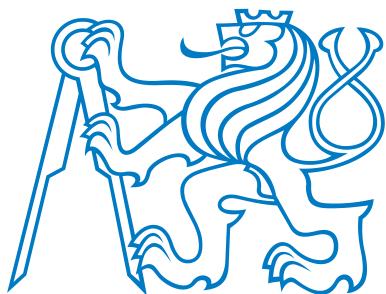


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

3D videosensor

Praha, 2009

Autor: Bc. Dan Pavlišta

Vedoucí: Ing. Jan Fischer, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb. , o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu Ing. Janu Fischerovi za odborné vedení a doktorandům Ing. Ondreji Pribulovi, Ing. Janu Pohankovi za cenné rady při řešení této práce. Neméně tak děkuji rodičům a blízkým za plnou podporu během studia.

Abstrakt

Tato práce popisuje realizaci 3D videosenzoru jako zařízení využívající metod měření polohy v prostoru pomocí vybraného hardware. Cílem je určovat polohu objektů v prostoru pomocí obrazu ze dvou kamer sledujících scénu. Vývoj metod proběhl s ohledem na možnost použití kompaktního zařízení v reálném čase bez nadřazeného systému a s ohledem na nižší výpočetní prostředky. K realizaci bylo využito jednak universální vývojové zařízení EZ-kit a různé typy dvojice kamer dále bylo využito zařízení Visor smart camera vyvinuté laboratoří videometrie pro účely měření. Obě zařízení obsahují signálový procesor Blackfin BF533.

Abstract

The work describes development sensor for object position measurement in space using stereovision for specific hardware. The goal is to compute 3D coordinates in space in a compact device from two images of a scene. Methods for measurement are simplified for using in a small compact device with bounded performance. The first device is the development kit by Analog Devices called EZ-kit and set of free cameras. Second multipurpose device is the Visor smart camera developed in videometry laboratory of department of measure. Both devices include signal processor Blackfin BF533.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Dan Pavlišta**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření, blok KM1 - Řídicí technika

Název téma: **3D videosensor**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte kompaktní senzor, který bude zpracováním obrazové informace získané z optoelektronických senzorů určovat tvar, polohu a rozměry objektů ve 3D prostoru.

Navrhněte metody vyhodnocení obrazů, pomocí nichž se ze dvou nebo více snímků určí poloha významných bodů objektů ležících v zorném poli senzoru.

Vytvořte snímací hlavici, která bude spolupracovat s deskami zpracování obrazu se signálovým procesorem. Dále navrhněte potřebné programové vybavení pro signálový procesor i pro nadřazené PC, jímž se senzor bude konfigurovat. Funkčnost 3D senzoru experimentálně ověřte snímáním několika známých vzorů scén a výsledky snímání porovnejte se skutečností.

Posuďte možnost použití výsledného zařízení pro řízení polohy objektů a v případně potřeby navrhněte a realizujte další potřebné bloky.

Seznam odborné literatury:

- 1) Hlaváč, V., Sedláček, M.: Zpracování signálů a obrazů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005.
- 2) Šonka M., Hlaváč V., Boyle R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, PWS Publishing, 1998, ISBN 0-534-953-93
- 3) Analog Devices ADSP-BF53x/BF56x Blackfin Processor Programming Reference, 2007, www.analog.com
- 4) Analog Devices: ADSP-BF533 Blackfin Processor Hardware Reference, 2007 www.analog.com

Vedoucí: Ing. Jan Fischer, CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2009/10

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 27. 2. 2009

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
1 Úvod	1
1.1 Stručný rozbor problematiky	2
2 Metody a algoritmy zpracování obrazů	3
2.1 Měření polohy těžiště tělesa	4
2.1.1 Metoda výpočtu těžiště	4
2.1.2 Použití LED k označkování měřeného objektu	5
2.2 Metody hledání objektů v obraze pomocí segmentace	5
2.2.1 Adaptivní prahování	6
2.2.2 Použití Houghovy Transformace	7
2.2.2.1 Linear Congruential Generator	7
2.2.3 Segmentace obarvením objektů	8
3 Metody měření polohy v prostoru	9
3.1 Fotogrametrie	9
3.2 Měření souřadnic pomocí kamer v kanonické konfiguraci	10
3.2.1 Jednoduchá metoda nastavení vzdálenosti optických os	11
3.3 Rozbor vlivů na správnost výsledku měření polohy	13
3.3.1 Vliv nedokonalého sesazení optických os	13
3.3.2 Radiální zkreslení objektivu, posun hlavního bodu	16
3.3.3 Statistické parametry šumu senzoru - opakovatelnost měření	17
3.4 Volba vhodné vzdálenosti optických os objektivů	18
3.5 Nekanonické uspořádání kamer pro měření	20
3.5.1 Porovnání citlivosti vůči kanonickému uspořádání	23

3.6	Obecná úloha stereovidění	24
3.6.1	Vnitřní a vnější parametry kamery	24
3.6.2	Kalibrace kamer	25
3.6.3	Triangulace	26
4	Realizace	27
4.1	Realizece 3D videosenzoru	27
4.1.1	Zařízení s EZ kitem a dvěma kamerami	27
4.1.1.1	Přenos obrazu a jeho digitalizace	28
4.1.2	Visor smart camera se dvěma CMOS senzory	29
4.1.3	Signálový procesor Blackfin BF533	29
4.2	Nadřazená aplikace a její funkce	31
4.2.0.1	Záložka - Zařízení (Devices)	31
4.2.1	Záložka - Statistické parametry	32
4.2.2	Záložka - Videometrie	32
4.2.3	Záložka - Download obrázku	32
4.2.4	Záložka - Barvení objektů	34
4.2.5	Záložka - Histogram, prahování	34
4.2.6	Další funkce - zoom, manuální výběr korespondence	34
4.3	Výsledky měření a experimentů	35
4.3.1	Měření v kanonické konfiguraci	35
4.3.2	Měření v nekanonickém uspořádání se známým úhlem mezi optickými osami.	37
4.3.3	Měření s kalibrovanou dvojicí kamer	37
4.4	Posouzení možností využití zařízení jako senzoru pro regulace	38
5	Závěr	41
A	Seznam použitého SW	III
B	Obsah přiloženého CD	V

Seznam obrázků

2.1	Vyzařovací charakteristika běžné indikační LED.	5
2.2	Detekce kružnice.	8
3.1	Geometrie kanonického uspořádání kamer pro stereovidění.	10
3.2	Epipolární geometrie obecného uspořádání kamer pro stereovidění.	11
3.3	Nastavení požadované vzdálenosti opt. os	12
3.4	Sumace sloupců v obrazu	12
3.5	Vliv nedokonalého sesazení na výsledek měření	13
3.6	Závislost chyby výpočtu souřadnice z na úhlu odklonu optické osy senzoru.	15
3.7	Radiální zreslení objektivu	16
3.8	Fluktuace souřadnic x,z	18
3.9	Minimální měřitelná vzdálenost pro stereosenzor.	19
3.10	Nekanonické, ale přesto ne zcela obecné uspořádání pro stereo měření. .	21
3.11	vyjádření vzdálenosti pro nekanonické uspořádání	22
3.12	Průběh velikosti disparity v závislosti na vzdálenosti pro kamery v kanonickém uspořádání	23
3.13	Souřadné systémy používané při promítání kamerou.	24
3.14	Schema procesu kalibrace zařízení.	25
4.1	Senzorová hlavice s EZkitem	28
4.2	Deska Visor	29
4.3	Adaptér pro připojení dvou senzorů	30
4.4	Senzor s obvodem MT9M001 Micron	30
4.5	Kompletní sestavená senzorová hlavice	31
4.6	Ovládací aplikace - nastavení zařízení	32
4.7	Ovládací aplikace - statistické parametry	33
4.8	Záložka videometrie	33
4.9	Barvení objektů v obrazu	34

4.10 Histogram, volba nastavení prahů	35
4.11 Zoom okno a manuální výběr korespondencí.	36
4.12 Měření na pojezdu MARS, kamery v kanonické konfiguraci	36
4.13 Vzdálenost mezi sousedními body pro měření podle 4.12	37
4.14 Fluktuace polohy bodu v závislosti fluktuaci parametrů kalibrace	38
4.15 Souřadnice bodů měření na posuvu Mars	39
4.16 Odchylky od očekávaných hodnot při měření na posuvu MARS	39

Seznam tabulek

3.1 Fluktuace polohy těžiště a standardní odchylka v závislosti na vzdálenosti světelného objektu.	17
--	----

Kapitola 1

Úvod

Práce se zabývá realizací 3D videosenzoru jako kompaktního zařízení pro měření polohy objektů v prostoru. Základem zařízení je signálový procesor Blackfin řady BF53x, který zpracovává obrazy ze dvou kamer pozorujících scénu. Dané zařízení bude informace předávat nadřazené aplikaci na PC, který však bude sloužit pouze jako zobrazovací a kalibrační nástroj. Prvním úkolem bylo zvolit vhodný hardware a provést rozbor konstrukce zařízení. Dále pak realizovat programové vybavení pro samotné zařízení a také pro možnost ovládání a pozorování obrazu z osobního počítače. Pro usnadnění případného využití jako vestavěného zařízení a z důvodu snadného a přesného vyhodnocení polohy objektu byla použita vhodná metoda značení objektů pomocí značek s výraznou světelnou intenzitou. Je diskutován vliv nejistoty vnesené šumem polohy těchto značek na určení polohy objektu.

Cílem je sestavit funkční vzorek zařízení a programového vybavení, realizovat pomocí něj měření a vyhodnotit zdroje chyb a nejistot. Využít přitom existující dostupné metody zpracování obrazů s ohledem na minimální dosažitelnou nejistotu měření a zároveň přijatelnou dobu výpočtu.

Hardware vybraný pro účely realizace je jednak vývojová univerzální deska Analog devices EZ-kit s procesorem BF533 a za druhé deska VISOR s procesorem BF532 vyvinutá v Laboratoři videometrie Katedry měření. Dále jde o návrh a realizaci metod zpracování obrazu na embedded zařízení, kde osobní počítač slouží pouze jako kalibrační a sledovací nástroj a v případě potřeby by s minimální úpravou (přidání displeje apod.) bylo možno hardware provozovat bez něj. Tomuto účelu musely být přizpůsobeny i veškeré metody s ohledem na výpočetní výkon zařízení.

1.1 Stručný rozbor problematiky

Pod pojmem senzor lze rozumět zařízení, které v závislosti na měřené veličině poskytuje (byť i prostřednictvím měronosné veličiny) signál úměrný měřené veličině. Závislost měronosné veličiny na měřené může být i silně nelineární, avšak pro zpracování je vždy výhodou linearita. V případě zadání této práce však definice senzoru není zcela evidentní. Chtěli bychom vyhodnocovat polohu předmětů v prostoru pomocí kamery. Kamera samotná je optickou soustavou s parametry, které je třeba znát a získat je lze procesem kalibrace. Dále je nutno identifikovat objekt(y) v obraze, který je zájmem naší pozornosti a to nejlépe automaticky bez asistence člověka. Na závěr je třeba vyhodnotit polohu v prostoru, případně velikost objektu pomocí vzdálenosti mezi klíčovými body. Z uvedeného výčtu je zřejmé, že tyto úlohy lze zpracovat pouze s komplexním přístupem k dané problematice. Koncepce této práce do jisté míry vycházela z toho, že na katedře měření v laboratoři videometrie v rámci diplomových prací, např. [7] a v rámci další práce doktorandů byl vyvinut hardware, který za tímto účelem bez citelných změn mohl být použit.

Hlavní důležité úkoly bylo tedy seznámení se s konkrétním zařízením, v případě desky VISOR a jejích modulů senzoru a adaptéra pro dva senzory šlo o její kompletní osazení a oživení. Dále pak vytvoření základního obslužného software, pomocí něž lze získat obraz z kamery do paměti. Dále je zapotřebí provést rozbor za účelem určení nejistoty měření polohy, ale i případné korekce zanesených chyb (např. geometrického uspořádání). Jakmile je obraz v paměti, je nutné provést jeho zpracování jehož výstupem by měla být dvojice případně sada dvojcí bodů zájmu (např. hran, středů hmoty, středů kružnic..). Z těchto bodů již lze určit polohu v prostoru. Aby bylo možné celý proces sledovat a ovládat bylo nutné vytvořit aplikaci, která pomocí vhodného grafického rozhraní ovládání prováděla.

Práce je dělena do tematicky dělených celků podle jednotlivých aplikačních oblastí, které byly při vývoji třeba zahrnout. Veškeré metody pro zpracování obrazu se opírají o známé postupy s odkazy na příslušnou literaturu a popsány jsou v samostatné kapitole o metodách. Samostatná kapitola je věnována obecným principům stereovidění a určování polohy v prostoru se zaměřením na konkrétní postup. Popis využitého hardwaru pro realizaci videosenzoru a popis funkce nalezneme v kapitole realizace. Kalibrační a ovládací aplikace pro nadřazený systém tvoří poslední celek. Závěrem jsou diskutovány výsledky měření a experimentů, jejich nejistoty a konfrontace s očekáváním.

