomocí čtyř bodů, které jsou odečteny na přijaté vlně (Obr. 16) a porovnáváno s vyslanou vlnou. Ze čtyř měření $c(\tau_1)$, $c(\tau_2)$, $c(\tau_3)$, $c(\tau_4)$ je vypočítán fázový posun φ , offset B a amplituda A následovně:

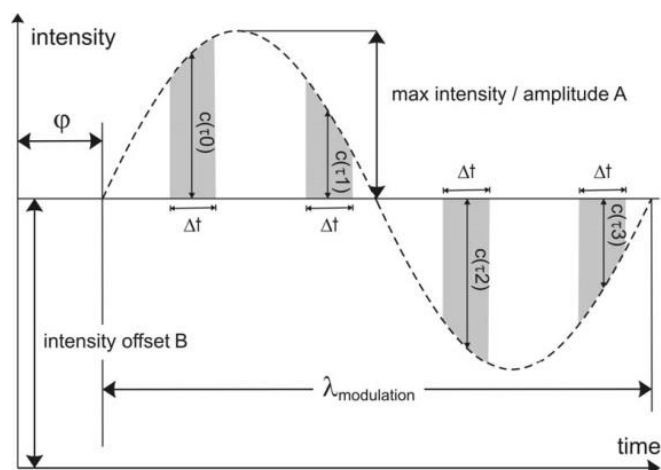
$$B = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_2) + c(\tau_3)}{4}, \quad (6)$$

$$A = \frac{\sqrt{(c(\tau_0) - c(\tau_2))^2 + (c(\tau_1) - c(\tau_3))^2}}{2}, \quad (7)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{c(\tau_0) - c(\tau_2)}{c(\tau_1) - c(\tau_3)}\right). \quad (8)$$

Vzdálenost mezi senzorem a měřeným objektem je vypočítána takto:

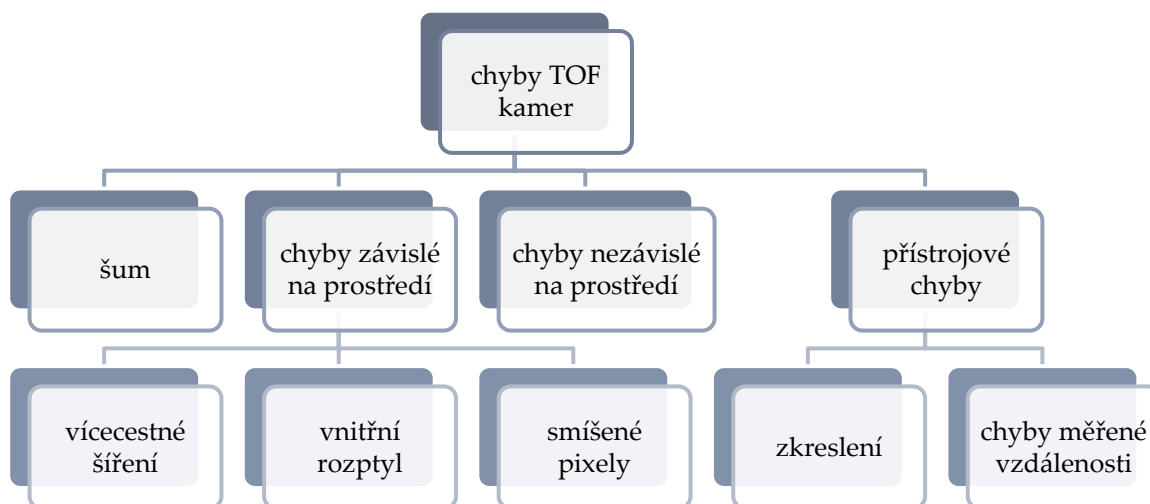
$$d = \frac{\lambda_{mod}}{2} \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (9)$$



Obr. 16 princip měření vzdáleností z fázového posunu [26]

Přesnost dálkoměrných kamer je ovlivněna mnoha faktory. V [27] jsou chyby dálkoměrných kamer rozděleny následovně (Obr. 17):

- šum, který lze odstranit pomocí časového a prostorového filtrování [28],
- chyby závislé na prostředí, tj. odchylky způsobené vnější teplotou, multi-path odrazy, vnitřní rozptyl (scattering) a smíšené pixely [29],
- chyby nezávislé na prostředí, tj. provoz kamery (integrační čas, čas zahřátí, čas zapojení),
- přístrojové systematické chyby způsobené některými komponenty a montážními chybami (radiální a tangenciální zkreslení) a chyby měřené vzdálenosti (offset, měřítko, periodické chyby, posunutí, zpoždění).



Obr. 17 Rozdělení chyb TOF kamer podle [27]

Existují i jiná rozdělení chyb TOF kamery např. podle [30] je přesnost ovlivněna mnoha faktory vnitřních efektů a okolní scény. Mezi chyby způsobené vnitřními efekty patří:

- nedokonalost pole LED diod (nehomogenita ve vyzařovaném NIR poli);
- nepřesné parametry objektivu a nutnost korekce měřené vzdálenosti;
- šum (kvantizační šum, „reset noise“ šum, elektronický šum, „photon shot“ šum),
- chyba způsobená vnitřní teplotou.

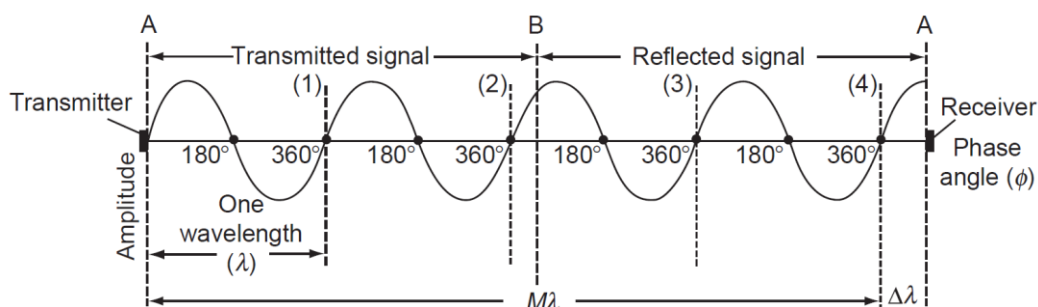
Chyby okolní scény jsou způsobeny:

- různou odrazivostí, polohou, barvou, rozptylem,
- vícenásobnými odrazy,
- okolní teplotou.

3.3.4 TERESTRICKÉ LASEROVÉ SKENERY

V této podkapitole bylo čerpáno z [31] - [34]. Laserové skenery umožňují bezkontaktní určování 3D prostorových souřadnic. V současné době se většinou používají skenery založené na prostorové polární metodě. Pro určení 3D souřadnic je použito současné měření přidružených úhlů a měření vzdáleností. Laserový dálkoměr používaný pro určení vzdálenosti funguje stejně jako u TOF kamer podle jednoho z následujících principů:

- **pulsní měření:** měření doby letu (tranzitního času) velmi krátkého, ale intenzivní pulsu laserového záření,
- **měření fázového posunu:** vzdálenost je určena z fázového rozdílu mezi vyslanou a přijatou vlnou.



Obr. 18 Porovnání fáze mezi vyslanou a přijatou vlnou [31]

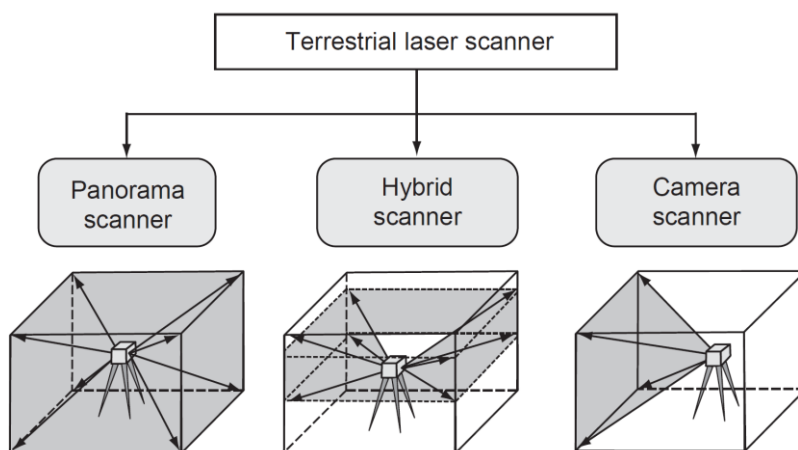
Pro fázové měření je vzdálenost d vypočtena následovně:

$$d = \frac{M\lambda + \Delta\lambda}{2}, \quad (10)$$

kde M je celý počet vln, $\Delta\lambda$ je fázový doměrek λ .

Laserové skenery lze klasifikovat také podle zorného pole resp. pokrytí skenované oblasti (Obr. 19). Skenery podle [34] rozdělujeme na:

- **panoramatické skenery:** Měření pokrývá celých 360° ve vodorovné rovině procházející středem přístroje a minimální vertikální zorné pole je 180° , ale i 270° a víc není neobvyklé.
- **hybridní skenery:** Rozsah skenování bývá neomezený okolo jedné osy rotace, většinou bývá plný rozsah měření kolem vertikální osy (horizontální zorný úhel 360°) a omezený rozsah vertikálního zorného pole, typicky na $50 - 60^\circ$. Data jsou získávána v rámci vertikálního zorného pole těmito metodami: rozmítání svazku pomocí rotujícího zrcadla, pomocí jednoho nebo více oscilujících zrcadel anebo polem skládajícím se z více laserů s daným vertikálním rozstupem (např. laserové skenery Velodyne).
- **kamerové skenery:** Skenery mají limitovaný úhlový rozsah uvnitř specificky definovaného zorného pole, typicky $40^\circ \times 40^\circ$.



Obr. 19 Klasifikace skenerů podle velikosti zorného pole [31]

Pokud budeme srovnávat vlastnosti terestrických laserových skenerů s vlastnostmi TOF kamer, pak mezi výhody skenerů patří především větší dosah, lepší přesnost a rozlišení. Mezi největší výhody TOF kamery patří rychlost získání kompletního 3D snímku okolí a hlavními nevýhodami je krátký dosah pro měření bez ambiguit a nízké rozlišení. Každé z těchto zařízení je s výhodou využitelné pro jiné aplikace.

3.4 ALGORITMY

Tato podkapitola obsahuje popis algoritmů, které budou použité v experimentální části práce. Je zde popsán algoritmus použitý pro extrakci hran, dále je popsán matematický model kalibrace kamery a na závěr je uveden popis podmínkového vyrovnání s neznámými.

3.4.1 EXTRAKCE HRAN A ROHŮ

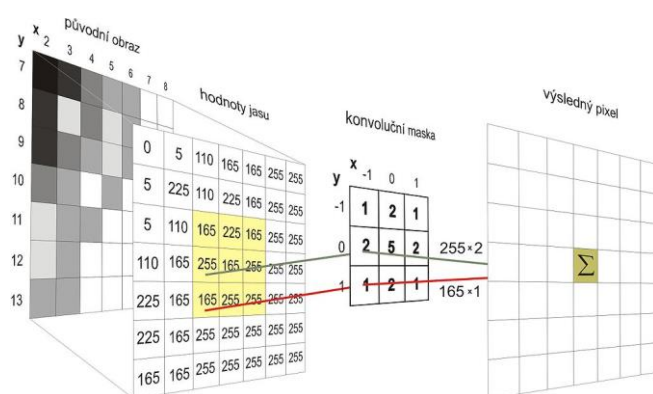
V této podkapitole jsou použity následující zdroje [35]-[41]. Je zde popsána metoda, která je v následující části práce použita pro extrakci rohů šachovnicové kalibrační mřížky. Většina toolboxů pro kalibraci kamer vychází z Bouguet's Camera calibration toolbox [35]. Tento toolbox bohužel používá manuální označování rohů kalibrační mřížky, nicméně autoři dalších kalibračních toolboxů se extrakci rohů mřížky snažili automatizovat jako např. OCamCalib: Omnidirectional Camera Calibration Toolbox for Matlab [36].

Před popisem algoritmu pro extrakci rohových bodů kalibrační mřížky budou popsány pojmy diskrétní konvoluce a morfologické transformace, které jsou použity pro úpravy obrazu.

Konvoluce je matematický operátor zpracovávající dvě funkce. Pro zpracování diskrétní jasové funkce je použita diskrétní konvoluce, viz následující rovnice:

$$(f * h)(x, y) = \sum_{i=-k}^{i=k} \sum_{j=-k}^{j=k} h(i, j) f(x - i, y - j), \quad (11)$$

kde $(f * h)(x, y)$ značí intenzitu výsledného pixelu na pozici (x, y) . $f(x, y)$ je intenzita vstupního snímku a $h(i, j)$ je intenzita bodu masky na pozici (i, j) . V případě diskrétní konvoluce lze jádro chápat jako tabulku (konvoluční masku), kterou položíme na příslušné místo obrazu. Každý pixel překrytý tabulkou vynásobíme koeficientem v příslušné buňce a provedeme součet všech těchto hodnot. Tím dostaneme jeden nový pixel (viz Obr. 20).

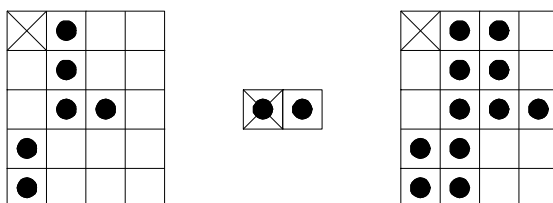


Obr. 20 Princip dvourozměrné konvoluce [37]

Morfologická transformace je dána relací obrazu (bodové množiny X) s jinou, obvykle menší, bodovou množinou B , která je nazývána strukturní element. Strukturní element B je vztažen k "lokálnímu" počátku, tzv. reprezentativnímu bodu. Základními transformacemi matematické morfologie jsou dilatace, eroze, otevření a uzavření. Dále jsou v textu použity matematické operátory \oplus pro Minkowského součet a \ominus pro Minkowského rozdíl.

Dilatace skládá body dvou množin pomocí vektorového součtu (též Minkowského množinový součet), např. $(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$. Dilatace množiny X a množiny B je bodovou množinou všech možných vektorových součtů pro dvojice pixelů, vždy pro jeden z množiny X a jeden z množiny B :

$$X \oplus B = \{p \in E^2: p = x + b, x \in X, b \in B\}. \quad (12)$$



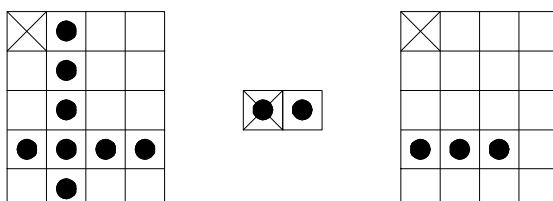
Obr. 21 Dilatace - vlevo bodová množina X , uprostřed strukturní element, vpravo dilatovaná množina [38]

Dilatace se používá k zaplnění malých děr a úzkých zálivů v objektech. Dilatace zvětší původní velikost objektu. Má-li být původní rozměr zachován, kombinuje se dilatace s erozí.

Eroze je duální operací k dilataci. Ani dilatace ani eroze nejsou invertovatelné. Eroze skládá dvě množiny následovně:

$$X \ominus B = \{p \in E^2: p = x + b, x \in X \text{ pro každé } b \in B\} \quad (13)$$

Z tohoto vztahu plyne, že pro každý bod obrazu p se ověřuje, zda pro všechna možná $p + b$ leží výsledek v X . Pokud ano, zapíše se v reprezentativním bodě do výsledného obrazu 1 a v opačném případě 0.



Obr. 22 Eroze - vlevo bodová množina X , uprostřed strukturní element, vpravo erodovaná množina [38]

Objekty menší než strukturální element vymizí (např. čáry tloušťky 1). Eroze se používá ke zjednodušení struktury objektů (rozložení objektu na jednodušší části).

Otevření je morfologická transformace, která vznikne na základě eroze následované dilatací. Otevření množiny bodů X strukturálním elementem B se označuje $X \circ B$ a je definováno jako:

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B. \quad (14)$$

Uzavření je morfologická transformace, která vznikne na základě dilatace následované erozí. Uzavření množiny bodů X strukturálním elementem B se označuje $X \bullet B$ a je definováno jako:

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B. \quad (15)$$

Otevření a uzavření izotropickým strukturálním elementem (stejně vlastnosti pro různé směry) se používá pro odstranění detailů v obraze, které jsou menší než strukturální element. Celkový tvar objektu se tak neporuší. Otevření oddělí objekty spojené úzkou šíjí, a tak zjednoduší strukturu objektů. Uzavření spojí objekty, které jsou blízko u sebe, zaplní malé díry a vyhladí obrys tím, že zaplní úzké zálivy. Pojmy "malý", "blízký" a "úzký" jsou relativní vzhledem k velikosti strukturálního elementu.

Dále následuje popis dvou algoritmů používaných pro extrakci rohových bodů kalibračních mřížek a to Vezhnevets algoritmu [40] a jeho vylepšené varianty [41].

Vezhnevets algoritmus

Tento algoritmus je využíván v Enhanced Matlab Camera Calibration Toolbox [40]. Algoritmus je použitelný pouze pro nesymetrické kalibrační objekty. Vstupními daty je černobílý obraz šachovnice o dané velikosti. Detekce rohů kalibračního obrazce je popsána v následujících krocích:

- 1) Adaptivní prahování. Binární prahování je ve většině případů vhodné pro oddělení bílé a černé barvy. Obraz je binarizován lokálně v závislosti na velikosti dané masky. Je možné použít dvě konvoluční jádra (průměr, Gaussův filtr).
- 2) Eroze pomocí konvolučního jádra 3×3 (viz Obr. 23 vlevo). Tímto krokem je možné oddělit čtverce šachovnice a získat sadu černých čtyřúhelníků. Kontury těchto čtyřúhelníků jsou pak snadno nalezeny. Pokud není šachovnicový vzor nalezen, lze předpokládat, že čtverce šachovnice jsou zobrazeny stále společně. Proto je eroze použita znovu.

- 3) Generování čtyřúhelníků: jsou nalezeny uzavřené obrysy a do nich vloženy čtyřúhelníky.
- 4) Spojení čtyřúhelníků: čtyřúhelníky jsou spojeny podle následující heuristiky:
 - Pro všechny rohy každého nalezeného čtyřúhelníku je spočtena vzdálenost ke každému rohu každého dalšího čtyřúhelníku. Je uložena nejmenší vzdálenost s rohem a ID čtyřúhelníku.
 - Kontrola aby vzdálenost byla menší, než je nejkratší délka strany obou čtyřúhelníků.
 - Pokud jsou obě předchozí podmínky splněny, je výsledná pozice rohu určena jako aritmetický průměr pozice extrahovaných rohů čtyřúhelníků.
- 5) Ze všech zpracování eroze je vybrán vzor s největším počtem detekovaných rohů.

0	1	0
1	1	1
0	1	0

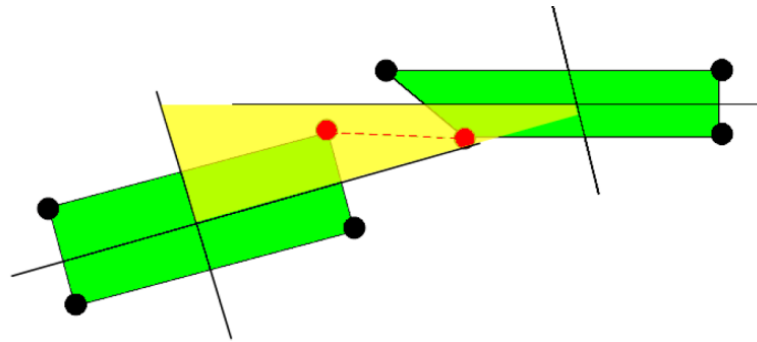
1	0	1
0	1	0
1	0	1

Obr. 23 Vlevo - 3 x 3 „křížové“ konvoluční jádro, vpravo - 3 x 3 „rect“ konvoluční jádro [41]

Vylepšený Vezhnevets algoritmus

Rufti a kol. [41] použili pro OCamCalib: Omnidirectional Camera Calibration Toolbox for Matlab [36] vylepšený Vezhnevets algoritmus, který se od původního algoritmu liší v následujících bodech.

- 1) Použity dvě varianty konvolučního jádra pro erozi viz Obr. 23.
- 2) Použita jiná heuristika:
 - První krok analogicky s Vezhnevets algoritmem, ovšem výsledkem je pouze dvojice kandidátů.
 - Pro každou dvojici kandidátů jsou nakresleny dvě přímky procházející středy stran čtyřúhelníků, viz Obr. 24.
 - Pokud kandidát na roh a zdrojový roh jsou na stejné straně každé ze 4 přímek, potom jsou rohy úspěšně spárovány.
- 3) Použita jiná limitní hodnota pro posuzování vzdáleností, která bere v úvahu i vliv eroze. Důležité zejména pro kamery s malým rozlišením.
- 4) Vzhledem k různé velikosti čtyřúhelníků jsou čtyřúhelníky detekovány při různém počtu erozí a ne pouze v jedné určité iteraci eroze, proto je vzor, ve kterém je nalezeno nejvíce čtyřúhelníků brán jako referenční a jsou do něj doplněny všechny dříve nalezené čtyřúhelníky.



Obr. 24 Heuristický postup pro spárování rohů: Pokud kandidáti na roh (červené tečky) leží na stejné straně 4 přímk (tj. uvnitř žluté plochy), je spárování rohů úspěšné. [41]

3.4.2 KALIBRACE KAMERY - URČENÍ PRVKŮ VNITŘNÍ A VNĚJŠÍ ORIENTACE

V této podkapitole jsou použity zdroje [42]-[48]. Na úvod této podkapitoly bude popsán model dírkové kamery. Stěžejní částí této podkapitoly je detailní popis matematického modelu kalibrace kamery při použití 2D kalibrační desky včetně určení zkreslení objektivu.

Snímáme-li libovolnou scénu pomocí kamery, pak 3D pozice objektů je promítána do roviny obrazu kamery. Centrální projekce je základním modelem tvorby obrazu v kameře. Geometricky je v souladu s modelem zobrazení pomocí dírkové kamery a reálné objektivy se centrální projekci obvykle snaží co nejvíce přiblížit.

Dále je popsán matematický model centrální projekce běžně používaný v počítačovém vidění, nikoliv ve fotogrammetrii. I když počítačové vidění původně vycházelo z fotogrammetrie, v současné době je přístup mírně odlišný.

Nechť $m = [u, v]^T$ jsou 2D snímkové souřadnice bodu a $M = [X, Y, Z]^T$ jsou 3D objektové souřadnice bodu. Homogenní snímkové souřadnice \tilde{m} a homogenní objektové souřadnice \tilde{M} získáme rozšířením vektorů o další člen rovný jedné, tj. $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$ a $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$. Obraz m objektového bodu M je určen průsečíkem optického paprsku procházejícím bodem M a projekčním centrem C s rovinou obrazu. Body m, M, C jsou kolineární. Vztah mezi objektovým bodem M a jeho obrazem m je dán následující rovnicí:

$$s\tilde{m} = A[R \ t]\tilde{M} \equiv P\tilde{M}, \quad (16)$$

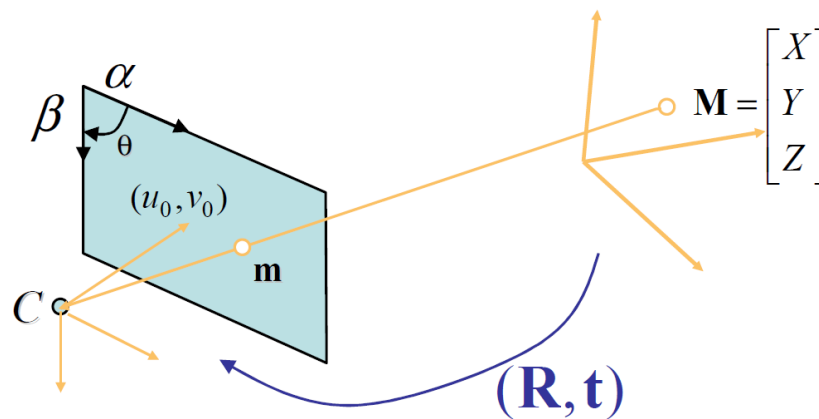
$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

kde s je měřítkový faktor, A matice prvků vnitřní orientace, prvky vnější orientace jsou obsaženy v matici rotace R a v matici translace t . u_0, v_0 jsou souřadnice hlavního snímkového bodu v pixelech, α, β jsou měřítkové faktory snímku v ose u a v .

Měřítkové faktory $\alpha = fm_x, \beta = fm_y$ reprezentují ohniskovou vzdálenost f v pixelech ve směru os x, y , kde m_x, m_y značí počet pixelů na jednotkovou vzdálenost snímkových souřadnic ve směru os x, y .

Parametr γ popisuje zkosení os snímku. Matice $P_{[3 \times 4]}$ se nazývá projekční matice kamery a jak vyplývá z rovnice (16), zahrnuje prvky vnitřní i vnější orientace. Na Obr. 25 je úhel mezi osami snímku označen θ , zkosení je podle něj vypočteno následovně: $\gamma = \cot \theta$. Pokud jsou pixely pravoúhlé, platí $\theta = 90^\circ$ a $\gamma = 0$.

Úkolem kalibrace je určit parametry transformace mezi objektem v 3D prostoru a 2D snímkem získaným kamerou. Transformační parametry musí být určitelné pouze z vizuální informace, tj. ze snímků.



Obr. 25 Model dírkové kamery [42]

Metody kalibrace lze podle kalibračního objektu rozdělit do 4 kategorií:

- kalibrace využívající 3D objekt,
- kalibrace využívající 2D rovinu,
- kalibrace využívající 1D linii,
- auto-kalibrace – bez využití speciálních kalibračních objektů.

Dále bude popsán pouze model kalibrace s použitím 2D roviny. Ostatní matematické modely jsou podrobně popsány v [42]. Pro získání kalibračních snímků je nutné buď pohybovat s kamerou a snímkovat staticky umístěný kalibrační objekt nebo naopak snímkovat statickou kamerou pohybuující se kalibrační objekt, je možná i kombinace těchto přístupů. 3D objektové souřadnice kalibračního pole označíme $[X, Y, Z]^T$ a 2D snímkové souřadnice $[u, v]^T$. Projekční matice kamery $P_{[3 \times 4]}$ dle předchozího textu splňuje rovnici $[u, v]^T = P[X, Y, Z]^T$ a plní analogickou funkci jako matice homografie $H_{[3 \times 3]}$ v 2D-2D případě. Jediný rozdíl je v dimenzích matic $P_{[3 \times 4]}$ a $H_{[3 \times 3]}$. Předpokládejme, že kalibrační objekt je rovina s objektovými souřadnicemi $Z = 0$ a

označme i -tý sloupec rotační matice R jako r_i , poté je možné zjednodušit rovnici (16) následovně:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Označme i -tý sloupec matice homografie H jako h_i , poté $H = [h_1 \ h_2 \ h_3]$. Pokud tento tvar dosadíme do rovnice (18) dostaneme rovnici:

$$[h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda A [r_1 \ r_2 \ t], \quad (19)$$

kde λ je libovolné měřítko. Vzhledem k faktu, že r_1 a r_2 jsou ortonormální, dostaneme dvě základní podmínky pro prvky vnitřní orientace dané homografií:

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0, \quad (20)$$

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2. \quad (21)$$

Homografie má 8 stupňů volnosti, z předchozích rovnic můžeme určit 6 prvků vnější orientace (3 rotace, 3 translace) a pouze 2 prvky vnitřní orientace.

Výpočet prvků orientace kamery začíná analytickým řešením, po kterém následuje nelineární optimalizace pomocí metody maximální věrohodnosti. Označme:

$$B = (A^{-1})^T A^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\lambda}{\alpha^2 \beta} & \frac{u_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{u_0}{\beta^2} \\ \frac{u_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{u_0}{\beta^2} & \frac{(v_0 - u_0 \beta)^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Matice B je symetrická a definuje následující 6D vektor $b = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T$. Označme i -tý sloupcový vektor matice H $h_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$. Získáme rovnici:

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b, \quad (23)$$

kde $v_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T$. Poté je možné 2 základní podmínky dané homografií přepsat na 2 homogenní rovnice následovně:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0. \quad (24)$$

Pokud je změřeno n snímků kalibrační roviny, použijeme následující rovnici:

$$Vb = 0, \quad (25)$$

kde V je matice dimenze $2n \times 6$. Pokud platí $n \geq 3$, dostaneme jediné řešení pro vektor b až na měřítkový faktor. Řešením rovnice (25) je vlastní vektor $V^T V$, který patří nejmenšímu vlastnímu číslu. Jakmile je určen vektor b , lze vypočítat všechny prvky vnitřní orientace kamery z matice $B = \lambda A^T A$, viz rovnice (26)-(31):

$$v_0 = \frac{B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2} \quad (26)$$

$$\lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})]/B_{11} \quad (27)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda}{B_{11}}} \quad (28)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\lambda B_{11}}{(B_{11}B_{22} - B_{12}^2)}} \quad (29)$$

$$\gamma = -\frac{B_{12}\alpha^2\beta}{\lambda} \quad (30)$$

$$u_0 = \frac{\gamma v_0}{\alpha} - \frac{B_{13}\alpha^2}{\lambda} \quad (31)$$

Když známe matici A , prvky vnější orientace určíme podle rovnice následovně:

$$r_1 = \lambda A^{-1}h_1, \quad r_2 = \lambda A^{-1}h_2, \quad r_3 = r_1 \times r_2, \quad t = \lambda A^{-1}h_3, \quad (32)$$

kde $\lambda = 1/\|A^{-1}h_1\| = 1/\|A^{-1}h_2\|$. Vzhledem k šumu v datech nebude takto vypočtená matice rotace $R = [r_1, r_2, r_3]$ plně splňovat vlastnosti rotační matice. Z tohoto důvodu musí být matice rotace získána přes rozklad singulárních hodnot (SVD – singular value decomposition). Výše uvedené řešení minimalizuje algebraickou vzdálenost, která nemá žádný fyzikální význam. Pro přesnější výsledky se používá metoda maximální věrohodnosti.

Je dáno n snímků modelové roviny a na nich je m bodů nacházejících se na této rovině. Předpokládejme, že souřadnice snímkových bodů jsou poškozeny nezávislým a identicky šířeným šumem. Odhad pomocí metody maximální věrohodnosti minimalizuje následující funkci:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)\|^2, \quad (33)$$

kde $\hat{m}(A, R_i, t_i, M_j)$ je projekce bodu M_j na snímku i podle rovnice (18). Rotace R je vyjádřena vektorem 3 parametrů, označených r , které jsou rovnoběžné (odpovídají rotačním osám a jejich velikost je rovna rotačním úhlům. Matematický vztah mezi R a r je dán Rodriguesovou formulí [43]. Minimalizace rovnice (33) je řešena Levenberg-Marquartovým algoritmem, který vyžaduje počáteční odhad parametrů $A, \{R_i, t_i | i = 1, \dots, n\}$, který je možné získat z analytického řešení úlohy.

Stolní kamery mají obvykle viditelné zkreslení objektivu, hlavně radiální komponenty. Odhad zkreslení může být zahrnut do minimalizace rovnice (33).

Zkreslení objektivu může být vyjádřeno jako mocninná řada radiální vzdálenosti $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ následovně:

$$\begin{aligned} \delta_x &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy](1 + p_3 r^2 + \dots), \\ \delta_y &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)](1 + p_3 r^2 + \dots), \end{aligned} \quad (34)$$

kde δ_x, δ_y označuje zkreslení, k_i jsou koeficienty radiálního zkreslení, p_i jsou koeficienty tangenciálního zkreslení.

Podle [44]-[46] funkci zkreslení zcela dominují radiální komponenty a to zejména první členy. Bylo také dokázáno [45], [46], že používání většího množství koeficientů výsledky nezpřesní, ale spíše vede k numerické nestabilitě výpočtu.

Vztah mezi zkreslenými snímkovými souřadnicemi (\check{x}, \check{y}) a ideálními snímkovými souřadnicemi (x, y) je následující:

$$f\check{x} = x + \delta_x, \quad f\check{y} = y + \delta_y. \quad (35)$$

Kalibrace kamery zahrnující i zkreslení stejně jak již popsaná metoda minimalizuje vzdálenost mezi snímkovým bodem a jeho predikovanou polohou, viz rovnice (36).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - \hat{m}(A, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, R_i, t_i, M_j)\|^2. \quad (36)$$

3.4.3 PODMÍNKOVÉ VYROVNÁNÍ S NEZNÁMÝMI

V této podkapitole bude popsán postup pro podmínkové vyrovnání s neznámými. Tento obecný typ vyrovnání nastává, když v podmínkových rovnicích vystupují kromě vyrovnaných měření ještě další, přímo neměřené neznámé, které též potřebujeme určit.

Dále bude popsán případ, kdy neznámé x ovlivňují každé měření. Podmínkové rovnice mají následující tvar:

$$f(x, l) = f(x, l + \hat{r}), \quad (37)$$

kde l jsou měření a \hat{r} předpokládané opravy. Podle [49] lze místo očekávaných odchylek \hat{r} použít odchylky r . Pro zjednodušení řešení je model linearizován podle Taylorova rozvoje následovně:

$$f(x, l) = f(x_0 + \delta, l_0 + r) \doteq f(x_0, l_0) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=x_0} (x - x_0) + \frac{\partial f}{\partial l} \Big|_{l=l_0} (l - l_0) \doteq 0 \quad (38)$$

Přetvořené podmínkové rovnice v maticovém tvaru odpovídají tomuto vyjádření:

$$A\delta + Br + w = 0, \quad (39)$$

kde matice plánu A a B jsou derivacemi podle neznámých a měřených veličin, δ značí vektor přírůstku neznámých, r vektor oprav měřených veličin a w je vektor uzávěrů.

Normální rovnice mají tvar

$$\begin{bmatrix} -BC_r B^T & A \\ A^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1} & A \\ A^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w \\ 0 \end{bmatrix} = 0, \quad (40)$$

kde M je váhová matice měření a $k = M(A\delta + w)$ jsou koreláty. Vektor přírůstku neznámých je vypočten ze vztahu $\delta = -N^{-1}u$, kde koeficienty normálních rovnic $N = A^T M A$ a $u = A^T M w$. Kovarianční matice C_δ , ze které jsou vypočteny střední chyby neznámých parametrů je vypočtena jako $C_\delta = N^{-1}$. Střední chyby neznámých parametrů jsou odhadnuty podle rovnice $\sigma_{\delta_i} = \sigma_0 \sqrt{C_{\delta_i}}$, kde σ_0 je jednotková směrodatná odchylka z vyrovnání.

4. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V oblasti servisní mobilní robotiky dochází v posledních několika letech k zásadním změnám. Je jasně patrný přechod od plošného měření k plně prostorovému a dále od relativně jednodušších vnitřních prostor do prostředí vnějšího, případně kombinovaného. To je umožněno nejen rychlým nárůstem poměru mezi výpočetním výkonem a energetickou náročností u výpočetních prostředků, ale také vývojem ve snímacích technologiích. Je tak možné nasnímat velké množství především optických a prostorových dat o okolním prostředí a zároveň je i v reálném čase zpracovávat. Současně jsou kladeny stále větší nároky na autonomnost alespoň některých funkcí robotů, často i ve značně členitém a obvykle předem neznámém prostředí.

V mobilní robotice jsou pro získání prostorové informace o okolní scéně používány různé typy senzorů. Informace o geometrii okolních objektů mohou být získány pasivními senzory s využitím dat z více snímků, aktivními senzory, které jsou schopny měřit vzdálenost (radar, sonar, LiDAR, dálkoměrné kamery) anebo taktilními (dotykovými) senzory. Tyto prostorové informace umožňují detekci a vyhýbání se překážkám, rozeznání daných objektů a v neposlední řadě také mapování.

Pokud porovnáme zpracování dat získaných z pasivních senzorů v oboru mobilní robotiky a geodézie, nalezneme jeden významný rozdíl. V oboru geodézie je pasivní určování geometrie používáno převážně pro následné zpracování. Výhodou tohoto přístupu oproti dalším metodám určování vzdáleností je dosažitelné vysoké rozlišení, současné zaměření oblasti bez pohybujících se objektů a bez emise energie. Hlavní nevýhodou v případě automatického spojování snímků je hledání korespondujících bodů, časová náročnost zpracování a potřeba kvalitních světelných podmínek [23].

V mobilní robotice lze využít pasivního přístupu i v reálném čase prostřednictvím stereovize. Stereoskopické zobrazení je nástrojem, který umožňuje získat současně snímek a hloubková data okolní scény [50]. Dva mírně posunuté obrazy stejné scenerie poskytují informace k vnímání hloubky okolních objektů. Proto je možné stereovizi použít pro různé aplikace v mobilní robotice, jako navigace robotů, simultánní lokalizace a mapování (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM), rekonstrukce 3D prostředí a virtuální realita [52].

Aktivní senzory, určující vzdálenost pomocí světelných vln, jsou využívány podobným způsobem jak v geodézii, tak v mobilní robotice. Techniky určení vzdáleností pro tyto aktivní senzory jsou rozděleny do tří hlavních kategorií: interferometrie, triangulace a měření doby letu („Time-Of-Flight“ dále jen TOF). Triangulační techniky mohou být použity jak pro aktivní senzory fungující na principu strukturovaného světla

tak i pro pasivní digitální kamery. Určovaný bod je získán prostřednictvím známé triangulační báze (základny) a velikosti triangulačního úhlu. [23]

Typickým příkladem TOF technik je optický dálkoměr, totální stanice anebo klasické LiDAR senzory jak terestrické tak letecké. Současné laserové skenery umožňují získat řádově milion bodů za sekundu díky rychlým skenovacím mechanismům. Dosah měření laserových skenerů se může značně lišit v závislosti na přístroji od centimetrů až po kilometry. Laserové skenery spolu s kamerovými systémy jsou v současné době klíčovými exteroceptivními sensorickými systémy v oblasti mobilní robotiky [8].

V posledních letech byla vyvinuta nová generace aktivních senzorů, které dovolují získávat 3D mračna bodů bez skenovacího mechanismu, pouze z jednoho pohledu a s vysokou rychlostí. Tato zařízení fungují také na principu měření doby letu vyslaného signálu k pozorovanému objektu. Výhodou je simultánní získání informací o měřených vzdálenostech pro každý pixel snímače. Pro takovéto zařízení je v literatuře používáno velké množství názvů jako TOF kamery, Range Imaging Cameras (RIM), 3D range imagers, range cameras. [23]

Nově se objevila na trhu alternativa k TOF kamerám a to řada senzorů založená na projekci textury v reálném čase a triangulační technice, která dohromady umožňuje současné získání geometrie a textury. Toto zařízení není drahé, je rychlé a má dosah typicky 4-5 m. Neznámějším senzorem z této kategorie je Microsoft Kinect [51].

Vyjma senzorů pro určení 3D informací o okolní scéně jsou používány i senzory, které jsou schopny přidat další doplňkové informace, především barevné (CCD nebo CMOS) kamery a termovizní kamery.

Dále v této kapitole je popsán současný stav řešení dílčích úkolů, které jsou obsaženy v této dizertaci tj. kalibrace dálkoměrných kamer, kalibrace skenerů Velodyne, vzájemná kalibrace více heterogenních maticových snímačů.

4.1 KALIBRACE „TOF“ KAMER

Dálkoměrné kamery nabízí velký potenciál pro měření v reálném čase, ovšem mají zatím velké množství nevyřešených problémů týkajících se přesnosti měření. Pro zlepšení přesnosti je nutná kalibrace kamery a vzhledem k vysokému množství šumu je vhodná filtrace. Princip fungování TOF kamer a rozdělení jejich chyb byl popsán v podkapitole 3.3.3. Vzhledem k faktu, že v této práci je kamera umístěna na pohybujiícím se robotu a data jsou zpracovávána v reálném čase, bude tato podkapitola popisovat pouze kalibraci a odstranění přístrojových systematických chyb. Tyto chyby jsou zapříčiněny chybami určitých komponent a montážními nepřesnostmi (radiální a tangenciální zkreslení) a chybou měřené délky.

Kombinace získaného 2D obrazu ve stupních šedi a 3D obrazu vzdáleností umožňuje částečné využití fotogrammetrického postupu kalibrace kamery např. v [53]. Pro určení přístrojových chyb je používána jednofázová a dvoufázová kalibrace [26], [54]. V dvoufázové kalibraci jsou nejdříve vyrovnány prvky vnitřní orientace a následně korekce měřené vzdálenosti. V jednofázové kalibraci jsou oba úkoly prováděny současně.

Pro určení radiálního a tangenciálního zkreslení (ale i ostatních prvků vnitřní orientace) jsou použity standardní fotogrammetrické postupy s použitím šachovnicové kalibrační mřížky [55] anebo kruhových terčů [56]. Časté je zpracování v Matlab Calibration Toolbox [35]. Např. v [56] je použité kalibrační pole tvořené standardní šachovnicovou kalibrační mřížkou a zpracování je provedeno v Camera Calibration Toolbox for Matlab.

Chyba měřené vzdálenosti je nejvýznamnějším problémem dálkoměrných kamer. Pro určení korekce vzdáleností byly vytvořeny různé modely: jednoduché polynomické funkce [55], [57], sinusové funkce [58], [59], B-spline [60] a tabulka LUT (Look up Table) [26]. V navržených modelech je korekce měřené vzdálenosti závislá na následujících veličinách:

- 1) měřená vzdálenost,
- 2) amplituda,
- 3) měřená vzdálenost a amplituda,
- 4) měřená vzdálenost a integrační čas,
- 5) měřená vzdálenost a snímkové souřadnice.

Použití modelu, kde korekce měřené vzdálenosti je závislá přímo na této vzdálenosti, je nejčastější. Dále bude uvedeno několik příkladů. V [61] autoři zjistili, že offset vzdálenosti se mění s měřenou vzdáleností. Autoři v [62] určili délkový offset také jako funkci měřené vzdálenosti.

Autoři v [58] pro eliminaci chyby vzdálenosti aproximovali délkové měření empirickou sinusoidální funkcí $R = a_2 \sin(\rho d_0 + \rho_0) + a_1 R_0 + a_0$, kde a_2 , a_1 , a_0 , ρ_0 jsou koeficienty určené z vyrovnání MNC, R je vzdálenost měřená pásmem a R_0 vzdálenost měřená kamerou.

Podle [59] byl vytvořen následující model pro korekci vzdáleností: $e = \lambda_0 + \lambda_1 m \sin(\lambda_2 m + \lambda_3)$, kde m je měřená vzdálenost. Z kontrolního měření bylo zjištěno, že tento model funguje pouze v rozmezí 1,5-4,0 m. Pro kratší a delší vzdálenosti je nevhodný.

V rozporu s modely dříve uvedenými dospěl autor v [56] k závěru, že korekce délky není závislá na měřené délce.

Dále jsou uvedeny příklady modelů závislých na amplitudě. Autoři v [63] použili velikost amplitudy pro opravu měřené vzdálenosti. Podle [63] se chyby měřené vzdálenosti objevují hlavně u tmavých objektů, u světlých objektů jsou chyby zanedbatelné.

V [56] byla zjištěna vysoká korelace mezi amplitudou a délkovým offsetem. Proto z měření jsou vylučovány hodnoty s amplitudou menší než 500 (z 65536).

Autoři v [64] opravu měřené vzdálenosti určili následovně: $\delta_r = r(a + b(I - c)^k)$, kde I je intenzita a r měřená vzdálenost. Koeficienty a , b , c , k byly odhadnuty při kalibraci.

V [60] autoři zkoumali, jak různá odrazivost terčů ovlivní chyby měřené délky. Byl zjištěn nárůst offsetu s amplitudou do vzdálenosti 3,5-4m. Při delších vzdálenostech se offset snižuje nepřímo úměrně měřené vzdálenosti. LUT bylo aproximováno pomocí B-spline.

Výsledkem kalibrace v [26] je LUT, v této tabulce jsou určeny délkové offsety pro určitou měřenou vzdálenost a integrační čas. Hodnoty offsetu byly modelovány i lineární a kosinovou funkcí, ovšem tyto modely nevedly k lepším výsledkům než LUT.

V [55] byl navržen kalibrační postup pro kombinaci 1 PMD kamery a 3 CCD kamer. Model pro korekci vzdálenosti je následující: $\lambda^* = d_0 + (1,0 + d_1)\lambda + d_2 x + d_3 y + d_4 \lambda^2 + d_5 \lambda^3$, kde λ^* je opravená vzdálenost, x , y snímkové souřadnice. Koeficienty d_0 a d_1 jsou silně korelovány. Dále je vysoká korelace mezi d_4 , d_5 s d_0 , d_1 .

4.2 KALIBRACE HYBRIDNÍCH SKENERŮ

Při kalibraci skenerů s více lasery jsou určovány prvky vnitřní a vnější orientace. Kalibrační postupy pro určení prvků vnitřní orientace včetně korekce měřené vzdálenosti jsou založeny na porovnávání skenerem získaných dat s vhodně zvolenou matematicky snadno popsatelnou scénou (většinou rovinné plochy) a následném přesném odhadu korekčních parametrů. V této podkapitole budou shrnuty přístupy používané pro určení prvků vnitřní orientace skenerů Velodyne s více lasery.

V [65] jsou určeny 3 kalibrační parametry (korekce vertikálního úhlu, korekce rotačního úhlu a korekce měřené vzdálenosti) pro každý laser. Pro kalibraci je použita rovina rovnoběžná s rovinou Y-Z souřadnicového systému skeneru, která je zaměřená z více vzdáleností (10, 12, 14 m).

Propracovanější postup kalibrace je uveden v [66], kde je skener umístěn do středu kalibrační místnosti, ve které je měřeno 5 rovin (podlaha a 4 stěny). Hodnoty uváděné výrobcem nejsou pro odhad prvků vnitřní orientace použity ani jako počáteční hodnoty.

Detailně kalibraci skenerů popisuje Glennie a Lichti ve svých článcích [67], [68], [69]. V [67] jsou pro statickou kalibraci využity stěny čtyř okolních budov, konfigurace je měněna natáčením skeneru v horizontálním i vertikálním směru. Dále je v [68] řešen postup pro snížení vysoké korelace mezi korekcí svislého úhlu v a vertikálního offsetu v_{off} . V [69] je testována časová stabilita měření skeneru a tím pádem i vliv času na kalibraci skeneru.

V [70] je pro kalibraci používána kombinace skeneru a sférického kamerového systému Ladybug2. Kalibrační rovina je nasnímána ze 40 různých konfigurací.

Chen a Chien v [71] navrhli plně automatickou metodu pro určení prvků vnitřní orientace a také alternativní lineární model pro geometrickou interpretaci. V [72] stejní autoři vyřešili simultánní kalibraci vnitřních a vnějších parametrů. Šachovnicová mřížka je měřena skenerem a dvěma kamerami v různých podmínkách a ve výpočtu je použito současné zpracování rovin na scéně, jako jsou zdi, strop a podlaha.

Levison v [73] popsal neřízenou kalibraci prvků vnitřní a vnější orientace, která nevyužívá žádné kalibrační terče ani manuální měření. Tato metoda je použitelná pouze pro pohybující se vozidla.

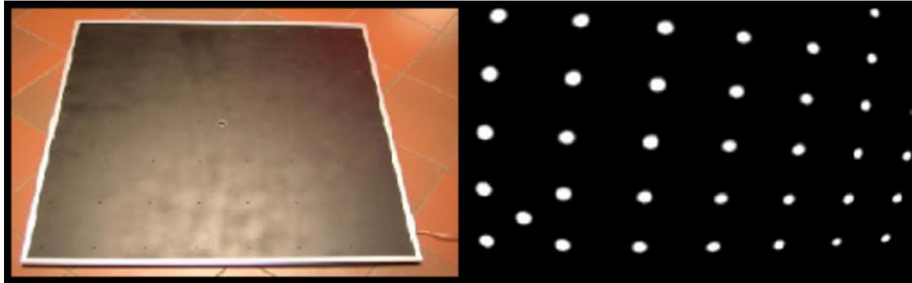
Dvoufázovou neřízenou kalibraci pouze prvků vnější orientace narhl Zhu and Liu v [74]. Všechny výše uvedené kalibrace pojednávají o kalibraci hybridního skeneru Velodyne HDL-64. V [75] je analyzována kalibrace skeneru HDL-32. Oproti dříve uvedeným kalibračním postupům v tomto přehledu je v [75] pro kalibraci použit jako referenční těleso válec extrahovaný z mračna bodů.

4.3 VZÁJEMNÁ KALIBRACE VÍCE SNÍMAČŮ

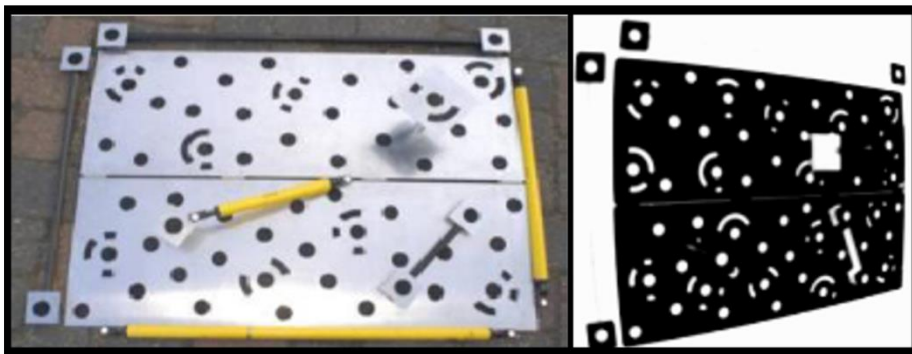
Kalibrace snímků jedné barevné kamery je už dobře vyřešená úloha. Většina řešení vychází z [35] a využití šachovnicové kalibrační mřížky. Kalibrace vícekamerových systémů je řešena např. v [76] a [77]. Kalibrace dálkoměrných zařízení (většinou laserů, ale i Microsoft Kinect a dálkoměrné kamery) s barevnou kamerou popř. systémem barevných kamer je popsána ve více zdrojích. Např. kalibrace barevné kamery a laseru v [36], [78] - [81], kalibrace barevné a dálkoměrné kamery v [82] a kalibrace systému barevných kamer a Microsoft Kinectu v [83].

Dále budou popsány navržené terče pro kalibraci více heterogenních snímačů měřících v různých spektrech. Existují různé možnosti řešení návrhu terče s dobře identifikovatelnými prvky ve více spektrech. V [84] bylo kalibrační pole vytvořeno z dřevěné desky s 57 malými žárovkami, které se po zapnutí zahřívají. V [84] bylo dále použito prostorové kalibrační pole. Základem prostorového kalibračního pole byla kovová deska s kruhovými a kódovými terči ze speciální samolepící folie. V [85] byla

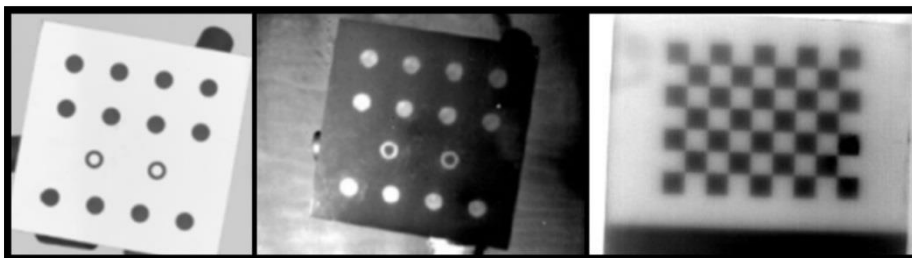
použita pro kalibraci termokamery a stereopáru barevných kamer rovinná deska s kruhovými vyhřívanými terči. V [86] byla pro kalibraci páru termokamer použita šachovnicová kalibrační mřížka nahřívána lampou.



Obr. 26 Rovinné kalibrační pole [84]: vlevo foto, vpravo snímek z termokamery



Obr. 27 Prostorové kalibrační pole [84]: vlevo foto, vpravo snímek z termokamery



Obr. 28 Rovinné kalibrační pole: vlevo – snímek z barevné kamery [85], uprostřed - snímek z termokamery [84], vpravo – snímek z termokamery [86]

4.4 STAV MULTISPEKTRÁLNÍ FÚZE PRO TELEPREZENCI A MAPOVÁNÍ V MOBILNÍ ROBOTICE

Digitální mapování se používá v mobilní robotice již několik desítek let. Historicky však byly používány mapy především pro navigaci samotného robotu. Velmi častá a pro mobilní robotiku je typická technika SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), kde je způsob použití takový, že mapa vzniká ze sensorických dat při průjezdu robotem v prostředí. Ze stejných dat zároveň robot určuje svou pozici ve vznikající mapě. Je zjevné, že jde o dvě antagonistické úlohy a jejich skloubení je velmi obtížné. Ačkoli se problematice věnuje celosvětově značné množství týmů, není uspokojivě vyřešena, a to ani pro relativně jednodušší vnitřní prostředí.

Mapování v mobilní robotice probíhá jak v jedné rovině (2D mapování), tak v prostoru (3D mapování). 2D mapování se používalo především v minulosti, kdy prakticky nebyly k dispozici vhodné snímače pro plně prostorové snímání a nebyla ani k dispozici dostatečně výkonná výpočetní technika. V posledních letech je však možné pozorovat jednoznačný přechod k plně 3D technologiím mapování, což umožňují například specializované prostorové snímače od firem Velodyne, SICK, SwissRanger, a další.

Pro mapování byly v mobilní robotice dříve používány především ultrazvukové snímače. Hlavním důvodem byla nízká cena oproti optickým proximitním snímačům. Ultrazvukové snímače však mají několik zásadních problematických vlastností – jednak je šíření ultrazvuku v prostředí oproti světlu velmi pomalé, což velmi omezuje použití těchto snímačů pro skenování, dále prakticky není možné ultrazvukový signál koncentrovat do paprsku podobně jako laser. Problémem především pro zpracování dat je pak možnost částečných a/nebo vícenásobných odrazů od překážek. S rozvojem optických metod založených na měření doby letu a zlevnění příslušných 2D a 3D skenerů došlo postupně k prakticky úplnému vytlačení ultrazvukových snímačů z oblasti mapování a tyto snímače zůstaly doménou detekce překážek. Pro mapování jsou rovněž v omezené míře používány barevné kamery. Zde jsou hlavní problémy v nedostatečném dynamickém rozsahu kamer a stále nedostatečně kvalitních algoritmech pro zpracování dat ve složitých scénách.

Současně se zpřesňováním snímačů a zlepšováním příslušných mapovacích metod začalo v nedávné době přibývat aplikací pro automatické robotické získávání map. Typickými příklady jsou automatické (nebo člověkem hlídané či řízené) platformy pro geodetické mapování. Obvykle obsahují barevné kamery, často pak i optické proximitní skenery. Termovizní kamery se sice v robotice používají, obvykle však bez fúzování jejich obsahu s dalšími snímači.

Velmi často používaným typem map jsou tzv. mřížky obsazenosti (Evidence Grids, Robot Evidence Grids, ...) viz podkapitola 3.1. Jde o 2D nebo 3D mřížku ve které každá buňka odpovídá informaci o místě v prostoru. Nejčastější informací obsaženou v jednotlivých buňkách je pravděpodobnost výskytu překážky. Někdy se používá modelů snímačů s podmíněnou pravděpodobností, pak jsou obvykle uschovávány dvě nezávislé informace – pravděpodobnost, že se v daném místě překážka vyskytuje a pravděpodobnost, že se tam nevyskytuje [87]. Velmi výhodnou vlastností mřížek obsazenosti je možnost jejich velmi snadného rozšíření o další informace, které se vážou k danému výseku prostoru. Nejvíce nasnadě a také nejčastěji prakticky realizované je přidání informace o barvě. Zde je hlavním problémem fúzování barev z více měření, specifickým problémem je pak interpretace měření z různých úhlů. Informace obsažené v jednotlivých buňkách se však nemusí omezovat pouze na viditelné spektrum. V této práci se jedná o přidání informaci o teplotě změřenou mikrobolometrem termovizní kamery ve vzdáleném infračerveném spektru do mapy. Je však principiálně možné přidat měření z jakékoli jiné části elektromagnetického spektra, pokud jsme schopni tuto část změřit. Také je možné přidat jakoukoli další informaci – například chemické složení objektu získané laserem indukovanou plazmou, informace o ionizačním záření, nebezpečných chemických nebo biologických látkách. Tato práce se zaměřuje na kombinaci dálkoměrného měření v blízkém infračerveném spektru a pasivního optického měření ve viditelném a vzdáleném infračerveném spektru. Pokud je mi známo, žádný tým se touto kombinací v kontextu mobilní robotiky nezabývá.

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této kapitole je na úvod popsán robotický systém Cassandra. Dále se tato kapitola zabývá řešením dílčích úkolů vytyčených jako cíle této práce. Nejprve jsou zde popsány kalibrace měřených délek hybridních laserových skenerů Velodyne a dálkoměrné kamery SwissRanger. V další části je popsána společná kalibrace snímačů sensorické hlavičky robotu Orpheus-X3 a na závěr je popsána fúze dat ze snímačů této hlavičky.

5.1 ROBOTICKÝ SYSTÉM CASSANDRA

Tato dizertační práce vznikla jako součást robotického projektu Cassandra, který vzniká od roku 2004 (původně pod názvem ARGOS) na FEKT VUT v Brně a je nyní dále rozšiřován především v rámci výzkumného centra CEITEC. Jde o robotický systém pro průzkum člověku nebezpečných nebo nedostupných oblastí.

Cassandra je pokročilý heterogenní robotický systém, který obsahuje mapovací robot envMap (Obr. 29), létající roboty typu multicopter (např. Uranus-ALU Obr. 29), větší roboty (např. Orpheus-X3, Orpheus-AC2, Scorpio – Obr. 30) a menší roboty (např. Perseus, Brontes – Obr. 31). Součástí systému je kromě samotných robotů rovněž programové a systémové vybavení – tedy především obslužný programový systém Cassandra, fúzní systém Theireisias, komunikační protokoly, řídicí algoritmy, zabezpečené bezdrátové komunikační moduly, speciální ovládací hardware, atd. Všechny tyto součásti jsou v současné době provozuschopné a funkční.



Obr. 29 Létající robot Uranus-ALU(vlevo), mapovací robot envMap (vpravo)



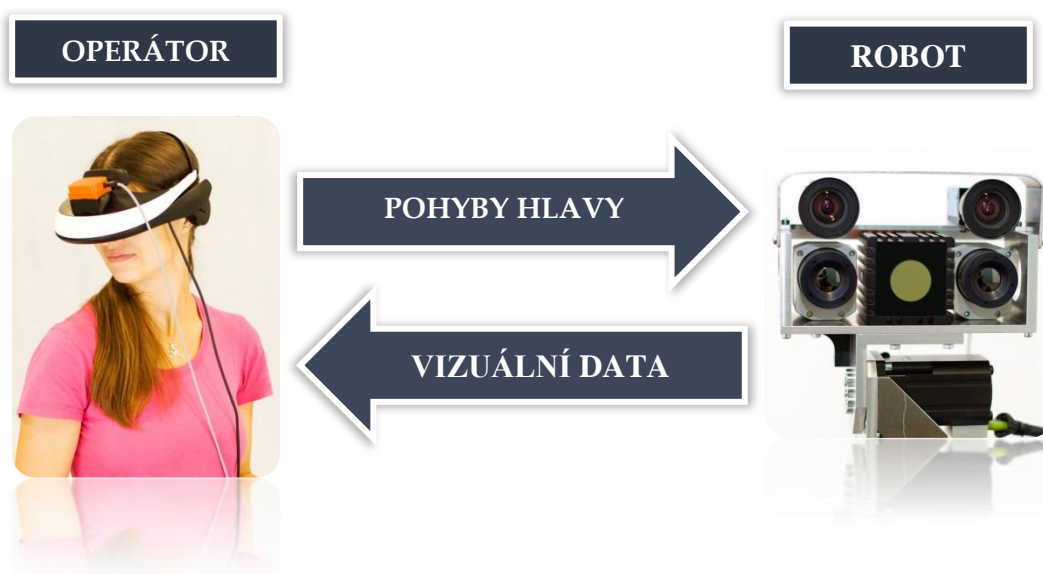
Obr. 30 Větší roboty systému Cassandra: Orpheus-X3 (vlevo), Orpheus-AC2 (uprostřed), Scorpio (vpravo)



Obr. 31 Menší roboty systému Cassandra: Perseus (vlevo), Brontes (vpravo)

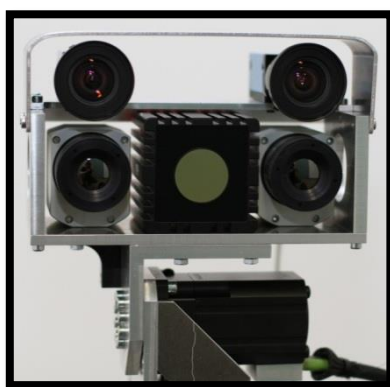
Roboty systému Cassandra byly původně řízeny operátorem v reálném čase – nešlo tedy o autonomní roboty s využitím prvků tzv. umělé inteligence, ale roboty ovládané člověkem. Důvodem byla především extrémní složitost záchranných misí, které se v praxi odehrávají v neznámém, a často velmi složitém terénu, v časovém stresu, v předem nespécifikovaných podmínkách (viditelnost, kontaminace, atd.). V posledních dvou 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 náročnou práci a celkově zvýší variabilitu využití systému.

Specialitou systému Cassandra je intuitivní způsob ovládání pomocí tzv. vizuální teleprezence (Obr. 32). Operátor má na hlavě helmu virtuální reality s příslušným snímačem pohybů hlavy, každý z robotů je pak vybaven minimálně jednou kamerou s pohybem ve dvou stupních volnosti tak, že 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, například díky níže popsaným výsledkům této dizertační práce.



Obr. 32 Princip vizuální teleprezence

Jak již bylo řečeno, roboty v projektu Cassandra jsou ovládány teleprezenčně. Pro tento způsob ovládání vzniká v týmu CEITEC nyní zcela nový sensorický systém (viz Obr. 33). Jde o soustavu maticových snímačů, která obsahuje stereovizní pár barevných CCD kamer, stereovizní pár termovizních kamer (dále označovány jako pasivní kamery) a TOF kameru (dále označována jako aktivní kamera). Tyto snímače jsou umístěny na pohyblivé hlavici robotu Orpheus-X3 se třemi stupni volnosti, která umožňuje díky svým elektro-mechanickým 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 (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.



Obr. 33 Sensorická hlavice robotu Orpheus-X3

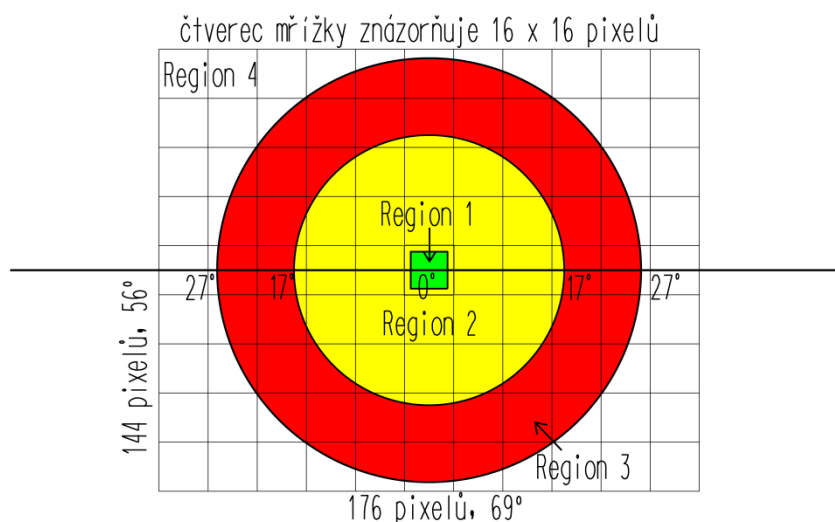
Tato data by navíc měla být kombinována s dříve získanou lokální mapou vytvořenou pomocí mapovacího robotu EnvMap nebo jiných robotů s možností získávání mapy do jednoho komplexního, avšak pro člověka zcela intuitivního obrazu. Výsledné zobrazení tak umožní operátorovi vidět nejen reálná barevná prostorová data, ale i teploty a informace o okolním prostoru, vše navíc včetně dat, která samotný robot ze svého místa nemůže svými senzory zachytit – např. data z předem získané mapy promítaná v reálném čase přes data kamer robotu. Vše bude reagovat nejen na pohyby operátorovy hlavy, ale i na pohyby robotu ve vzdáleném prostředí. Vznikne tak prostorové zobrazení tzv. rozšířené reality (augmented reality), které umožní operátorovi nejen zobrazení prostor, do kterých by se sám nemohl dostat nebo by to pro něj bylo příliš nebezpečné, ale i zobrazení dat, která by ani sám nemohl pozorovat („vidění“ teploty objektů, „vidění“ skrze pevné překážky, pozorování v obtížných podmínkách jako je tma, mlha, kouř, apod.).

Pro úspěšné řešení těchto úloh je naprosto nezbytné, aby byly jednotlivé snímače na kamerové hlavici kalibrovány. Pomocí kalibrace jsou určeny prvky vnitřní orientace jednotlivých kamer (2 CCD kamery, 2 termovizní kamery, TOF kamera) a jejich vzájemná prostorová poloha a orientace. Výsledky této kalibrace jsou následně použity pro datovou fúzi. Pro vznik dostatečně přesných lokálních digitálních prostorových map je pak nezbytná co nejpřesnější kalibrace příslušného dálkoměrného snímače, tedy hybridního laserového skeneru nebo dálkoměrné kamery. Tyto činnosti jsou podrobně popsány níže v této kapitole.

5.2 KALIBRACE TOF KAMERY

Na úvod této podkapitoly budou specifikovány technické parametry kamery SwissRanger SR4000, dále je podrobně popsán navržený model, postup a realizace kalibrace této kamery, která je součástí již dříve popsané sensorické hlavičky použité na robotu Orpheus X-3. Výpočet regresních koeficientů modelu oprav měřených vzdáleností je zahrnut ve vytvořeném programu *MultiSensCalib*, který je popsán v podkapitole 5.2.2.

Senzor dálkoměrné kamery SwissRanger SR4000 je tvořen polem 176 x 144 pixelů s rozestupem 40 μm . Scéna je při měření osvětlována modulovaným infračerveným zářením s vlnovou délkou 850 nm. Modulační frekvence je uživatelsky nastavitelná na hodnoty 14,5/15/15,5 MHz. Maximální snímková frekvence je 50 fps (frames per second - snímků za sekundu). Integrační doba snímku je nastavitelná v rozmezí 0,3–25,8 ms. Při experimentech byla použita kamera SR4000, typ 00400013, která má dosah 10 m a zorný úhel 69°x56°. [88]



Obr. 34 Rozdělení snímku dálkoměrné kamery na oblasti podle přesnosti

Absolutní přesnost měřené vzdálenosti garantovaná výrobcem je ± 15 mm, ovšem platí pouze pro centrálních 11x11 pixelů, 99% odrazivost cílů a pouze pro měřené vzdálenosti od 0,8 do 8 metrů [88]. Vzhledem k sudému počtu pixelů kamery v obou dvou osách, je definice 11x11 centrálních pixelů velmi nejednoznačná. Pro následující výpočty je použita oblast 12x12 centrálních pixelů. Výrobce rozděluje snímek kamery na 4 regiony (viz Obr. 34). Kromě centrální oblasti přesnost měření není definována. Pro oblasti 1-3 je definována opakovatelnost měření viz Tab. 1. Pro oblast 4 není definována ani opakovatelnost. [88]

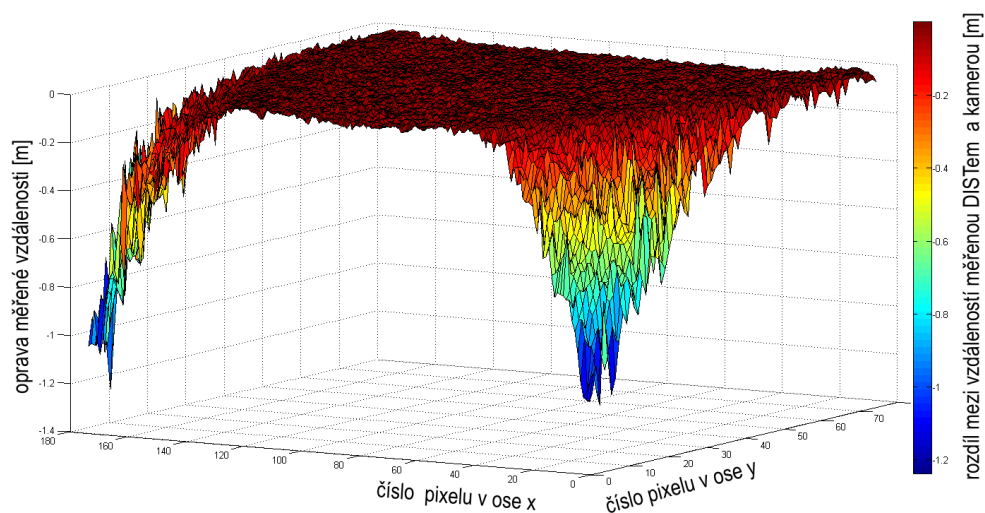
	opakovatelnost typ. (1σ)	opakovatelnost max. (1σ)
region 1	6 mm	9 mm
region 2	7,2 mm	10,8 mm
region 3	12 mm	18 mm

Tab. 1 Opakovatelnost měření vzdáleností v jednotlivých regionech TOF kamery SR4000, typ 00400013 [88]

V manuálu [89] je **absolutní přesnost** definovaná jako rozdíl mezi průměrnou měřenou hodnotou rozdělení a skutečně měřenou hodnotou. Tato hodnota by měla popisovat maximální systematickou chybu měřené vzdálenosti. **Opakovatelnost** je udávána pro 1σ . Tato hodnota určuje šum jednotlivého měření. [89]

Absolutní přesnost je nezávislá na vzdálenosti a odrazivosti, uvádí výrobce v manuálu [89], i když v technickém listě [88] garantovanou přesnost podmiňuje odrazivostí cílů.