Kapitola 2

Metody a algoritmy zpracování obrazů

Předpokládejme, že máme zařízení, videosenzor, pomocí něhož jsme schopni zachytit dva obrazy jedné scény v prostoru. Získáme tak dva planární snímky, které jsou centrální projekcí trojrozměrného světa do dvojrozměrné obrazové roviny. Snímky jsou pořízeny často s různými chybami, např. radiální zkreslení, které je vhodné na počátku korigovat. Následovně je třeba z obrazové funkce separovat objekt zájmu, například bod. Tentýž bod však následně musíme najít spolehlivě i ve druhém snímku. Souřadnice jednoho bodu, které získáme pro levý a pravý obraz nazýváme korespondencí a rozdíl souřadnic bývá často označován pojmem disparita. Automatické hledání korespondencí pro počítačové vidění je stále i po mnoha letech zajímavým a živým odvětvím této vědy. Zde bude nastíněno několik možností, vhodných pro naši aplikaci, které však představují zlomek celého spektra použitelných metod. Většinou platí, že čím více výpočetního výkonu a paměťových prostředků máme k dispozici, tím sofistikovanější a obecnější metodu lze použít. Z tohoto důvodu budou z hlediska přesnosti, schopnosti korespondenci odhalit a rychlosti výpočtu stále lepší zařízení na úrovni osobních počítačů, avšak v případech, kdy není nasazení tak energeticky a prostorově náročného zařízení možné, má smysl se zabývat výpočetně jednoduššími metodami pro embeeded systémy.

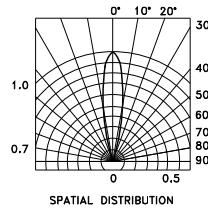
2.1 Měření polohy těžiště tělesa

Nechť pro celý tento text považujeme obraz pořízený kamerou za funkci dvou proměnných - horizontálních a vertikálních indexů $f(x, y)$. Tato funkce nabývá hodnot z oboru celých nezáporných čísel $H \in <0; MAX>$, kde MAX odpovídá typicky bílé barvě. Definičním oborem je hodnota souřadnice x a y , závislá na rozměru pořízeného obrázku. Težiště tělesa je první obecný moment funkce dvou proměnných. Využití nachází v celé řadě aplikací, kdy je třeba určit přibližnou polohu objektu s výraznou světelnou intenzitou. V našem případě, lze takto jednoznačně identifikovat polohu bodového zdroje světla, např. LED diody, IR diody a použít hodnotu souřadnic z levého a pravého obrazu k vypočtení vzdálenosti. Samozřejmě, že tato metoda je podmíněna zjednosušujícími omezeními. Jedním z nich je, že zdroj světla musí být osamocený a separovatelný od pozadí. Pokud by bylo zdrojů více v jednom obraze, museli bychom aplikovat některou z metod segmentace, například barvení objektů, abychom správně odlišili jednotlivé zdroje. Pokud ale tato omezení splníme, lze určovat polohu se subpixelovou přesností.

2.1.1 Metoda výpočtu těžiště

Poloha těžiště je dána rovnicí (2.1), což v obecné případě vyžaduje váženou sumu přes všechny obrazové body. To je pro využití v mikroprocesoru poněkud nepraktické, protože s rostoucími rozměry obrázku (uvažujme zde obdélníkový tvar) roste přibližně s druhou mocninou počet jeho obrazových bodů. Pokud naši úlohu hledání těžiště omezíme na hledání bodových zdrojů světla, lze s výhodou udělat zrychlující omezení. Z miniatury obrázku, řekněme N-násobné, vypočteme těžiště, které tedy bude výsledkem operace na N^2 -krát méně bodech než na originálu. Takto získáme ne příliš přesný odhad polohy těžiště, který využijeme k přesnému vypočtení těžiště na lokálním okolí tohoto odhadu. Tento přístup vyžaduje vhodnou volbu velikosti tohoto okolí a přesvědčení se, že se celý zdroj světla do tohoto okolí vešel. Tímto přístupem dosáhneme stejného výsledku, jako kdybychom celý obrázek kromě okolí obrazu bodového zdroje prahovali na hodnotu 0, avšak bez nutnosti jakékoli operace nad obrazovými body. Oproti prahování navíc takto odstraníme náhodné pixelové chyby, které by nemusely být odprahovány a tak by ovlivňovaly výpočet.

$$T_x = \frac{\sum_x \sum_y xb(x, y)}{\sum_x \sum_y b(x, y)}, \quad T_y = \frac{\sum_x \sum_y yb(x, y)}{\sum_x \sum_y b(x, y)} \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1: Vyzařovací charakteristika běžné indikační LED.

2.1.2 Použití LED k označkování měřeného objektu

Světloemittující dioda není naprostoto ideální zdroj světla pro referenční měření protože do daného poloprostoru nevyzařuje ideálně izotropně. Proto ve dvou posunutých obrazech dvou kamer nemusí obraz světelného bodu vypadat stejně a tím pádem použití algoritmu hledání těžiště může způsobit značný posun pozice těžiště. Pro případy, kdy by charakter záření mohl zkreslit výsledek měření lze využít difuzní LED, která je opatřena v plastovém pouzdře speciální vrstvou zajišťující difuzní rozptyl světla. Případně promítání světelného kužele na průsvitku, tenký průsvitný papír, na němž bude vidět osvětlená plocha stejnoměrně bez rozdílu při změně pozorovacího úhlu. Na obrázku 2.1 je příklad vyzařovací charakteristiky běžné indikační LED diody.

2.2 Metody hledání objektů v obraze pomocí segmentace

Segmentace obrazu je odvětví zpracování obrazových dat, které umožňuje nahlédnout na data globálněji a rozdělit kupříkladu obraz na pozadí a popředí. Rovněž lze lokalizovat tvarem nebo jasem charakteristický objekt, např. přímku, kružnici i jiné složitější útvary. Objekty, které lze jednoznačně nalézt v obraze, lze jednoznačně parametrizovat a použít tak jako korespondenci pro stereovidění. To je důvod proč se zde zabýváme základními metodami segmentace obrazů.

2.2.1 Adaptivní prahování

Chceme-li v obraze oddělit objekt od pozadí bez asistence člověka můžeme se pokusit použít některou z metod prahování. Prahování je proces, kdy pixely s hodnotou nižší než zvolený práh T klasifikujeme jako pozadí a pixely s hodnotou vyšší jako objekt. Volba vhodného prahu však zásadně ovlivňuje výsledek a tuto hodnotu je nutno udržovat aktuální vzhledem k jasovým poměrům scény. Nelze se zde spoléhat na statické nastavení, proto jednou z možností volby prahu je prahování adaptivní. V iteračním procesu přizpůsobujeme práh tak, aby oddělil souvislé plochy s rozdílnými hodnotami jasu. Jako počáteční stav algoritmu vezmeme za pozadí čtyři rohové pixely a zbytek klasifikujeme jako popředí. Vypočteme průměr jasu pro pozadí I_{bg} a popředí I_{obj} . A stanovíme nový práh pro další cyklus podle $T(i+1) = \frac{I_{bg}(i)+I_{obj}(i)}{2}$. Cyklus končí po předem nastaveném počtu iterací případně pokud změna prahu pro dva následující cykly nedosáhne hodnoty 1.

Další možnosti jsou konvenční metody založené na hledání lokálních extrémů v histogramu jasu. Tyto metody pak lze využít k multispektrálnímu prahování, které pracuje s několika prahy a výstupem tak může být více objektů než jen popředí a pozadí. Prahování obecně však zpravidla poskytne výstup, který je vhodný pro pozorování člověkem a z hlediska použitelnosti dat je nutno obraz dále zpracovávat.

Řekněme, že kamera hledí na objekt bílého míčku před tmavším pozadím, v obraze bude kruh s vyšším jasem obklopen pixely s nižším jasem. Pokud obrázek oprahujeme vhodně zvoleným prahem zbavíme se šumu a pravděpodobně i z velké části informace o pozadí a zůstane objekt v popředí. Abychom mohli pracovat s menším počtem obrazových bodů vyloučíme ze zpracování vnitřek kruhu nalezením hran. Hledání hran je předmětem zájmu metod, jako je například metoda využívající sobelův operátor nebo sofistikovanější Cannyho hranový detektor. Provedeme první diferenci (2.2) ve vodorovném a obdobně ve svislém směru.

$$L(x, y) = L(x - 1, y) + L(x + 1, y) \quad (2.2)$$

Ve výsledné množině obrazových bodů s vyšším jasem bude z velké části zastoupen obrys kružnice. Pro potřeby jednoznačného určení korespondence je nutné nalézt střed kružnice. Ten lze hledat například pomocí Houghovy transformace.

2.2.2 Použití Houghovy Transformace

Je nástrojem k hledání neznámých parametrů analytického popisu objektu. Nejsnažším vysvětlením této metody je její aplikace při hledání přímek v obraze. Použijeme směrnicovou rovnici přímky ve tvaru $y = kx + q$. Tato rovnice má dva neznámé parametry k, q , pro které zavedeme dvourozměrný prostor parametrů $A(k, q)$. Procházíme-li předzpracovaný obraz obsahující např. pouze hrany, náhodně vybíráme dva hranové body, pro něž vypočítáme parametry a inkrementujeme příslušnou hodnotu v parametrovém prostoru.

Problém této metody je zjevný a tím je velikost prostoru parametrů, který roste s mocninou jejich počtu. Z toho důvodu se používají různé modifikace. Příkladem za všechny uvádíme metodu RANSAC (Random sampling and consensus). V našem případě aplikace pro signálový procesor bylo snadno proveditelné hledání přímek, hůře však již hledání kružnic, které mají obecně tři parametry. Jelikož střed kružnice může být spolehlivou korespondencí pro pozdější potřeby, bylo implementováno následujícím způsobem.

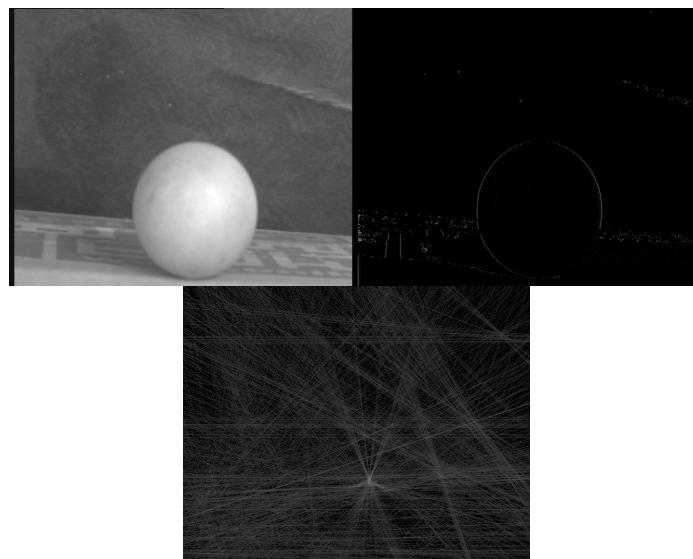
Vezměme náhodně dva body ležící na kružnici. Těmito body ved'me úsečku (tětvu) a v jejím středu sestrojme kolmou přímku. Dále máme k dispozici příznakový prostor o shodném rozměru jako obrázek, kde každý pixel, kterým tato kolmice v prostoru obrazu prochází inkrementujeme. Pokud tímto způsobem budeme pokračovat opakováně, střed kružnice v obraze bude pixel s nejvyšší nainkrementovanou hodnotou. S jeho souřadnicí se spokojíme v případě, že není třeba znát polohu středu subpixelově přesně. Chtěli-li bychom znát polohu s vyšší přesností bylo by nasnadě vhodnou metodou označit hranové body kružnice a použít je pro řešení optimalizační úlohy hledání parametrů kružnice, která se na ně co nejpřesněji zobrazí.

Další podobnou grafickou metodou je možnost sestrojovat kružnice se středem v hranovém bodě, která je diskutována v [9]. Její nevýhodou je však nutnost znalosti poloměru hledané kružnice, což její aplikaci zužuje na specifické případy kdy toho jsme schopni.

Závažnou nevýhodou, pro niž nebylo hledání přímek a kružnic dále příliš využíváno v této práci, je nutnost náhodného výběru a většího počtu opakování v rádech tisíců cyklů a u hledání středů kružnic pouze pixelová přesnost.

2.2.2.1 Linear Congruential Generator

Knihovny dostupné pro BF533 neobsahují standardní knihovnu pro práci s náhodnými čísly *random.h* byl implementován generátor pseudonáhodných čísel podle [5], což je sice jednoduchý, ale dodnes hojně používaný generátor. Pomocí histogramu na dvou tisících náhodných čísel rozděleného do sta binů byla ověřena vlastnost rovnoměrného rozdělení



Obrázek 2.2: Detekce kružnice.

s maximální odchylkou 5% od ideálního rovnoměrného rozdělení což pro danou aplikaci vyhovuje.

2.2.3 Segmentace obarvením objektů

Je obecně známá metoda segmentace jednotlivých objektů v obrazu podle jasu nebo barvy. Každý objekt obklopený pozadím dostane barvu (číslo), podle které je v obrazu jednoznačně identifikován. Na základě této metody bylo provedeno další hledání korespondencí a použito pro měření polohy. Tato metoda však má i jistá negativa, která mohou při jejich pominutí značně zkreslit výsledek. Jasový profil stereo obrazů musí být co nejpodobnější, protože bude-li nastavený práh použitý při barvení ohraničovat různý tvar stejněho objektu nelze použít jeho těžiště ani hranici jako korespondenci. Naproti tomu lze pomocí této metody bez dramatických výpočetních nároků rozlišit jednotlivé objekty. Poté například pomocí sledování velikosti, jasového profilu, nebo relativní polohy objekty sledovat při pohybu.