Vzhledem k faktu, že výrobce garantuje přesnost pouze pro 0,005 % plochy snímku (tj. centrálních 11x11 pixelů), kalibrace kamery SwissRanger SR4000 je pro zlepšení a také zhodnocení reálné přesnosti dálkoměrné kamery žádoucí. Obr. 35 zobrazuje odchylky měřené vzdálenosti rovné stěny TOF kamerou z testovacího měření provedeného v rámci této práce.



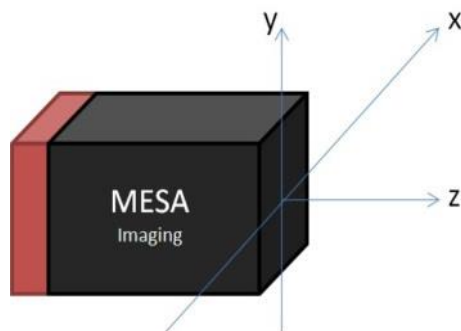
Obr. 35 Korekce vzdáleností měřených dálkoměrnou kamerou pro horní polovinu snímku – vlastní testovací měření

5.2.1 MATEMATICKÝ MODEL KALIBRACE

Kalibrace dálkoměrné kamery je navržena jako dvoufázová:

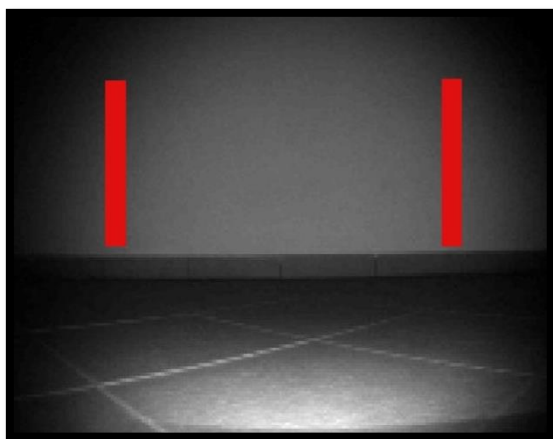
1. určení prvků vnitřní a vnější orientace,
2. určení modelu oprav vzdáleností pro jednotlivé pixely.

Určení prvků vnitřní a vnější orientace bude podrobně popsáno v podkapitole 5.4 společně se vzájemnou kalibrací ostatních kamer sensorické hlavice. Z toho důvodu bude v této podkapitole podrobně popsána pouze kalibrace měřených vzdáleností, i když pro určování korekcí měřených vzdáleností jsou samozřejmě použity kalibrované prvky vnitřní orientace včetně zkreslení.

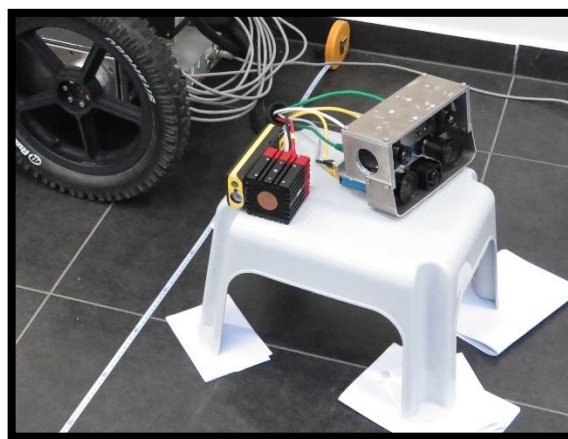


Obr. 36 Orientace souřadnicových os objektového systému [89]

Korekce měřené vzdálenosti je určována z měření svíslé referenční roviny. Orientace os souřadného systému kamery je zobrazena na Obr. 36. Pro zjednodušení výpočtu je použit speciální případ referenční roviny $Z = \text{konst.}$ Proto je nutné horizontovat kameru pomocí libely ve směru osy X a Z . Rovnoběžnost snímkové roviny kamery a referenční roviny je zajištěna urovnáním kamery tak, aby se rovnaly hodnoty mediánu měřených vzdáleností v levé a pravé části snímku viz červené obdélníky na Obr. 37. Tato funkce byla přidána do softwarového rozhraní pro ovládání kamery.



Obr. 37 Snímek kalibrační stěny (z červených obdélníků je určován medián měřené vzdálenosti v levé a pravé části snímku)

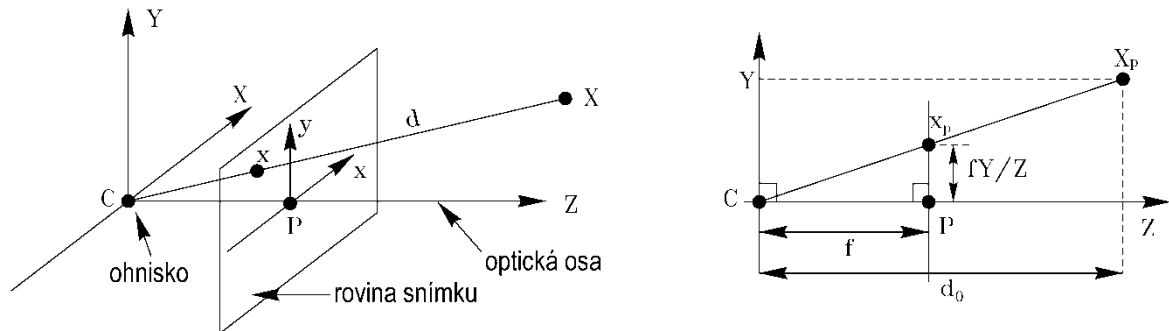


Obr. 38 Foto kamery při kalibraci

Objektové souřadnice jsou určovány v lokálním souřadnicovém systému rovnoběžném s kamerovým systémem a s počátkem v průsečíku optické osy s čelní stranou kamery. Pro výpočet objektových souřadnic jsou použity snímkové souřadnice

x, y a měřená vzdálenost d . Snímkové souřadnice jsou opraveny na skutečnou polohu hlavního snímkového bodu a o zkreslení (radiální, tangenciální).

Projekce z roviny obrazu do prostorové scény je odvozena z modelu dírkové kamery [47] podle principu středového promítání. Rozdílem proti klasické kameře je možnost využití měřené vzdálenosti d . Model dírkové kamery je zobrazen na Obr. 39, kde C je projekční centrum kamery, p hlavní snímkový bod a f ohnisková vzdálenost.



Obr. 39 Geometrie dírkové kamery [47]

Rovnice (41), (42) pro výpočet objektových souřadnic X, Y, Z jsou určeny z podobnosti trojúhelníků CPx_p a CZX_p , kde d_0 je měřená vzdálenost promítnutá na optickou osu a x_p, X_p jsou postupně snímkový a prostorový bod kolmo promítnutý do roviny $X=0$ (výpočet Y) nebo do roviny $Y=0$ (výpočet X):

$$X = \frac{d_0 x}{f}, Y = \frac{d_0 y}{f} \quad (41)$$

$$Z = d_0 = d \cos \left(\arctan \left(\frac{y}{\sqrt{f^2 + x^2}} \right) \right) \cos \left(\arctan \left(\frac{x}{f} \right) \right) \quad (42)$$

Pro zjednodušení výpočtu objektové souřadnice Z lze použít následující vztah [90] pro cyklometrickou funkci (rovnice (43)).

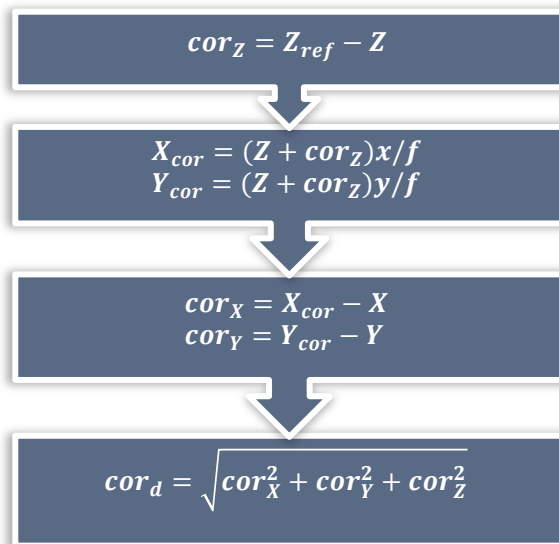
$$\cos(\tan^{-1} x) = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \quad (43)$$

Po dosazení této rovnice do rovnice (42) dostaneme následující zjednodušení:

$$Z = \frac{df}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \quad (44)$$

Korekce měřené vzdálenosti cor_d jsou určeny z korekce souřadnice Z podle diagramu na Obr. 40, kde $X, Y, Z, X_{cor}, Y_{cor}, Z_{cor}$ jsou objektové souřadnice bez a se

zavedenou korekcí měřené vzdálenosti, Z_{ref} referenčně měřené objektové souřadnice Z , cor_x , cor_y , cor_z korekce jednotlivých snímkových souřadnic, x , y snímkové souřadnice a f ohnisková vzdálenost.



Obr. 40 Schéma určení korekce měřené vzdálenosti

Korekce měřené vzdálenosti je určena pro každý pixel kamery. Vzhledem k již dříve zjištěné závislosti korekce především na samotné vzdálenosti např. v [61], [62] jsou korekce určovány pro různé vzdálenosti referenční roviny.

Vzhledem k využití snímače v mobilní robotice pro automatickou tvorbu digitálních 3D map okolního prostředí a tím pádem velkému důrazu na rychlé zpracování dat, je požadován co nejméně výpočetně náročný algoritmus, který ovšem významně zlepší přesnost měřených vzdáleností.

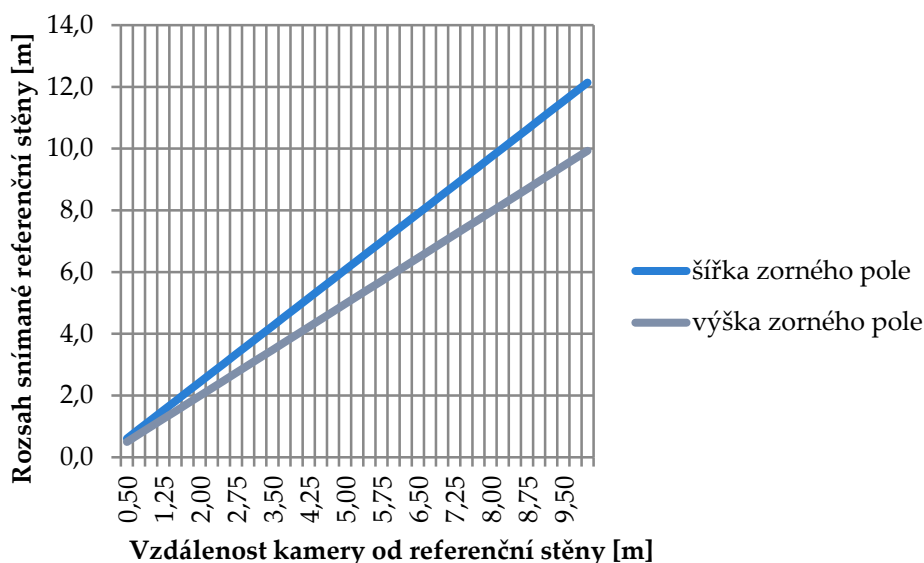
5.2.2 POSTUP PRO KALIBRACI MĚŘENÝCH VZDÁLENOSTÍ DÁLKOMĚRNÉ KAMERY V PROGRAMU MULTISENSCALIB

Tato podkapitola slouží jako manuál pro kalibraci měřených vzdáleností dálkoměrné kamery SwissRanger. V první části je popsán postup pro kalibrační měření, v druhé části postup zpracování v programu *MultiSensCalib* vytvořeném v rámci této práce. Měření a zpracování této kalibrace je časově náročnější než vzájemná kalibrace kamer sensorické hlavičky, nicméně se předpokládá, že nebude nutné je provádět tak často. Pokud dálkoměrnou kameru sejmete a znovu umístíte do sensorické hlavičky, korekce měřených vzdáleností zůstanou stejné. Tetovací data z provedeného experimentu lze stáhnout z <http://naszalud.uamt.fekt.vutbr.cz> (<ftp://naszalud.uamt.fekt.vutbr.cz>). Pro přihlášení je třeba použít následující přihlašovací údaje: login: kalibrace, heslo: kalibrace.

Kalibrační měření

Na začátku měření je kalibrovaná kamera umístěna ve vzdálenosti 0,5 m od svislé rovné referenční stěny. Další postup je popsán pomocí následujících bodů:

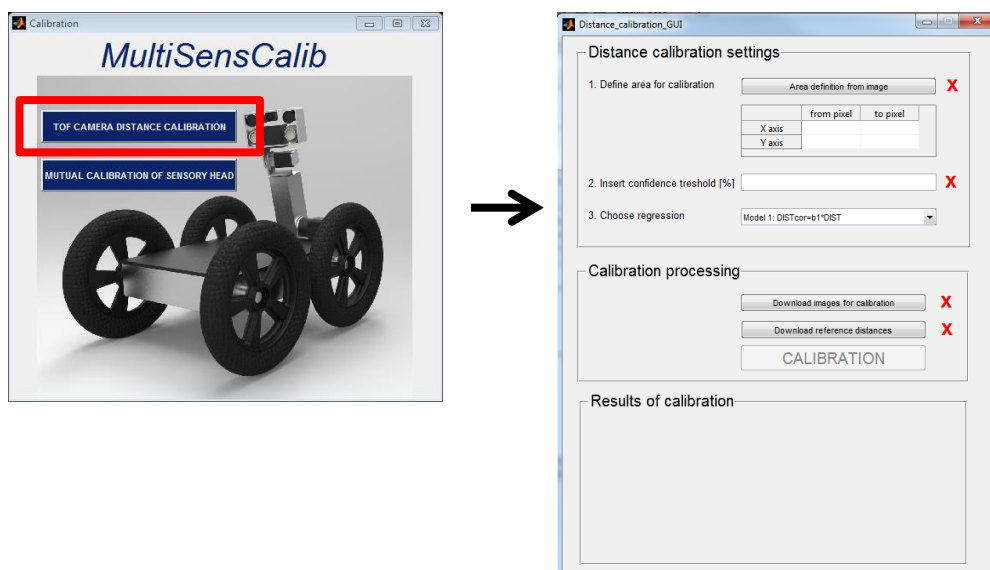
- 1) Horizontace kamery.
- 2) Zajištění rovnoběžnosti referenční stěny a snímkové roviny kamery. S kamerou natáčíme, dokud se medián měřených vzdáleností v červených obdélnících na levé a pravé straně snímku nerovnaj.
- 3) Změření a uložení snímku TOF kamery.
- 4) Změření referenční vzdálenosti laserovým dálkoměrem (např. Leica DISTO). Čelní stěna dálkoměrné kamery musí lícovat s čelní stěnou laserového dálkoměru.
- 5) Kroky 1) až 5) opakujeme s rozestupem 0,25 m nejlépe až do vzdálenosti 10 m. Pokud referenční stěna nemá dostatečné rozměry, opakujeme do vzdálenosti, kterou nám umožní. Obr. 41 zobrazuje nutné rozměry referenční stěny pro kalibraci celé kamery v závislosti na vzdálenosti kamery od referenční stěny.



Obr. 41 Velikost zorného pole dálkoměrné kamery promítnutého na referenční stěnu v závislosti na vzdálenosti kamery od referenční stěny

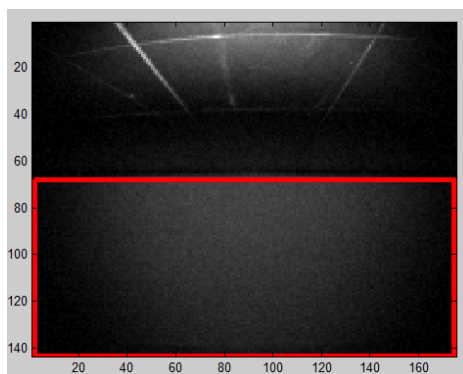
Výpočet kalibrace měřených vzdáleností

- 1) Před kalibrací vzdáleností je nutné určit parametry zkreslení kamery, proto je nutné prvně provést kalibraci kamery popsanou v podkapitole 5.4.2. Otevřeme program *MultiSensCalib* a vybereme kalibrace vzdáleností TOF kamery (tlačítko „TOF CAMERA DISTANCE CALIBRATION“). Otevře se okno „Distance_calibration_GUI“ pro zadání parametrů kalibrace.



Obr. 42 Úvodní okno programu *MultiSensCalib* (vlevo), okno pro kalibraci měřených vzdáleností (vpravo)

- 2) Ze snímku nejdále od referenční stěny graficky určíme oblast snímku, kterou potřebujeme zkalibrovat (tlačítko „Area definition from image“). Vybereme snímek, na kterém budeme určovat kalibrovanou oblast, potvrdíme výběr snímku tlačítkem „OK“. Obdélníkovou oblast označíme tažením myši z levého horního rohu.



Obr. 43 Ohraničení oblasti snímku pro kalibraci

Potvrdíme správnost vybrané oblasti tlačítkem „Yes“ popř. pro nový výběr oblasti dáme tlačítko „No“. Označení vybraných pixelů se zobrazí v tabulce. Správný výběr oblasti značí zelené kolečko napravo od tlačítka „Area definition from image“.

Distance calibration settings

1. Define area for calibration Area definition from image ○

	from pixel	to pixel
x axis	2	175
y axis	68	143

2. Insert confidence treshold [%] ✗

3. Choose regression Model 1: DISTcor=b1*DIST ▼

Obr. 44 Panel „Distance calibration setting“ – správně definovaná oblast snímku pro kalibraci

- 3) Zadáme v procentech (0-100%) od jaké hodnoty konfidence (spolehlivosti) se jednotlivá měření použijí pro kalibraci. Doporučená hodnota konfidence je 95%. Správné zadání konfidence značí zelené kolečko napravo od tlačítka „Insert confidence treshold [%]“.

Distance calibration settings

1. Define area for calibration Area definition from image ○

	from pixel	to pixel
x axis	2	175
y axis	68	143

2. Insert confidence treshold [%] 95 ○

3. Choose regression Model 1: DISTcor=b1*DIST ▼

Obr. 45 Panel „Distance calibration setting“ se správně definovanou oblastí snímku pro kalibraci a hodnotou konfidence

- 4) Vybereme regresní model pro kalibraci.
- 5) Zmáčkneme tlačítko „Download images for calibration“. Označíme složku, ve které jsou uloženy soubory s měřením dálkoměrné kamery („measx.mat“, kde x je číslo snímku). Správné zadání snímků pro kalibraci značí zelené kolečko napravo od tlačítka „Download images for calibration“.

Calibration processing

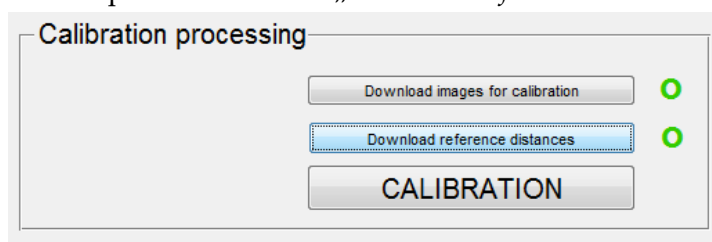
Download images for calibration ○

Download reference distances ✗

CALIBRATION

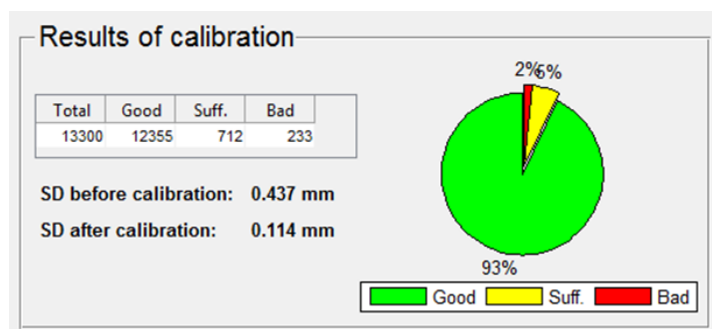
Obr. 46 Panel „Calibration processing“ s označenými snímky pro kalibraci

- 6) Zmáčkneme tlačítko „Download reference distances“. Označíme soubor „REFERENCE_dastance.txt“, v kterém jsou uvedené referenční vzdálenosti měřené laserovým dálkoměrem DISTO oddělené středníky. Pro vzdálenosti je použita desetinná tečka nikoliv čárka. Načteme soubor s referenčními vzdálenostmi. Správné načtení souboru s referenčními vzdálenostmi značí zelené kolečko napravo od tlačítka „Download reference distances“.



Obr. 47 Panel „Calibration processing“ s načteným souborem, se vzdálenostmi z referenčního měření

- 7) Stiskneme tlačítko „Calibration“, kterým spustíme výpočet kalibrace. Pokud tlačítko „Calibration“ nelze použít, chybí zadání některého z dříve definovaných vstupů pro kalibraci (označené červeným křížkem). Jakmile je kalibrace zpracována, objeví se přehled základních výsledků, podrobné výsledky jsou uloženy do souboru „Regrese_Model1.xls“ popř. „Regrese_Model2.xls“ umístěného v adresáři s programem *MultiSensCalib*.



Obr. 48 Panel „Results of calibration“ s přehlednými výsledky kalibrace

Přehledné výsledky zobrazují směrodatnou odchylku měřené vzdálenosti pro všechny kalibrované pixely před kalibrací („SD before calibration“) a po kalibraci („SD after calibration“). Celkový počet kalibrovaných pixelů a počet pixelů spadajících do následujících tří kategorií:

- „Good“ – pixely, pro které je splněna podmínka $S_T > 2 \cdot S_R$, kde S_T je teoretický součet čtverců vysvětlený regresním modelem a S_R je reziduální součet čtverců nevysvětlený regresním modelem,
- „Suff.“ – pixely splňující podmínku $S_T > S_R$,
- „Bad“ – pixely splňující podmínku $S_T < S_R$.

Tab. 2 zobrazuje popis proměnných použitých v úplných výsledcích kalibrace.

název proměnné	popis
a, b	korekční koeficienty měřené vzdálenosti (korigovaná měřená vzdálenost $cor_d = a + bd$ nebo $cor_d = bd$, kde d je měřená vzdálenost)
se_a, se_b	směrodatná odchylka korekčních koeficientů a, b
p_a, p_b	pravděpodobnost, že při platnosti nulové hypotézy nabude testovací kritérium hodnoty svědčící ještě více v neprospěch nulové hypotézy než vypočtené testovací kritérium
$corr_{ab}$	koeficient korelace mezi regresními koeficienty a, b
$min. resid$	minimální odchylka mezi referenčními vzdálenostmi a vzdálenostmi vypočtenými dle kalibrace
$max. resid$	maximální odchylka mezi referenčními vzdálenostmi a vzdálenostmi vypočtenými dle kalibrace
$mean resid.$	průměrná odchylka mezi referenčními vzdálenostmi a vzdálenostmi vypočtenými dle kalibrace
$median resid$	medián odchylek mezi referenčními vzdálenostmi a vzdálenostmi vypočtenými dle kalibrace
i, j	označení pixelu v ose x, y
Sr	reziduální součet čtverců regresního modelu (nevysvětlená část variability modelu)
St	teoretický součet čtverců regresního modelu (variabilita vzdálenosti vysvětlená modelem)
Sy	celkový součet čtverců regresního modelu (celková variabilita vzdálenosti)
r^2	koeficient determinace mezi měřenou vzdáleností d a její korekcí cor_d
$distance SD$ <i>before calibration</i>	směrodatná odchylka měřené vzdálenosti před kalibrací
$distance SD$ <i>after calibration</i>	směrodatná odchylka měřené vzdálenosti po kalibraci
$conf. treshold T$	prahová hodnota konfidence (spolehlivosti), měření s nižší hodnotou konfidence ve výpočtu nejsou použity

Tab. 2 Popis proměnných použitých v exportovaném souboru výsledků

5.2.3 EXPERIMENT

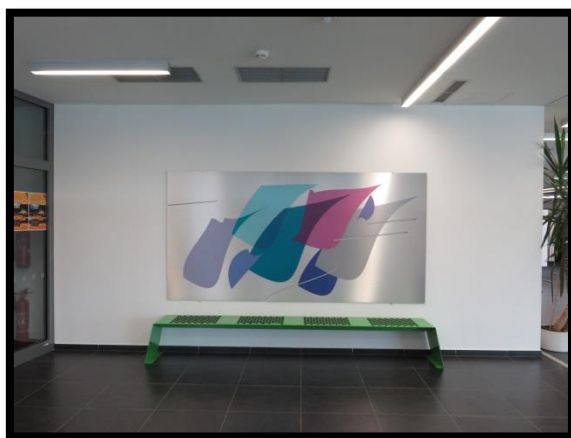
Vzhledem k velkému zornému úhlu kamery $69^\circ \times 56^\circ$ bylo nutné měření pro určení korekcí měřených vzdáleností rozdělit na 2 části (horní, dolní polovina snímku). Regresní koeficienty pro korekci měřených vzdáleností v překrytových oblastech byly určeny jako průměr z obou měření.

Referenční stěna pro kalibraci horní poloviny snímku se nacházela v budově FEKT VUT v Brně, Technická 8. Před kalibrací druhé poloviny kamery byl na tuto stěnu nainstalován obraz (Obr. 49), který nebylo možné ani krátkodobě odstranit. Pro kalibraci druhé poloviny snímače byla použita jiná stěna na chodbě stejné budovy. Porovnání je uvedeno v následující tabulce. Referenční stěny byly snímány z různých vzdáleností s krokem 0,25 m v rozsahu viz Tab. 3.

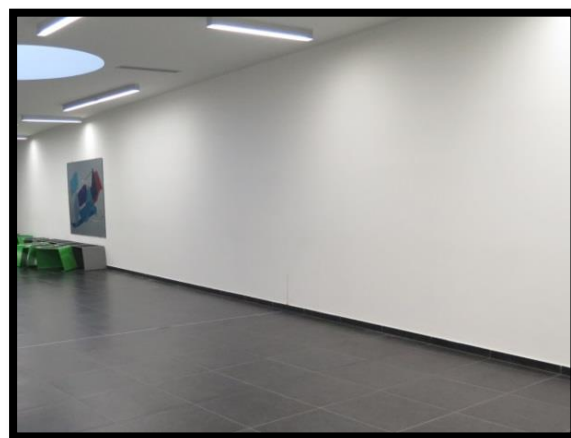
	kalibrace horní poloviny snímače	kalibrace dolní poloviny snímače
rozsah vzdáleností	0,5 m-7,25 m	0,5 m-5,25 m
rozměry stěny (výška x šířka)	2,9 m x 3,8 m	2,9 m x 15 m
velikost zorné pole poloviny snímače pro max. vzdálenost (výška x šířka)	3,6 m x 8,8 m	2,6 m x 6,4 m
počet snímků	28	20

Tab. 3 Porovnání kalibrace horní a dolní půlky kamery

V druhém případě stěna byla širší, což bylo výhodou oproti prvnímu měření. Při prvním měření od 4 metrů zasahovaly do snímku vedlejší stěny a od 5 metrů i strop. V druhém případě byl za stěnou kratší volný prostor, proto strop do snímků nezasahoval. Z výpočtu regresních koeficientů byly vypuštěny měřené vzdálenosti pixelů, které při měření horní poloviny TOF kamery referenční stěnu nezobrazovaly.



Obr. 49 Referenční stěna pro kalibraci horní poloviny snímače s již nainstalovaným obrazem



Obr. 50 Referenční stěna pro kalibraci dolní poloviny TOF kamery

Pro určení referenčních hodnot měřených vzdáleností byl použit laserový dálkoměr DISTO D8 s mezní odchylkou měřené vzdálenosti ± 1.0 mm pro součinitel konfidence $t=2$ a pro vzdálenosti nepřesahující 10 m [91]. Směrodatná odchylka vzdálenosti měřené laserovým dálkoměrem DISTO je proti směrodatné odchylce měřené vzdálenosti

kamerou SwissRanger SR4000 zanedbatelná, proto dále bude toto měření považováno za bezchybné.

Byly testovány 2 lineární regresní modely, které by mohly vhodně aproximovat závislost korekce cor_d na měřené vzdálenosti d :

- model 1 (bez absolutního členu): $cor_d = bd$,
- model 2 (s absolutním členem): $cor_d = a + bd$

Parametry těchto modelů byly vypočteny v nově vytvořeném programu *MultiSensCalib*, pro odhad parametrů modelů byly použity funkce programu Matlab *glmfit* a *robustfit*.

Vzhledem k vysoké korelaci mezi regresními koeficienty a , b lineárního modelu s absolutním členem je vhodnější použít lineární model bez absolutního členu. Hodnoty korelace mezi regresními koeficienty jsou uvedeny v následující tabulce. Výsledné korekční koeficienty jsou uvedeny v příloze 2.

	horní polovina snímku		dolní polovina snímku	
	glmfit	robustfit	glmfit	robustfit
maximální korelace reg. koeficientů	0,95	0,95	0,94	0,94
minimální korelace reg. koeficientů	0,75	0,75	0,78	0,78
průměrná korelace reg. koeficientů	0,89	0,89	0,89	0,89

Tab. 4 Korelace mezi regresními koeficienty lineárního modelu s absolutním členem

Zhodnocení regresního modelu 1 je uvedeno v Tab. 5, kde směrodatná odchylka je označena SD a regresní koeficient b . Díky měření překrytových oblastí je celkový počet pixelů větší než počet pixelů kamery. Testování statistické významnosti regresních koeficientů proběhlo na hladině významnosti $\alpha = 5\%$. Proto v Tab. 5 je uveden počet pixelů, pro které hodnota p je menší než hladina významnosti α . Tyto regresní koeficienty jsou statisticky významné, protože hodnota p označuje nejmenší hladinu, na které zamítáme nulovou hypotézu. Většina regresních koeficientů je statisticky významných.

Dále je v Tab. 5 uvedeno porovnání variability měřené vzdálenosti vysvětlené regresním modelem tj. teoretický součet čtverců S_T s částí variability nevysvětlené modelem tj. reziduální součet čtverců S_R . Pokud nebudeme uvažovat region 4, pak pro 99 % pixelů (odhad funkcí *glmfit*) a pro 98 % pixelů (odhad funkcí *robustfit*) je variabilita vysvětlená regresním modelem větší než nevysvětlená. Z toho vyplývá vhodnost použitého regresního modelu.

	odhad funkcí <i>glmfit</i>				odhad funkcí <i>robustfit</i>			
	reg. 1	reg. 2	reg. 3	reg. 4	reg. 1	reg. 2	reg. 3	reg. 4
celkový počet pixelů	228	4126	7670	9623	228	4126	7670	9623
počet pixelů, pro které platí $p < 0,05$	227	4110	7670	9511	228	4126	7670	9595
počet pixelů, pro které platí $p \geq 0,05$	1	16	0	112	0	0	0	28
počet pixelů, pro které platí $S_T > S_R$	227	4099	7568	8508	227	4094	7447	7262
počet pixelů, pro které platí $S_T \leq S_R$	1	27	102	1115	1	32	223	2361
počet pixelů, pro které platí $r^2 > 0,80$	81	2463	3674	987	78	2286	3375	859
počet pixelů, pro které platí $0,50 < r^2 \leq 0,80$	146	1600	3894	7521	149	1808	4072	6403
počet pixelů, pro které platí $0,25 < r^2 \leq 0,50$	0	3	101	1049	0	8	219	2109
počet pixelů, pro které platí $r^2 \leq 0,25$	1	24	1	102	1	24	4	252
SD před kalibrací	0,063	0,079	0,095	0,322	0,063	0,079	0,095	0,322
SD po kalibraci	0,030	0,035	0,050	0,225	0,031	0,035	0,053	0,236
min. hodnota b	-0,021	-0,028	-0,033	-0,771	-0,019	-0,027	-0,032	-0,686
max. hodnota b	-0,007	-0,007	-0,003	-0,004	-0,007	-0,007	-0,003	-0,002
prům. hodnota b	-0,014	-0,017	-0,018	-0,053	-0,014	-0,017	-0,017	-0,042
průměrná SD pro b	0,002	0,002	0,002	0,012	0,002	0,001	0,002	0,007

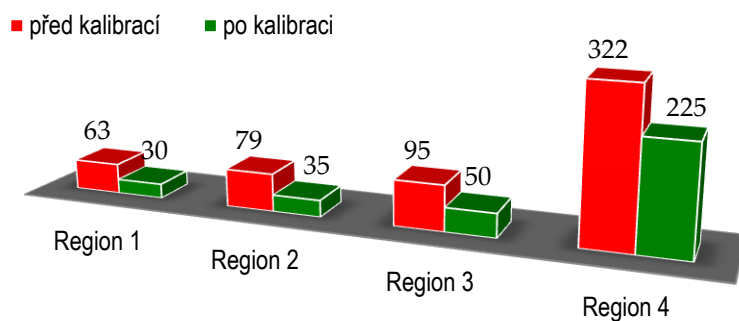
Tab. 5 Zhodnocení parametrů regresního modelu 1 pro funkce *glmfit* a *robustfit*

Určení míry závislosti mezi měřenou vzdáleností a její opravou pro jednotlivé pixely je zobrazeno v Tab. 5. Určení míry závislosti podle koeficientu determinace je uvedeno v následující tabulce:

interval hodnot koeficientu determinace	míra závislosti
$r^2 \leq 0,10$	těsnost nízká
$0,10 < r^2 \leq 0,25$	těsnost mírná
$0,25 < r^2 \leq 0,50$	těsnost význačná
$0,50 < r^2 \leq 0,80$	těsnost velká
$0,80 < r^2 \leq 1,00$	těsnost velmi vysoká

Tab. 6 Určení míry závislosti podle koeficientu determinace [92]

Přesnost měřené vzdálenosti byla nezávisle posuzována ve 4 oblastech, které kopírují rozdělení přesnosti měření podle výrobce [88]. Obr. 51 a Tab. 5 zobrazují směrodatnou odchylku měřené vzdálenosti před kalibrací a po kalibraci v jednotlivých oblastech snímku. Po kalibraci se absolutní přesnost měření výrazně zlepšila, avšak pro region 1 stále nedosahuje hodnoty udávané výrobcem.