Kapitola 3

Metody měření polohy v prostoru

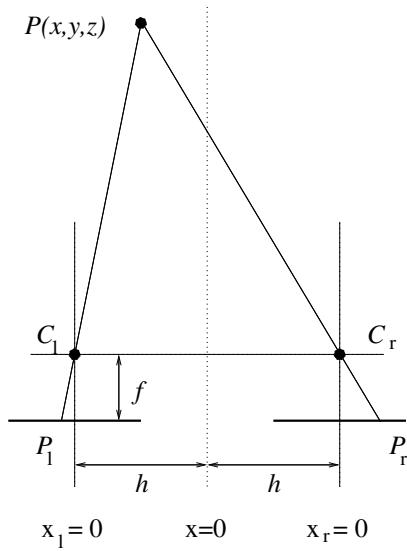
V této kapitole budou diskutovány přístupy vyhodnocení polohy objektu v prostoru. Nejelementárnějším z přístupů je využití kanonické konfigurace, jejíž vlastnosti jsou diskutovány v následující kapitole. Druhou použitou možností je lineární metoda triangulace popisovaná v [1], kdy známe projekční matice kamer a souřadnice korespondence. Třetí diskutovaná možnost se opírá o článek Jean Yves-Bougueta [3], který předpokládá znalost rotace a translace mezi kamerami.

3.1 Fotogrammetrie

Počátky Fotogrammetrie, jako vědního oboru sahají až téměř k počátkům fotografie samotné. Myšlenka centrálního promítání jako základní zobrazovací metody, však sahá až k Leonardu da Vinci. Tyto základní stavební kameny daly vzniknout odvětvím ve stavařství, kartografii, které určují rozměry a polohu objektů z jejich fotografických snímků.

Současná fotogrammetrie se zabývá rekonstrukcí rozměrů objektů z fotografických snímků nebo za pomoci speciálních přístrojů, dělí se především na pozemní a leteckou. Pozemní se používá k mapování, ve stavebnictví nebo k dokumentaci zevnějšku budov. Uplatnění nachází také při dokumentování dopravních nehod. Letecká fotogrammetrie se používá převážně ke kartografickým účelům.

Fotogrammetrické snímkы získané jako centrální projekci, kde je středem ohnisko objektivu slouží stejně jako v počítačovém vidění k určení souřadnic bodů v prostoru. Je tedy zapotřebí dvou snímků a ve fotogrametrii se nejčastěji z kamer v kanonickém uspořádání. Základní rovnice fotogrammetrie je odvozena na základě podobnosti trojúhelníků stejně



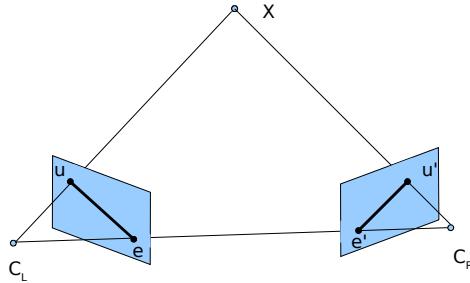
Obrázek 3.1: Geometrie kanonického uspořádání kamer pro stereovidění.

jako (3.3). Další podrobnosti lze nalézt např. v [2]

3.2 Měření souřadnic pomocí kamer v kanonické konfiguraci

Kanonická konfigurace kamer je z hlediska výpočtu velice pohodlná a s její pomocí lze obejít nezanebatelnou náročnost výpočtů polohy v prostoru v obecném uspořádání. Představme si nejprve obecnou scénu, kdy dva senzory sledují jeden objekt jako na obr. 3.1, myšlenka je podrobně popsána např. v [9]. Vzdálenost obou senzorů je \$2h\$, ohnisková vzdálenost je značena \$f\$, polohy projekce objektu do obrazové roviny jsou značeny \$P_l, P_r\$. Předpokládáme, že obraz objektu se bude shodovat v řádkové souřadnici a rozdílná poloha bude tedy pouze ve svíslém směru (sloupcí). Na základě podobnosti trojúhelníků nyní odvodíme rovnici pro výpočet vzdálenosti bodu \$P\$ od ohniska. Vezměme tangens úhlu, který svírá paprsek od objektu s osou senzoru v místech mezi ohniskem a plochou senzoru. Tento úhel umíme vyjádřit v obou rovnicích pomocí vzdálensti \$P_l, P_r\$ a ohniskové vzdálenosti \$f\$.

$$\operatorname{tg}(\alpha_l) = \frac{P_l}{f}, \quad \operatorname{tg}(\alpha_r) = \frac{P_r}{f} \quad (3.1)$$



Obrázek 3.2: Epipolární geometrie obecného usporádání kamer pro stereovidění.

To je ale také úhel který svírá paprsek s osou senzoru na druhou stranu od ohniska. Dále předpokládáme, že hodnota P_l bude záporná, a proto můžeme zapsat rovnice

$$\frac{P_l}{f} = -\frac{h-x}{z}, \quad \frac{P_r}{f} = \frac{h+x}{z} \quad (3.2)$$

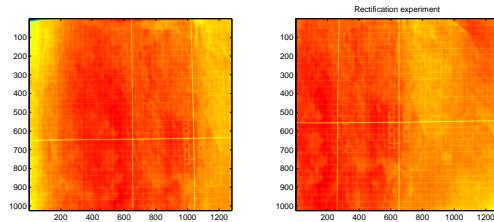
Pokud tyto rovnice odečteme a upravíme, vypadne neznámá x a dostaneme rovnici pro vzdálenost z jako

$$z = \frac{2hf}{P_r - P_l} \quad (3.3)$$

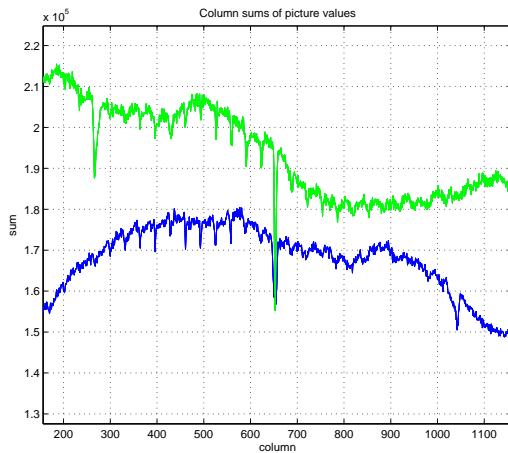
Pro jednoduché měření polohy v prostoru se často používá kanonického uspořádání, kde jsou rovnoběžné optické osy, ohniska leží v rovině a obrazové roviny jsou vůči sobě posunuty pouze o translaci v ose x . Ve výsledných obrazech pak korespondující body, které leží na tzv. epipolárních liniích hledáme v rádcích obrazu. To je podstatně jednodušší než v obecném případě, kdy epipolární linie mohou procházet obrazem pod libovolným úhlem. Toto značné matematické zdědění však do výpočtu zanáší chybu z předpokladu, že jsou kamery sesazeny přesně s rovnoběžnými optickými osami. Toho však lze mechanicky dosáhnout jen do určité míry viz 3.3.

3.2.1 Jednoduchá metoda nastavení vzdálenosti optických os

Při experimentech nastala situace, kdy bylo třeba nastavit kamery pohyblivé v ose x s možností aretace do kanonické konfigurace s požadovanou vzdáleností h . V našem případě při vývoji s deskou EZ-kit jsou kamery připojeny koaxiálním kabelem a uchyceny aretačním šroubem k pevné podložce. Konfigurace lze docílit pomocí jednoduchého

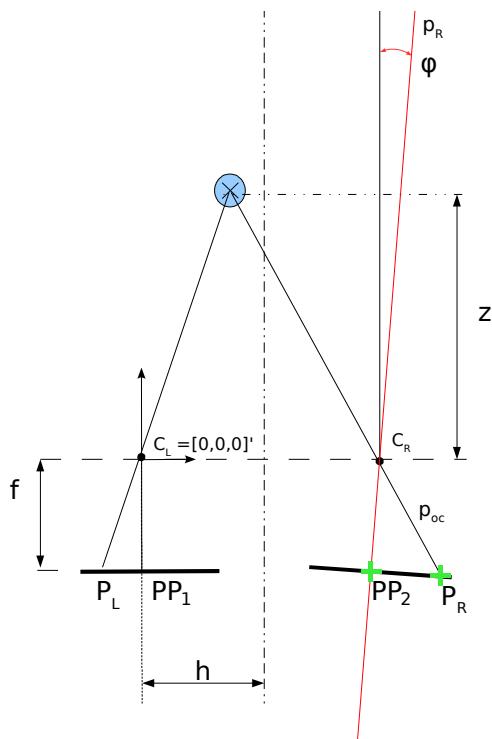


Obrázek 3.3: Nastavení požadované vzdálenosti opt. os



Obrázek 3.4: Sumace sloupců v obrazě

přípravku, například listu papíru s dvěma rovnoběžnými čarami. Požadujeme-li vzdálenost optických os h připravíme rovnoběžky tak, aby jejich vzdálenost byla h . Potom budeme-li sledovat obraz kamerami a docílíme situace, kdy levá rovnoběžka v obraze levé kamery bude svisle procházet hlavním bodem (ve středu obrazu) a stejně tak pravá bude svisle procházet středem pravého obrazu půjde o kanonické uspořádání se vzdáleností optických os h . Je vhodné zabezpečit ještě posun ve vertikálním směru (v našem případě to nebylo možné mechanicky, ale pouze softwarově). Toho lze docílit přidáním kolmé čáry na rovnoběžky a hlídat vzájemný řádkový posun v obrazech. Jednoduchým algoritmem lze provést sumaci jasových hodnot ve sloupci a pomocí sledování extrémů kamery sesadit.



Obrázek 3.5: Vliv nedokonalého sesazení na výsledek měření

3.3 Rozbor vlivů na správnost výsledku měření polohy

Následující kapitola si klade za cíl provést rozbor aspektů, které ovlivní výsledek měření polohy v prostoru.

3.3.1 Vliv nedokonalého sesazení optických os

Jakmile zavedeme geometrické uspořádání s předpokladem rovnoběžnosti optických os, měli bychom znát důsledky nesprávného sesazení na konečné měření. Využijme dále geometrického modelu dírkové komory pro zavedené uspořádání. Budeme nyní sledovat jakou chybu do měření zanese nesouosost v podélném směru optické osy. Jde o systematickou a korigovatelnou chybu. Ta však způsobí nesouosost jednak ve směru z , ale přirozeně i ve směru x . Osy ve směru y budeme prozatím považovat za souosé a zabývat

se vlivem chyby uspořádání na výsledek měření. Na 3.3 je modrým kruhem naznačen měřený objekt. Levý senzor budeme považovat jako referenční vůči němuž budeme nesouosost vztahovat, to znamená, že budeme používat souřadný systém levé kamery *camera centered coordinate system*, který zavádí střed do ohniska kamery a osu z totožně s hlavní optickou osou. Za těchto předpokladů není levý obraz zatížen chybou a projekce bodu na plochu CCD snímače budeme považovat za správnou. Na zmíněném obrázku je červenou čarou vyznačena odkloněná optická osa pravé kamery, která svírá s ideální úhel α . S odklonem osy se pohybuje i hlavní bod *Principal point*, označen PP_2 , který se ne nachází na stejně souřadnici x jako ohnisko pravého objektivu. Parametr h značí poloviční vzdálenost mezi optickými středy. Vzdálenost P_R , kterou potom používáme ve vztahu (3.3). V následujícím odstavci se pokusíme odvodit vztah pro vzdálenost $|PP_2 - P_R|$ zatíženou nesouosostí, která zanáší chybu do výpočtu vzdálenosti.