Obr. 51 Směrodatná odchylka měřené vzdálenosti - regresní model 2, funkce glmfit [mm]

5.3 KALIBRACE HYBRIDNÍCH SKENERŮ

V této podkapitole je popsána kalibrace měřených vzdáleností pro skenery Velodyne HDL-64 a Velodyne HDL-32, které jsou součástí mapovacího robota EnvMap, viz Obr. 52, Obr. 53. Na úvod jsou popsány technické parametry použitých skenerů, dále je definován matematický model výpočtu objektových souřadnic a matematický model pro kalibraci měřených vzdáleností. Závěrečná část podkapitoly je věnována samotným experimentům včetně nezávislého ověření korekčních parametrů určených kalibrací.



Obr. 52 Mapovací robot EnvMap se skenerem Velodyne HDL-64

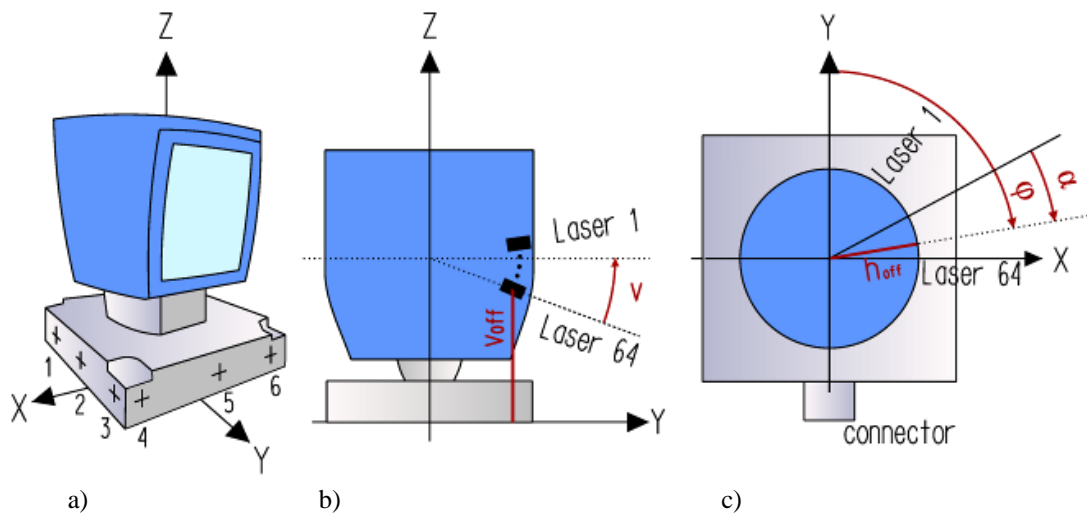


Obr. 53 Mapovací robot EnvMap se skenerem Velodyne HDL-32

Zařízení Velodyne HDL-64 je rychlý 3D LiDAR s 64 lasery. Každý z laserů je umístěn pod specifickým vertikálním úhlem na hlavě skeneru rotující rychlostí 5–15 Hz. Zorné pole pokrývá 26,8° (od -24,8° do +2°) vertikálně a 360° horizontálně. Horizontální rozlišení skeneru je přibližně 0,09° a vertikální přibližně 0,04°. Velodyne HDL-32 obsahuje 32 laserů, zorné pole pokrývá 41,3° (od -30,67 do +10,67) vertikálně a 360° horizontálně. Horizontální rozlišení skeneru je přibližně 0,16° a vertikální přibližně 1,33°. Směrodatná odchylka měřené vzdálenosti udávaná výrobcem pro oba dva typy je < 2 cm. [93], [94]

Kalibrace hybridního skeneru Velodyne se skládá z kalibrace vnitřních a vnějších parametrů. Tato práce se zabývá pouze zpřesněním vnitřních parametrů. Lokální 3D souřadnice okolních objektů vztažené k souřadnému systému skeneru jsou určeny z měřené vzdálenosti, horizontálního úhlu a 5 korekčních parametrů, které jsou neměnné pro každý laser. Souřadnicový systém skeneru je pravotočivý s počátkem ve středu dolní plochy základny. Orientace souřadnicových os X , Y a vnitřní (geometrické) parametry skeneru jsou znázorněny na Obr. 54. Následujících 5 korekčních parametrů je použito pro výpočet kartézských souřadnic:

- korekce horizontálního úhlu α definovaná úhlem mezi paprskem laseru a rovinou $Y-Z$,
- korekce vertikálního úhlu v definovaná úhlem mezi paprskem laseru a rovinou $X-Y$,
- korekce měřené vzdálenosti Δl , která označuje absolutní hodnotu, o kterou musí být zvětšena měřená vzdálenost pro jednotlivý laser,
- vertikální offset v_{off} definovaný jako výška laseru od spodní plochy základny,
- horizontální offset h_{off} .



Obr. 54 Skener Velodyne HDL64: a) orientace os souřadnicového systému skeneru, b) parametry skeneru ve vertikální rovině, c) parametry skeneru v horizontální rovině

Definice vertikálního offsetu je použita podle výrobce [95], někteří autoři např. v [65], [66] jej nepřesně definují jako vzdálenost měřenou kolmo od paprsku laseru k počátku souřadného systému.

Vodorovná vzdálenost $l_{X,Y}$ v rovině X, Y je vypočtena stejným způsobem jako v [96]:

$$l_{X,Y} = (l + \Delta l) \cdot \cos v. \quad (45)$$

3D souřadnice X, Y, Z v lokálním souřadnicovém systému skeneru jsou vypočteny podle [96], kde φ je aktuální horizontální úhel.

$$\begin{aligned} X &= (l_{X,Y} \cdot \sin(\varphi - \alpha) - h_{off} \cdot \cos(\varphi - \alpha)), \\ Y &= (l_{X,Y} \cdot \cos(\varphi - \alpha) + h_{off} \cdot \sin(\varphi - \alpha)), \\ Z &= (l + \Delta l) \cdot \sin v + v_{off}. \end{aligned} \quad (46)$$

Pokud dosadíme rovnici (45) do rovnice (46) dostaneme následující tvar:

$$\begin{aligned}
 X &= ((l + \Delta l) \cdot \cos v) \cdot \sin(\varphi - \alpha) - h_{off} \cdot \cos(\varphi - \alpha), \\
 Y &= ((l + \Delta l) \cdot \cos v) \cdot \cos(\varphi - \alpha) + h_{off} \cdot \sin(\varphi - \alpha), \\
 Z &= (l + \Delta l) \cdot \sin v + v_{off}.
 \end{aligned}
 \tag{47}$$

Předchozí rovnice lze použít pro oba typy skenerů, ale pro Velodyne HDL-32 je podle výrobce [95] z 5 korekčních parametrů pouze korekce vertikálního úhlu nenulová.

5.3.1 MATEMATICKÝ MODEL KALIBRACE

Navržený postup kalibrace je složený ze tří částí. V první fázi jsou určeny transformační parametry mezi dvěma lokálními ortogonálními pravotočivými souřadnicovými systémy, tj. výpočet 6 parametrů shodnostní transformace (3 translace, 3 rotace) podmínkovým vyrovnaním.

Druhá fáze zahrnuje výpočet rovnice kalibračních rovin, který je také založen na podmínkovém vyrovnaní. Rovnice roviny je určena v obecném tvaru, kde a , b , c jsou koeficienty normálového vektoru roviny.

V třetí fázi jsou odhadnuty korekční parametry. První navržené řešení je podle podmínkového vyrovnaní s neznámými. Za předpokladu dostatečné rovinnosti referenčních stěn by měl skenerem změřený bod referenční roviny splňovat danou rovnici referenční roviny. Jako podmínka je použita skutečnost, že vzdálenost měřeného bodu od roviny v daném vertikálním a horizontálním úhlu musí být nulová. Podle [98] je vzdálenost od roviny vyjádřena následovně:

$$d = \frac{a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z - 1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}},
 \tag{48}$$

kde a , b , c jsou koeficienty rovnice roviny. Pokud budeme uvažovat vzdálenost v daném horizontálním a vertikálním úhlu, pak se rovnice (48) změní na (49), kde β označuje úhel vypočtený z úhlů ω , φ . ω je úhel mezi osou Y souřadnicového systému skeneru a referenční stěnou. Výpočet úhlu β se liší podle kvadrantu, ve kterém leží úhly ω , φ , viz Tab. 7.

$$s = \frac{a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z - 1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \cdot \cos|v| \cdot \sin \beta}
 \tag{49}$$

	$\omega \in (0^\circ, 90^\circ)$	$\omega \in (90^\circ, 180^\circ)$
$\varphi \in (0^\circ, 90^\circ)$	$\beta = \varphi - \omega$	$\beta = 180^\circ - (\varphi - \omega)$
$\varphi \in (90^\circ, 180^\circ)$	$\beta = \varphi - \omega$	$\beta = \omega - \varphi$
$\varphi \in (180^\circ, 270^\circ)$	$\beta = (\varphi - \omega) - 180^\circ$	$\beta = \varphi - \omega$
$\varphi \in (270^\circ, 360^\circ)$	$\beta = 360^\circ - (\varphi - \omega)$	$\beta = 180^\circ - (\varphi - \omega)$

Tab. 7 Výpočet úhlu β

Standardní řešení tohoto modelu je podmínkové vyrovnání s neznámými. Měřené vzdálenosti l_i a horizontální úhly φ_i reprezentují v modelu vyrovnání přímá měření a 5 korekčních faktorů nepřímá měření. Model vyrovnání je popsán v podkapitole 3.4.3. Matice plánu mají následující tvar:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial s_1}{\partial \Delta l} & \frac{\partial s_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial s_1}{\partial v} & \frac{\partial s_1}{\partial v_{off}} & \frac{\partial s_1}{\partial h_{off}} \\ \frac{\partial s_2}{\partial \Delta l} & \frac{\partial s_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial s_2}{\partial v} & \frac{\partial s_2}{\partial v_{off}} & \frac{\partial s_2}{\partial h_{off}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial s_n}{\partial \Delta l} & \frac{\partial s_n}{\partial \alpha} & \frac{\partial s_n}{\partial v} & \frac{\partial s_n}{\partial v_{off}} & \frac{\partial s_n}{\partial h_{off}} \end{pmatrix} \quad (50)$$

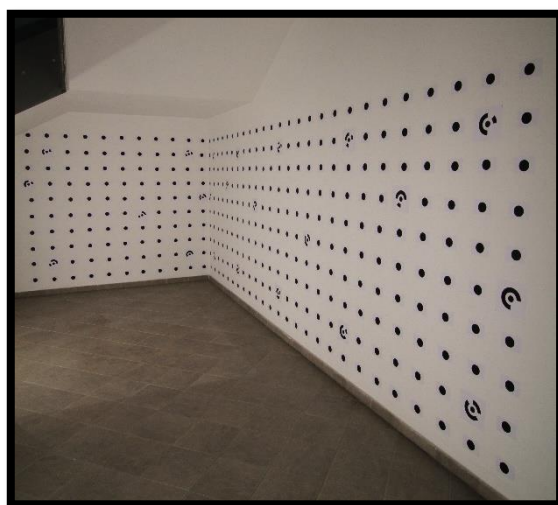
$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial s_1}{\partial l_1} & \frac{\partial s_1}{\partial \varphi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial s_2}{\partial l_2} & \frac{\partial s_2}{\partial \varphi_2} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial s_n}{\partial l_n} & \frac{\partial s_n}{\partial \varphi_n} \end{pmatrix} \quad (51)$$

Nevýhodou popsaného vyrovnání je, že jsou určeny kromě oprav nepřímých měření, které potřebujeme pro kalibraci, i opravy přímých měření. Tyto opravy jsou vzhledem k použitému modelu nadbytečné a nevhodně ovlivňují hodnoty korekčních parametrů.

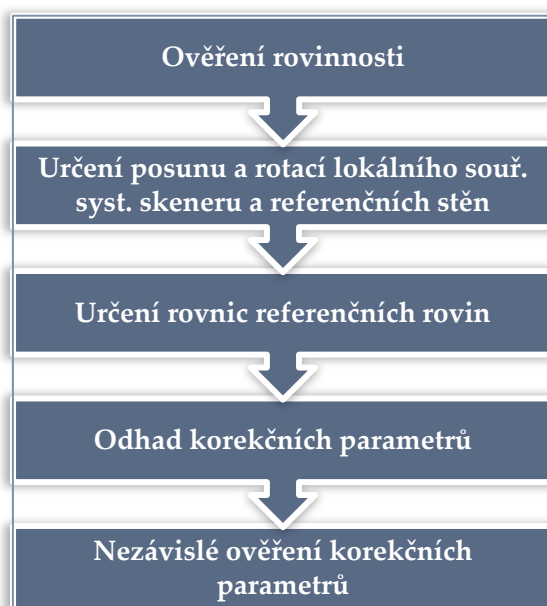
Nově navržený model vyrovnání vychází z podmínkového vyrovnání. Standardní vyrovnání se ovšem nedá použít vzhledem k faktu, že počet podmínkových rovnic je vyšší než počet nadbytečných měření. Podmínkové rovnice mají tvar $A\delta + w = 0$, kde A je matice plánu stejná jako v předchozím vyrovnání, δ je vektor přírůstku neznámých a w je vektor uzávěrů. Normální rovnice mají tvar $AP^{-1}A^T k + w = 0$, kde P je matice vah, $k = -N^+w$ jsou koreláty a $N = AP^{-1}A^T$ jsou koeficienty normálních rovnic. Vektor přírůstků neznámých δ je vypočten následovně: $\delta = P^{-1}A^T k$. Pro výpočet N^+ je použita Moore-Penroseova pseudoinverze [97].

5.3.2 EXPERIMENTY

Bodové pole pro kalibraci bylo vytvořeno na Ústavu automatizace a měřící techniky, FEKT VUT v Brně. Pole bylo složeno ze dvou matných vertikálních stěn (viz Obr. 55). Rozměry stěn jsou následující: výška 2 m, šířka 2,2 m a 5 m. Jednotlivé kroky kalibrace znázorňuje Obr. 56. Před samotným měřením bylo nutné provést ověření rovinnosti stěn a vytvořit bodové pole, které by umožnilo určit počátek souřadnicového systému skeneru v místním souřadnicovém systému referenčních stěn. Z identických bodů jsou určeny transformační parametry.



Obr. 55 Bodové pole pro kalibraci



Obr. 56 Postup kalibrace skeneru Velodyne

Pro určení souřadnic bodů kalibračního bodového pole byla použita blízká fotogrammetrie. Souřadnice 23 vřícovacích bodů byly určeny totální stanicí Topcon GPT 3003N, jejíž parametry jsou uvedeny v [99]. Souřadnice a výšky vřícovacích bodů byly určeny protínáním z úhlů. Každý vřícovací bod byl určen minimálně ze 3 stanovisek. Výsledné souřadnice byly určeny z vyrovnání. Nejvyšší dosažená hodnota směrodatné souřadnicové odchylky na vřícovacím bodu je 0,89 mm. Vřícovací body byly stabilizovány 8-bitovými kódovými terči (viz Obr. 57). Pro stabilizaci ostatních 372 bodů byly použity kruhové terče s průměrem 50 mm vytištěné na laserové tiskárně na matnou samolepící fólii. Souřadnice těchto bodů byly určeny digitální zrcadlovkou Canon EOS 7D s širokoúhlým objektivem Tokina 12–24 mm. Při kalibraci této kamery byly použity 4 parametry zkreslení $k1$, $k2$ pro radiální a $p1$, $p2$ pro tangenciální. Fotogrammetrické zpracování bylo provedeno v software PhotoModeler Scanner od Eos Systems Inc.. Bylo použito automatického označování a referencování terčů. Maximální hodnota směrodatné souřadnicové odchylky na určovaném bodě je 0,93 mm.



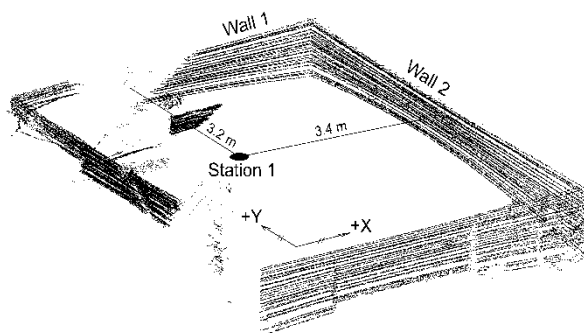
Obr. 57 8-bitové kódované terče

Obecné rovnice roviny pro referenční stěny byly vypočteny v programu Matlab, následně byly vypočteny odchylky jednotlivých bodů od ideální roviny. Na kratší stěně dosáhla průměrná odchylka hodnoty 1 mm a maximální hodnoty 2 mm, hodnoty pro kratší stěnu byly postupně 1 mm a 5 mm.

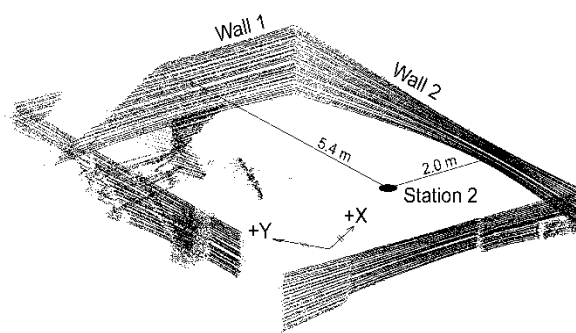
Transformační parametry mezi lokálním souřadnicovým systémem a souřadnicovým systémem skeneru byly určeny z identických bodů. 6 terčů bylo umístěno na základnu skeneru Velodyne HDL-64 (3 na 2 stranách) viz Obr. 54 a 7 terčů bylo umístěno na kruhovou základnu Velodyne HDL-32 (úhlový rozestup 30°). První sada souřadnic identických bodů v souřadnicovém systému pro skener Velodyne HDL-64 byla určena z měření posuvným měřítkem. Byly měřeny vzdálenosti mezi 6 terči a významnými prvky základny, které měly přesně definovaný vztah k počátku systému. Pro Velodyne HDL-32 nebylo nutné provádět měření posuvným měřítkem, protože jsou všechny terče na obvodu válce a tím je jejich vztah k počátku souřadnicového systému skeneru přesně definován. Maximální hodnota směrodatné souřadnicové odchylky je 0,68 mm.

Druhá sada souřadnic identických bodů v souřadnicovém systému referenčních stěn byla určena z protínání ze směrů. K měření byla použita totální stanice Topcon GPT

3003N. Bylo orientováno na vlčovací body. Maximální hodnota směrodatné souřadnicové odchylky je 0,97 mm.



Obr. 58 Mračno bodů (pouze horních 32 laserů) změřené skenerem Velodyne HDL-64 – stanoviště 1



Obr. 59 Mračno bodů (pouze horních 32 laserů) změřené skenerem Velodyne HDL-64 – stanoviště 2

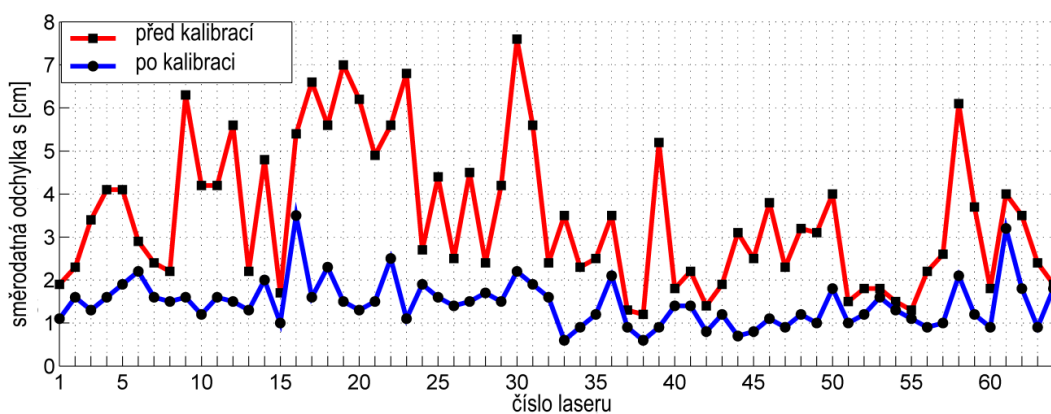
Data pro kalibraci Velodyne HDL-64 byla získána ze 4 měření (s_1, s_2, s_3, s_4) kalibračního pole. Měření bylo provedeno ze dvou postavení skeneru, viz Obr. 58 a Obr. 59, při dvou různých světelných podmínkách. Z každého stanoviště bylo měřeno dvakrát, s osvětlením halogenovými reflektory (s_2, s_3) a bez osvětlení (s_1, s_4). Každé měření trvalo 5 minut. Pro každou situaci bylo vybráno 300 otáček skeneru. 100 rotací ze začátku měření, 100 ze středu a 100 z konce měření. Pro urychlení vyrovnání byl vypočten medián měřených vzdáleností pro každý rotační úhel φ a jednotlivé sady 100 otáček.

Pro Velodyne HDL-32 byla provedena pouze 2 měření (s_5, s_6) ze dvou různých stanovišť. Další zpracování bylo stejné jako v případě skeneru Velodyne HDL-64.

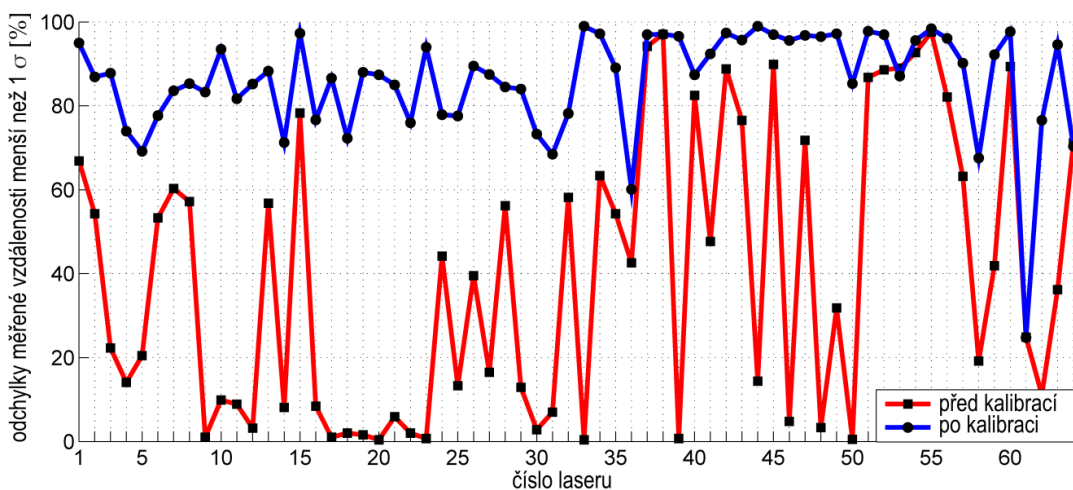
Pro vyrovnání skeneru Velodyne HDL-64 byly použity počáteční hodnoty korekčních parametrů uvedené výrobcem. Vyrovnané korekční parametry $\Delta l, \alpha, v$ byly vypočteny ze stanoviště 2 (s_3, s_4) pro všech 64 laserů. Hodnoty korekčních parametrů v_{off} and h_{off} nebyly znovu určovány, vzhledem k faktu, že dosahují významně nižších hodnot než je hodnota směrodatné odchylky měřené vzdálenosti $\sigma = 2$ cm. Výsledné korekční parametry byly určeny jako průměr vyrovnaných korekčních parametrů z měření s_3 a s_4 .

Tab. 8 zobrazuje porovnání směrodatné odchylky měřené vzdálenosti před kalibrací a po kalibraci prvků vnitřní orientace pro jednotlivé sady vybraných 100 rotací. Dále obsahuje porovnání procent odchylek měřených vzdáleností s mezi měřenými body a body ležícími v dané referenční rovině pod daným horizontálním a vertikálním úhlem menších než $1, 3\sigma$ před a po kalibraci. Směrodatná odchylka měřené vzdálenosti udávaná výrobcem podle technického listu [93] je označena σ .

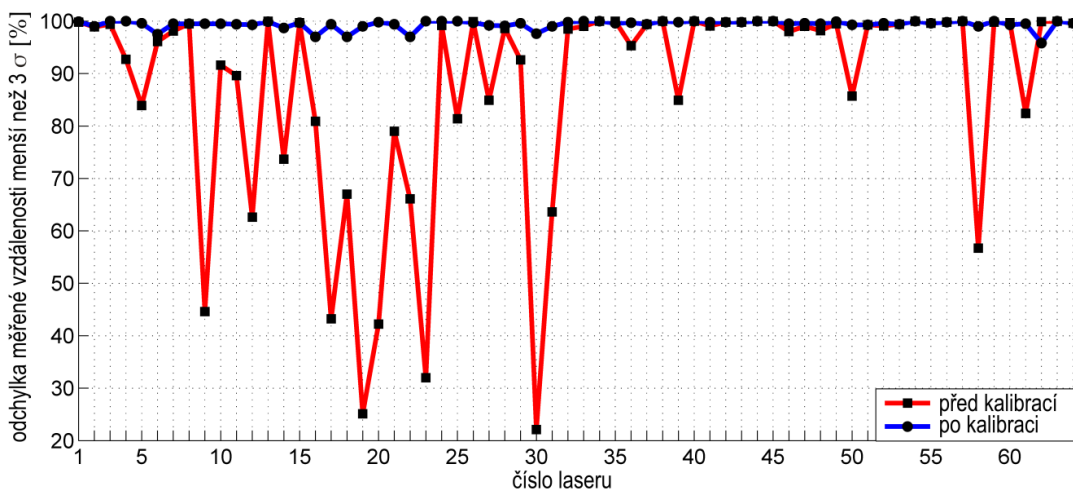
Obr. 60 zobrazuje směrodatnou odchylku měřené vzdálenosti s pro stanoviště skeneru 2 před a po kalibraci. Obr. 61 a Obr. 62 porovnávají procenta měření, které mají menší odchylku měřené vzdálenosti s než 1σ (3σ) před a po kalibraci pro všech 64 laserů.



Obr. 60 Kalibrace Velodyne HDL-64 - porovnání směrodatné odchylky měřené vzdálenosti pro každý laser před a po kalibraci



Obr. 61 Kalibrace Velodyne HDL-64 – porovnání procent odchylek měřené vzdálenosti menší než 1σ (2 cm) pro každý laser před a po kalibraci



Obr. 62 Kalibrace Velodyne HDL-64 – porovnání procent odchylek měřené vzdálenosti menší než 3σ (6 cm) pro každý laser před a po kalibraci

	před kalibrací			po kalibraci		
	směrodatná odchylka [cm]	s menší než $\pm 1\sigma$ [%]	s menší než $\pm 3\sigma$ [%]	směrodatná odchylka [cm]	s menší než $\pm 1\sigma$ [%]	s menší než $\pm 3\sigma$ [%]
$S_3^{\text{začátek}}$	3.5	41.3	85.2	1.2	67.4	99,4
$S_3^{\text{střed}}$	3.5	40.5	84.2	1.2	85.2	99,4
S_3^{konec}	3.4	40.8	87.7	1.2	89.7	99,5
$S_4^{\text{začátek}}$	3.3	38.1	89.3	1.2	90.3	99,5
$S_4^{\text{střed}}$	3.3	37.9	90.1	1.2	89.4	99,4
S_4^{konec}	3.2	37.5	90.6	1.2	88.6	99,3

Tab. 8 Směrodatné odchylky měřené vzdálenosti před a po kalibraci skeneru Velodyne HDL-64

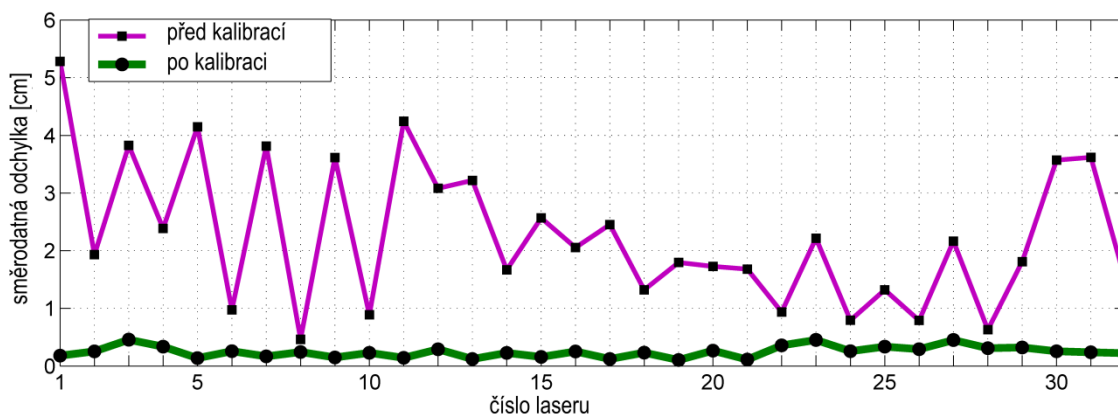
Bylo provedeno statistické testování dosažené hodnoty směrodatné odchylky. Testována byla nulová hypotéza, že hodnota variance je větší nebo rovna σ^2 (4 cm²) [93]; proti alternativní hypotéze, že hodnota variance je menší než σ^2 . Pro data před kalibrací byla nulová hypotéza zamítnuta na hladině významnosti 5% pro 14 laserů, po kalibraci pro 51 laserů. Z toho vyplývá, že po kalibraci 51 z 64 laserů nepřekračuje směrodatnou odchylku měřené vzdálenosti udávané výrobcem.

Vyrovnané korekční parametry pro skener Velodyne HDL-32 byly vypočteny pro stanovisko skeneru 5. Tab. 9, Obr. 63 a Obr. 64 pro Velodyne HDL-32 jsou analogické jako Tab. 8, Obr. 60 a Obr. 61 pro Velodyne HDL-64. Graf zobrazující procenta odchylek menších než 3 σ není uveden, protože před i po kalibraci všechny hodnoty dosahují přibližně 100%.

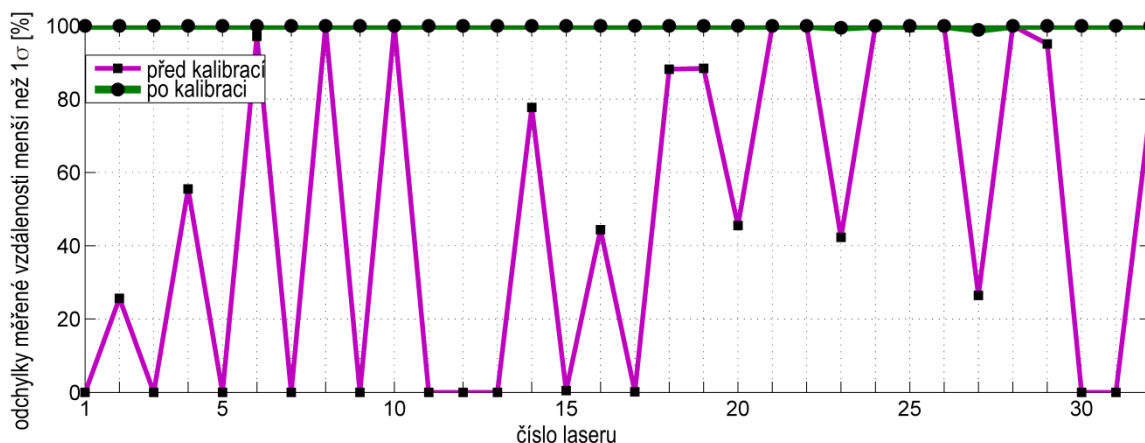
Bylo provedeno stejné statistické testování dosažených hodnot směrodatných odchylek jako v předchozím případě. Pro data před kalibrací byla nulová hypotéza zamítnuta na hladině významnosti 5% pro 14 laserů, pro data po kalibraci pro 32 laserů. Z toho vyplývá, že po kalibraci všechny lasery skeneru Velodyne HDL-32 odpovídají přesnosti udávané výrobcem.

	před kalibrací			po kalibraci		
	směrodatná odchylka [cm]	s menší než $\pm 1\sigma$ [%]	s menší než $\pm 3\sigma$ [%]	směrodatná odchylka [cm]	s menší než $\pm 1\sigma$ [%]	s menší než $\pm 3\sigma$ [%]
$S_5^{\text{začátek}}$	2.3	49.0	100.0	0.2	100.0	100.0
$S_5^{\text{střed}}$	2.3	49.1	100.0	0.3	100.0	100.0
S_5^{konec}	3.4	48.5	100.0	0.2	99.9	100.0

Tab. 9 Směrodatné odchylky měřené vzdálenosti před a po kalibraci skeneru Velodyne HDL-32



Obr. 63 Kalibrace Velodyne HDL-32 - porovnání směrodatné odchylky měřené vzdálenosti pro každý laser před a po kalibraci



Obr. 64 Kalibrace Velodyne HDL-32 – porovnání procent odchylek měřené vzdálenosti menší než 1σ (2 cm) pro každý laser před a po kalibraci

Nezávislé ověření vyrovnaných korekčních parametrů bylo vypočteno pro stanoviště skenerů 1 (měření s_1 , s_2) a 6 (s_6). Z každé série měření byl vybrán jeden sken ze začátku, jeden uprostřed a jeden z konce. Hodnoty odchylek měřené vzdálenosti s pro korekční parametry udávané výrobcem a zpřesněné kalibrací jsou zobrazeny v Tab. 10 a Tab. 11 pro Velodyne HDL-64 a Velodyne HDL-32. Směrodatná odchylka měřené vzdálenosti se pro vyrovnané korekční parametry snížila z 3,7 cm na 2,6 cm pro Velodyne HDL-64 a z 2,3 cm na 0,4 cm pro Velodyne HDL-32. Procenta odchylek měřené vzdálenosti spadajících do intervalů $\pm\sigma$, $\pm 3\sigma$ se zvýšila. Obr. 65 a Obr. 68 zobrazují srovnání směrodatných odchylek s použitím původních a nově vyrovnaných korekčních parametrů, grafy Obr. 66, Obr. 67 a Obr. 69 zobrazují porovnání procent odchylek měřených vzdáleností menší než 1σ (3σ) před a po kalibraci pro 64 laserů skeneru Velodyne HDL-64 a pro 32 laserů skeneru Velodyne HDL-32. Graf zobrazující procenta

odchylek menších než 3σ není opět uveden ze stejného důvodu jako při kalibraci korekčních parametrů.

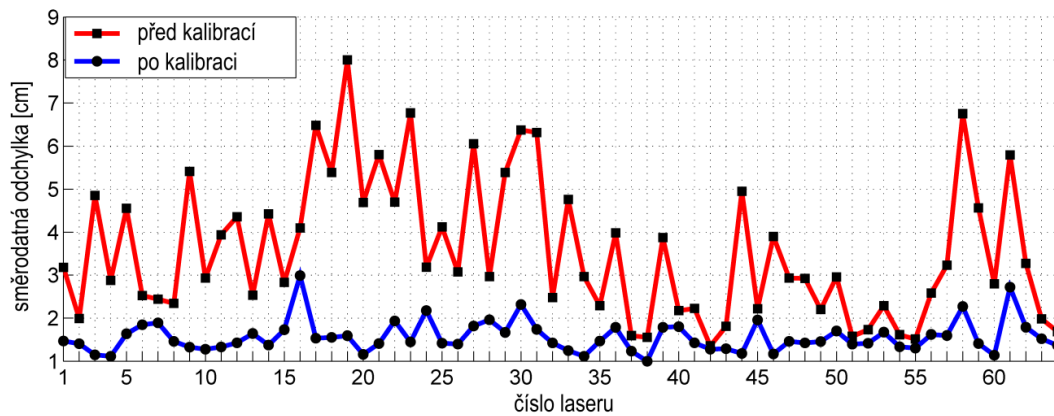
	před kalibrací			po kalibraci		
	směrodatná odchylka [cm]	s menší než $\pm 1\sigma$ [%]	s menší než $\pm 3\sigma$ [%]	směrodatná odchylka [cm]	s menší než $\pm 1\sigma$ [%]	s menší než $\pm 3\sigma$ [%]
$S_1^{\text{začátek}}$	3.6	35.6	85.5	2.1	66.6	98.0
$S_1^{\text{střed}}$	3.6	35.8	85.3	2.5	52.9	97.2
S_1^{konec}	3.8	33.9	82.5	2.7	47.0	96.3
$S_2^{\text{začátek}}$	3.7	33.7	81.3	2.7	48.2	95.7
$S_2^{\text{střed}}$	3.7	34.9	81.7	2.7	50.3	95.6
S_2^{konec}	3.7	35.5	82.1	2.7	51.4	95.3

Tab. 10 Ověření kalibrace Velodyne HDL-64 ve vnitřním prostředí - směrodatné odchylky měřené vzdálenosti před a po kalibraci skeneru Velodyne HDL-64

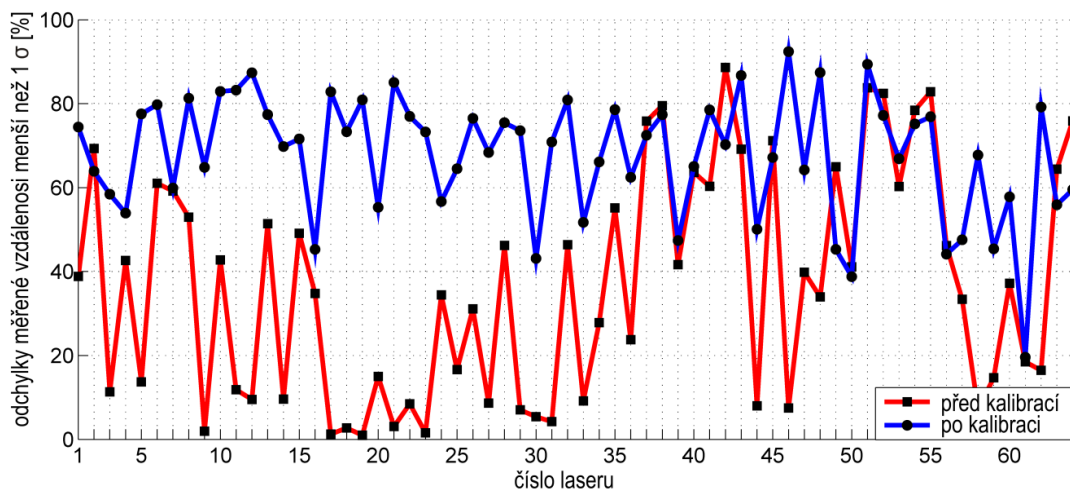
	před kalibrací			po kalibraci		
	směrodatná odchylka [cm]	s menší než $\pm 1\sigma$ [%]	s menší než $\pm 3\sigma$ [%]	směrodatná odchylka [cm]	s menší než $\pm 1\sigma$ [%]	s menší než $\pm 3\sigma$ [%]
$S_6^{\text{začátek}}$	2.3	52.6	100.0	0.4	99.2	100.0
$S_6^{\text{střed}}$	2.3	50.4	100.0	0.4	98.6	100.0
S_6^{konec}	2.3	50.8	100.0	0.4	98.9	100.0

Tab. 11 Ověření kalibrace Velodyne HDL-32 ve vnitřním prostředí - směrodatné odchylky měřené vzdálenosti před a po kalibraci skeneru Velodyne HDL-64

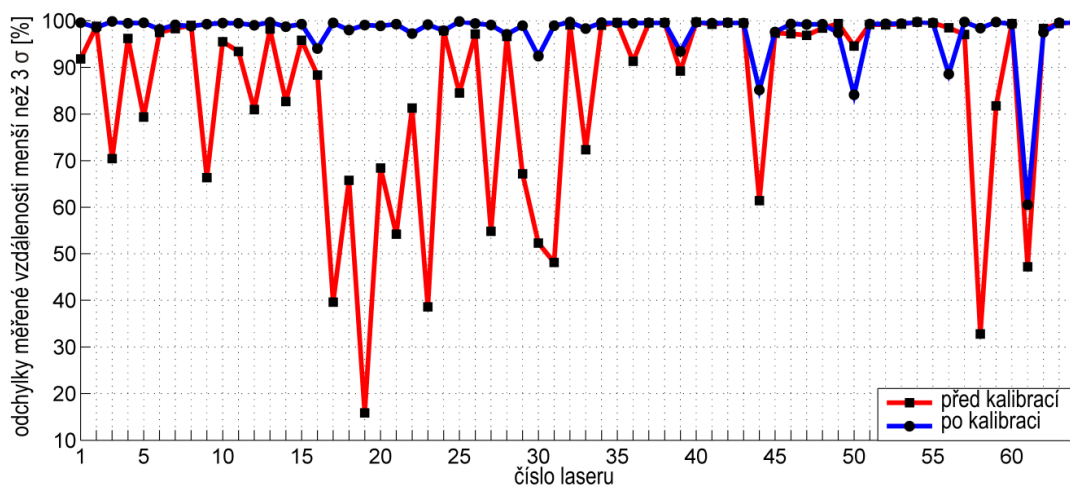
Bylo provedeno statistické testování střední chyby pro nezávislé ověření. Nulová a alternativní hypotéza byly použity stejné jako v předchozí části (H_0 : variance měřené vzdálenosti je větší nebo rovna $\sigma^2 \uparrow H$: variance je menší než σ^2). Pro Velodyne HDL-64 byla tato hypotéza pro data před kalibrací zamítnuta pro 14 laserů na hladině významnosti 5%, s použitím kalibrovaných korekčních koeficientů byla nulová hypotéza zamítnuta pro 36 laserů. Stejný test byl proveden pro skener Velodyne HDL-32. Nulová hypotéza byla zamítnuta pro 14 laserů pro data před kalibrací a pro 32 laserů pro data po kalibraci. Z tohoto testování vyplývá, že pro Velodyne HDL-64 ne všechny lasery odpovídají přesnosti uváděné výrobcem. Velodyne HDL-32 je přesnější a po kalibraci všechny lasery nepřekračují směrodatnou odchylku 2 cm.



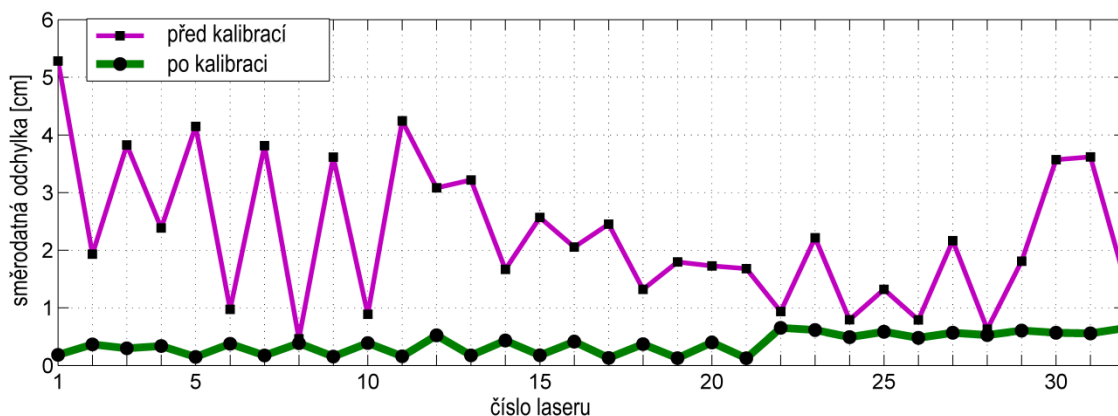
Obr. 65 Ověření kalibrace Velodyne HDL-64 ve vnitřním prostředí - porovnání směrodatné odchylky měřené vzdálenosti pro každý laser před a po kalibraci



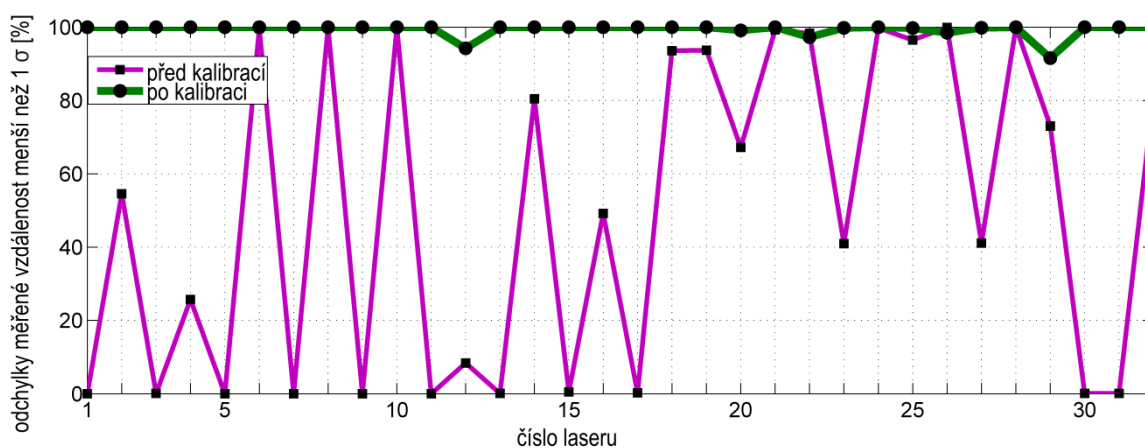
Obr. 66 Ověření kalibrace Velodyne HDL-64 ve vnitřním prostředí - porovnání procent odchylek měřené vzdálenosti menší než 1σ (2 cm) pro každý laser před a po kalibraci



Obr. 67 Ověření kalibrace Velodyne HDL-64 ve vnitřním prostředí - porovnání procent odchylek měřené vzdálenosti menší než 3σ (6 cm) pro každý laser před a po kalibraci

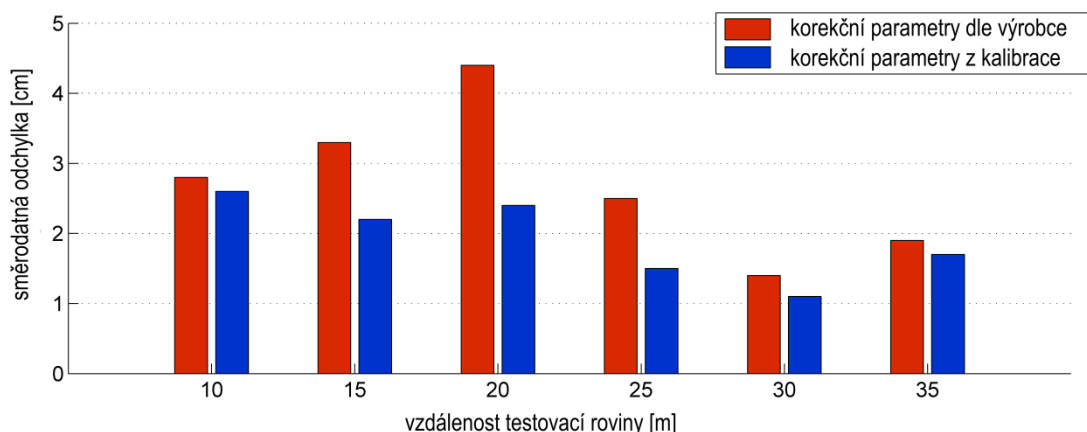


Obr. 68 Ověření kalibrace Velodyne HDL-32 ve vnitřním prostředí - porovnání směrodatné odchylky měřené vzdálenosti pro každý laser před a po kalibraci



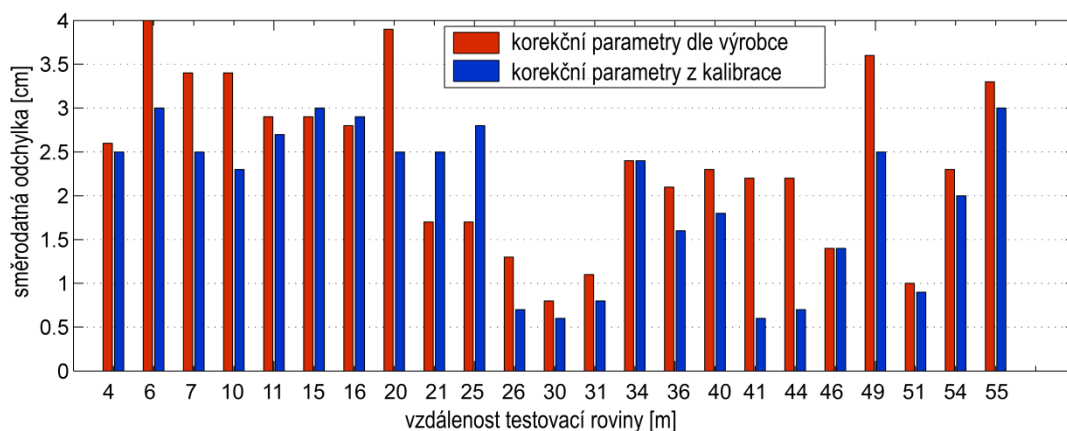
Obr. 69 Ověření kalibrace Velodyne HDL-32 ve vnitřním prostředí - porovnání procent odchylek měřené vzdálenosti menší než 1σ (2 cm) pro každý laser před a po kalibraci

Kromě ověření kalibrace ve vnitřních podmínkách, které bylo provedeno jenom pro vzdálenosti nepřesahující 6 m, bylo provedeno i ověření ve venkovních podmínkách. Byly měřeny dřevotřískové desky ve vzdálenostech 10 až 35 m s krokem 5 metrů. Směrodatná odchylka měřené vzdálenosti pro Velodyne HDL 64 s korekčními parametry udávanými výrobcem měla hodnotu 2,7 cm a pro kalibrované parametry 1,9 cm. Toto testování bylo provedeno pouze pro skener Velodyne HDL-64. Porovnání směrodatných odchylek je zobrazeno na Obr. 70.

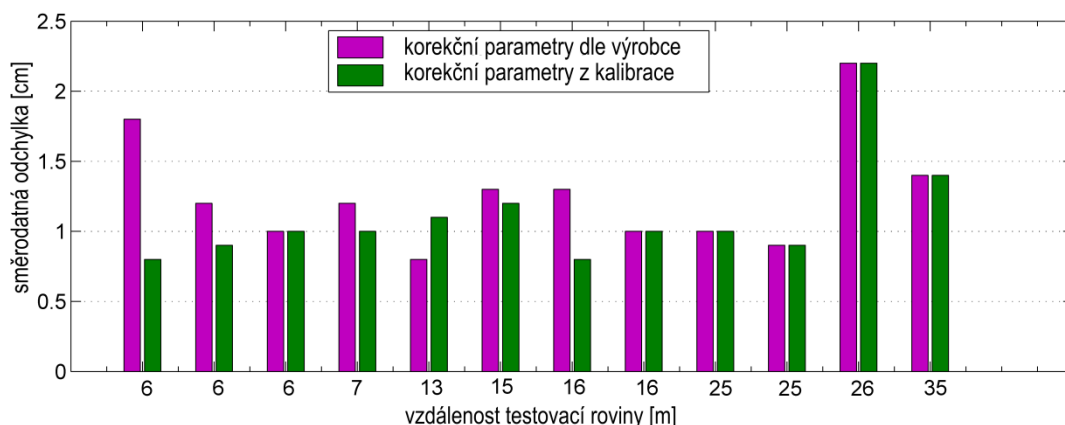


Obr. 70 Ověření kalibrace Velodyne HDL-64 za ideálních podmínek ve venkovním prostředí - porovnání směrodatné odchytky měřené vzdálenosti pro desky umístěné v různých vzdálenostech před a po kalibraci

Všechna předchozí ověření byla provedena v téměř ideálních podmínkách. Proto bylo provedeno ještě ověření v reálných podmínkách. Experiment probíhal před budovou FEKT během konce výuky, takže kolem skeneru v průběhu měření procházelo velké množství studentů. Viditelnost byla snížena také mlhou. Na krajích chodníku byly umístěny 2 dřevotřískové desky. Robot se skenerem byl řízen po chodníku. Bylo provedeno 15 sérií měření s rozestupem 10 m pro oba skenery. Na Obr. 71 a Obr. 72 jsou zobrazeny směrodatné odchytky pro různé vzdálenosti desek od skeneru. Pro Skener Velodyne HDL-64 s parametry definovanými výrobcem byla hodnota směrodatné odchytky měřené vzdálenosti 2,4 cm, s vyrovnanými parametry potom 2,0 cm. Hodnota směrodatné odchytky pro Velodyne HDL-32 byla před kalibrací 1,3 cm, zatímco po kalibraci 1,1 cm. Ve většině případů byla směrodatná odchytka po kalibraci menší než před ní, kromě vzdáleností kolem 25 m, což je hodnota použitá výrobcem pro určení korekčních parametrů [95].



Obr. 71 Ověření kalibrace Velodyne HDL-64 za reálných podmínek ve venkovním prostředí - porovnání směrodatné odchytky měřené vzdálenosti pro desky umístěné v různých vzdálenostech před a po kalibraci



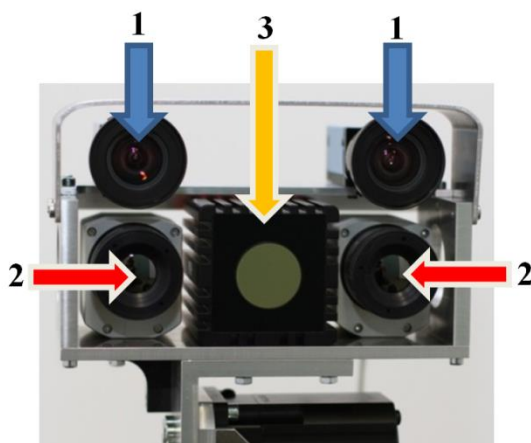
Obr. 72 Ověření kalibrace Velodyne HDL-32 za reálných podmínek ve venkovním prostředí - porovnání směrodatné odchylky měřené vzdálenosti pro desky umístěné v různých vzdálenostech před a po kalibraci

Jak dokazuje předchozí část, některé lasery testovaného skeneru Velodyne HDL-64 nemají přesnost v mezích definovaných výrobcem. Zatímco směrodatná odchylka měřené vzdálenosti pro skener Velodyne HDL-32 po kalibraci odpovídá přesnosti udávané výrobcem. Po provedení kalibrace se počet laserů splňujících výrobcem definovanou směrodatnou odchylku zvýšil ze 14 na 36 laserů skeneru Velodyne HDL-64 a ze 14 na 32 pro Velodyne HDL-32. Ačkoliv výrobce udává pro oba skenery stejnou přesnost měření, dle experimentů je testovaný skener Velodyne HDL-32 přesnější.

5.4 VZÁJEMNÁ KALIBRACE VÍCE MATICOVÝCH SNÍMAČŮ

Vzájemná kalibrace slouží pro určení prvků vnitřní orientace, vzájemné polohy a orientace snímačů maticových senzorů umístěných na hlavici robotu Orpheus-X3. Zpočátku byly pro tuto hlavici použity termovizní kamery MicroEpsilon TIM 450, později byly nahrazeny kvalitnějšími kamerami Flir Tau 640. Sensorická hlavice (viz Obr. 73) je složena z následujících 5 snímačů:

- 2 CCD kamery The Imaging Source DFK23G445 s objektivem Computar, ohniskovou vzdáleností 5 mm, rozlišením 1280 x 960 pixelů, rozestupem mezi pixely 3,75 μm a zorným polem 51° x 40°,
- 2 termokamery,
 - MicroEpsilon TIM 450 s ohniskovou vzdáleností 8 mm, rozlišením 382 x 288 pixelů, rozestupem mezi pixely 25 μm , zorným polem 62° x 49° a teplotní citlivostí 0,08 K,
 - Flir Tau 640 s ohniskovou vzdáleností 9 mm, rozlišením 640 x 512, rozestupem mezi pixely 17 μm , zorným polem 69° x 56° a teplotní citlivostí 0,05 K,
- dálkoměrná kamera Swissranger SR4000 s ohniskovou vzdáleností 5,8 mm, rozlišením 176 x 144 pixelů, rozestupem mezi pixely 40 μm a zorným polem 69° x 56°.



Obr. 73 Sensorická hlavice: 1 - CCD kamery, 2 - termokamery, 3 - dálkoměrná kamera

Rozsah zorného pole je pro všechny senzory podobný. Dálkoměrná kamery a termovizní kamery Flir Tau 640 mají největší zorné pole. Největší nevýhodou dálkoměrné kamery je její malé rozlišení. V porovnání s CCD kamerou je rozlišení v jedné ose téměř desetkrát nižší, s termokamerou MicroEpsilon TIM 450 poloviční a termokamerou Flir Tau 640 přibližně čtvrtinové.

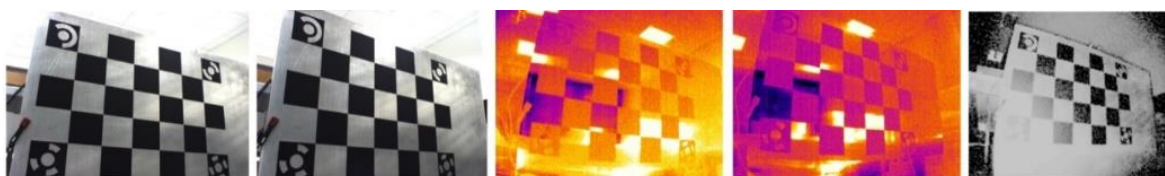
Prvním důležitým krokem při kalibraci bylo vytvoření kalibračního terče použitelného pro snímače s velmi rozdílným rozlišením měřící ve 3 různých spektrech:

- blízké infračervené (850 nm) pro TOF kameru,
- viditelné pro CCD kamery,
- LWIR pro termovizní kamery.

Celkem byly vytvořeny 3 různé kalibrační terče. První terč byl koncipován tak, aby dostatečného kontrastu šachovnicové mřížky bylo dosaženo pouze rozdílnými vlastnostmi materiálů, tj. aby kontrastní materiály měly podstatně jinou emisivitu a odrazivost. Tento prototyp byl vyroben z hliníkové desky o rozměrech 0,7x0,5 m (nízká emisivita, vysoká odrazivost), na které byla nalepena speciální matná černá samolepící folie s vysokou emisivitou (absorpcí) a nízkou odrazivostí viz Obr. 74. Kontrast těchto dvou materiálů je dostatečný pro identifikování rohů šachovnicové mřížky, ale pouze v případě kolmého pohledu na kalibrační desku. Pokud se deska natáčí, odrazivost hliníkových ploch začíná způsobovat velké problémy v identifikaci rohů mřížky, viz Obr. 75.



Obr. 74 Snímky první kalibrační desky: vlevo - CCD kamery (2 snímky), vprostřed – termokamery (2 snímky), vpravo - dálkoměrná kamera.



Obr. 75 Snímky první kalibrační desky: vlevo - CCD kamery (2 snímky), vprostřed – termokamery (2 snímky), vpravo - dálkoměrná kamera.

Vzhledem k problémům pro plochy s vysokou odrazivostí byla navržena druhá kalibrační deska, pro kterou je také základem hliníková deska (tloušťka 5 mm). V hliníkové desce byly laserem vyřezány otvory a deska byla povrchově upravena tzv. eloxováním, aby se zmenšila odrazivost hliníku. Za hliníkovou desku byla ve vzdálenosti přibližně 5 mm umístěna dřevotřísková deska s černým povrchem. Výhodou tohoto řešení je možnost nahřátí pouze hliníkové desky a tím zvýšení kontrastu šachovnicového vzoru. Snímky jednotlivých kamer jsou znázorněny na Obr. 76.



Obr. 76 Snímky druhé kalibrační desky: vlevo - CCD kamery (2 snímky), vprostřed - termokamery (2 snímky), vpravo - dálkoměrná kamera

Jedinou změnou mezi druhým návrhem a třetí finální verzí je aktivní vyhřívání desky. Tato funkce výrazně zjednodušuje přípravu kalibrace.

Postup pro společnou kalibraci kamer sensorické hlavičky, tj. určení prvků vnitřní a vnější orientace je složen z následujících kroků:

- nasnímání kalibračního terče z různých úhlů, více o vhodné konfiguraci v podkapitole 5.4.1,
- extrakce uzlových bodů kalibrační desky,
 - pro automatickou extrakci uzlových bodů je použit algoritmus navržený Rufti a kol. v [41], který je podrobně popsán v podkapitole 3.4.1
 - pokud algoritmus automatické extrakce nekonverguje k řešení je použito manuální označení 4 rohů kalibrační desky a následná extrakce zpřesnění uzlových bodů, podle algoritmu použitého v [100],
- pro kalibraci kamer sensorické hlavičky byly vytvořeny následující funkce:
 - „compute_homografy.m“ - určí matici homografie H pro každý snímek z objektových a snímkových souřadnic uzlových bodů kalibračního terče,
 - „initial_calibration.m“ - vypočte matici kamery K_0 , matici rotace R_0 a matici translace t_0 mezi sořadnicovým systémem kalibrační desky a souřadnicovým systémem kalibrované kamery, matematický model určení prvků vnitřní a vnější orientace je popsán v podkapitole 3.4.2,
 - „refine_calibration.m“ - vyrovnání, které minimalizuje reprojekční chybu uzlových bodů pro jednotlivé kamery zvlášť. Pro vyrovnání je použita funkce Matlabu „lsqnonlin“ a je definována cost funkce. Vyrovnání zpřesní hodnoty matice kamery K , koeficientů zkreslení k , matice rotace R a matice translace t mezi sořadnicovým systémem kalibrační desky a souřadnicovým systémem kalibrované kamery,
 - „refine_extrinsic_calibration.m“ - vyrovnání, které minimalizuje reprojekční chybu pro všechny snímky všech kalibrovaných kamer

současně. Pro vyrovnání je opět použita funkce programu Matlab *lsqnonlin* a definována *cost* funkce. Vyrovnání zpřesní hodnoty matice kamery K , matice rotace R a matice translace t referenční kamery vzhledem k souřadnému systému kalibrační desky a rotace R_{ref} a translace t_{ref} mezi souřadnicovými systémy referenční kamery a ostatních kamer.

- Export výsledků kalibrace do souboru ve formátu *.xls

Program *MultiSensCalib* je přílohou číslo 1. Tato příloha obsahuje jak zdrojové kódy, tak program kompilovaný pro spuštění *.exe.

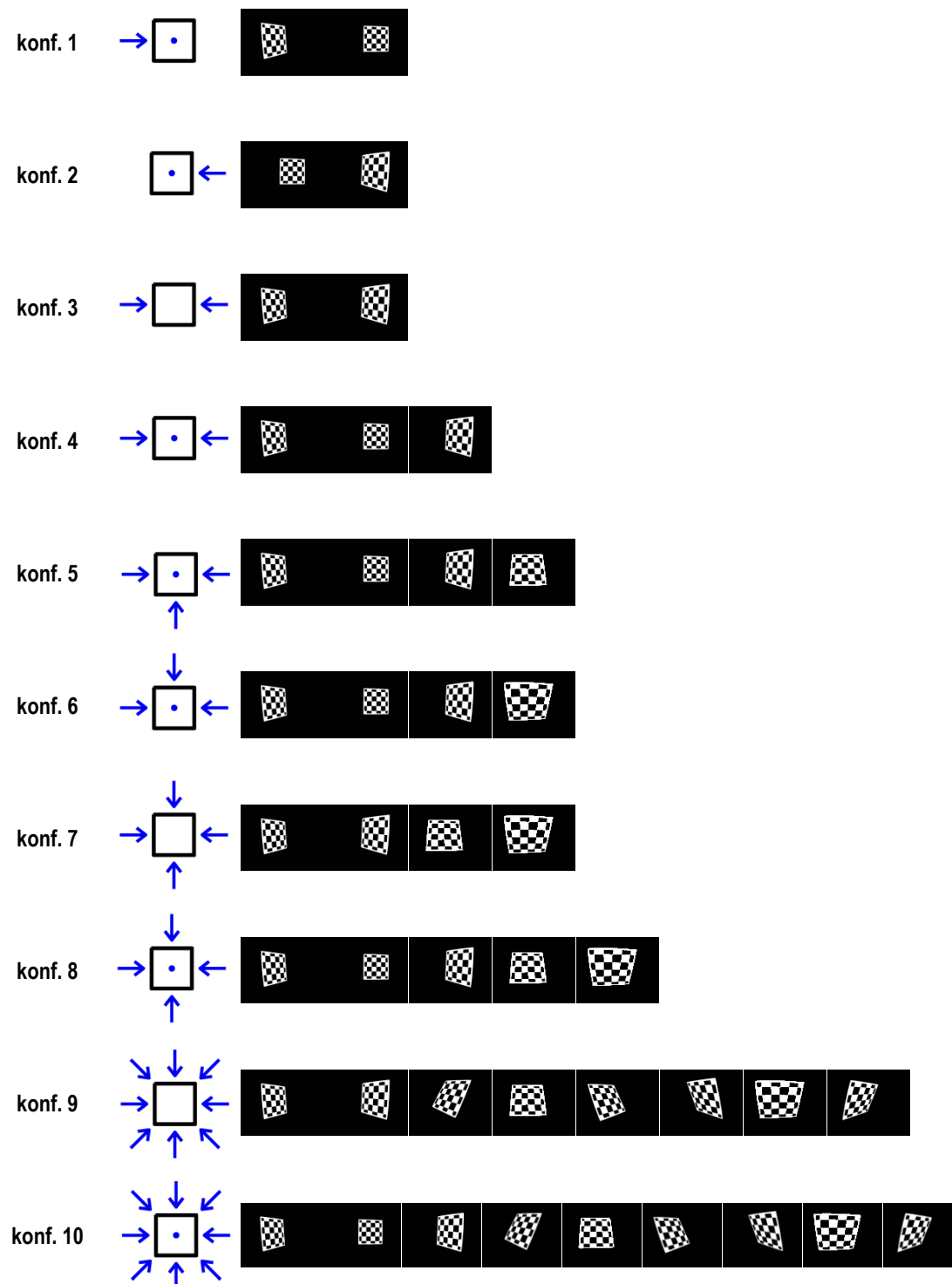
5.4.1 OPTIMÁLNÍ KONFIGURACE SNÍMKŮ

Jednotlivé kamery mohou být ze sensorické hlavice sejmuty, použity pro jiný účel a opět namontovány zpět, což vyvolává potřebu systém vždy recalibrovat. Z tohoto důvodu je důležité znát optimální konfiguraci snímků pro rychlou a přesnou kalibraci všech kamer. Výběr dostatečně spolehlivé konfigurace s minimálním počtem snímků bude popsán dále. Na úvod je popsáno několik vybraných konfigurací používaných pro kalibraci kamer.

Algoritmus kalibrace je navržen podle [48]. Zhang v [48] testoval jak závislost přesnosti prvků vnitřní orientace na počtu snímků použitých pro kalibraci, tak na úhlu, který svírá rovina kalibrační desky se snímkovou rovinou. K nejvýznamnějšímu zlepšení přesnosti došlo mezi kalibrací ze 2 a ze 3 snímků. S použitím více snímků se přesnost kalibrace zlepšuje už jen minimálně. V závislosti na úhlu mezi kalibrační a snímkovou rovinou je nejlepší přesnosti dosaženo podle [48] pokud rovina kalibrační desky svírá se snímkovou rovinou úhel 45° . Tato hodnota úhlu je v reálných podmínkách ovšem špatně dosažitelná a snižuje přesnost extrakce uzlových bodů kalibrační mřížky. V [48] jsou pro kalibraci kamery použity dva až pět snímků. V [36] je pro kalibraci použito 9-10 snímků. V programu Photomodeler je pro automatickou kalibraci kamery doporučeno použít minimálně 6 snímků, optimálně 8 snímků. Dále je doporučeno pro širokouhlé objektivy s velkým zkreslením nepoužívat více než 12 snímků, protože mohou nastat problémy ve výpočtu [101]. V programu Photomodeler je ovšem doporučeno získat 2 snímky ze stejného úhlu ke kalibrační desce otočením kamery o 90° . Toto otočení sensorické hlavice v našem případě není možné – sensorický manipulátor to neumožňuje.

Pro testování optimální konfigurace snímků pro kalibraci sensorické hlavice bylo vybráno 10 konfigurací zobrazených v Tab. 12. Pro kalibraci je použito od 2 do 9 snímků. Jednotlivé kamery sensorické hlavice jsou vůči sobě natočené, aby snímky bylo možné použít pro barevnou a termovizní stereovizi. Okraje, které neobsahují kalibrační terč, jsou větší než je obvyklé pro kalibraci pouze jedné kamery, to proto, aby byl zobrazený celý

kalibrační terč na snímcích ze všech kamer. Dalším důvodem je fakt, že každý použitý typ kamer má poněkud jiné zorné pole.