Odklon přímky p_R budeme považovat za známou proměnnou, přes kterou budeme pozorovat chybu ve výsledku. Rovnice přímky p_R v prostoru bude

$$\mathbf{U} = \mathbf{C}_2 - \mathbf{s}.t \quad (3.4)$$

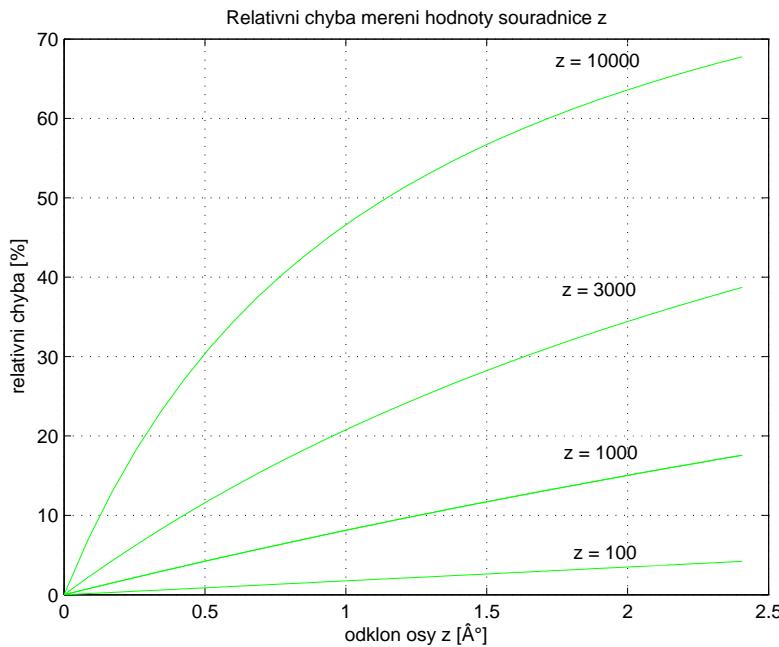
Tučné značení odpovídá zjednodušenému zápisu vektoru o třech prvcích. Pro přehlednost nebude často zapisována rovnice pro y které přepokládáme nulové. Pokud si rovnice rozepíšeme vztah pro t lze vyjádřit z rovnice pro U_z jako

$$t = \frac{U_z - C_{2z}}{s_z} \quad (3.5)$$

3.6 Nyní lze hledat hlavní bod PP_2 , protože víme, že leží jistě na této ose p_R a přitom je ve vzdálenosti f . Lze jej hledat jako průsečík kružnice se středem v bodě C_2 a přímky p_R . Nebo jednodušeji jako

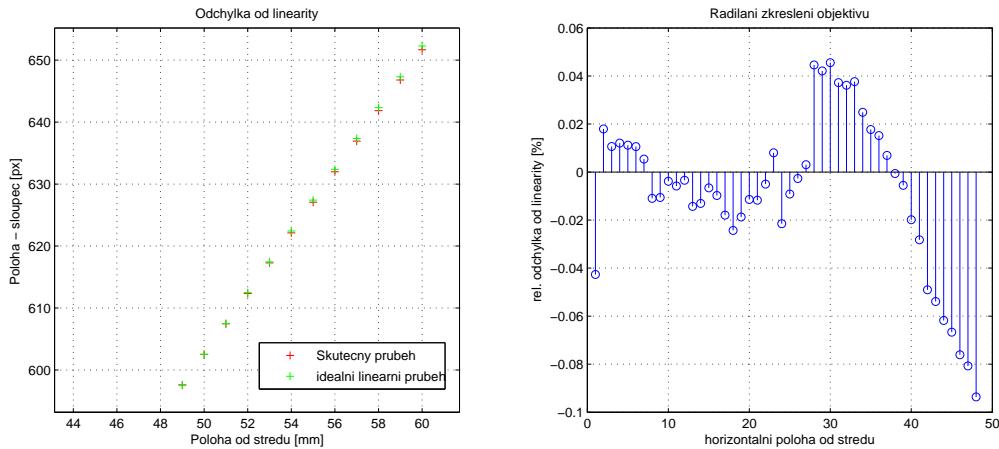
$$PP_{2x} = PP_{20x} - f \cdot \cos(\alpha), \quad PP_{2z} = PP_{20z} - f \cdot \sin(\alpha) \quad (3.6)$$

Tím máme jeden z bodů, mezi nimiž měříme vzdálenost. Najdeme nyní druhý, v tomto případě známe bod předmětu mezi nímž a bodem C_2 povedeme přímku, která protne kolmici vedenou na optickou osu p_R bodem PP_2 . Směrnice s_2 je určena předmětem a ohniskem C_2 , směrnice s_1 je kolmice na optickou osu p_R v bodě PP_2 . Vše potřebné, směrnice obou přímek i body jim příslušející známe, takže společný průsečík vyjádříme pomocí parametrického vyjádření přímky v rovině pro známý parametr t Vztahy, které bychom dostali pro vzdálenost těchto dvou bodů, obsahují stále více nezávisle proměnných než bychom mohli usuzovat o nějakém funkčním chování. Na 3.6 lze pozorovat relativní



Obrázek 3.6: Závislost chyby výpočtu souřadnice z na úhlu odklonu optické osy senzoru.

chybu určení souřadnice z na odklonu osy. Jako parametr je vzdálenost z . Pro konkrétní případ sestavení použitý při experimentech byl zjištěn pomocí Camera calibration toolboxu rotační vektor mezi souřadnými systémy $om = [0.000480.020850.02505]$ s nejistotou nepřesahující 2%. Mezi 3x3 rotační maticí a tímto vektorem je vztah Rodriguezova formule. Jednoduchým výpočtem tak zjistíme nesouosost ve směru osy z $\delta = 1.15^\circ$ s nejistotou $u_\delta = 0.5^\circ$ pomocí hodnoty jednotlivých úhlů lze korigovat vypočtenou vzdálenost a pomocí nejistoty určení tohoto úhlu vyjádříme vliv nesouososti na nejistotu měření. Pokud by byla naší prioritou rychlosť výpočtu z předchozího výpočtu bylo by možné korekci vynechat a pro konkrétní případ vynést obdobný graf který určuje jaké chyby se dopustíme pro měrenou vzdálenost. To může být prakticky výhodné například pro robota, který se rozhoduje kterým směrem jet. Stačí mu vědět i s chybou, že daným směrem je překážka nebo není, ale omezené výpočetní prostředky a jeho případný rychlý pohyb kladou nárok na rychlosť získání takové informace.



Obrázek 3.7: Radiální zkreslení objektivu

3.3.2 Radiální zkreslení objektivu, posun hlavního bodu

Tento druh zkreslení se projevuje ve výsledném obraze nejvíce na jeho okraji. Podle tvaru jej označujeme jako soudkové nebo poduškové zkreslení. Pomocí experimentu s přesným posuvem MARS lze vyhodnotit linearitu průběhu závislosti polohy v obraze na posuvu po ose x . Kameru s objektivem Carl Zeiss - Tevidon 25mm nastavíme přímo proti horizontálně situovanému pojedoucímu pojezdu MARS. Abychom měli při experimentu kolmou optickou osu na směr pojedoucího, změříme od středu na obě strany $\delta_p x$ pro stejnou vzdálenost. Pokud tato hodnota bude shodná pro posuv vlevo i vpravo, a rozdíl řádkové souřadnice pozorovaného objektu je nulový, je směr posuvu kolmý na optickou osu. K přesně definovanému horizontálnímu pohybu použijeme přesný posuv MARS [8]. Pomocí něj byla nastavována poha LED a pro každou nastavenou hodnotu odebráno 20 vzorků. Ze získaných měření byly vypočteny střední hodnoty těžiště a vyneseny do grafu.

Z obrázku 3.7 vidíme, že lze dosáhnout odchylky polohy od skutečné až 0.5pixelu na kraji obrazu. V případě vyhodnocení stereoobrazu tak může vzniknout chyba rozdílu polohy korespondence až 1 pixel. Existuje mechanismus korekce tohoto zkreslení, které je v rámci obrazu rotačně symetrické. Pozici u, v libovolného bodu obrazu pak můžeme opravit pomocí polynomu až šestého řádu (tzv. Brownův model zkreslení). S tím úzce souvisí odchylka polohy hlavního bodu od optické osy, která je do korekce zahrnuta, respektive korekce na radiální zkreslení by bez znalosti odchylky polohy hlavního bodu nebyla smysluplná. V praxi se hlavní bod málokdy nachází přesně ve středu obrázku, ale

vzdalenost od C [mm]	100	200	400
$T_x[px]$	367.658	374.457	347.430
$T_y[px]$	289.669	271.438	285.816
$\sigma_x[px]$	0.094	0.051	0.027
$\sigma_y[px]$	0.051	0.048	0.022

Tabulka 3.1: Fluktuace polohy těžiště a standardní odchylka v závislosti na vzdálenosti světelného objektu.

je v obou směrech posunut. Základní problematika korekce je popsána detailně v [9].

3.3.3 Statistické parametry šumu senzoru - opakovatelnost měření

Aby bylo možné relevantně vyhodnotit nejistotu měření polohy je nutné zjistit statistické vlastnosti měření těžiště pro námi použitý bodový zdroj. Opakováním měření za konstantních okolních podmínek bylo odebráno N vzorků obrazů a stejnou metodou vypočteno těžiště. Statistické vlastnosti shrnuje tabulka 3.1

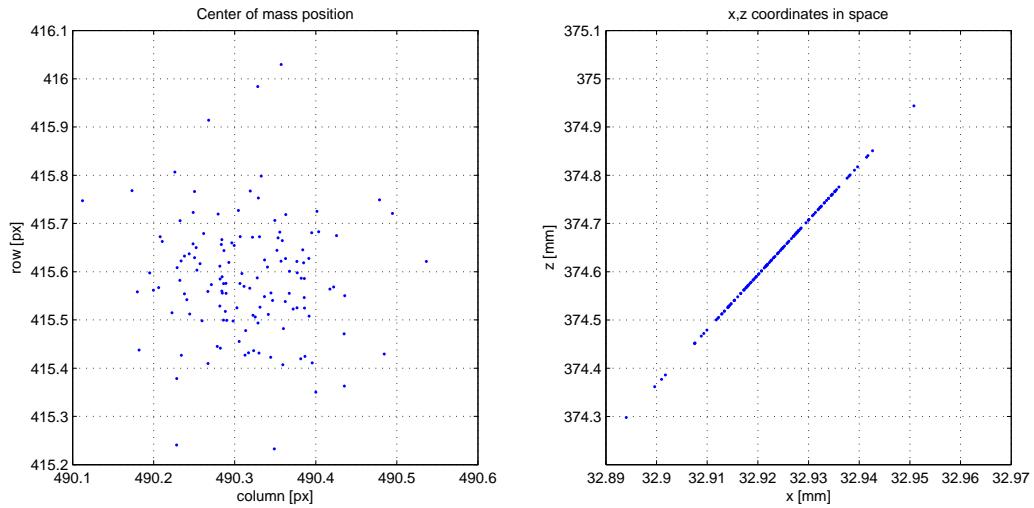
Nejistota měření veličiny z (vzdálenosti) je závislá [6] na hodnotách souřadnic korespondence P_l, P_r , přičemž o přesnosti hodnoty ohniska objektivu f nemáme k dispozici žádné údaje, vzdálenost mezi optickými osami v tomto případě budeme považovat za přesnou, případně bychom ji obdobným způsobem zahrnuli. V serii uvedených měření můžeme uvažovat pouze nejistoty typu A, tedy odhad výsledné hodnoty souřadnice korespondence reprezentovat výběrovým průměrem a nejistotu učít jako směrodatnou odchylku dle vztahu

$$u_{P_l,r} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.7)$$

nejistotu výsledné veličiny tedy vypočteme jako odmocninu ze sumy parciálních derivací podle proměnných P_r, P_l násobených jejich standardními nejistotami.

$$u_z = \sqrt{\left(\frac{-2hf}{(P_r - P_l)^2} u_{P_r} \right)^2 + \left(\frac{-2hf}{(P_r - P_l)^2} u_{P_l} \right)^2} \quad (3.8)$$

Vezměme příklad dat vycházejících z reálného měření : rozdíl $P_r - P_l = 246px = 1.7083mm$ ohnisko $f = 16mm$, vzdálenost $h = 40mm$. Standardní nejistota typu A určená



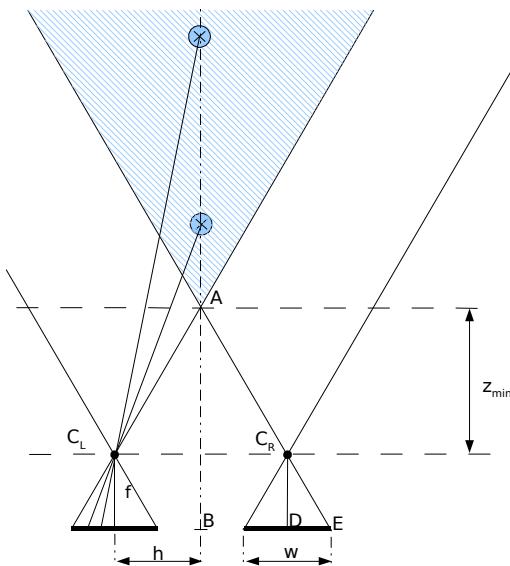
Obrázek 3.8: Fluktuace souřadnic x,z

ze statistických vlastností měření polohy těžiště $u_A = 0.0062px = 8.5439 \cdot 10^{-6}$. Nejistotu v obrazové rovině ještě musíme dělit zvětšením objektivu $-\beta = \frac{f'}{z} = 8.9 \cdot 10^{-3}$. Dosazením těchto hodnot do výše uvedených vztahů lze vypočítat nejistotu určení souřadnice z jako $u_z = 0.3mm$. Tato metoda snímání polohy bodu jako polohy těžiště značky zavádí do měření nejistotu cca 0.1%. Grafické znázornění výpočtu lze pozorovat na grafu 3.8.

3.4 Volba vhodné vzdálenosti optických os objektivů

Existuje několik kriterií, pomocí kterých lze usuzovat o vhodném nastavení vzdálenosti rovnoběžných optických os obou senzorů. První z nich je jistě rozsah přípustných hodnot vzdálenosti, kterou budeme chtít měřit. Minimální měřitelná vzdálenost objektu je přehledně definována možností spatřit jej na obou senzorech. Podle obrázku obr. 3.9 lze snadno odvodit z podobnosti trojúhelníků $A-B-E$ a $C_R - D - E$, že nejmenší teoretická vzdálenost, kdy bude objekt ještě viditelný na obou obrazech je

$$z_{min} = \frac{2hf}{w} \quad (3.9)$$



Obrázek 3.9: Minimální měřitelná vzdálenost pro stereosenzor.

Záleží však zajisté na použité metodě nalezení objektu v obraze, zdali jej algoritmus bude schopen identifikovat i na krajní souřadnici bezchybně. Jinou úvalu musíme vzít v potaz, pokud se budeme chtít zabývat maximální hranicí vzdálenosti, kdy ještě měření bude mít smyslnou vypovídací hodnotu. Při oddalování měřeného objektu od senzorů se nemůže stát, že by z jednoho senzoru vymizel (uvažujeme pohyb po přímce procházející body \$A - B\$). Matematicky je možno operovat s měřením téměř do nekonečna, ale v praxi jsme omezeni například velikostí CCD matice nebo nejistotou metody určující polohu korespondence způsobenou například šumem senzoru. Paprsek procházející bodem \$C_L\$ bude při vzdalování se od ohniskové roviny svírat čím dál tím menší úhel až se v určité vzdálenosti \$z_{max}\$ a vzdálenosti \$z_{max} + \delta z\$ hodnota disparity zmenší o hodnotu přibližně shodnou jako je nejistota určení samotné pozice \$P_L\$ resp. \$P_R\$. Jinými slovy při takovém měření budeme pracovat s velmi nízkým a zašuměným rozdílem hodnot disparity.