Tab. 12 Konfigurace snímků testované pro kalibraci sensorické hlavičky; modré šipky značí směr získání snímku; modrá tečka snímek v normální poloze; v pravém sloupci jsou zobrazeny snímky termovizní kamery pro danou konfiguraci

Posouzení nejvhodnější konfigurace bylo provedeno na základě ověření přesnosti datové fúze podrobně popsané v podkapitole 5.5.2. Směrodatné odchytky reprojekce snímkových souřadnic pro konfigurace 4–10 jsou uvedeny v Tab. 13. Kalibraci pouze ze dvou snímků nelze určit ani přibližné hodnoty prvků vnitřní a vnější orientace, proto nejsou v tabulce uvedeny. Výsledky kalibrace pro jednotlivé konfigurace jsou obsaženy v příloze 3. Na základě hodnot směrodatných odchylek lze jako nejvhodnější konfiguraci považovat konfiguraci číslo 8 a 10. Pro konfiguraci číslo 8 je z grafů odchylek snímkových souřadnic (viz podkapitola 5.5.2) patrná chyba pro levou termovizní kameru výrazně narůstající se vzdáleností od středu snímku. Z tohoto důvodu je za spolehlivou považována až konfigurace číslo 10.

	konf. 4	konf. 5	konf. 6	konf. 7	konf. 8	konf. 9	konf. 10
směrodatná odchytky snímkové souřadnice x [px zkoumané kamery]							
CCDI	6,3	2,8	2,7	3,7	2,0	2,9	2,4
CCDr	6,3	3,3	3,1	3,4	2,4	3,5	3,0
THER.l	2,2	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0
THER.r	3,5	1,5	1,1	1,3	1,1	1,1	1,2
směrodatná odchytky snímkové souřadnice y [px zkoumané kamery]							
CCDI	5,2	3,9	3,3	3,9	3,2	4,1	3,2
CCDr	6,0	3,8	3,3	3,7	3,2	4,4	3,3
THER.l	2,3	1,6	1,7	1,3	1,5	1,4	1,2
THER.r	2,3	1,1	1,1	1,3	1,0	1,2	1,1
směrodatná souřadnicová odchytky [px zkoumané kamery]							
CCDI	5,8	3,4	3,0	3,8	2,7	3,6	2,8
CCDr	6,2	3,6	3,2	3,6	2,8	4,0	3,2
THER.l	2,3	1,5	1,5	1,3	1,4	1,3	1,1
THER.r	3,0	1,3	1,1	1,3	1,1	1,2	1,2

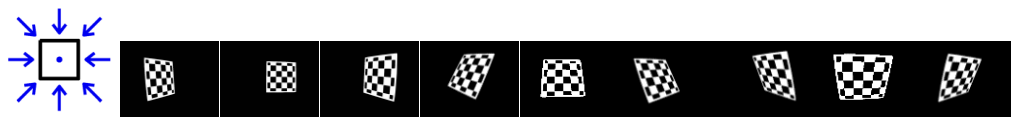
Tab. 13 Směrodatné odchytky snímkových souřadnic pro konfigurace číslo 4 -10

5.4.2 POSTUP PRO KALIBRACI SENZORICKÉ HLAVICE V PROGRAMU MULTISENSCALIB

Tato podkapitola slouží jako manuál pro vzájemnou kalibraci kamer senzorické hlavice robotu Orpheus-X3. V první části je popsán postup pro kalibrační měření, v druhé části postup zpracování v programu *MultiSensCalib* vytvořeném v rámci této práce. Měření a zpracování této kalibrace jsou časově málo náročné, protože se předpokládá časté opakování. Tetovací data z provedeného experimentu lze stáhnout z <http://naszalud.uamt.fekt.vutbr.cz> (<ftp://naszalud.uamt.fekt.vutbr.cz>). Pro přihlášení je třeba použít následující přihlašovací údaje: login: kalibrace, heslo: kalibrace.

Kalibrační měření

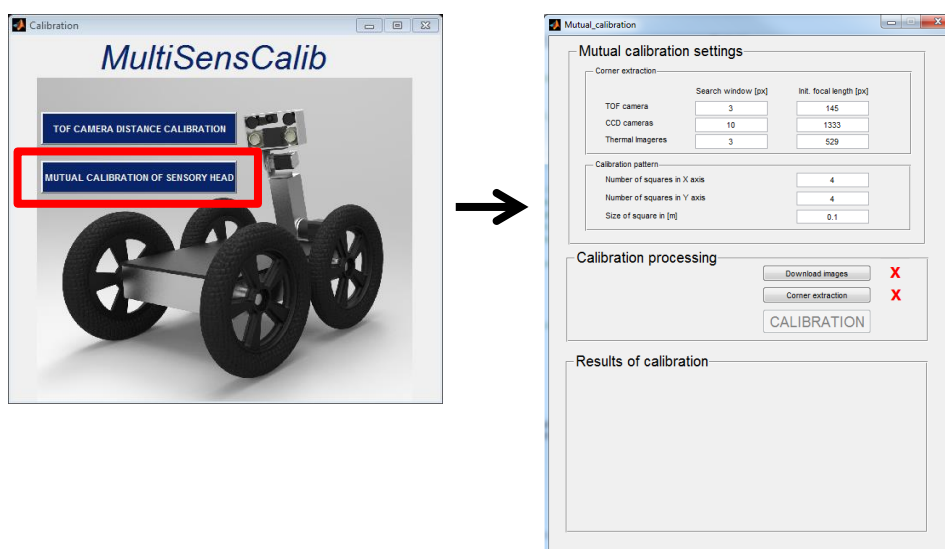
Nejdříve vyčkáme na zahřátí a teplotní stabilizaci kalibrační desky. Změříme a uložíme 9 snímků kalibračního terče podle konfigurace na Obr. 77.



Obr. 77 Vlevo - konfigurace snímků pro kalibraci sensorické hlavičky; modré šipky značí směr získání snímku; modrá tečka snímek v normální poloze; dále vpravo jsou zobrazeny příklady snímků

Výpočet kalibrace sensorické hlavičky

- 1) Otevřeme program *MultiSensCalib* a vybereme vzájemnou kalibraci sensorické hlavičky (tlačítko „MUTUAL CALIBRATION OF SENSORY HEAD“). Otevře se okno „Mutual_Calibration“ pro zadání parametrů kalibrace.



Obr. 78 Úvodní okno programu *MultiSensCalib* (vlevo), okno pro vzájemnou kalibraci sensorické hlavičky (vpravo)

- 2) Zkontrolujeme přednastavené parametry pro extrakci rohů kalibrační mřížky, tj. velikost okna pro prohledávání obrazu („*Search window [px]*“) a předběžnou ohniskovou vzdálenost („*Init. Focal length [px]*“). Tato předběžná hodnota ohniskové vzdálenosti je použita pouze pro manuální extrakci bodů terče. Přibližný převod mezi ohniskovou vzdáleností v milimetrech a ohniskovou vzdáleností v pixlech je uveden v rovnici (52), kde jako m je použita velikost pixelu anebo rozestup pixelů.

$$f_{[px]} = \frac{f_{[mm]}}{m_{[mm/px]}} \quad (52)$$

- 3) Zkontrolujeme parametry kalibrační desky. Počet celých čtverců v ose x kalibračního terče („Number of squares in x axis“), počet celých čtverců v ose y kalibračního terče („Number of squares in y axis“) a délku strany jednoho čtverce kalibrační mřížky („Size of square [m]“).

Mutual calibration settings		
Corner extraction		
	Search window [px]	Init. focal length [px]
TOF camera	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="145"/>
CCD cameras	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1333"/>
Thermal Imageres	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="529"/>
Calibration pattern		
Number of squares in x axis	<input type="text" value="4"/>	
Number of squares in y axis	<input type="text" value="4"/>	
Size of square [m]	<input type="text" value="0.1"/>	

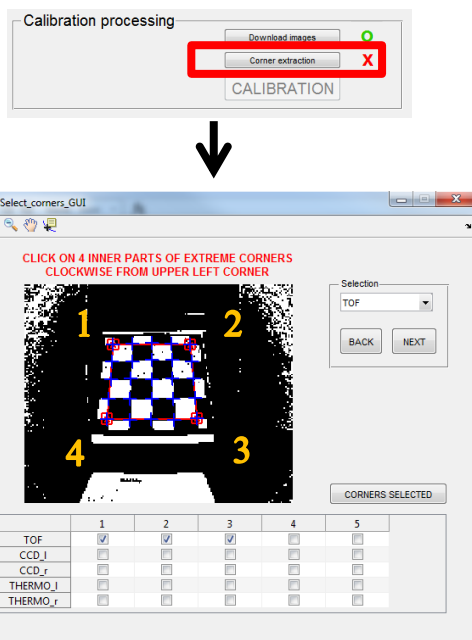
Obr. 79 Panel „Mutual calibration setting“ – nastavení základních parametrů pro kalibraci

- 4) Zmáčkneme tlačítko „Download images“. Označíme složku, ve které jsou uloženy složky s kalibračními snímky („meas_yyyy_mm_dd_hh_mm_ss“, kde yyyy je rok, mm měsíc, dd den, hh hodina, mm minuta, ss sekunda měření). Správné zadání snímků pro kalibraci značí zelené kolečko napravo od tlačítka „Download images“. Potvrdíme výběr snímků tlačítkem „OK“.

Obr. 80 Panel „Calibration processing“ se správně označenými snímky pro kalibraci

- 5) Zmáčkneme tlačítko „Corner extraction“. Otevře se okno „Select_corner_GUI“. Pokud rohové body kalibrační mřížky nejsou určeny automaticky, jsme vyzváni k manuálnímu označení čtyř rohových bodů kalibrační mřížky. Označení provedeme kliknutím levým tlačítkem myši, prvně je označen levý horní roh a dále se postupuje ve směru hodinových ručiček, viz Obr. 81. Pro označení dalšího snímku použijeme tlačítko „NEXT“, pro označení snímků z dalších kamer vybereme kameru v panelu „Selection“ a dáme tlačítko „NEXT“. Snímky, pro které jsou už rohy kalibračního terče extrahovány, jsou označeny v tabulce pod snímkem. Jakmile máme označené snímky všech kamer, které potřebujeme zkalibrovat, ukončíme okno „Select_corner_GUI“ tlačítkem „CORNER SELECTED“. Správně

provedenou extrakci bodů kalibračního terče značí zelené kolečko napravo od tlačítka „Corner extraction“.



Obr. 81 Okno „Select_corner_GUI“ – pro extrakci rohových bodů kalibračního terče, žlutá čísla určují pořadí označování rohů pro manuální extrakci

- 6) Stiskneme tlačítko „Calibration“, kterým spustíme výpočet kalibrace. Pokud tlačítko „Calibration“ nelze použít, chybí zadání některého z dříve definovaných vstupů pro kalibraci (označeno červeným křížkem). Jakmile je kalibrace zpracována, objeví se přehled základních výsledků, podrobné výsledky jsou uloženy do souboru „Mutual_calibration_RESULTS.xls“ umístěného v adresáři s programem *MultiSensCalib* a v adresáři „calibration_data“ umístěného ve složce dohromady se zdrojovými snímky. Přehledné výsledky zobrazují vzájemné posuny a rotace kamerových systémů vzhledem k referenční dálkoměrné kameře a hodnoty reprojekční chyby po vyrovnání.

Results of calibration

	TOF	CCD_l	CCD_r	THERMO_l	THERMO_r
tX [mm]	0	-55.6000	53.7000	-58.3000	55.1000
tY [mm]	0	-51.7000	-52.4000	0	0.4000
tZ [mm]	0	-3.4000	-0.7000	10.9000	12.7000
RX [grad]	0	0.3961	1.4659	0.3762	1.2867
RY [grad]	0	3.3929	-7.6309	4.1843	-9.1696
RZ [grad]	0	-0.8336	0.3095	0.0759	-0.1634
rep_er [px]	0.2900	0.3600	0.3700	0.5200	0.3800

Obr. 82 Panel „Results of calibration“ s přehlednými výsledky kalibrace

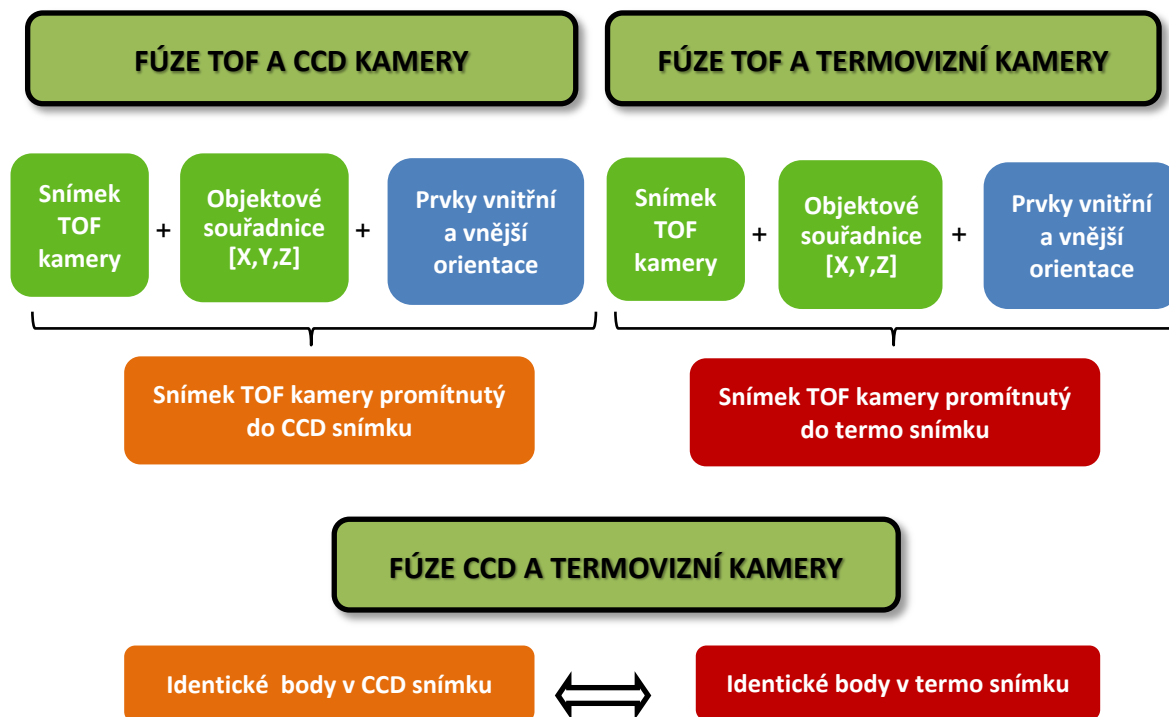
Tab. 14 zobrazuje popis proměnných použitých v úplných výsledcích kalibrace.

název proměnné	popis
fx, fy	součin ohniskové vzdálenosti a měřítkového faktoru v ose x, y
$u0, v0$	souřadnice hlavního snímkového bodu
$k1, k2$	koeficienty radiálního zkreslení
$p1, p2$	koeficienty tangenciálního zkreslení
tX, tY, tZ	translace systémů pasivních kamer vůči referenčnímu systému dálkoměrné kamery
rX, rY, rZ	rotace systémů pasivních kamer vůči referenčnímu systému dálkoměrné kamery
$SD1$	směrodatná odchylka reprojekce rohových bodů kalibračního terče po vyrovnání prvků vnitřní orientace
$SD2, rep_er$	směrodatná odchylka reprojekce rohových bodů kalibračního terče po vzájemném vyrovnání prvků vnitřní a vnější orientace

Tab. 14 Popis proměnných použitých v exportovaném souboru výsledků

5.5 DATOVÁ FÚZE

Pro datovou fúzi jsou použity transformace snímků. Měření dálkoměrné kamery je promítnuto do snímků CCD a termovizních kamer. Tímto způsobem jsou získány identické body mezi CCD a termovizní kamerou, které umožní doplňovat obraz ve viditelném spektru informacemi z termovize a naopak. Tento princip je zobrazen na Obr. 83.



Obr. 83 Princip datové fúze

Vstupními daty pro fúzi jsou měřené vzdálenosti TOF kamerou, snímky ze všech kamer a prvky vnitřní a vnější orientace z kalibrace kamer sensorické hlavičky.

Proces datové fúze se skládá z následujících kroků:

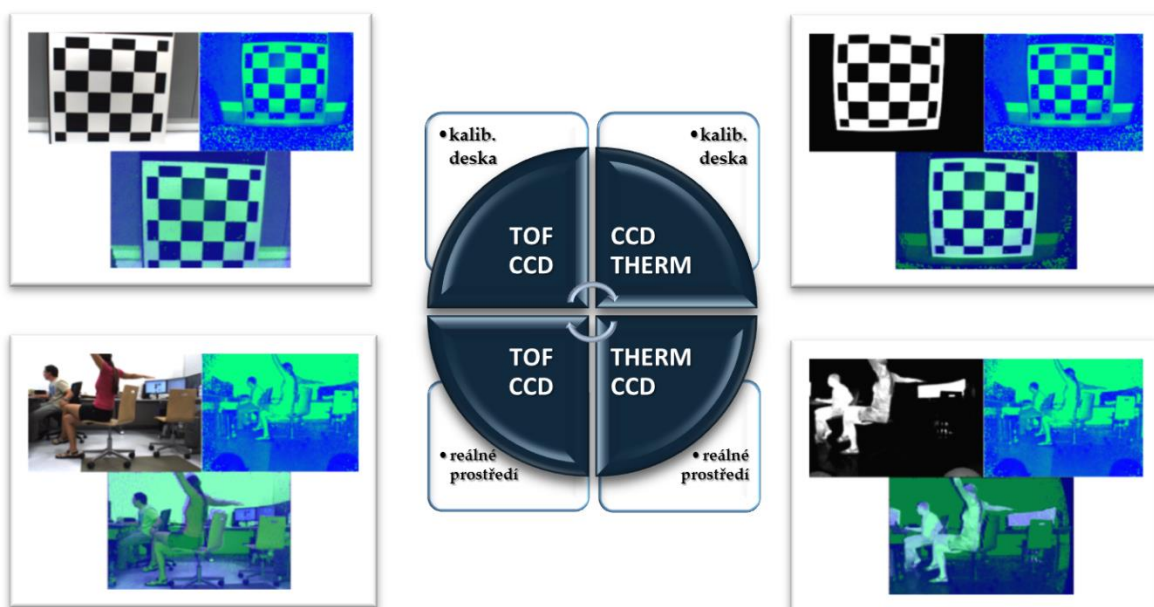
1. výpočet objektových souřadnic měřené scény dálkoměrnou kamerou,
2. homogenní transformace
 - určení objektových souřadnic v referenčním systému pasivních kamer,
3. perspektivní projekce
 - převod objektových souřadnic v referenčním systému pasivních kamer na snímkové souřadnice,
4. korekce snímkových souřadnic na polohu kalibrovaného hlavního snímkového bodu.

Rovnice pro výpočet objektových souřadnice X, Y, Z jsou uvedeny v podkapitole 5.2.1 rovnice (41),(44). Homogenní transformace určuje rovnice (53), kde $R_{[3 \times 3]}$ je matice rotace, $t_{[3 \times 1]}$ matice translace a X', Y', Z' jsou objektové souřadnice v souřadnicovém systému pasivních kamer. Snímkové souřadnice pixelů TOF kamery x_c', y_c' promítnutých do souřadnicových systémů pasivních kamer jsou vypočteny podle perspektivní transformace (rovnice (54)), kde f' je ohnisková vzdálenost pasivní kamery.

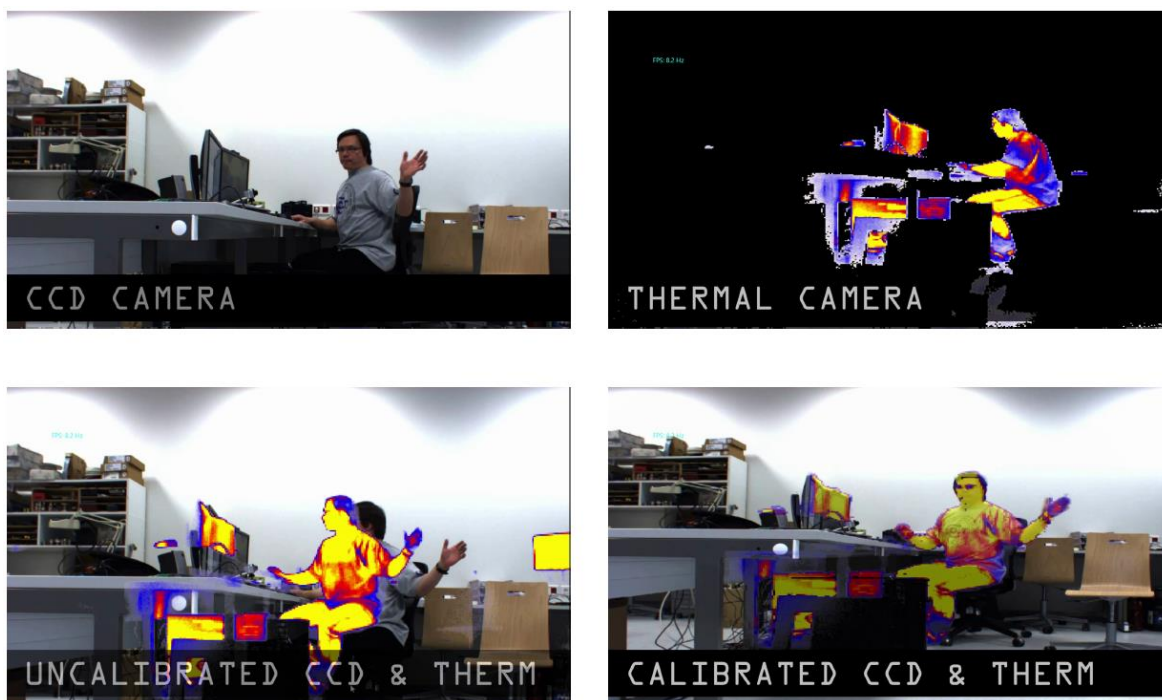
$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$x_c' = \frac{f' X'}{Z'}, y_c' = \frac{f' Y'}{Z'} \quad (54)$$

Tato dizertace zpracovává datovou fúzi v postprocessingu a programu Matlab. Zobrazení datové fúze snímků dálkoměrné kamery se snímky CCD a termovizní kamery je na Obr. 84. Na ústavu Automatizace a měřící techniky FEKT VUT v Brně byl následně vytvořen softwarový systém *Theseirias*, který využívá navržený postup datové fúze včetně výsledků kalibrace senzorické hlavičky v reálném čase. Obr. 85 je převzat z dizertační práce Ing. Františka Buriana [102] a ilustruje vliv kalibrace a výsledek datové fúze v reálném čase.



Obr. 84 Zobrazení datové fúze v programu Matlab; vlevo nahoře – snímek CCD a TOF kamery zobrazující kalibrační desku; vpravo nahoře – snímek termovizní a TOF kamery zobrazující kalibrační desku; vlevo dole – snímek CCD a TOF kamery zobrazující reálné prostředí; vpravo dole - snímek termovizní a TOF kamery zobrazující reálné prostředí



Obr. 85 Fúze dat - snímky z videa pořízeného programem Theseirias [102]; použita kalibrace z programu *MultiSensCalib*

5.5.1 SIMULACE

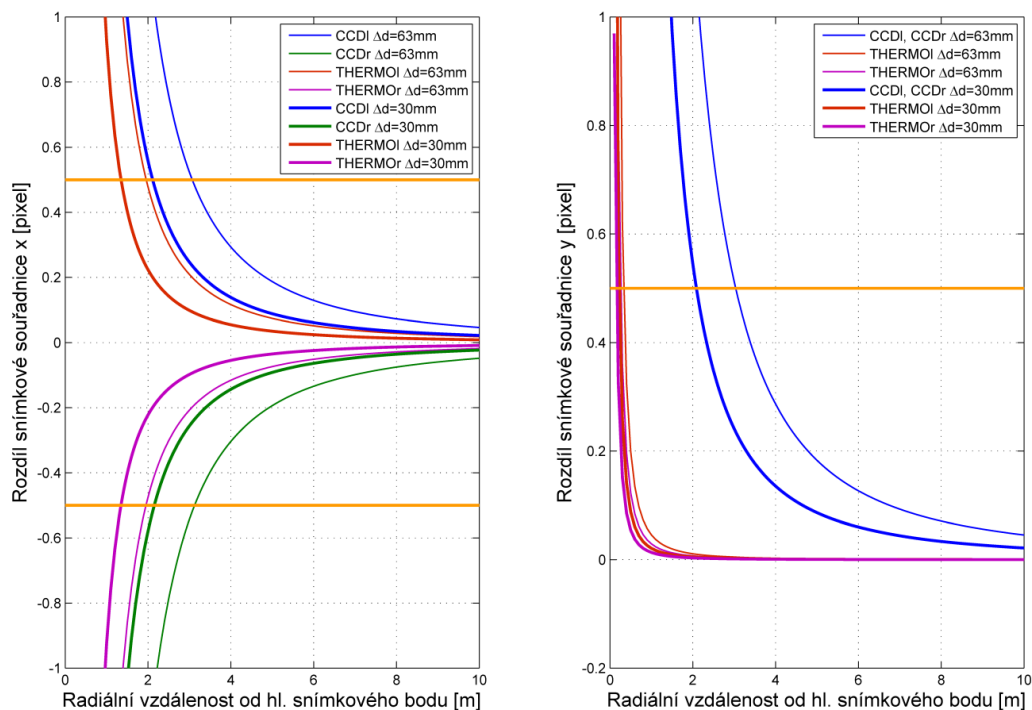
V této podkapitole je popsána simulace vlivu nejvýznamnějších chyb snímačů senzorické hlavice na datovou fúzi. Dálkoměrná kamera je nepostradatelným prvkem této hlavice i datové fúze, ale bohužel také nejméně přesným. Proto je v této podkapitole simulován vliv chyby měřené vzdálenosti a nízkého rozlišení TOF kamery. Vliv nízkého rozlišení je simulován v závislosti na snímkové radiální vzdálenosti TOF kamery. Všechny simulace byly provedeny v program Matlab.

Vliv odchylek měřené vzdálenosti na přesnost datové fúze

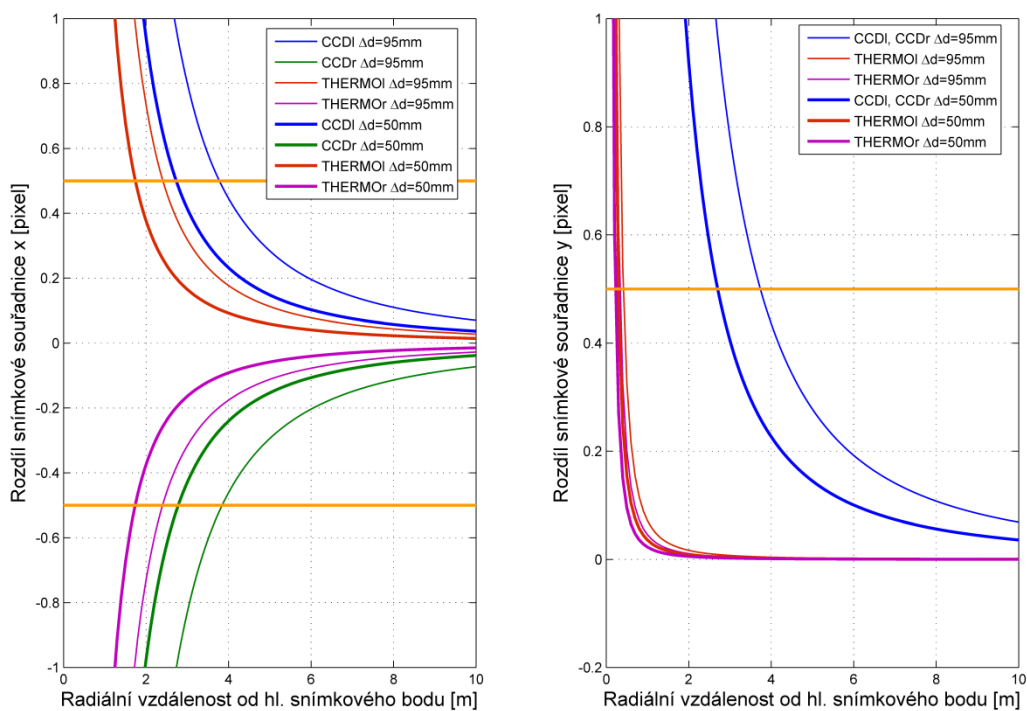
Nejdříve byl zkoumán vliv nepřesně měřené vzdálenosti na algoritmus datové fúze. V této simulaci byly určeny rozdíly snímkových souřadnic v algoritmu datové fúze pro CCD a termovizní kamery. Byla simulována chyba měřené vzdálenosti pro 2 body snímku: hlavní snímkový bod a pro bod ležící na ose x na hranici regionu 3 (viz Obr. 34). Region 4 nebyl vybrán vzhledem k velmi nízké spolehlivosti měřených vzdáleností. Rozsah měřených vzdáleností pro simulaci byl použit stejný jako rozsah měření TOF kamery 0,1–10,0 metrů.

Vliv chyb měřené vzdálenosti je zanedbatelný, pokud rozdíl v transformovaných snímkových souřadnicích pasivních kamer nepřekročí hodnotu půl pixelu posuzované kamery. Pro simulaci byly použity hodnoty směrodatných odchylek měřené vzdálenosti dálkoměrné kamery z podkapitoly 0. Podle této simulace lze posoudit nutnost kalibrace měřených vzdáleností a vliv na datovou fúzi. Chyby měřené vzdálenosti před a po kalibraci byly převzaty z podkapitoly 5.2.3. Pro bod na ose snímku byla převzata hodnota 63 mm před kalibrací a 30 mm po kalibraci. Pro bod na okraji regionu 3 (viz Obr. 34) 95 mm před kalibrací a 50 mm po kalibraci. Obr. 86 zobrazuje vliv chyby měřené vzdálenosti na snímkové souřadnice pasivních kamer pro bod ve středu snímku dálkoměrné kamery. Graf pro bod na okraji regionu 3 je uveden na Obr. 87, křivky mají stejnou tendenci a podobný tvar.

Tab. 15 obsahuje hodnoty vzdáleností, pro které uvažované chyby v měření způsobí odchylku půl pixelu. Pro bod na okraji snímku jsou chyby měřené vzdálenosti významné do větších vzdáleností než pro bod ve středu snímku. Kalibrace dálkoměrné kamery výrazně rozšířila interval vzdáleností, v kterém chyba měřené vzdálenosti způsobí odchylku snímkových souřadnic menší jak půl pixelu. V datové fúzi se tato chyba neprojeví pro CCD kamery od vzdálenosti 2,8 metrů a pro termovizní kamery v souřadnici x od 1,7 m a v y od 0,3 m. Nízký vliv způsobené odchylky v souřadnici y je způsoben montáží dálkoměrné kamery na senzorické hlavici přibližně ve stejné výškové úrovni jako montáž termovizních kamer.



Obr. 86 Odchytky snímkových souřadnic x (vlevo), y (vpravo) způsobené chybou měření vzdálenosti pro bod ležící ve středu snímku dálkoměrné kamery



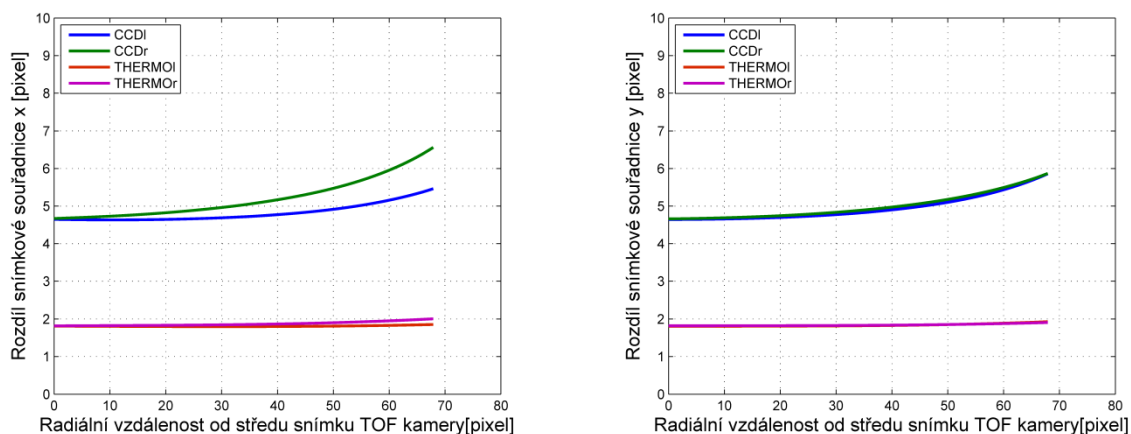
Obr. 87 Odchytky snímkových souřadnic x (vlevo), y (vpravo) způsobené chybou měření vzdálenosti pro bod ležící na okraji regionu 3 dálkoměrné kamery

	odchylka měřené vzdálenosti	snímková souřadnice.	radiální vzdálenost, při které chyba měřené vzdálenosti způsobí odchylku snímkových souřadnic 0,5 pixelu [m]			
			CCDI	CCDr	TH. l	TH. r
bod na optické ose	63 mm – před kalibrací	x	3,08	3,14	1,95	1,95
		y	3,05	3,05	0,34	0,27
	30 mm – po kalibraci	x	2,12	2,15	1,36	1,35
		y	2,09	2,09	0,23	0,17
bod na okraji regionu 3	95 mm – před kalibrací	x	3,78	3,85	2,411	2,40
		y	3,75	3,75	0,42	0,34
	50 mm – po kalibraci	x	2,74	2,79	1,74	1,74
		y	2,72	2,72	0,30	0,23

Tab. 15 Radiální vzdálenost, od které lze vliv chyby měřené vzdálenosti pro datovou fúzi považovat za zanedbatelný

Vliv nízkého rozlišení TOF kamery na přesnost datové fúze

Tato podkapitola popisuje vliv nízkého rozlišení TOF kamery na datovou fúzi. Pro simulaci byla uvažována chyba 0,5 pixelu ve snímkové souřadnici x , y TOF kamery. Výsledky této simulace dle očekávání přímo odráží rozdílné rozlišení snímačů. Rozdíl 0,5 pixelu ve snímkové souřadnici TOF kamery způsobí přibližně rozdíl 5 pixelů na snímku CCD kamery (Obr. 88) a přibližně 2 pixely na snímku termovizních kamer (Obr. 88).



Obr. 88 Odchytky snímkových souřadnic x (vlevo), y (vpravo) způsobené chybou 0,5 pixelu TOF kamery v závislosti na radiální vzdálenosti od středu snímku TOF kamery

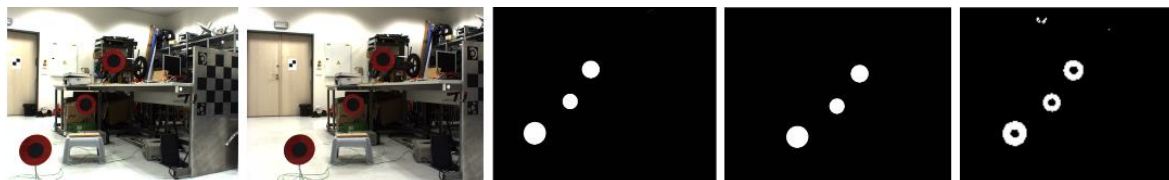
5.5.2 NEZÁVISLÉ OVĚŘENÍ DATOVÉ FÚZE

Tato podkapitola se zabývá ověřením a funkčností navrženého algoritmu datové fúze. Princip nezávislého ověření je založen na porovnání identických bodů přímo extrahovaných ze snímků pasivních kamer s objekty extrahovanými ze snímků TOF kamery a promítnutých do snímků pasivních kamer navrženým algoritmem datové fúze. Pro toto nezávislé ověření bylo nejdříve nutné vytvořit terče snadno identifikovatelné na snímcích všech použitých senzorů. Prvně byl navržen terč ve tvaru koule, protože koule se na snímku zobrazuje jako kruh ze všech úhlů. Pro terče byly použity petanquové koule s průměrem 72 mm a vrhací koule s průměrem 104 mm. Tento terč je snadno rozeznatelný na snímcích CCD kamery (viz Obr. 89). Pro identifikaci na termovizních snímcích byly koule před měření nahřáty na 60°C, takže na termovizních snímcích jsou také dobře identifikovatelné viz Obr. 89. Aby terče byly dobře identifikovatelné na snímcích TOF kamery, byly koule pokryty vysoce reflexní 3M páskou. Tato páska výrazně zlepšila extrakci terče ze snímků (viz Obr. 89), nicméně znehodnotila měřené vzdálenosti. Z tohoto důvodu není možné tento typ terče použít pro ověření.



Obr. 89 Snímky prvního navrženého terče pro ověření přesnosti datové fúze: z levé a pravé CCD kamery (vlevo), z levé a pravé termovizní kamery (uprostřed) a snímek intenzity z dálkoměrné kamery (vpravo)

Druhá varianta terče snadno identifikovatelného na snímcích všech kamer byla vytvořena z hliníkových kruhů pokrytých uprostřed černým matným papírem a po okrajích 3M reflexní páskou. Terče jsou vybaveny aktivním vyhříváním založeném na odporové fólii. Reflexní páska je použita pro snadnější a přesnější identifikaci terče na snímcích dálkoměrné kamery. Matný papír ve středu terče umožňuje měřit vzdálenost na terč. Byly použity hliníkové desky průměrů 20 a 30 cm. Tento terč je velmi dobře identifikovatelný na snímcích všech tří heterogenních snímačů (viz Obr. 90).



Obr. 90 Snímky druhého navrženého terče pro ověření přesnosti datové fúze: z levé a pravé CCD kamery (vlevo), z levé a pravé termovizní kamery (uprostřed) a snímek intenzity z dálkoměrné kamery (vpravo)

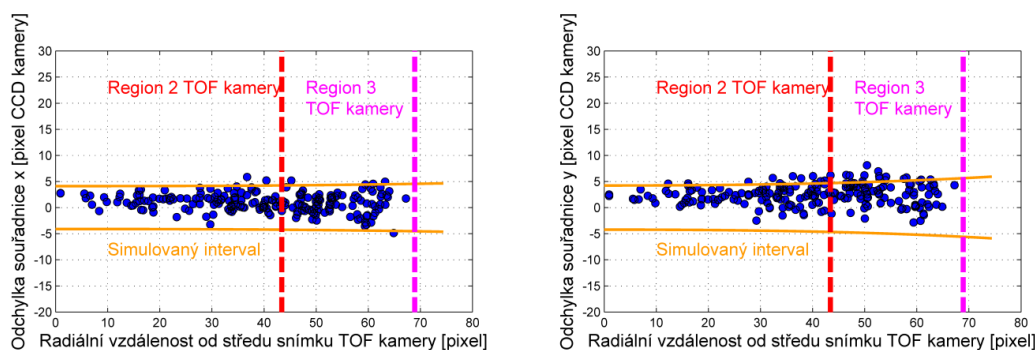
Pro ověření přesnosti datové fúze bylo nasnímáno 27 snímků v reálných vnitřních podmínkách. Z těchto snímků bylo extrahováno 211 obrazů terčů použitých

pro zhodnocení přesnosti datové fúze. Tyto obrazy na snímcích se vyskytovaly v intervalu 1-67 pixelů radiální vzdálenosti od středu TOF kamery. Interval měřených vzdáleností na terče byl od 1,1 m do 5,7 m.

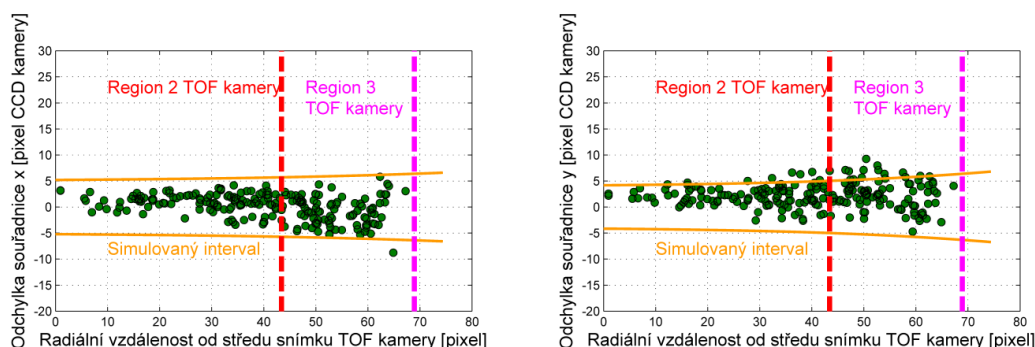
Extrakce obrazů terčů na snímcích se skládala z následujících kroků:

- prahování,
- odstranění malých objektů (šumu) pomocí morfologické operace otevření,
- propojení oddělených částí objektů pomocí morfologického uzavření,
- vyplnění všech uzavřených objektů,
- výpočet parametrů centroidu (snímkové souřadnice středu).

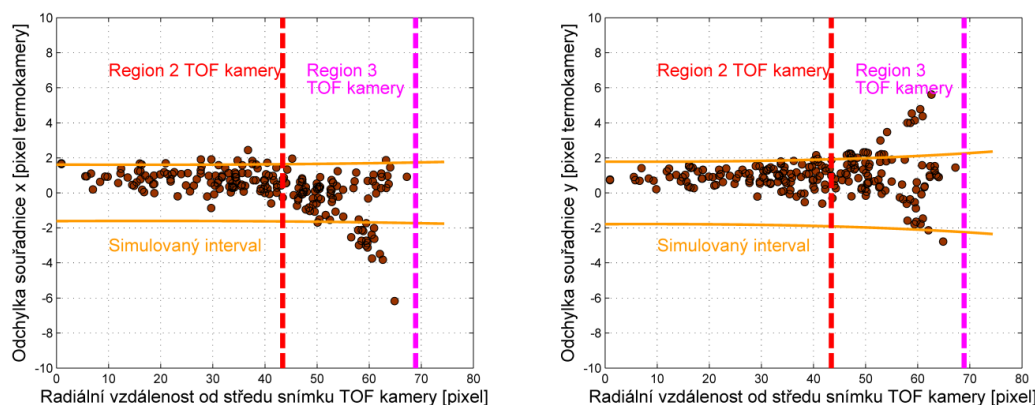
Dle podkapitoly 5.4.1 jsou nevhodnější pro kalibraci konfigurace snímků číslo 8 a 10. Proto jsou pro ověření použity prvky vnitřní a vnější orientace určené kalibrací podle těchto dvou konfigurací. Souřadnicové rozdíly mezi extrahovanými středy objektů ze snímků pasivních kamer a středy objektů extrahovanými ze snímku TOF kamery a dále promítnutými algoritmem datové fúze do snímků pasivních kamer jsou zobrazeny na Obr. 91-Obr. 94 s použitím kalibrace z konfigurace snímků číslo 8 a na Obr. 95-Obr. 98 pro konfiguraci číslo 10. Vzhledem k faktu, že největší nepřesnost datové fúze je způsobena nízkým rozlišením, TOF kamery, je v grafech znázorněn interval simulované chyby $\pm 0,5$ pixelu pro extrakci souřadnic centroidu na snímcích dálkoměrné kamery. Dále jsou v grafech znázorněny regiony 2, 3 přesnosti měření TOF kamery (viz Obr. 34). Z Obr. 93 a Obr. 94 je patrná narůstající hodnota odchylek s radiální vzdáleností. Z tohoto důvodu se konfigurace číslo 8 nedá považovat za spolehlivou pro kalibraci.



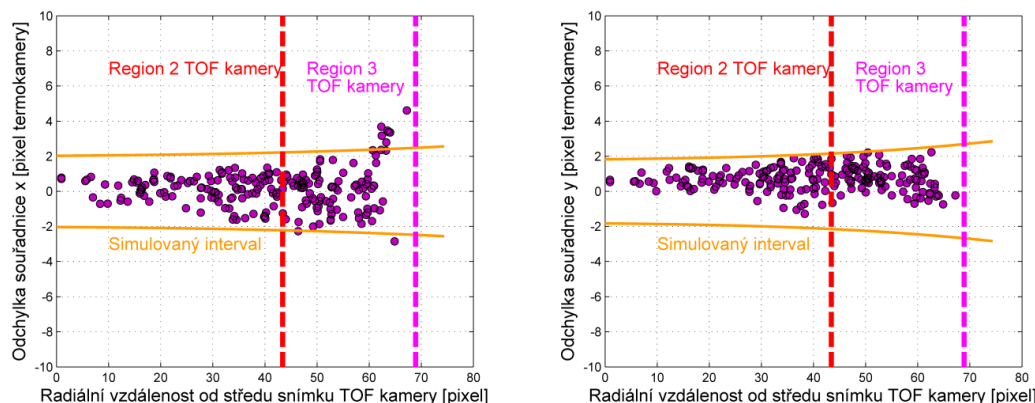
Obr. 91 Odchyly snímkových souřadnic mezi extrahovanými středy objektů ze snímků levé CCD kamery a středy objektů extrahovanými ze snímku TOF kamery a promítnutými algoritmem datové fúze do snímků levé CCD kamery; použita kalibrace z konfigurace číslo 8; odchylna souřadnice x (vlevo), odchylna souřadnice y (vpravo)



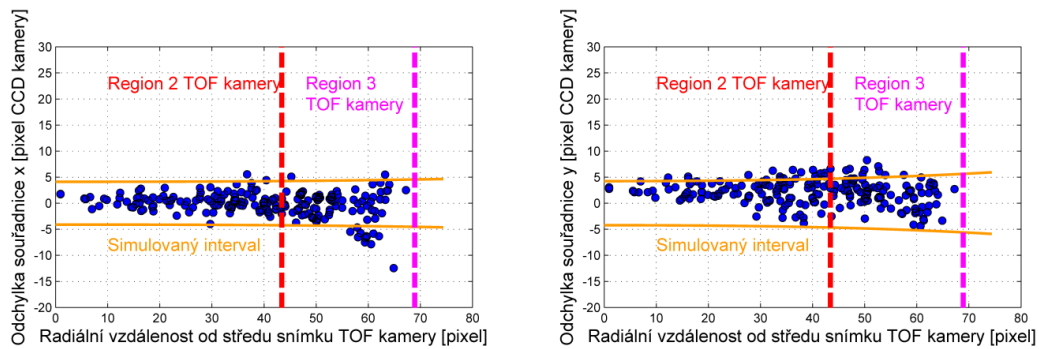
Obr. 92 Odchylky snímkových souřadnic mezi extrahovanými středy objektů ze snímků pravé CCD kamery a středy objektů extrahovanými ze snímku TOF kamery a promítnutými algoritmem datové fúze do snímků pravé CCD kamery; použita kalibrace z konfigurace číslo 8; odchylka souřadnice x (vlevo), odchylka souřadnice y (vpravo)



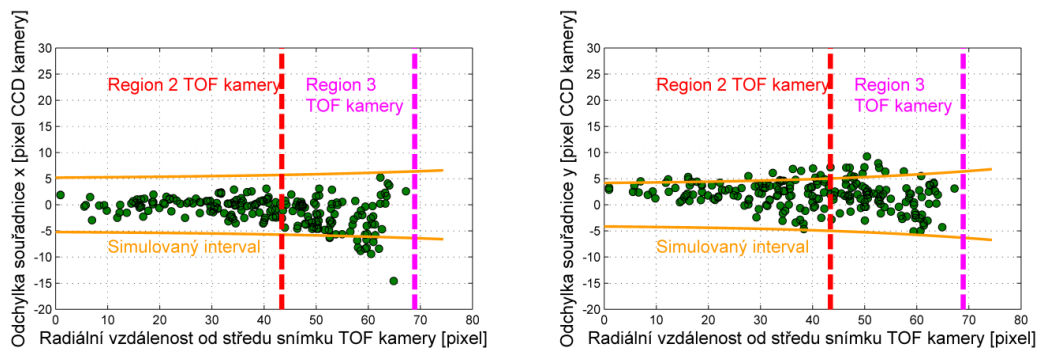
Obr. 93 Odchylky snímkových souřadnic mezi extrahovanými středy objektů ze snímků levé termovizní kamery a středy objektů extrahovanými ze snímku TOF kamery a promítnutými algoritmem datové fúze do snímků levé termovizní kamery; použita kalibrace z konfigurace číslo 8; odchylka souřadnice x (vlevo), odchylka souřadnice y (vpravo)



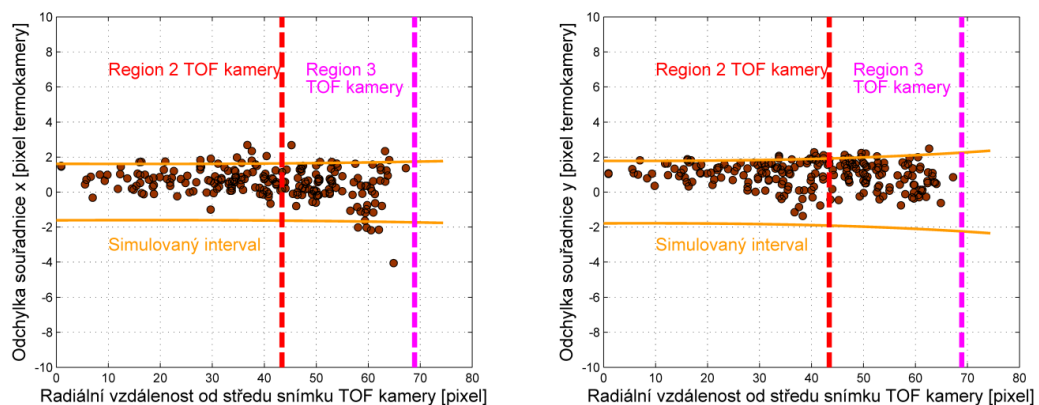
Obr. 94 Odchylky snímkových souřadnic mezi extrahovanými středy objektů ze snímků pravé termovizní kamery a středy objektů extrahovanými ze snímku TOF kamery a promítnutými algoritmem datové fúze do snímků pravé termovizní kamery; použita kalibrace z konfigurace číslo 8; odchylka souřadnice x (vlevo), odchylka souřadnice y (vpravo)



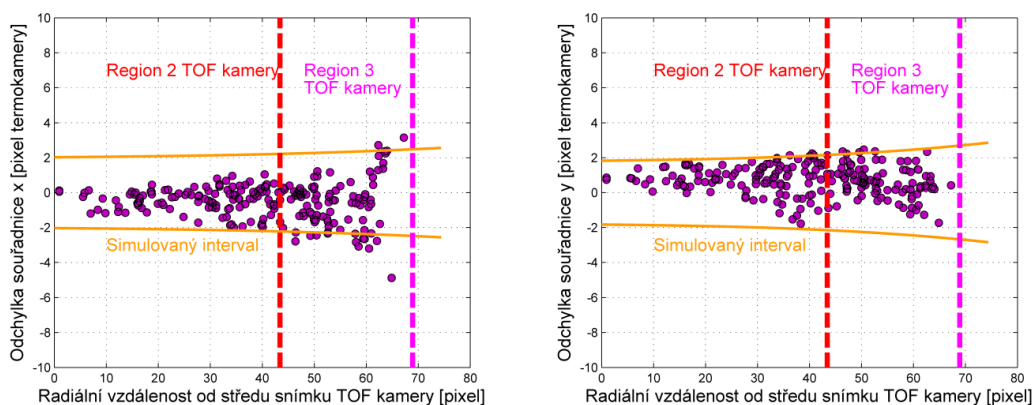
Obr. 95 Odchyly snímkových souřadnic mezi extrahovanými středy objektů ze snímků levé CCD kamery a středy objektů extrahovanými ze snímku TOF kamery a promítnutými algoritmem datové fúze do snímků levé CCD kamery; použita kalibrace z konfigurace číslo 10; odchylka souřadnice x (vlevo), odchylka souřadnice y (vpravo)



Obr. 96 Odchyly snímkových souřadnic mezi extrahovanými středy objektů ze snímků pravé CCD kamery a středy objektů extrahovanými ze snímku TOF kamery a promítnutými algoritmem datové fúze do snímků pravé CCD kamery; použita kalibrace z konfigurace číslo 10; odchylka souřadnice x (vlevo), odchylka souřadnice y (vpravo)



Obr. 97 Odchyly snímkových souřadnic mezi extrahovanými středy objektů ze snímků levé termovizní kamery a středy objektů extrahovanými ze snímku TOF kamery a promítnutými algoritmem datové fúze do snímků levé termovizní kamery; použita kalibrace z konfigurace číslo 10; odchylka souřadnice x (vlevo), odchylka souřadnice y (vpravo)



Obr. 98 Odchylky snímkových souřadnic mezi extrahovanými středy objektů ze snímků pravé termovizní kamery a středy objektů extrahovanými ze snímku TOF kamery a promítnutými algoritmem datové fúze do snímků pravé termovizní kamery; použita kalibrace z konfigurace číslo 10; odchylka souřadnice x (vlevo), odchylka souřadnice y (vpravo)

Hodnoty směrodatných souřadnicových odchylek snímkových souřadnic pro všechny pasivní kamery jsou uvedeny v Tab. 16. Navržený postup kalibrace a datové fúze se ukázal jako funkční a pro dané účely dobře použitelný. Výsledky jsou ovšem limitované nízkým rozlišením dálkoměrné kamery. Jak je však patrné z předcházejících grafů, přesnost datové fúze odpovídá simulované přesnosti.

	směrodatná odchylka souřadnice x				směrodatná odchylka souřadnice y			
	CCDI	CCDr	THER.l	THER.r	CCDI	CCDr	THER.l	THER.r
konf. 8	2,0	2,4	1,2	1,1	3,2	3,2	1,5	1,0
konf. 10	2,4	3,0	1,0	1,2	3,2	3,3	1,2	1,1
	směrodatná souřadnicová odchylka							
	CCDI	CCDr	THER.l	THER.r				
konf. 8	2,0	2,4	1,2	1,1				
konf. 10	2,4	3,0	1,0	1,2				

Tab. 16 Směrodatné odchylky ve snímkových souřadnicích x , y a směrodatná souřadnicová odchylka pro datovou fúzi, hodnoty směrodatných odchylek jsou uvedené v pixlech posuzované kamery

6. SHRnutí DOSAŽENÝCH CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE

V kapitole 2 byly vytyčeny tři základní cíle této práce.

Prvním dílčím cílem bylo zlepšení přesnosti dálkoměrných snímačů. V rámci této práce byla navržena metodika pro kalibraci laserových skenerů Velodyne HDL-64, Velodyne HDL-32 a dálkoměrné kamery SwissRanger SR4000. Všechny tři dálkoměrné snímače byly kalibrovány. Dále pro ně bylo provedeno nezávislé ověření jejich přesnosti. Pro každý jednotlivý laser skenerů Velodyne a pro každý pixel dálkoměrné kamery byly určeny korekční parametry. Pro skener Velodyne HDL-64 se směrodatná odchylka měřené vzdálenosti kalibrací zlepšila z 3,7 cm na 2,6 cm, pro skener Velodyne HDL-32 z 2,3 cm na 0,4 cm. Navržená kalibrace dálkoměrné kamery také přinesla výrazné zlepšení přesnosti měření, i když byl vybrán jednoduchý regresní model s ohledem na nutnost korigovat měření vzdáleností v reálném čase. Pro centrální oblast snímku TOF kamery (12×12 centrálních pixelů) se směrodatná odchylka zlepšila z 60 mm na 30 mm, pro kruhovou oblast snímku ohraničenou zorným úhlem 17° se odchylka zlepšila ze 79 mm na 35 mm a pro oblast snímku ohraničenou zorným úhlem 27° z 95 mm na 50 mm. Ve čtvrté okrajové oblasti snímku TOF kamery odchylky měřené vzdálenosti dosahují až 1 m, proto tato oblast není pro další zpracování používána a je považována za nespolehlivou. Kalibrace všech zmíněných dálkoměrných snímačů významně přispěly k větší přesnosti digitálních map vytvářených v robotickém systému Cassandra.

Dalším dílčím cílem této dizertační práce je kalibrace kamer senzoričké hlavičce robotu Orpheus-X3. Vzhledem k faktu, že na senzoričké hlavici jsou umístěny kamery snímající ve 3 různých spektrech, bylo nutné navrhnout kalibrační obrazce snadno detekovatelné ve všech snímaných spektrech. Z tohoto důvodu byly postupně navrženy a realizovány tři kalibrační desky, přičemž poslední z nich se ukázala jako dobře použitelná. Tyto kalibrační desky s šachovnicovou mřížkou umožňují identifikovat uzlové body pro všechny tři typy použitých snímačů tj. pro CCD kamery, termovizní kamery a dálkoměrnou kameru. Byla testována optimální konfigurace snímků pro kalibraci. V rámci práce byl vytvořen program *MultiSensCalib* včetně manuálu pro postup kalibrace. Hlavním cílem je, aby procedura kalibrace zabrala krátkou dobu a mohl ji vykonávat libovolný uživatel obsluhující roboty.

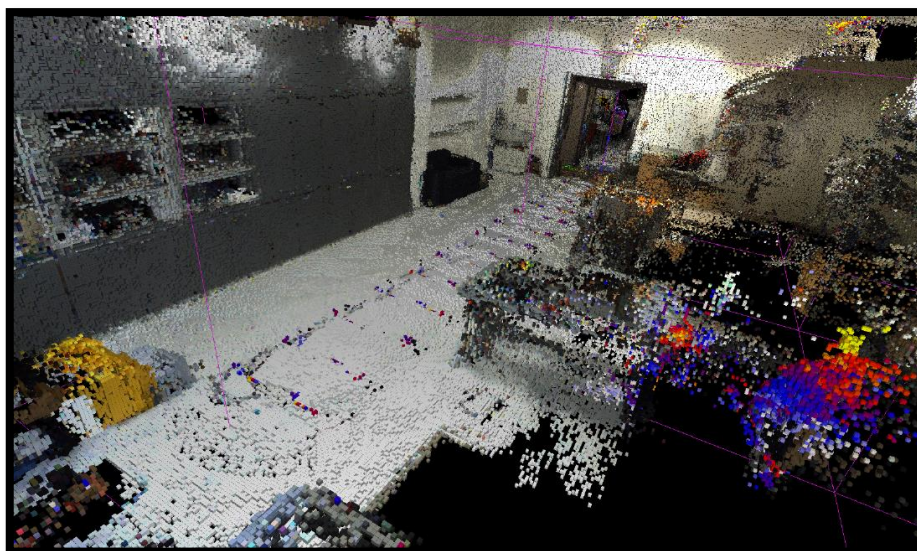
Třetím a neméně důležitým dílčím cílem práce byl návrh algoritmu fúze dat z kamer senzoričké hlavičce robotu Orpheus-X3. Algoritmus navržený v této práci a otestovaný v programu Matlab byl implementován do programového systému *Theseirias* vytvořeného na UAMT FEKT VUT v Brně. Pro ověření přesnosti datové fúze byly vytvořeny speciální terče použitelné pro současné měření ve třech různých spektrech (viditelné, NIR, LWIR). Proběhlo nezávislé ověření přesnosti datové fúze. Směrodatné

souřadnicové odchylky pro promítnutí informací TOF kamery do snímků CCD kamery dosahují hodnot do 3 pixelů CCD kamery (0,3 pixelu TOF kamery) a pro promítnutí informací TOF kamery do termovizních snímků dosahují hodnot do 1,2 pixelů termovizní kamery (0,5 pixelu TOF kamery). Toto nezávislé ověření dokazuje funkčnost a použitelnost navržené metody datové fúze.

7. ZÁVĚR

Tato dizertační práce se zabývá zlepšením přesnosti a návrhem datové fúze senzorů robotů EnvMap a Orpheus-X3, které jsou součástí robotického systému Cassandra. Důležitou částí práce bylo vytvoření programu *MultiSensCalib*, který umožňuje kalibraci sensorické hlavice robotu Orpheus-X3.

V rámci práce byl navržen postup a provedena kalibrace dálkoměrných snímačů. Kalibrovány byly laserové skenery Velodyne HDL-64, Velodyne HDL-32 umístěné na robotu EnvMap a dálkoměrná kamera SwissRanger SR4000 umístěná na sensorické hlavici robotu Orpheus-X3. Tyto kalibrace významně přispěly k větší přesnosti aktuálních sensorických map vytvářených v robotickém systému Cassandra. Obr. 99 ukazuje příklad sensorické mapy vytvořené s pomocí robotu Orpheus-X3.

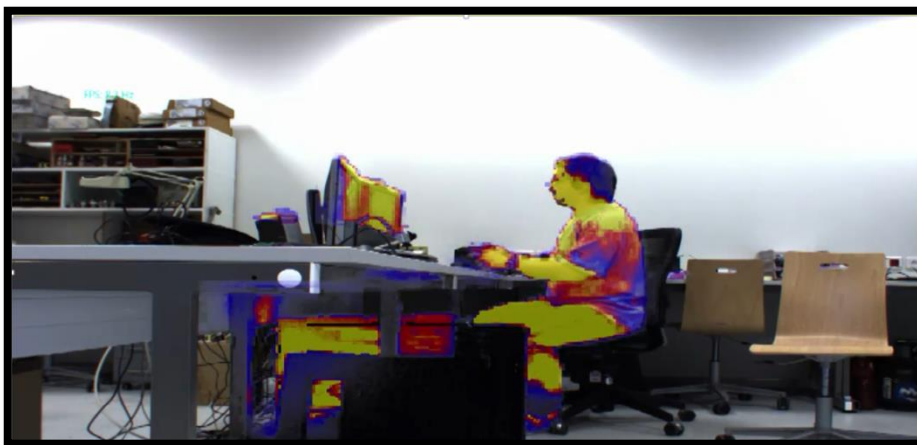


Obr. 99 Sensorická mapa – pohled do laboratoře ústavu UAMT, FEKT, VUT v Brně [102]

Vytvořený program *MultiSensCalib* umožňuje rychlou kalibraci všech pěti kamer sensorické hlavice (stereovizní pár CCD kamer, stereovizní pár termovizních kamer a dálkoměrná kamera). Podle postupu popsaneho v dizertační práci by měla být schopna provést kalibraci libovolná osoba bez znalostí příslušné teorie.

V rámci dizertační práce byl také navržen a v programu Matlab realizován algoritmus datové fúze kamer sensorické hlavice robotu Orpheus-X3. Tento algoritmus byl implementován také do programového systému *Theseirias*, který by měl po dokončení vývoje umožnit ovládání robotů systému Cassandra v reálném čase s pomocí zmiňované datové fúze, včetně použití stereovizního zobrazení do brýlí virtuální reality, a dále tzv. rozšířenou realitu s multispektrálními mapami. Nezávislé testování přesnosti datové fúze dokázalo funkčnost a použitelnost navržené metody pro datovou fúzi používanou

v rámci robotického systému Cassandra. Obr. 100 ukazuje příklad snímku, na kterém je aplikována fúze dat z CCD a termovizní kamery.



Obr. 100 Fúze dat z CCD a termovizní kamery - snímek z videa pořízeného programem Theseirias [102]; použita kalibrace z programu *MultiSensCalib*

Zde popsaná práce je součástí mnohem většího celku. Vytvořené algoritmy již nyní jsou a v budoucnu budou používány v rámci dalšího vývoje robotického systému Cassandra. Cílem této práce kromě splnění tří na začátku definovaných cílů bylo vytvořit nástroje, které by byly prakticky použitelné i osobami bez hlubší znalosti příslušné teorie. Velkou výhodou je značná univerzálnost řešení, protože systém je vyvíjen poměrně intenzivně a je možné předpokládat konstrukční změny i změny v sensorickém vybavení. To byl také důvod, proč byl velký důraz v této práci kladen na vývoj prakticky použitelného programu pro kalibraci s jednoduchou a dobře zdokumentovanou obsluhou.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] SLOCUM, Terry A. *Thematic cartography and geovisualization*. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, c2009, x, 561 s. Prentice Hall series in geographic information science. ISBN 978-0-13-229834-6.
- [2] ADAM, Ladislav. *Tvorba interaktivní návodky v prostředí rozšířené reality*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní.
- [3] MILGRAM, Paul, Haruo TAKEMURA, Akira UTSUMI a Fumio KISHINO. Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *SPIE*[online]. 1994, č. 2351 [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: http://etclab.mie.utoronto.ca/publication/1994/Milgram_Takemura_SPIE1994.pdf
- [4] 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>
- [5] KOŠNAR, Karel. Mobilní robotika. [online]. [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2007/06/Kosnar.pdf>
- [6] GÄRTNER, Jan. *Provedení rešeršní studie v oblasti metod simultánní lokalizace a mapování*. Brno, 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6471. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] 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.
- [8] MÁZL, Roman. *Lokalizace pro autonomní systémy*. Praha, 2007. Dostupné z: <http://labe.felk.cvut.cz/~kulich/disertace-mazl.pdf>. Dizertační práce. ČVUT.
- [9] ŠVÁBENÍK, Petr a Lucie DORDOVÁ. Použití termokamery v technické praxi. *Elektrorevue* [online]. 2011, roč. 13, č. 1, s. 6 [cit. 2014-11-17]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/kybernetika--automatizace--merici-technika/10/pouziti-termokamery-v-technicke-praxi/>
- [10] ISO 20473:2007: *Optics and photonics -- Spectral bands*. 2007, 3 s.

- [11] SOVA, Jan. Základy práce s termokamerou. [online]. 2013 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/workswell/zaklady-prace-s-termokamerou>
- [12] PAVELEK, Milan, Eva JANOTKOVÁ a Josef ŠTĚTINA. Vizualizační a optické měřicí metody. [online]. Druhé vydání. Brno, 2007 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/>
- [13] BARTL, J. a M. BARANEK. Emissivity of aluminium and its importance for radiometric measurement. *Measurement science review* [online]. 2004, roč. 4, č. 3, s. 31-36 [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: <http://www.measurement.sk/2004/S3/Bartl.pdf>
- [14] ZEMBOL, Filip. *Analýza parametrů infračerveného zobrazení*. Brno, 2011. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/18522>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETEČKA. Encyklopedie fyziky. [online]. 2006-2014 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [16] Snímače - masky a filtry. *4um.overclocking.cz* [online]. 2008 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://4um.overclocking.cz/showthread.php?t=67873>
- [17] Bayerova maska. Slovník fotografických pojmů [online]. 2011 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: http://www.fotoroman.cz/glossary2/1_bayer_mask.htm
- [18] CAGAŠ, Pavel. CCD kamery v astronomii. [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://pozorovanislunce.eu/userfiles/files/dokumenty/workshop-II-ccd-v-astronomii-uprava.pdf>
- [19] Senzory pro DF: Digitální snímače: jak na barvy (5. díl). [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: [http://www.fotofocus.cz/cz_digitalni-snimace-jak-na-barvy-\(5.-dil\),248.html](http://www.fotofocus.cz/cz_digitalni-snimace-jak-na-barvy-(5.-dil),248.html)
- [20] MALÍK, Dalibor. *Zpracování dat z termokamery*. Brno, 2012. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/17463>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [21] FRANK, Zdeněk. *Měření termokamerou*. České Budějovice, 2012. Dostupné z: <http://theses.cz/id/yv2b2h/?lang=en;furl=%2Fid%2Fyv2b2h%2F>. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- [22] KADLEC, K. Bezdotykové měření teploty. [online]. 2009 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/ufmt/kadleck.html>

- [23] *TOF Range-Imaging Cameras*. New York: Springer, 2013, p. cm. ISBN 978-364-2275-227.
- [24] 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>
- [25] PIATTI, Dario. *Time-of-Flight cameras: tests, calibration and multi-frame registration for automatic 3D object reconstruction*. Torino, 2011. Ph.D. Thesis. Politecnico di Torino.
- [26] 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
- [27] LICHTI, Derek D. a Changjae KIM. A Comparison of Three Geometric Self-Calibration Methods for Range Cameras. *Remote Sensing* [online]. 2011, vol. 3, issue 12, s. 1014-1028 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.3390/rs3051014#sthash.2mTP11Sv.dpuf. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/5/1014/>
- [28] LINDNER, Marvin, Ingo SCHILLER, Andreas KOLB a Reinhard KOCH. Time-of-Flight sensor calibration for accurate range sensing. *Computer Vision and Image Understanding* [online]. 2010, vol. 114, issue 12, s. 1318-1328 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.1016/j.cviu.2009.11.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1077314210001682>
- [29] KAHLMANN, Timo a Hilmar INGENSAND. Calibration and development for increased accuracy of 3D range imaging cameras. *Journal of Applied Geodesy* [online]. 2008, vol. 2, issue 1, s. 1-11 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.1515/JAG.2008.001. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/jag.2008.2.issue-1/jag.2008.001/jag.2008.001.xml>
- [30] GUDMUNDSSON, Sigurjon Ami, Henrik AANAES a Rasmus LARSEN. Environmental Effects on Measurement Uncertainties of Time-of-Flight Cameras. *2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems* [online]. IEEE, 2007, s. 1-4 [cit. 2014-11-23]. DOI: 10.1109/ISSCS.2007.4292664. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4292664>

- [31] SHAN, Jie a Charles K TOH. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. Boca Raton: CRC Press/Taylor, c2009, xvii, 590 p., [8] p. of plates. ISBN 14-200-5142-3.
- [32] LICHTI, Derek D., Jacky CHOW a Hervé LAHAMY. Parameter de-correlation and model-identification in hybrid-style terrestrial laser scanner self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2011, roč. 66, č. 3 [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271610001206>
- [33] SMÍTKA, Václav. *Přesnost 3D skenovacích technologií v geodézii a možnosti jejího zvyšování*. Praha, 2013. Dizertační práce. ČVUT, Fakulta stavební.
- [34] STEIGER, Rudolf. Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications. In: *2nd FIG Regional Conference* [online]. 2003 [cit. 2014-07-09]. Dostupné z: http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/ts12/ts12_3_staiger.pdf
- [35] BOUGUET, Jean-Yves. *Complete Camera Calibration Toolbox for Matlab* [online]. [cit. 2013-09-08]. Dostupné z: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- [36] OCamCalib: Omnidirectional Camera Calibration Toolbox for Matlab. SCARAMUZZA, Davide. *University of Zurich* [online]. [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/scarabotix/ocamcalib-toolbox>
- [37] HORÁK, David. *Diskrétní transformace*. 2012. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/diskretni_transformace.pdf
- [38] *Subpixelová detekce posunů pro určování objemových změn stavebních látek s využitím digitálního mikroskopu*. Brno, 2010. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [39] 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>
- [40] VEZHNEVETS, Vladimir. OpenCV and MatLab Camera Calibration Toolboxes Enhancement. In: *Graphics & Media lab* [online]. [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: <http://graphics.ru/oldgr/en/research/calibration/index.html>
- [41] RUFLI, M., D. SCARAMUZZA a R. SIEGWART. Automatic detection of checkerboards on blurred and distorted images. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2008, s. 3121-3126. ISBN 978-1-

- 4244-2057-5. DOI: 10.1109/IROS.2008.4650703. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4650703>
- [42] KANG, Sing Bing a Gérard MEDIONI. *Emerging topics in computer vision*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, 2005, xix, 661 p. ISBN 01-310-1366-1. Dostupné z: <http://www.inf.ethz.ch/personal/pomarc/pubs/KangMedioniBook.pdf>
- [43] FAUGERAS, O. *Three-dimensional computer vision*. Vyd. 1. Cambridge: MIT Press, 1996, 663 s. ISBN 02-620-6158-9.
- [44] BROWN, Duane C. Close-range camera calibration. In: *Photogrammetric Engineering*, 1971, 855–866. Dostupné z: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/lehre/vorlesungen/Aero/Brown71.pdf>
- [45] TSAI, Roger Y. A Versatile Camera Calibration Techniaue for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. 1987, roč. 3, č. 4, s. 323-344. Dostupné z: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/papers/Tsai.pdf
- [46] WEI, Guo-Qing a Song De MA. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1994, vol. 16, issue 5, s. 469-480. DOI: 10.1109/34.291450.
- [47] HARTLEY, Richard a Andrew ZISSERMAN. *Multiple view geometry in computer vision*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 655 s. ISBN 05-215-4051-8.
- [48] ZHANG, Zhengyou. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. 1999. DOI: 10.1109/iccv.1999.791289.
- [49] VANÍČEK, Petr a Edward J KRAKIWSKY. *Geodesy, the concepts*. 2nd ed. New York, N.Y.: Sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier Science Pub. Co., 1986, xv, 697 p. ISBN 04-448-7777-0.
- [50] POLLEFEYS, M., D. NISTÉR, J.-M. FRAHM, A. AKBARZADEH, P. MORDOHAI, B. CLIPP, C. ENGELS, D. GALLUP, S.-J. KIM, et al. Detailed Real-Time Urban 3D Reconstruction from Video. *International Journal of Computer Vision*. 2008, 78(2-3): 143-167. DOI: 10.1007/s11263-007-0086-4. ISSN 0920-5691. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11263-007-0086-4>

- [51] ZHANG, Zhengyou. Microsoft Kinect Sensor and Its Effect. *IEEE Multimedia*. 2012, **19**(2): 4-10. DOI: 10.1109/MMUL.2012.24. ISSN 1070-986x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6190806>
- [52] NALPANTIDIS, Lazaros a Antonios GASTERATOS. Stereo vision for robotic applications in the presence of non-ideal lighting conditions. *Image and Vision Computing*. 2010, **28**(6): 940-951. DOI: 10.1016/j.imavis.2009.11.011. ISSN 02628856. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0262885609002674>
- [53] LICHTI, Derek D. a Changjae KIM. A Comparison of Three Geometric Self-Calibration Methods for Range Cameras. *Remote Sensing* [online]. 2011, vol. 3, issue 12, s. 1014-1028 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.3390/rs3051014#sthash.2mTP11Sv.dpuf. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/5/1014/>
- [54] LINDNER, Marvin a Andreas KOLB. Lateral and Depth Calibration of PMD-Distance. In: *Lecture Notes in Computer Science* [online]. 2006, vol. 4292, s.524-533 [cit. 2013-09-07].
- [55] SCHILLER, Ingo, Christian BEDER a Reinhard KOCH. Calibration of a PMD-Camera Using a Planar Calibration Pattern Together with a Multi-Camera Setup. In: *Proceedings of the XXIst ISPRS Congress, Technical Commission III* [online]. 2008, vol. XXXVII, s. 297-302 [cit. 2013-09-07].
- [56] ROBBINS, Scott, Brigit SCHROEDER, Bryan MURAWSKI, Nicholas HECKMAN, Jonathan LEUNG, Francis BERGHMANS, Anna G. MIGNANI, Antonello CUTOLO, Patrick P. MEYRUEIS a Thomas P. PEARSALL. Photogrammetric calibration of the SwissRanger 3D range imaging sensor. *Proceedings of SPIE Optical Sensors* [online]. 2008, č. 7003, s. 700320-700320-10 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.1117/12.781551. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1334751>
- [57] KIM, Young Min, Derek CHAN, Christian THEOBALT a Sebastian THRUN. Design and Calibration of a Multi-view TOF Sensor Fusion System. In: *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops* [online]. 2008 [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: http://www-cs.stanford.edu/people/theobalt/TOF_CV_mvfuse_calib_final.pdf
- [58] JAAKKOLA, A., S. KAASALAINEN, J. HYYPPA, H. NIITTYMAKI a A. AKUJARVI. Intensity Calibration and Imaging with SwissRanger SR-3000 Range Camera. *The Photogrammetric Journal of Finland*. 2008, roč. 21, č. 1, s. 16-25.