Obecné doporučení tedy je použít objektiv s ohniskovou vzdáleností která je vhodná pro snímání dané scény, dále nastavit vzdálenost mezi optickými osami tak, aby nehrzoilo dosažení minimální měřitelné vzdálenosti. Tím pádem budeme-li se pohybovat v oblasti bezprostředně za minimální měřitelnou vzdáleností bude zabezpečena nejvyšší citlivost pro požadovaný rozsah.

3.5 Nekanonické uspořádání kamer pro měření

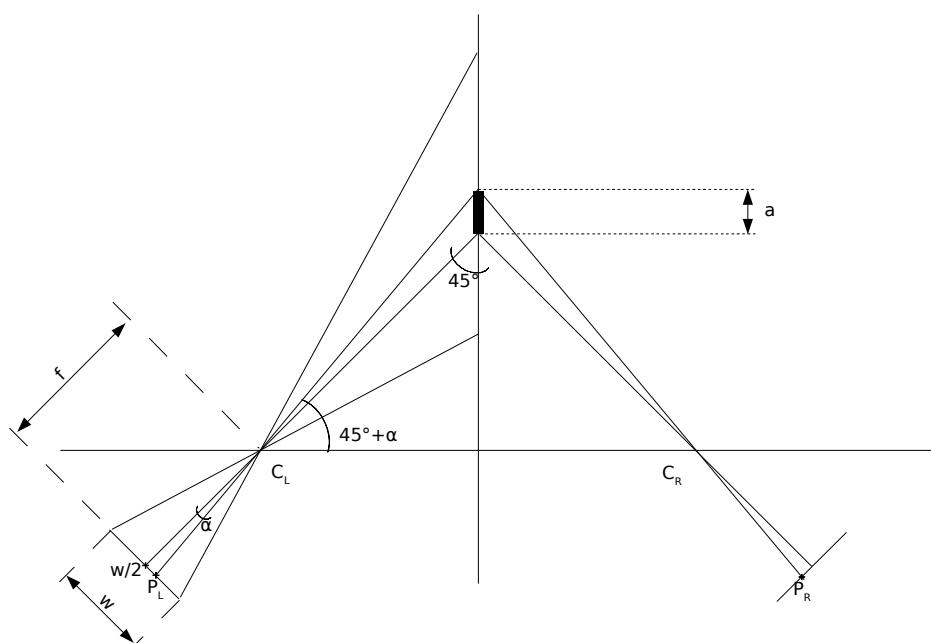
Významnou nevýhodou kanonického uspořádání bude citlivost na vzdálenějším konci rozsahu. Paprsek od předmětu bude svírat s osou z čím dálé tím menší úhel a tak se bude zmenšovat změna P_L . Samozřejmě, že záleží na konkrétním uspořádání do jaké míry bude tato vlastnost ovlivňovat měření. Stojí za povšimnutí, že pokud by se měřený objekt pohyboval pouze po hlavní optické ose ve směru z , využívali bychom při měření pouze polovinu plochy senzoru, protože dle obr. 3.9 je zřejmé, že paprsek by protíhal polovinu senzoru pouze pro polohu bodu v nekonečnu. Pokud bychom uvažovali uspořádání, kdy kamery sledují scénu např. pod úhlem 45° vůči hlavní optické ose 3.10, dojde ke znatelnému poklesu rozsahu měřitelné vzdálenosti. Na druhou stranu dojde ke zvýšení citlivosti, protože na menším rozsahu měřených vzdáleností využijeme celou šířku senzoru. Jde o obdobu optoelektronických senzorů s triangulací, které pracují typicky s jedním PSD (Position sensitive photo detector) nebo CCD (Charged coupled devices) přehled těchto senzorů poskytuje [10]. Senzor poskytuje informaci o poloze pod známým úhlem odražené světelné stopy. Pomocí podobnosti trojúhelníků lze vyjádřit polohu odrazivé plochy. Zde není využito zdroje koherentního záření, ale druhé kamery, která poskytne souřadnice korespondence v osově symetrickém obrazu. V našem případě máme možnost jednoduše aretovat kamery v úhlu 45° , ale jen obtíženě lze nastavit požadovanou vzdálenost h . Proto ji vypočteme pomocí kalibračního objektu, nezáleží na druhu objektu, stačí, když budeme moci přesně odhalit korespondenci jeho okrajů známé vzdálenosti. Usadíme jej v ose p tak, aby jeho přední část byla ve středu obrazu a poloha zadní části byla na obou obrazech stejně daleko. Velikost strany u trojúhelníka $C_L - V - U$ vypočteme ze sinové věty jako $u = \sin(\pi - \pi/4) \cdot \frac{a}{\sin(\alpha)}$. Z takto získané vzdálenosti u vypočteme h jako $h = u \cdot \sin(\pi/4)$.

Nalezneme korespondenci bodu umístěného v oblasti překryvu zorného pole obou kamer, pak vznikne trojúhelník znázorněný na 3.11 jako $C_L - C_R - W$. Jeho úhly jsou $\gamma_L = \pi/4 + \alpha$, $\gamma_R = \pi/4 + \beta$. Tím pádem známe i třetí úhel trojúhelníku $\omega = 180 - \gamma_L - \gamma_R$ a ze sinové věty a znalosti h lze dopočítat ostatní souřadnice. (Strana c_L je naproti bodu C_R apod.) Například tedy c_L

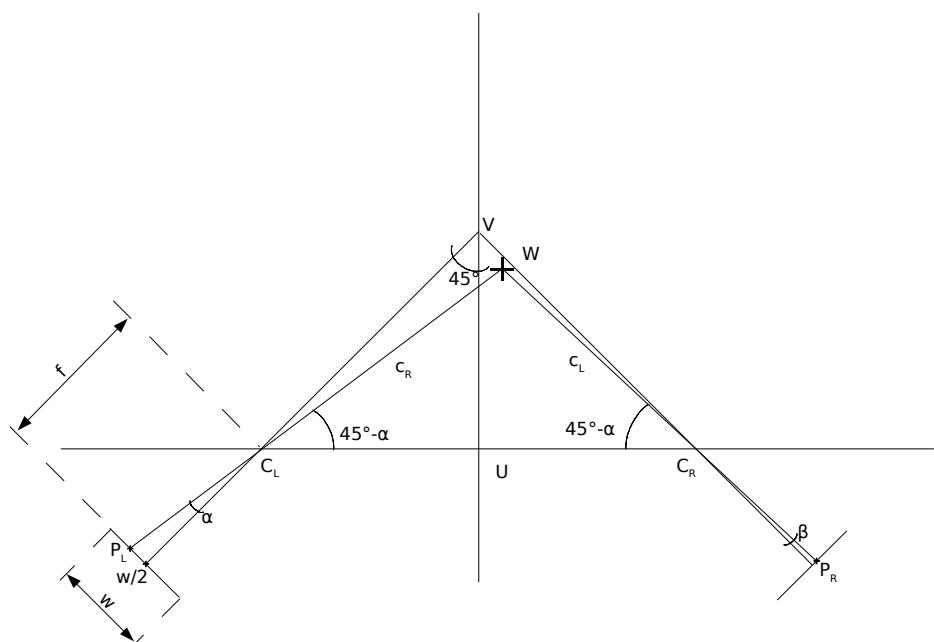
$$c_L = 2h \cdot \frac{\sin(\gamma_L)}{\sin(\omega)} \quad (3.10)$$

a pomocí c_L vzdálenost z

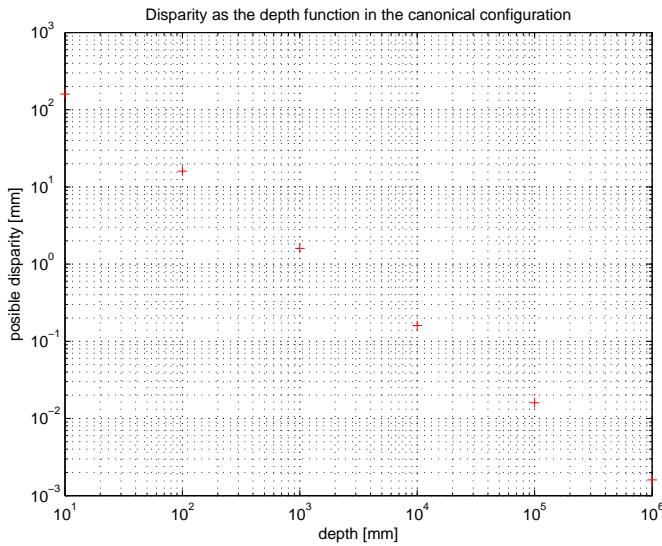
$$z = \sqrt{c_L^2 - (c_L \cdot \cos(\gamma_L))^2} \quad (3.11)$$



Obrázek 3.10: Nekanonické, ale přesto ne zcela obecné uspořádání pro ste-
reo měření.



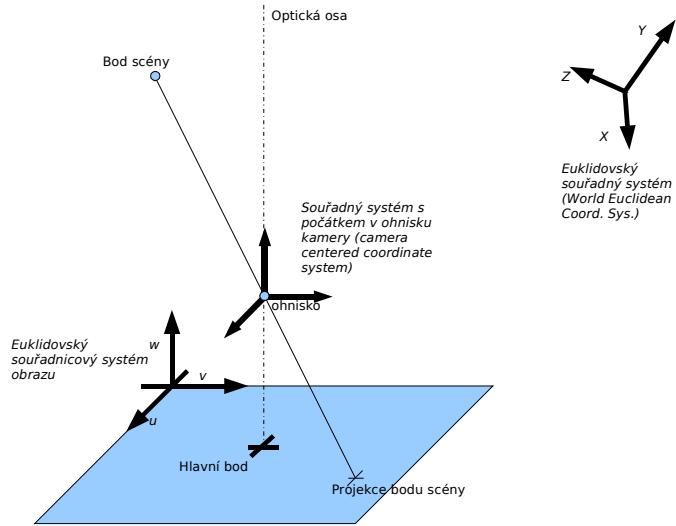
Obrázek 3.11: vyjádření vzdálenosti pro nekanonické uspořádání



Obrázek 3.12: Průběh velikosti disparity v závislosti na vzdálenosti pro kamery v kanonickém uspořádání

3.5.1 Porovnání citlivosti vůči kanonickému uspořádání

Dále budeme uvažovat pro oba případy stejnou podmínu a to pohyb ve směru osy z ve středu mezi kamerami. Cítlivost lze porovnat pomocí velikosti šířky senzoru vůči rozsahu vzdálenosti kterou lze měřit. V případě kamer v kanonickém uspořádání maximální teoretická vzdálenost z_{max} je v nekonečnu a tedy měřený rozsah je od z_{min} do nekonečna. Tím pádem by citlivost neměla žádnou vypovídací ani porovnávatelnou hodnotu, a proto budeme uvažovat praktičtější hodnotu z_{max} . Sledujeme-li obrázek 3.1 je zjevné, že máme-li objekt ve vzdálenosti $z_1 \ll z_2$ bude hodnota disparity na jednotku vzdálenosti $d_1 \gg d_2$. jinými slovy pro vzdálený objekt stejný posuv ve směru z vyvolá menší hodnotu disparity než pro blízký objekt. To způsobí, že nejistota měření této polohy bude závislá na vzdálenosti objektu a to tak, že s rostoucí vzdáleností poroste. Citlivost bude s rostoucí vzdáleností klesat. Graf 3.12 ukazuje jak se zmenšuje hodnota disparity v závislosti na vzdálenosti pro modelový případ $f = 16\text{mm}$, $h = 100\text{mm}$. Je z něj zřejmé, že na rozmezí 10 až 100mm je k dispozici (teoretická) šířka senzoru 160mm, avšak od 100 do 1000mm je to již jen desetkrát méně. Závislost je v logaritmických souřadnicích lineární.



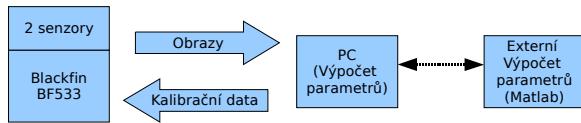
Obrázek 3.13: Souřadné systémy používané při promítání kamerou.

3.6 Obecná úloha stereovidění

Obecně lze kamery uspořádat libovolně bez jakékoli rovnoběžnosti optických os, jak je znázorněno na obr. 3.2. Chceme-li ze získaných obrazů a nalezených korespondencí měřit přesně polohu, lze použít některou z metod triangulace. Ty však zpravidla vyžadují znalost kalibračních parametrů obou kamer, existují i takové, které to nevyžadují, diskutované např. v [9], ale pro účely této práce se jimi nebudeme zabývat. Kalibrace kamery nám umožňuje nahlédnout numericky na geometrii jejího uspořádání.

3.6.1 Vnitřní a vnější parametry kamery

Pro popis vlastností kamery je všeobecně používána dvojice skupin vnitřních (intrinsicských) a vnějších (extrinsicských) parametrů. Vnitřní parametry kamery jsou ohnisková vzdálenost f a souřadnice hlavního bodu (tzv. Principal point). Tyto parametry lze zapsat do matice intrinsicských parametrů K , pomocí které lze zapsat projekci ze 3D do 2D jako maticovou operaci. Projekční matice M pomocí níž získáme přímočarý vztah mezi souřanicemi v obrazové rovině a prostoru se skládá mimo vnitřních parametrů ještě z vnějších. Vnější parametry popisují polohu kamery v prostoru vůči počátku, k němuž



Obrázek 3.14: Schema procesu kalibrace zařízení.

vztahujeme souřadnice reálného světa opět pomocí translace a rotace.

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\tilde{u} = M \cdot \tilde{X} \quad (3.13)$$

kde projekční matice M

$$M = K \cdot R[I \mid -t] \quad (3.14)$$

Tento vztah přiřazuje obrazové souřadnice bodu v prostoru, jehož prostorové souřadnice jsou známy. Cesta opačným směrem, tedy od obrazových souřadnic k poloze v prostoru je poněkud složitější. Matice M je rozměru 3x4, a proto není možná přímá inverze, což je logickým důsledkem toho, že pořízení obrazu je projekce ze 3D do 2D kde dochází ke ztrátě informace.

3.6.2 Kalibrace kamer

Jelikož je kalibrační proces výpočetně poměrně náročný a je nutno provést jen jednou pro konkrétní sestavu páru kamer, není nutné aby samotná kalibrace byla provedena přímo v signálovém procesoru. Schema distribuce výpočtů v procesu kalibrace je na obrázku obr. 3.14. Přesnou kalibraci ve smyslu cyklické optimalizace koeficientů poskytuje nástroj Camera calibration toolbox pro Matlab. Vstupem pro toolbox je sada obrázků čtvercové mřížky, nejlépe šachovnice. Algoritmus provádí extrakci korespondencí uvnitř ohraničené

oblasti s možností korekce radiálního zkreslení. Po extrakci korespondencí je pomocí optimalizačního algoritmu vypočtena hodnota koeficientů ohniskové vzdálenosti, hlavního bodu a jednotlivých nejistot. Toolbox obsahuje rozhraní pro kalibraci páru stereokamer, jehož vstupem jsou výstupní data kalibrace levé a pravé kamery. Z těchto dat je vypočtena vzájemná poloha souřadných systémů obou kamer, kterou popisuje vektor rotace a translace. Tato data lze uložit ve formě binárního `.mat` souboru. Grafické rozhraní implementované jako nadřazená aplikace senzoru tento soubor dokáže parsovat a kalibrační data odeslat do připojeného zařízení. Přitom bylo využito oficiálních knihoven poskytovaných firmou Mathworks pro práci se soubory programu MATLAB (`.mat`) v jazyce C++ a vytvořena dynamicky sdílená knihovna pro volání z aplikace v jazyce C#.

3.6.3 Triangulace

Jde o proces rekonstrukce euklidovských souřadnic v prostoru pomocí nalezených souřadnic korespondence v obraze. Za předpokladu znalosti vzájemné polohy a kalibračních matic kamer lze použít některou z metod popisovaných [9] dalšími metodami triangulace se lze seznámit zde. Pro účely této práce byla implementována triangulace podle [4].

Kapitola 4

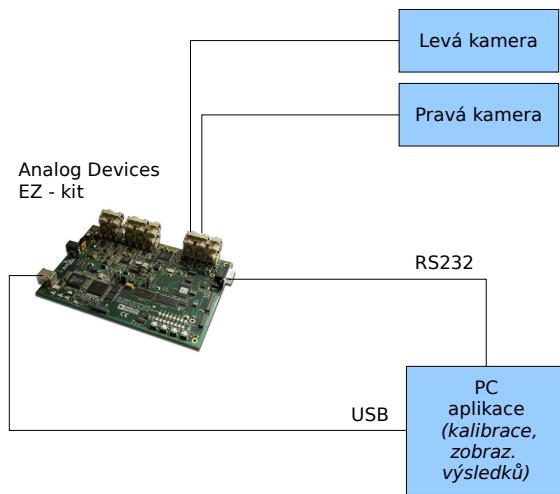
Realizace

4.1 Realizece 3D videosenzoru

Byla realizována dvě odlišná zařízení se společným ovládacím SW. První z nich je určeno k demonstraci měření především na statických scénách a veškeré popisované algoritmy zpracování obrazů popsané v této práci na tomto zařízení byly implementovány. Druhé zařízení je rozšíření universálního kitu zpracování obrazů Visor, vyvinutého laboratoří videometrie katedry měření v rámci diplomových a navazujících prací. Rozšíření spočívá v připojení adaptéru pro dva senzory v kanonickém uspořádání. Toto zařízení je vhodné i pro snímání dynamické scény, protože při přenosu obrazu ze senzoru do paměti je přepínán po pixelu levý a pravý senzor. Programové vybavení k tomuto zařízení je postaveno na existujícím základním SW desky Visor, kam jsou přidány metody pro zpracování obrazu používané v EZ kitu. Zařízení s deskou Visor lze modifikovat pro měření v obecném uspořádání kamer jejich připojením přes plochý samořezný kabel.

4.1.1 Zařízení s EZ kitem a dvěma kamerami

EZ-kit je universální vývojová deska společnosti Analog Devices, jejíž jádro tvoří signálový procesor Blackfin BF533. K dispozici je 64MB paměti SDRAM a 2MB paměti typu FLASH. Na desce je integrován videodekoder i enkoder se třemi vstupními a výstupními kanály opatřenými konektorem CINCH. Kód pro zařízení lze psát jak v asembleru, tak v jazyce CC++ a pomocí rozhraní programu VisualDSP++ program nahrát. USB port desky je však využíván výhradně pro účely ladění programů a nelze jej využít ke komunikaci. Pro komunikaci s nadřazeným systémem bylo nutno používat pouze RS232, kterou



Obrázek 4.1: Senzorová hlavice s EZkitem

je možno spolu s převodníkem USB na RS232 (obvod Prolific) provozovat až na 0,5 Mbd. Přesto však přenos obrazu v plném rozlišení trvá několik vteřin a je namísto používat pouze přenos zmenšeného náhledu.

4.1.1.1 Přenos obrazu a jeho digitalizace

Digitalizace obrazu z každého kanálu je prováděna jedním videodekodérem ADV7183, obrazy nelze multiplexovat po menší části než je celý obraz. Signál z kamer používaných při experimentech (MC420C, ...) je typu CVBS (*Composite video burst signal*) avšak zmíněný dekodér je schopen zpracovat i další běžné typy signálů. Podle dokumentace k dekodéru ADV7183 jsou dvě možnosti výběru kanálu, z nichž jedna je prostřednictvím I^2C rozhraní a druhá přímým nastavením úrovně na příslušných adresových pinech. Na desce EZ-kit je realizována pravděpodobně z důvodu úspory pinů procesoru první možnost, která je v dokumentaci ADV7183 označena jako nepreferovaná. Po přepnutí kanálu totiž dochází k nesprávné řádkové synchronizaci, která trvá několik snímků. (Experimentálně pozorováno 3 až 5 snímků.) Tyto snímkы jsou samozřejmě pro měření těžko použitelné a celková doba pořízení obrazu ze dvou kamer je prodloužena o několik snímků po přepnutí kanálu. Data z dekodéru jsou přenášena rozhraním PPI (parallel peripheral interface) přičemž data jsou ukládána do paměti v módu přímého přístupu do paměti (DMA).



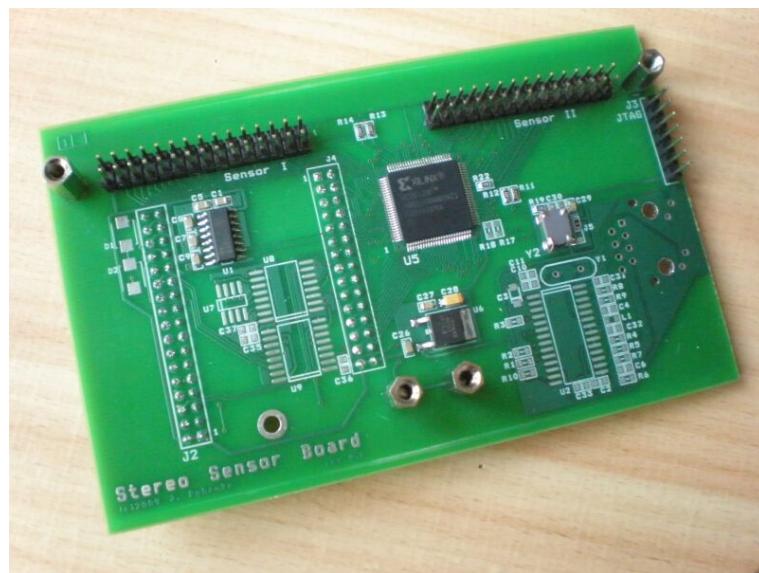
Obrázek 4.2: Deska Visor

4.1.2 Visor smart camera se dvěma CMOS senzory

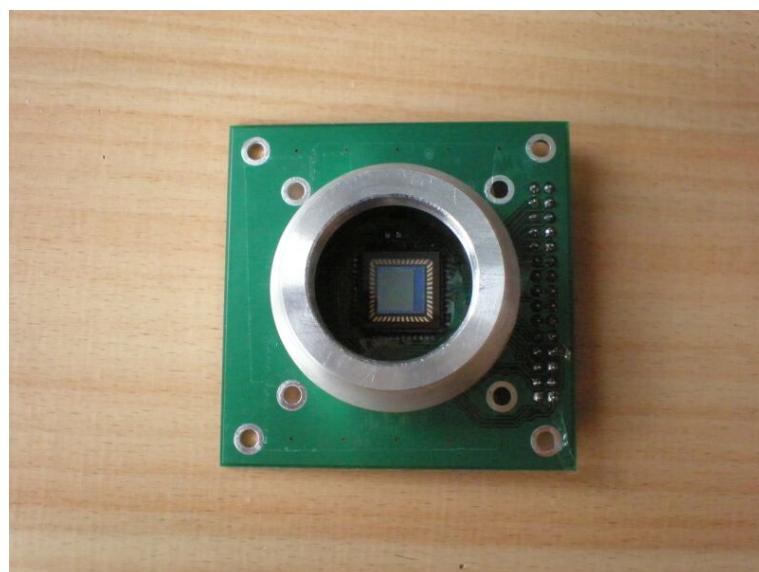
Za účelem realizace kompaktního senzoru bylo využito hardware vyvinutého laboratoří videometrie katedry měření. Jedná se o desku Visor, jejíž detailní popis nalezne čtenář v [7]. K desce Visor je připojen adaptér, jehož autorem je Ing. Pohanka a který umožňuje připojení dvou senzorů a multiplex při přenosu obrazu i kanálu I2C. Na tento adaptér jsou připojeny dva CMOS senzory MT9M001 1.3Mpix firmy Micron na desce Ing. Šedivého. Při experimentech byl použit shodný objektiv pro oba senzory Meopta Video Opticon 16mm. Většina algoritmů popisovaných pro zařízení EZ-kit byla posléze implementována pro zařízení VISOR a dopněna o možnosti video streamingu. V rámci této práce byly všechny desky, ze kterých je zařízení složeno, osazeny a oživovány.

4.1.3 Signálový procesor Blackfin BF533

Zařízení používá procesor Blackfin BF533 a BF532, které se liší pouze velikostí vnitřní paměti SRAM. Jde o procesory s RISC-like instrukční sadou a možností operací SIMD (operace single instruction multiple data). Instrukční sada zahrnuje klasickou paletu operací a navíc je doplněna o některé další, díky kterým lze urychlit operace typické pro zpracování signálů. Veškeré popisované algoritmy a metody byly implementovány v jazyce C/C++ a tedy je možná jejich přenositelnost na jinou platformu.



Obrázek 4.3: Adaptér pro připojení dvou senzorů



Obrázek 4.4: Senzor s obvodem MT9M001 Micron



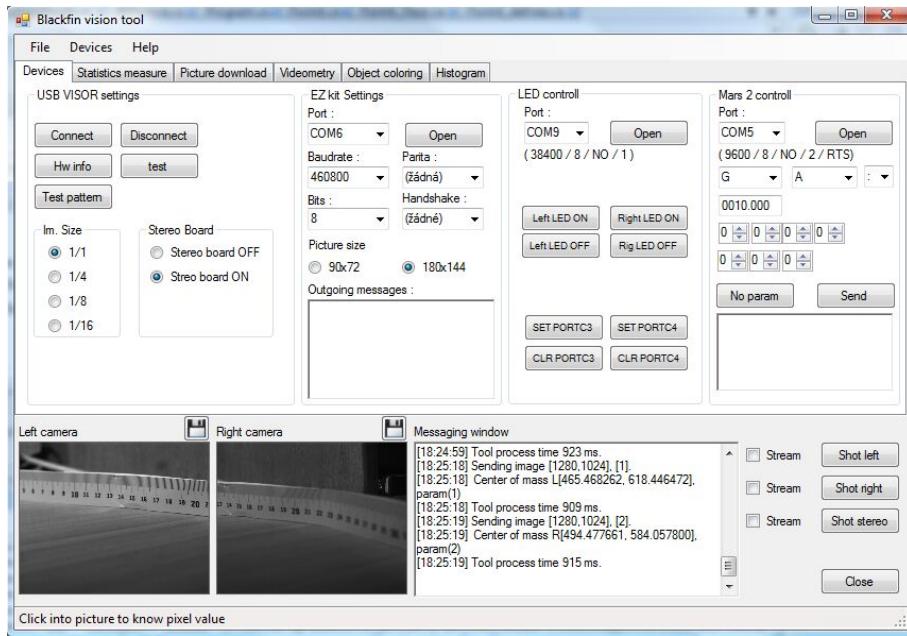
Obrázek 4.5: Kompletní sestavená senzorová hlavice

4.2 Nadřazená aplikace a její funkce

Aplikace je dělena do záložek sdružujících tematicky podobné skupiny ovládacích prvků. V této sekci se budeme zabývat zajímavými funkcemi s ukázkami použití. Ve spodní části je stále vidět okna pro zobrazení zmenšených obrazů z obou kamer, spolu s oknem pro zobrazování zpráv ze zařízení. Přenesené obrazy lze uložit v plném rozlišení.