- [59] CHIABRANDO, Filiberto, Roberto CHIABRANDO, Dario PIATTI a Fulvio RINAUDO. Sensors for 3D Imaging: Metric Evaluation and Calibration of a CCD/CMOS Time-of-Flight Camera. *Sensors* [online]. 2009, vol. 9, issue 12, s. 10080-10096 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.3390/s91210080#sthash.CGSGmer9.dpuf. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/12/10080/>
- [60] RADMER, Jochen, Pol Moser FUSTE, Henning SCHMIDT a Jorg KRUGER. Incident light related distance error study and calibration of the PMD-range imaging camera. *2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops* [online]. IEEE, 2008, s. 1-6 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.1109/CVPRW.2008.4563168. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4563168>
- [61] TOURNAS, E. a M. TSAKIRI. 2010. Distance Error Estimation for Range Imaging Sensors. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: Commission V Symposium*. Newcastle upon Tyne, s. 5. XXXVIII: Part 5. Dostupné také z: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part5/papers/124.pdf>
- [62] STEIGER, Olivier, Judith FELDER a Stephan WEISS. 2008. Calibration of time-of-flight range imaging cameras. In: *2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*. San Diego: IEEE, s. 1968-1971. DOI: 10.1109/ICIP.2008.4712168. ISBN 978-1-4244-1765-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4712168>
- [63] OPRISESCU, Serban, Dragos FALIE, Mihai CIUC a Vasile BUZULOIU. 2007. Measurements with ToE Cameras and Their Necessary Corrections. In: *2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems*. IEEE, s. 1-4. DOI: 10.1109/ISSCS.2007.4292691. ISBN 1-4244-0968-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4292691>
- [64] WANG, Jianguo Jack, Gibson HU, Shoudong HUANG a Gamini DISSANAYAKE. 2009. 3D Landmarks Extraction from a Range Imager Data for SLAM. In: *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*. Sydney, s. 8. Dostupné také z: <http://www.araa.asn.au/acra/acra2009/papers/pap165s1.pdf>
- [65] MUHAMMAD, Naveed a Simon LACROIX. Calibration of a rotating multi-beam Lidar. In: *International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. 2010 [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: <http://homepages.laas.fr/simon/publis/MUHAMMAD-IROS-2010.pdf>

- [66] ATANACIO-JIMÉNEZ, Gerardo, José-Joel GONZÁLEZ-BARBOSA, Juan B. HURTADO-RAMOS, Francisco J. ORNELAS-RODRÍGUEZ, Hugo JIMÉNEZ-HERNÁNDEZ, Teresa GARCÍA-RAMIREZ a Ricardo GONZÁLEZ-BARBOSA. LIDAR Velodyne HDL-64E Calibration. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. 2011, roč. 8, č. 5, s. 70-82 [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/23811.pdf>
- [67] GLENNIE, Craig a Derek D. LICHTI. Static Calibration and Analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for High Accuracy Mobile Scanning. *Remote Sensing* [online]. 2010, vol. 2, issue 6, s. 1610-1624 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.3390/rs2061610#sthash.eLLJ7qYH.dpuf. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/2/6/1610/>
- [68] LICHTI, Derek D., Jacky CHOW a Hervé LAHAMY. Parameter de-correlation and model-identification in hybrid-style terrestrial laser scanner self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2011, roč. 66, č. 3 [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271610001206>
- [69] GLENNIE, Craig a Derek D. LICHTI. Temporal Stability of the Velodyne HDL-64E S2 Scanner for High Accuracy Scanning Applications. *Remote Sensing* [online]. 2011, vol. 3, issue 12, s. 539-553 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.3390/rs3030539#sthash.n0vfMW7m.dpuf. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/3/539/>
- [70] MIRZAEI, Faraz M., Dimitrios G. KOTTAS a Stergios I. ROUMELIOTIS. 3D Lidar-Camera Intrinsic and Extrinsic Calibration: Observability. In: [online]. [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: <http://www-users.cs.umn.edu/~faraz/pdfs/VelodyneLadybug.pdf>
- [71] CHEN, Chia-Yen a Hsiang-Jen CHIEN. On-Site Sensor Recalibration of a Spinning Multi-Beam LiDAR System Using Automatically-Detected Planar Targets. *Sensors*. 2012, **12**(12): 13736-13752. DOI: 10.3390/s121013736. ISSN 1424-8220. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/10/13736/>
- [72] CHEN, Chia-Yen a Hsiang-Jen CHIEN. Geometric calibration of a multi-layer LiDAR system and image sensors using plane-based implicit laser parameters for textured 3-D depth reconstruction. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 2014, **25**(4): 659-669. DOI: 10.1016/j.jvcir.2013.08.005. ISSN 10473203. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S104732031300151X>

- [73] LEVISON, Jesse. *Automatic Laser Calibration, Mapping, and Localization for Autonomous Vehicles* [online]. Stanford, 2011 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <https://stacks.stanford.edu/file/druid:zx701jr9713/JesseThesisFinal2-augmented.pdf>. Dizertační práce.
- [74] ZHU, Zhu a Jilin LIU. Unsupervised Extrinsic Parameters Calibration for Multi-beam LIDARs. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013)*. 2013, s. 1110-1113. DOI: 10.2991/iccsee.2013.278. ISSN 1951-6851.
- [75] CHAN, T. O., D. D. LICHTI a D. BELTON. Temporal Analysis and Automatic Calibration of the Velodyne HDL-32E LiDAR System. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2013, s. 61-66. DOI: 10.5194/isprsannals-ii-5-w2-61-2013.
- [76] SVOBODA, Tomáš, Daniel MARTINEC a Tomáš PAJDLA. A Convenient Multicamera Self-Calibration for Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* [online]. 2005, vol. 14, issue 4, s. 407-422 [cit. 2013-09-08]. DOI: 10.1162/105474605774785325. Dostupné z: <http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/105474605774785325>
- [77] UEMATSU, Yuko, Tomoaki TESHIMA, Hideo SAITO a Cao HONGHUA. D-Calib: Calibration Software for Multiple Cameras System. *14th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP 2007)* [online]. IEEE, 2007, s. 285-290 [cit. 2013-09-08]. DOI: 10.1109/ICIAP.2007.4362793. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?>
- [78] GANHUA LI, YUNHUI LIU, LI DONG, XUANPING CAI a DONGXIANG ZHOU. An algorithm for extrinsic parameters calibration of a camera and a laser range finder using line features. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. IEEE, 2007, s. 3854-3859 [cit. 2013-09-08]. DOI: 10.1109/IROS.2007.4399041. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4399041>
- [79] WASIELEWSKI, S. a O. STRAUSS. Calibration of a multi-sensor system laser rangefinder/camera. *Proceedings of the Intelligent Vehicles '95. Symposium* [online]. IEEE, 1995, s. 472-477 [cit. 2013-09-08]. DOI: 10.1109/IVS.1995.528327. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=528327>
- [80] MEI, C. a P. RIVES. Calibration between a central catadioptric camera and a laser range finder for robotic applications. *Proceedings 2006 IEEE International Conference*

- on Robotics and Automation*, 2006. ICRA 2006 [online]. IEEE, 2006, s. 532-537 [cit. 2013-09-08]. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1641765. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1641765>
- [81] UNNIKRISHNAN, Ranjith a Martial HEBERT. Fast Extrinsic Calibration of a Laser Rangefinder to a Camera: Tech. report CMU-RI-TR-05-09 [online]. 2005 [cit. 2013-09-08]. Dostupné z: http://www.ri.cmu.edu/publication_view.html?pub_id=5293
- [82] GUAN, Li a Marc POLLEFEYS. A Unified Approach to Calibrate a Network of Camcorders and ToF. In: *Dans Workshop on Multi-camera and Multi-model Sensors Fusion algorithms and Applications* [online]. 2008 [cit. 2013-09-08]. Dostupné z: <http://www.inf.ethz.ch/personal/pomarc/pubs/GuanM2SFA208.pdf>
- [83] HERRERA C., Daniel, Juho KANNALA a Janne HEIKKILA. Joint Depth and Color Camera Calibration with Distortion Correction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2012, vol. 34, issue 10, s. 2058-2064 [cit. 2013-09-08]. DOI: 10.1109/TPAMI.2012.125. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6205765>
- [84] LUHMANN, Thomas, Julia OHM, Johannes PIECHEL a Thorsten ROELFS. Geometric Calibration of Thermographic Cameras. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2010, vol. XXXVIII, s. 411-416 [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.222.4253&rep=rep1&type=pdf>
- [85] JU, Xiangyang, Jean-Christophe NEBEL, J. Paul SIEBERT, Haimei GONG, Yi CAI a Jean-Pierre CHATARD. 3D thermography imaging standardization technique for inflammation diagnosis. *Proceedings of the SPIE* [online]. 2005, roč. 5640, s. 266-273 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.1117/12.577055. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=856332>
- [86] PRAKASH, Surya, Pei Yean LEE a Terry CAELLI. 3D Mapping of Surface Temperature Using Thermal Stereo. *2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision* [online]. IEEE, 2006, s. 1-4 [cit. 2013-09-07]. DOI: 10.1109/ICARCV.2006.345342. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4150183>
- [87] MARTIN, Martin C. a Hans P. MORAVEC. *Robot Evidence Grids*. 1996. [cit. 1.6.2015]. Dostupné také z:

- <https://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/project.archive/robot.papers/1996/RobotEvidenceGrids.pdf>
- [88] *SR4000 Data Sheet* [online]. Rev. 5.1. MESA Imaging AG, Switzerland 2011. [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: <http://www.mesa-imaging.ch/swissranger4000.php>
- [89] *SR4000/SR4500 User Manual* [online]. MESA Imaging AG, Technoparkstrasse 1, 8005 Zurich. Version 3.0. [cit. 2. 5. 2015]. Dostupné z: http://downloads.mesa-imaging.ch/dlm.php?fname=customer/Customer_CD/SR4000_SR4500_Manual.pdf
- [90] REKTORYS, Karel. 2000. *Přehled užití matematiky*. 7. vyd. Praha: Prometheus, 720 s. ISBN 80-719-6179-5.
- [91] *Leica DISTO TM D8: The original laser distance meter* [online]. Leica Geosystems AG, CH-9435 Heerbrugg [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: www.disto.com
- [92] KOČMANOVÁ, Petra. 2011. *Predikce pohybů skalních bloků v Moravském krasu*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [93] High Definition Lidar: Datasheet for Velodyne HDL-64E S2 [online]. Velodyne: Morgan Hill, CA, USA. [cit. 2013-09-07]. Dostupné z: <http://velodynelidar.com/lidar/products/brochure/HDL-64E%20S2%20datasheet.pdf>
- [94] High Definition Lidar™: Datasheet for Velodyne HDL-32E [online]. Velodyne: Morgan Hill, CA, USA. [cit. 2013-19-12]. Dostupné z: http://velodynelidar.com/lidar/hdl/downloads/97-0038c%20HDL-32E%20datasheet_APR2012.pdf
- [95] HDL-64E S2 and S2.1, User's manual and programming guide [online]. Velodyne: Morgan Hill, CA, USA. [cit. 2012-23-12]. Dostupné z: <http://velodynelidar.com/lidar/products/brochure/HDL-64E%20S2%20datasheet.pdf>
- [96] Diagram_correct.ppt, [online]. Velodyne: Morgan Hill, CA, USA. [cit. 2012-03-05]. Dostupné z: http://velodyne.com/lidar/doc/Documents/Doc%20Package/diagram_correct.ppt
- [97] BJERHAMMAR, Arne. *Theory of errors and generalized matrix inverses*. New York: Elsevier Wetenschappelijke Uitgeverij, 1973, xii, 420 p. ISBN 04-444-0981-5.

- [98] KOSKA, Bronislav, Martin ŠTRONER a Jiří POSPÍŠIL. 2003. Algoritmus určování rovnice obecné roviny pro laserové skenování. *Stavební obzor*. **12**(10): 309-313.
- [99] Instruction Manual Pulse Total Station GPT-3000 Series, [online]. TOPCON CORPORATION 75-1 Hasunuma-cho, Itabashi-ku, Tokyo 174-8580, Japan. [cit. 2013-23-12]. Dostupné z: <http://www.surveyequipment.com/PDFs/topcon-gpt-3000-manual.pdf>
- [100] HERRERA C., Daniel, Juho KANNALA a Janne HEIKKILA. Joint Depth and Color Camera Calibration with Distortion Correction. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2012, s. 2058-2064. DOI: 10.1109/TPAMI.2012.125. ISSN 0162-8828. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6205765>
- [101] PhotoModeler Pro 5 help. Eos System Inc.: 210 - 1847 West Broadway, Vancouver BC V6J 1Y6, Canada.
- [102] BURIAN, František. *Tvorba multispektrálních map v mobilní robotice*. Brno, 2014. Dizertační práce. VUT v Brně.

PUBLIKACE AUTORA VZTAHUJÍCÍ SE K DIZERTAČNÍ PRÁCI

- [1] 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, 21(1): 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>
- [2] KOČMANOVÁ, Petra a Luděk ŽALUD. Multispectral Stereoscopic Robotic Head Calibration and Evaluation. In: *Lecture Notes in Computer Science series Volume 9055*. 2015. [v tisku]
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] BURIAN, František, Petra KOČMANOVÁ a Luděk ŽALUD. Robot mapping with range camera, CCD cameras and thermal imagers. In: *2014 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. Miedzyzdroje: IEEE, 2014, s. 200-205. DOI: 10.1109/MMAR.2014.6957351. ISBN 978-1-4799-5081-2. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6957351>
- [6] KOČMANOVÁ, Petra, Luděk ŽALUD, František BURIAN a Tomáš JÍLEK. Multispectral Data Fusion for Robotic Reconnaissance and Mapping. In: *ICINCO 2014 Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics Volume 2*. Vídeň, 2014, s. 459-466. ISBN 978-989-758-040-6.
- [7] KOČMANOVÁ, Petra, František BURIAN a Luděk ŽALUD. Multispectral Texture Mapping for Telepresence and Autonomous Mobile Robotics. In: *3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics (ICMEM'14)*. Praha, 2014.

- ISBN 978-1-927877-05-0. Dostupné také z:
http://avestia.com/ICMEM2014_Proceedings/papers/158.pdf
- [8] BURIAN, František., Luděk ŽALUD, Petra KOČMANOVÁ, Tomáš JÍLEK a Lukáš KOPEČNÝ. Multi-robot system for disaster area exploration. In: *Flood Recovery, Innovation and Response IV*. Great Britain: WIT Press, 2014, s. 263-274. DOI: 10.2495/FRIAR140221. ISBN 978-1-84564-785-8. Dostupné také z:
<http://library.witpress.com/viewpaper.asp?pcode=FRIAR14-022-1>
- [9] KOČMANOVÁ, Petra. Kalibrace a ověření přesnosti hybridního skeneru Velodyne. In: *Sborník anotací konference JUNIORSTAV 2014*. Brno, 2014, s. 1-6. ISBN 978-80-214-4851-3.
- [10] KOČMANOVÁ, Petra a Luděk ŽALUD. Proximity laser scanner calibration for rescue robotics. In: *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Vienna: IEEE, 2013, s. 2460-2465. DOI: 10.1109/IECON.2013.6699517. ISBN 978-1-4799-0224-8. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6699517>
- [11] KOČMANOVÁ, Petra a Luděk ŽALUD. Mutual Calibration of Heterogeneous Matrix Sensors. In: *Sborník studentské vědecké konference Telč 2013*. Telč: ČVUT, 2013, s. 1-6. ISBN 978-80-01-04499-6.
- [12] ŽALUD, Luděk a Petra KOČMANOVÁ. Fusion of thermal imaging and CCD camera-based data for stereovision visual telepresence. In: *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. Linköping: IEEE, 2013, s. 1-6. DOI: 10.1109/SSRR.2013.6719344. ISBN 978-1-4799-0880-6. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6719344>
- [13] CHROMÝ, Adam, Petra KOČMANOVÁ a Luděk ŽALUD. Creating Three-Dimensional Computer Models Using Robotic Manipulator and Laser Scanners. In: *12th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems (2013)*. Velké Karlovice: Elsevier B.V., 2013, s. 268-273. DOI: 10.3182/20130925-3-CZ-3023.00037. ISBN 9783902823533. Dostupné také z: <http://www.ifac-paperonline.net/Detailed/62529.html>
- [14] KOČMANOVÁ, Petra, Adam CHROMÝ a Luděk ŽALUD. 3D Proximity Laser Scanner Calibration. In: *18th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*. Miedzyzdroje: Institute of Control Engineering, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, 2013, s. 742-747. ISBN 978-1-4673-5507-0.

- [15] KOCMANOVÁ, Petra a Luděk ŽALUD. 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, s. 343-348. ISBN 978-80-214-4755-4.
- [16] KOCMANOVÁ, Petra a Luděk ŽALUD. Velodyne HDL-64E Proximity Laser Scanner Calibration. In: *Elektrorevue* [online]. 2013. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/en/articles/analogue-technics/0/velodyne-hdl-64e-proximity-laser-scanner-calibration/>
- [17] KOCMANOVÁ, Petra a Luděk ŽALUD. Kalibrace dálkoměrné kamery SwissRanger SR4000. In: *Geodetický a kartografický obzor* [online]. 2013. ISSN 1805-7446. Dostupné z: http://egako.eu/pdf/gako_2013_06.pdf
- [18] ŽALUD, Luděk, František BURIAN, Lukáš KOPEČNÝ a Petra KOCMANOVÁ. Remote Robotic-Exploration of Contaminated and Dangerous Areas. In: *International Conference in Military Technology Proceeding, ICMT'13*. Brno: University of Defence, 2013, s. 1309-1316. ISBN 978-80-7231-917-6.
- [19] KOCMANOVÁ, Petra. Kalibrace dálkoměrné kamery. In: *Sborník anotací konference Juniorstav 2013* [CD]. 2013. ISBN 978-80-214-4670-0.
- [20] KOCMANOVÁ, Petra. Point field for scanner calibration. In: *XVII Miedzynarodowa Konferencja Studenckich Kól Naukowych i XXIX Sejmik SKN Wroclaw, 10-11 maja 2012 r.* Wroclaw: Uniwersytet Przyrodniczy we Wroclawiu, 2012, s. 86. ISBN 978-83-7717-090-8.

POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY

APDs – Avalanche Photodiodes

CCD – Charge-coupled device

CMOS – Complementary Metal–Oxide–Semiconductor

D-TOF – Direct – TOF

FAST – Features from Accelerated Segment Test

FIR – Far-infrared

FPA - Focal Plane Array

I-TOF – Indirect - TOF

LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LED – Light Emitting Diode

LiDAR – Light Detection And Ranging

LUT – Look up Table

LWIR - Long-wavelength infrared

MIR – Mid-infrared

MNČ – Metoda Nejmenších Čtverců

MWIR - Mid-wavelength infrared

NIR – Near-infrared

PMD – Photo-mixing Devices

RGB – Red-Green-Blue

RIM – Range Imaging Cameras

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping

SPADs – Single-Photon Avalanche Diodes

SWIR – Short-wavelength infrared

TOF – Time-Of-Flight

SEZNAM PŘÍLOH

Digitální přílohy

Příloha č. 1:

- program *MultiSensCalib*

Příloha č. 2:

- korekční koeficienty pro měření vzdáleností dálkoměrné kamery Swissranger SR4000

Tištěné přílohy

Příloha č. 3:

- výsledky kalibrace sensorické hlavice robotu Orpheus-X3 pro jednotlivé konfigurace snímků číslo 4-10

konfigurace číslo 4

name of camera	TOF_filter	CCD_left	CCD_right	THERMO_left	THERMO_right
<i>fx</i> [px]	148,27	1354,1	1353,14	523,81	527,78
<i>fy</i> [px]	148,00	1354,31	1353,28	523,28	525,87
<i>u0</i> [px]	109,08	670,58	627,37	321,92	325,17
<i>v0</i> [px]	76,43	472,50	439,15	262,71	255,17
<i>k1</i>	-0,6113	-0,1807	-0,185	-0,2668	-0,1980
<i>k2</i>	0,6473	0,3837	0,2949	-0,2483	-0,1220
<i>p1</i>	-0,0199	-0,0011	-0,0020	0,0002	0,0018
<i>p2</i>	-0,0156	0,0014	0,0030	0,0020	-0,0064
<i>rX</i> [g]	0,0000	2,4209	3,6963	1,6929	2,9583
<i>rY</i> [g]	0,0000	-2,9937	-14,1314	-1,5681	-15,6569
<i>rZ</i> [g]	0,0000	-0,9867	0,0841	-0,0492	-0,4402
<i>tX</i> [m]	0,000	-0,058	0,050	-0,063	0,049
<i>tY</i> [m]	0,000	-0,053	-0,054	-0,001	-0,001
<i>tZ</i> [m]	0,000	-0,016	-0,004	-0,001	0,005
<i>SD1</i> [px]	0,27	0,35	0,35	0,44	0,31
<i>SD2</i> [px]	0,31	0,36	0,37	0,49	0,33

konfigurace číslo 5

name of camera	TOF_filter	CCD_left	CCD_right	THERMO_left	THERMO_right
<i>fx</i> [px]	149,84	1362,21	1360,38	527,36	526,98
<i>fy</i> [px]	149,69	1361,35	1358,66	526,40	526,46
<i>u0</i> [px]	101,20	660,31	618,68	318,25	325,65
<i>v0</i> [px]	71,89	473,15	443,32	256,87	249,77
<i>k1</i>	-0,4714	-0,1572	-0,1496	-0,2737	-0,2664
<i>k2</i>	0,3450	0,2951	0,2216	-0,0890	-0,0270
<i>p1</i>	-0,0067	-0,0015	-0,0017	0,0015	0,0008
<i>p2</i>	-0,0081	-0,0008	-0,0011	0,0021	0,0019
<i>rX</i> [g]	0,0000	0,4414	1,5968	0,4799	1,6967
<i>rY</i> [g]	0,0000	-0,1912	-11,2027	1,2880	-12,3754
<i>rZ</i> [g]	0,0000	-0,8904	0,3162	0,0180	-0,1707
<i>tX</i> [m]	0,000	-0,057	0,052	-0,061	0,053
<i>tY</i> [m]	0,000	-0,052	-0,053	-0,001	0,000
<i>tZ</i> [m]	0,000	-0,004	0,004	0,009	0,018
<i>SD1</i> [px]	0,27	0,32	0,32	0,53	0,37
<i>SD2</i> [px]	0,30	0,32	0,33	0,57	0,4

konfigurace číslo 6

name of camera	TOF_filter	CCD_left	CCD_right	THERMO_left	THERMO_right
<i>fx</i> [px]	150,24	1362,03	1361,00	527,78	529,64
<i>fy</i> [px]	150,22	1363,29	1361,63	527,68	529,73
<i>u0</i> [px]	96,10	687,95	646,94	324,35	331,81
<i>v0</i> [px]	74,80	484,20	453,98	264,13	259,60
<i>k1</i>	-0,4012	-0,1429	-0,1200	-0,2559	-0,2437
<i>k2</i>	0,2485	0,3045	0,1554	-0,1345	-0,0880
<i>p1</i>	-0,0025	0,0011	0,0002	0,0018	0,0009
<i>p2</i>	-0,0081	0,0035	0,0021	-0,0002	0,0005
<i>rX</i> [g]	0,0000	1,1920	2,3606	0,8894	1,7939
<i>rY</i> [g]	0,0000	3,2028	-7,7875	4,0637	-9,4974
<i>rZ</i> [g]	0,0000	-0,8423	0,2208	0,0873	-0,2522
<i>tX</i> [m]	0,000	-0,055	0,055	-0,058	0,055
<i>tY</i> [m]	0,000	-0,052	-0,053	-0,001	0,000
<i>tZ</i> [m]	0,000	0,000	0,004	0,013	0,015
<i>SD1</i> [px]	0,27	0,38	0,39	0,41	0,30
<i>SD2</i> [px]	0,29	0,39	0,39	0,44	0,33

konfigurace číslo 7

name of camera	TOF_filter	CCD_left	CCD_right	THERMO_left	THERMO_right
<i>fx</i> [px]	146,95	1363,47	1360,97	528,11	529,04
<i>fy</i> [px]	146,89	1363,06	1360,14	527,49	529,08
<i>u0</i> [px]	89,55	684,51	640,61	318,95	327,61
<i>v0</i> [px]	71,88	480,19	453,27	261,34	259,57
<i>k1</i>	-0,3126	-0,1652	-0,1172	-0,2515	-0,2477
<i>k2</i>	-0,1026	0,4101	0,1373	-0,1319	-0,0926
<i>p1</i>	0,0001	-0,0005	0,0002	0,0025	0,0025
<i>p2</i>	-0,0058	0,0030	0,0012	0,0005	0,0009
<i>rX</i> [g]	0,0000	0,2825	1,3281	0,1470	0,7383
<i>rY</i> [g]	0,0000	5,8414	-5,2849	6,2063	-7,2564
<i>rZ</i> [g]	0,0000	-0,8003	0,3452	0,1112	-0,151
<i>tX</i> [m]	0,000	-0,055	0,055	-0,057	0,057
<i>tY</i> [m]	0,000	-0,050	-0,050	0,002	0,003
<i>tZ</i> [m]	0,000	-0,015	-0,017	-0,004	-0,006
<i>SD1</i> [px]	0,28	0,40	0,40	0,53	0,38
<i>SD2</i> [px]	0,29	0,40	0,41	0,57	0,41

Konfigurace číslo 8

name of camera	TOF_filter	CCD_left	CCD_right	THERMO_left	THERMO_right
<i>fx</i> [px]	149,62	1363,98	1361,92	527,59	528,33
<i>fy</i> [px]	149,59	1364,33	1361,69	527,19	528,61
<i>u0</i> [px]	94,92	680,13	638,15	320,70	330,30
<i>v0</i> [px]	72,56	481,14	453,33	260,61	255,91
<i>k1</i>	-0,3991	-0,1535	-0,1191	-0,2643	-0,2571
<i>k2</i>	0,2647	0,3636	0,1506	-0,0793	-0,0515
<i>p1</i>	-0,0015	-0,0001	-0,0002	0,0022	0,0016
<i>p2</i>	-0,0069	0,0022	0,0006	0,0008	0,0015
<i>rX</i> [g]	0,0000	0,3976	1,4673	0,3776	1,2881
<i>rY</i> [g]	0,0000	3,3896	-7,6343	4,1810	-9,1730
<i>rZ</i> [g]	0,0000	-0,8337	0,3093	0,0758	-0,1637
<i>tX</i> [m]	0,000	-0,056	0,054	-0,058	0,055
<i>tY</i> [m]	0,000	-0,052	-0,052	0,000	0,000
<i>tZ</i> [m]	0,000	-0,003	-0,001	0,011	0,013
<i>SD1</i> [px]	0,27	0,36	0,36	0,49	0,35
<i>SD2</i> [px]	0,29	0,36	0,37	0,52	0,38

konfigurace číslo 9

name of camera	TOF_filter	CCD_left	CCD_right	THERMO_left	THERMO_right
<i>fx</i> [px]	148,83	1363,52	1361,34	527,07	527,31
<i>fy</i> [px]	148,00	1362,82	1360,47	525,77	526,21
<i>u0</i> [px]	93,88	688,48	647,73	328,38	324,36
<i>v0</i> [px]	71,25	482,84	453,50	257,33	255,71
<i>k1</i>	-0,5160	-0,1530	-0,1348	-0,2923	-0,3007
<i>k2</i>	0,7728	0,3016	0,2195	0,1418	0,0626
<i>p1</i>	-0,0075	-0,0003	-0,0002	0,0009	0,0000
<i>p2</i>	-0,0069	0,0037	0,0027	0,0018	0,0001
<i>rX</i> [g]	0,0000	-0,1858	0,9443	0,2318	0,7853
<i>rY</i> [g]	0,0000	4,0926	-6,8783	5,4369	-9,5683
<i>rZ</i> [g]	0,0000	-0,8590	0,3309	0,0659	-0,1396
<i>tX</i> [m]	0,000	-0,053	0,056	-0,056	0,057
<i>tY</i> [m]	0,000	-0,051	-0,052	0,000	0,001
<i>tZ</i> [m]	0,000	-0,012	-0,010	0,003	0,008
<i>SD1</i> [px]	0,32	0,46	0,46	0,56	0,38
<i>SD2</i> [px]	0,35	0,47	0,47	0,59	0,43

konfigurace číslo 10

name of camera	TOF_filter	CCD_left	CCD_right	THERMO_left	THERMO_right
<i>fx</i> [px]	150,40	1362,52	1360,99	526,71	529,74
<i>fy</i> [px]	149,62	1362,66	1360,73	525,76	528,62
<i>u0</i> [px]	93,80	685,79	645,17	328,21	324,97
<i>v0</i> [px]	72,25	483,15	454,30	258,61	256,30
<i>k1</i>	-0,4845	-0,1472	-0,1298	-0,2889	-0,3052
<i>k2</i>	0,6424	0,2879	0,1931	0,1297	0,0849
<i>p1</i>	-0,0069	-0,0001	-0,0002	0,0010	-0,0003
<i>p2</i>	-0,0069	0,0032	0,0020	0,0018	0,0006
<i>rX</i> [g]	0,0000	0,1207	1,2387	0,4220	1,0620
<i>rY</i> [g]	0,0000	4,0410	-6,9288	5,4862	-9,4271
<i>rZ</i> [g]	0,0000	-0,8325	0,3216	0,0887	-0,1526
<i>tX</i> [m]	0,000	-0,054	0,056	-0,056	0,057
<i>tY</i> [m]	0,000	-0,053	-0,053	-0,001	0,000
<i>tZ</i> [m]	0,000	-0,001	0,001	0,015	0,015
<i>SD1</i> [px]	0,31	0,44	0,44	0,53	0,37
<i>SD2</i> [px]	0,34	0,45	0,44	0,57	0,42