4.2.0.1 Záložka - Zařízení (Devices)

EZ-kit disponuje seriovou linkou v našem případě použitou jako hlavní komunikační kanál, je zde proto možnost nastavit veškeré parametry linky. Zařízení Visor používá USB rozhraní a interface pro jeho připojení byl již vytvořen v rámci vývoje samotné desky a nejde tedy o moji práci. V této části je začleněn do aplikace tak, aby bylo možno vybrat konkrétní USB zařízení. Je možno rovněž ovládat Visor bez stereo adaptéru a provádět volbu rozlišení cílového senzoru, což lze provést rovněž v této záložce. Senzory Micron MT9M001 poskytují obraz v režimu 1:1, 1:4, 1:8, 1:16. Dále bylo nutné při experimentech ovládat ze stejné aplikace pojezd MARS2 a případně i vzdálené zdroje světla. Na záložce zařízení tedy je implementováno ovládání dvou dalších portů a možnost odesílat jednotlivým zařízením (pojezd MARS, případně další zařízení) zprávy.



Obrázek 4.6: Ovládací aplikace - nastavení zařízení

4.2.1 Záložka - Statistické parametry

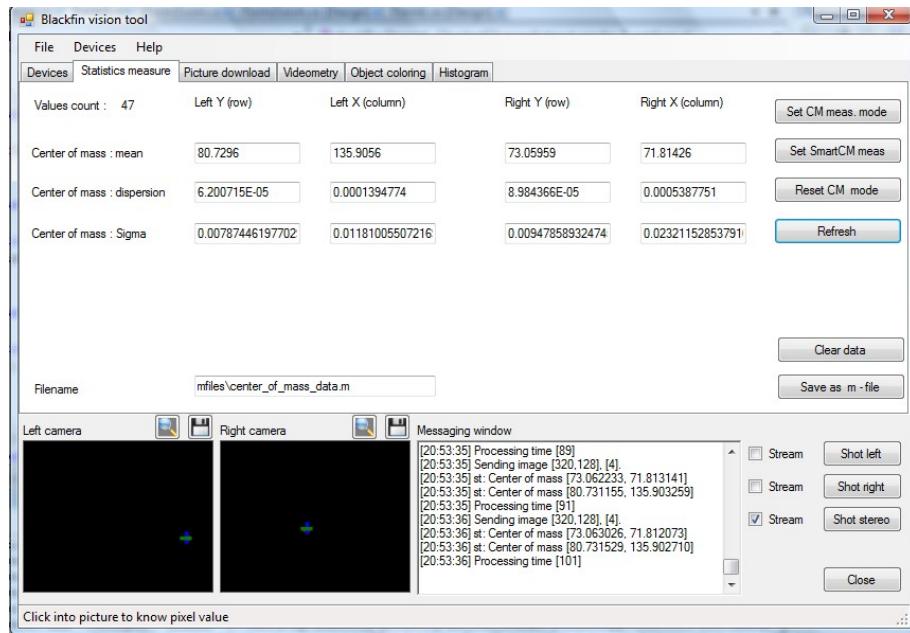
V této části programu lze vyhodnocovat kontinuálně získávaná data z měření těžiště objektu. Kontinuální měření lze započít a ukončit v libovolný okamžik a stejně tak provést výpočet statistických parametrů. Pro zobrazení výsledků je vhodný export hodnot do formátu pro prostředí MATLAB, který je zde implementován.

4.2.2 Záložka - Videometrie

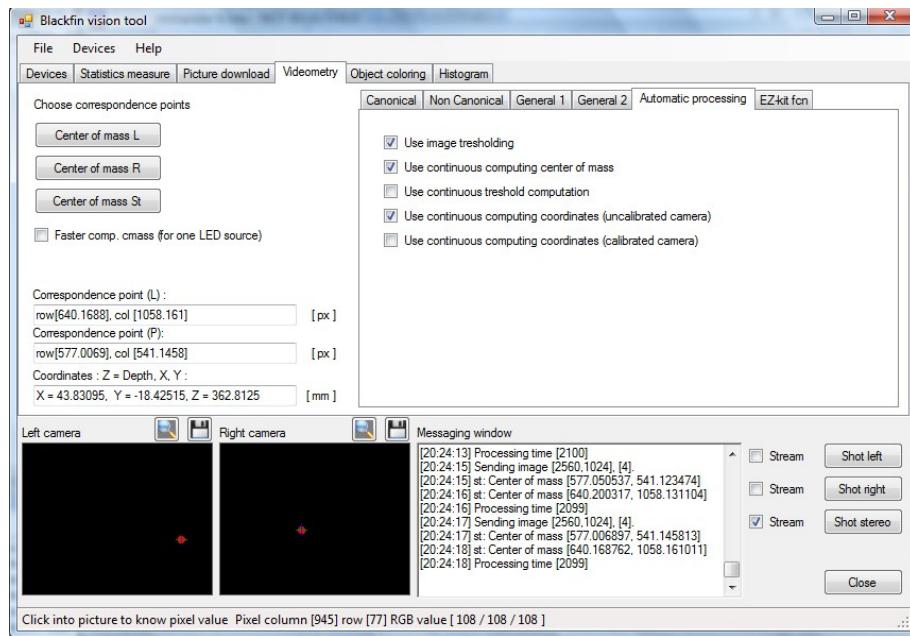
Ovládací část pro měření polohy v prostoru. Zde je možno nastavit a zařadit do procesu zpracování operace jako prahování, adaptivní prahování, výpočet těžiště, výpočet polohy pro kanonickou konfiguraci, konfiguraci se známým úhlem mezi osami z i pro zcela obecné uspořádání. Lze zde načíst kalibrační data z .mat souboru a odeslat do přístroje.

4.2.3 Záložka - Download obrázku

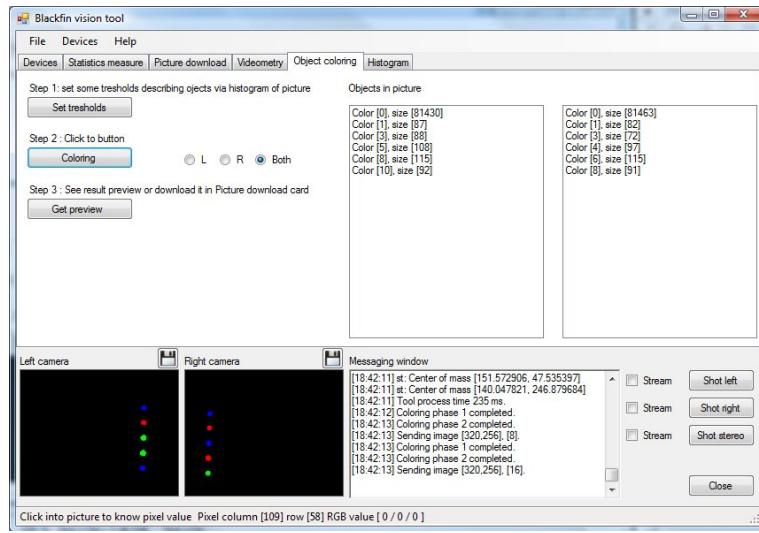
Slouží pouze pro případ, kdy je připojen EZ-kit. V případě EZ kitu se do náhledových oken přenáší pouze obrázek podle volby 90x72 nebo 180x144 pixelů. Pro případ, kdy je vhodné stáhnout obraz v plném rozlišení, poslouží tato záložka ovládací aplikace.



Obrázek 4.7: Ovládací aplikace - statistické parametry



Obrázek 4.8: Záložka videometrie



Obrázek 4.9: Barvení objektů v obraze

4.2.4 Záložka - Barvení objektů

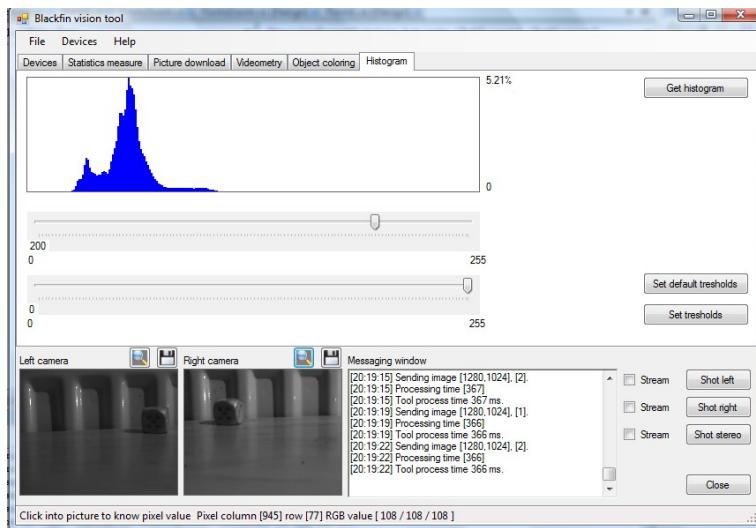
Pokud bychom chtěli detailněji zkoumat danou scénu ve více bodech, museli bychom je zpracovávat sekvenčně. Barvením objektů lze v obrazu identifikovat např. jednotlivé zdroje světla nebo na scénu lze promítat matici bodů a pomocí barvení udržet přehled o počtu i jejich poloze.

4.2.5 Záložka - Histogram, prahování

Pro nastavení vhodného prahu pro zpracování obrazu je možno použít algoritmus adaptivního prahování nebo tento práh stanovit manuálně po shlédnutí konkrétního histogramu. Na kartě se objeví histogram pro osmibitový obraz, kde výška sloupce ukazuje procentuální zastoupení dané barvy v celém obrazu. Nastavením posuvníků se odešle zpráva s požadavkem nové hodnoty prahu. Ty lze nastavit rychle i do výchozích stavů, kde nebude efekt prahování viditelný.

4.2.6 Další funkce - zoom, manuální výběr korespondence

Pro širší možnosti použití aplikace byla implementována funkce manuálního výběru bodů korespondence. Kliknutím pravého tlačítka na příslušný obrázek a vybráním volby *Mark correspondence* přepne do módu označení korespondence a po kliku do obrázku proběhne



Obrázek 4.10: Histogram, volba nastavení prahů

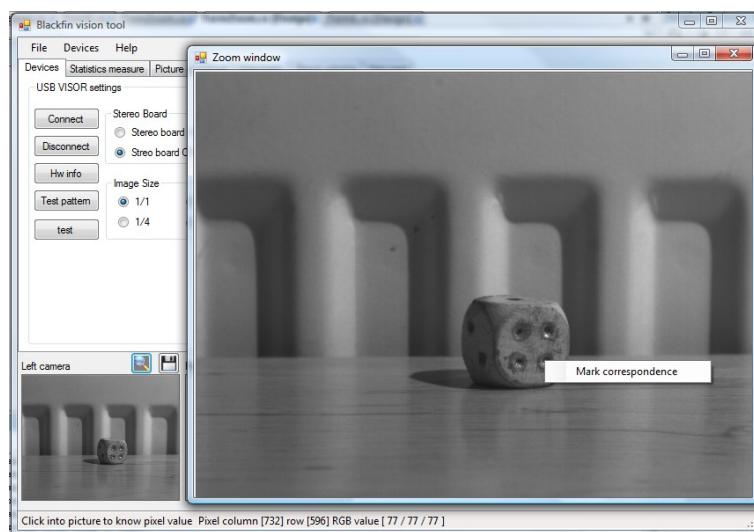
odeslání požadované souřadnice do zařízení. Pokud takto budou označeny body v levém i pravém obrázku, pak lze zjistit souřadnice bodu v prostoru pomocí kliknutí na příslušné tlačítko.

Další užitečnou funkcí je zoom okno, které získaný obrázek, jehož náhled vidíme na hlavním formuláři, aplikace zvětší do nového okna s měnitelnou velikostí. Otevírá se klikem na ikonu lupy nad náhledem. Zmíněné funkčnosti dokumentuje 4.11

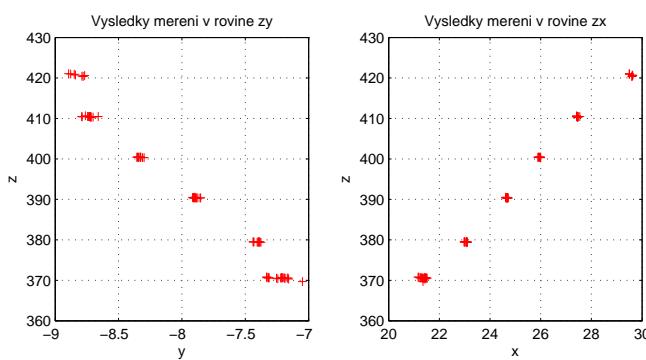
4.3 Výsledky měření a experimentů

4.3.1 Měření v kanonické konfiguraci

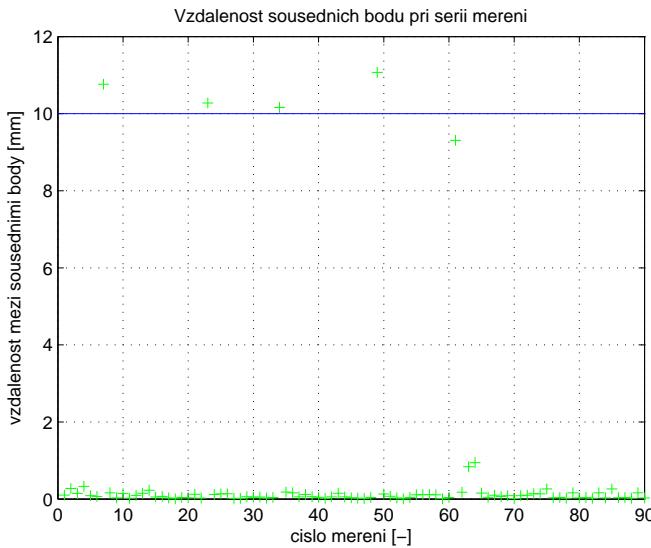
Pro posouzení funkčnosti realizovaného zařízení bylo využíváno přesného posuvu MARS2 vyrobeného firmou Pikron. Dva posuvy v délkách 200mm a 300mm byly pevně spojeny pomocí modulárních stavebních dílů s držákem kamer kolmo na sebe. Měření bylo provedeno v celém rozsahu možností posuvu a vyhodnocována naměřená vzdálenost. Abychom se nemuseli zabývat nastavením osy z kamer rovnoběžně se směrem pojezdu, vyhodnocujeme vzdálenost bodů v prostoru mezi dvěma měřeními, přičemž víme, že pojezd způsobil posun s přesností $1\mu m$. Nejistota měření je diskutována v sekci 3.3. Výsledky měření shrnuje obrázek 4.12.



Obrázek 4.11: Zoom okno a manuální výběr korespondencí.



Obrázek 4.12: Měření na pojedzu MARS, kamery v kanonické konfiguraci



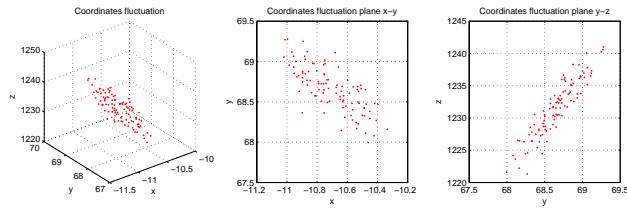
Obrázek 4.13: Vzdálenost mezi sousedními body pro měření podle 4.12

4.3.2 Měření v nekanonickém uspořádání se známým úhlem mezi optickými osami.

V rámci práce byly implementovány algoritmy, které tento typ měření umožňují, ale příslušné experimenty nebyly provedeny.

4.3.3 Měření s kalibrovanou dvojicí kamer

Příklad experimentu na měření polohy s pomocí posuvu MARS. Kamera byla umístěna na nedefinovanou pozici před posuvem. Na posuvu byla připevněna difuzní LED a nastavována poloha posunem vždy v jedné ose (x nebo z) o 10mm. Absolutní vzdálenost diody byla více než 1,2m. Opět byla vyhodnocena vzdálenost mezi souřadnicemi určenými po sobě jdoucimi měřeními. Nejistota měření je složena z nejistoty způsobené šumem senzoru, která způsobí fluktuaci korespondence a dále pak nejistotami jednotlivých kalibračních koeficientů. Tyto nejistoty jsou závislé na tom, jak byla provedena kalibrace a kolik pro ni bylo k dispozici stereoobrazů. Pro každou realizaci se tedy bude lišit. Celkový vliv na fluktuaci polohy způsobený nejistotou parametrů lze charakterizovat obrázkem 4.14 pro použitou kalibraci byla celková nejistota určení polohy v jednotlivých osách do 2%. Jde o vysokou hodnotu pro přesné měření, ale lze ji snížit přesnější kalibrací zařízení. U CMOS senzorů byla patrná i vyšší hodnota fluktuace polohy těžistě při určování polohy značky a



Obrázek 4.14: Fluktuace polohy bodu v závislosti fluktuaci parametrů kalibrace

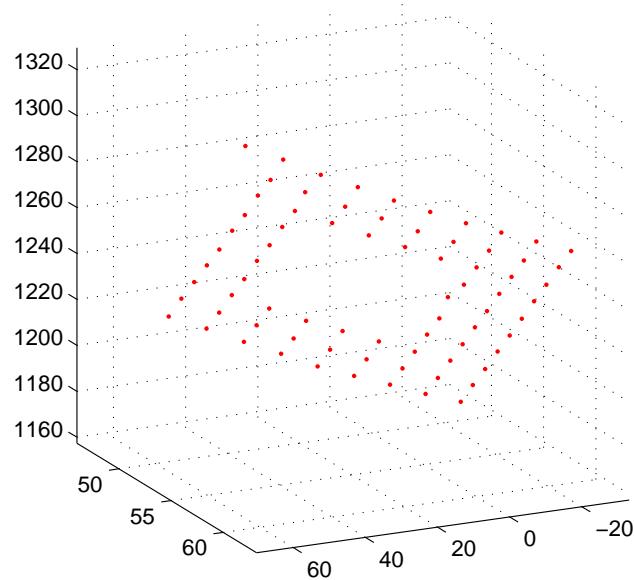
to v řádu až dvou pixelů pro stejné podmínky, při kterých bylo měřeno 3.8. To zanáší do měření nejistotu typu A, která v tomto případě dosáhla 0.5% měřené hodnoty. Odchylky od ideálního průběhu shrnuje graf 4.16.

4.4 Posouzení možností využití zařízení jako senzoru pro regulace

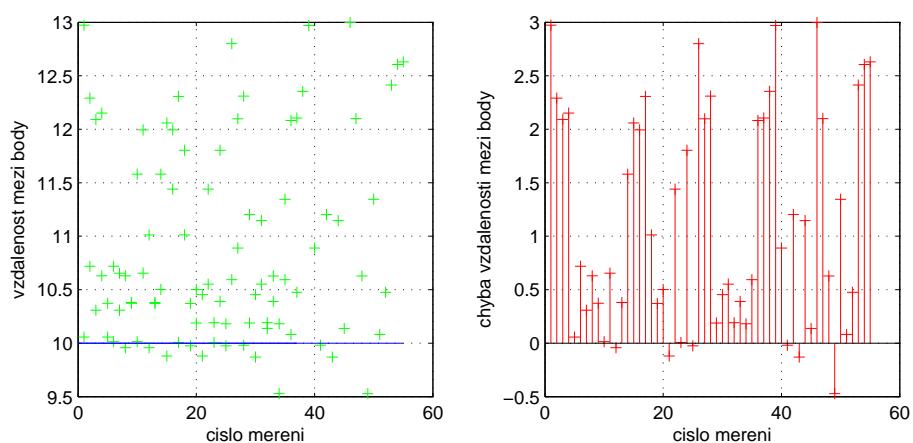
Využití senzoru pro regulace je omezeno ze dvou hledisek, jednak z hlediska nejvyšší možné vzorkovací frekvence se kterou je možno poskytovat informaci o poloze a také z hlediska nejistoty určení polohy objektu. Jak již bylo uvedeno dříve, s pomocí EZkitu nebylo možno zpracovávat obraz při přepínání mezi kamerami ihned po přepnutí. Přesto však bylo možné zařízení použít ke kontinuálnímu vyhodnocování polohy, např. pro námi používané LED, avšak bez přenosu obrazu do nadřazené aplikace po každém snímku. V tomto režimu bylo možno zpracovávat 12 snímků za vteřinu. To implikuje při zachování Shannon-Kotelnikova theoremu omezení pro nejrychlejší mód systému 6Hz. Pro současný přenos celého obrazu bylo nutno použít desku Visor. Snímání stereoobrazu lze provést ve volitelném rozlišení, na kterém je závislá i doba přenosu obrazu do nadřazené aplikace a doba zpracování. S šestnáctinovým (nejnižším) rozlišením obrazu tvá zpracování 60ms tedy minimální vzorkovací perioda je 120ms, s nejvyšším rozlišením 320ms.

Další faktor, který by mohl komplikovat případné nasazení, je udržení podmínek okolního osvětlení v mezích pro úspěšné vyhodnocení korespondence.

4.4. POSOUZENÍ MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ ZAŘÍZENÍ JAKO SENZORU PRO REGULACE 39



Obrázek 4.15: Souřadnice bodů měření na posuvu Mars



Obrázek 4.16: Odchylky od očekávaných hodnot při měření na posuvu MARS

Kapitola 5

Závěr

Práce si kladla za cíl vytvořit 3D videosenzor, tedy sestavu hardware a software pro vyhodnocování polohy objektů v prostoru pomocí stereovideometrie.

Realizovány byly tyto hlavní úkoly

- Proveden rozbor geometrického uspořádání zařízení
- Realizovány vhodné metody pro zpracování obrazu
- Proveden rozbor nejistoty určení korespondence a následně polohy
- Na základě existujícího návrhu osazeny a oživeny všechny potřebné části (Visor, adaptér, CMOS senzory)
- Realizováno zařízení využívající EZ-kit
- Realizováno zařízení s deskou Visor
- Implementováno programové vybavení pro obě zařízení
- Implementována nadřazená aplikace pro zobrazování výsledků a ovládání.
- Provedeny experimenty s přesným posuvem
- Zhodnocena možnost použití jako senzoru pro regulaci

Jako vhodný hardware pro první realizaci zařízení byla vybrána vývojová deska Analog devices EZ-kit. Pro realizaci více kompaktnějšího videosenzoru bylo použito zařízení Visor vyvíjené Laboratoří videometrie Katedry měření. Jako optoelektronické senzory byly použity kamery MC420C, a pro CMOS senzory Micron MT9M. Byl proveden výběr

vhodných metod pro zpracování obrazové informace pro výběr korespondencí, s ohledem na rychlosť výpočtu a dosažení co nejmenší možné nejistoty měření. Navrženy a implementovány byly některé metody hledání specifických objektů v obraze inspirované doporučenou literaturou a dostupnými zdroji. Za účelem rychlého subpixelového stanovení korespondence, bylo plně automatické snímání scény omezeno na použití přídavných značek s výraznou světelnou intenzitou ve scéně. Metody implementované za účelem automatického oddělení objektů v obraze umožňují současné vyhodnocení více korespondencí najednou. Byly vyhodnoceny vlivy na nejistotu měření souřadnic, provedeno experimentální měření a porovnáno s očekávanými výsledky. Posouzena byla i možnost a omezení nasazení senzoru pro účely regulace. Bylo vytvořeno programové vybavení pod windows pro ovládání a komunikaci s těmito dvěma zařízeními. Tedy nástroj pro jejich kalibraci a jako zobrazovač výsledků. Pomocí této nadřazené aplikace je možné zároveň ovládat přesný posuv MARS2 používaný při experimentech pro referenční polohování.

Literatura

- [1] Hartley R.; Zisserman A. *Multiple View Geometry in computer vision.* Cambridge University Press, second edition, 2003.
- [2] Böhm J. *Fotogrametrie.* Vysoká škola báňská-technická univerzita Ostrava; Hornicko - geologická fakulta, 2002.
- [3] Bouguet Jean-Yves. Stereo triangulation in matlab. *EE/CNS148*, 1998.
- [4] Bouguet Jean-Yves. Camera calibration toolbox. *documentation online*, 2006.
- [5] Park S.K.; Miller K.W. Random number generators: Good ones are hard to find. *Computer practices*, 1988.
- [6] Haasz V.; Sedláček M. *Elektrická měření. Přístroje a metody.* Monografie ČVUT, Praha, 2003.
- [7] Pribula O. *Diplomová práce, Vývojový modul s procesorem Blackfin (ADSP-BF532).* 2006.
- [8] Příša P. *Uživatelský manuál k jednotce MARS 2.* PIKRON s.r.o., 2004.
- [9] Sonka M.; Hlavac V.; Boyle R. *Image processing, analysis, and machine vision.* Toronto : Thomson, 2008.
- [10] Ripka P.; Ďad' o S.; Kreidl M.; Novák J. *Senzory a převodníky.* Katedra měření, skripta ČVUT, 2005.

Příloha A

Seznam použitého SW

- VisualDSP++, IDE a kopilátor jazyka C/C++ pro procesory Blackfin
- Microsoft Visual Studio 8
- Mathworks Matlab R2008a
- Knihovny pro práci se soubory .mat. Dostupné online www.mathworks.com.
- Základní obslužný program desky Visor - autor Ing. Ondrej Pribula
- Knihovna pro komunikaci s deskou Visor Ondreje Pribuly
- Kile - editace a správa projektů L^AT_EX
- GhostScript, GhostView - práce s obrázky ve formátu .eps, konverze do .pdf pro pdfLaTeX
- OpenOffice.org Drawing - tvorba blokových schemat

Příloha B

Obsah přiloženého CD

- /pdf - složka obsahující podklady použité při tvorbě dokumentu
- /BFVisionTool - projekt nadřazené aplikace
- /VisorProject - zdrojové kódy pro desku Visor
- /EZKitProject - zdrojové kódy pro EZ kit
- DP-Dan-Pavlista.pdf - tento dokument