

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 499

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Petr Stančík

**Optoelektronické
a fotogrammetrické měřicí systémy**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

Ing. Petr Stančík

**OPTOELEKTRONICKÉ A FOTOGRAMMETRICKÉ MĚŘÍCÍ
SYSTÉMY**

OPTOELEKTRONIC AND PHOTOGRAMMETRIC MEASURING
SYSTEMS

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

Obor: Elektronika a sdělovací technika
Školitel: Prof. Ing. Václav Říčný, CSc.
Oponenti: Prof. Ing. Miloš Klíma, CSc.
Doc. Ing. Jiří Masopust, CSc.
Datum obhajoby: 31. října 2008

KLÍČOVÁ SLOVA

Optoelektronické bezdotykové měřiče ploch, stereofotogrammetrie, kalibrace kamer, sesouhlasení bodů na snímcích, rekonstrukce prostorových souřadnic snímaných objektů

KEY WORDS

Optoelectronic contactless area meters, stereophotogrammetry, camera self-calibration, matching points, 3D reconstruction

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vědecké oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00

OBSAH

KLÍČOVÁ SLOVA	2
1 ÚVOD	5
1.1 FORMULACE PROBLÉMU.....	5
1.2 SOUČASNÝ STAV.....	6
1.3 CÍLE DISERTACE.....	8
2 ANALÝZA A SYSTÉMOVÝ NÁVRH OPTOELEKTRONICKÝCH BEZDOTYKOVÝCH MĚŘIČŮ PLOCH	9
2.1 MĚŘIČE S ANALOGOVÝM ZPRACOVÁNÍM OBRAZOVÉHO SIGNÁLU.....	9
2.2 MĚŘIČ S ČÍSLICOVÝM ZPRACOVÁNÍM OBRAZOVÉHO SIGNÁLU.....	9
2.3 SYSTÉMOVÁ RELATIVNÍ CHYBA MĚŘENÍ.....	10
2.3.1 <i>Vliv dílčích funkčních částí na výslednou chybu měření</i>	11
2.3.2 <i>Odhad celkové chyby měření a porovnání obou metod</i>	12
2.4 PROGRAM AD-EVAL PRO MĚŘENÍ PLOCH A ROZMĚŘŮ.....	12
2.4.1 <i>Komunikační okno ovládacího programu</i>	14
3 REKONSTRUKCE PROSTOROVÝCH SOUŘADNIC NA ZÁKLADĚ STEREOFOTOGRAMMETRIE	15
3.1 GEOMETRICKÝ MODEL KAMERY.....	15
3.2 REKONSTRUKCE ZE DVOU KALIBROVANÝCH SNÍMKŮ.....	18
3.2.1 <i>Epipolární geometrie, esenciální matice</i>	18
3.3 REKONSTRUKCE ZE DVOU NEKALIBROVANÝCH SNÍMKŮ.....	19
3.4 ZPŮSOBY ZTOTOŽŇOVÁNÍ BODŮ NA SNÍMCÍCH.....	20
3.5 ANALÝZA PŘESNOSTI V URČENÍ PROSTOROVÉ SOUŘADNICE BODU.....	21
3.5.1 <i>Vliv kalibrace kamer</i>	21
3.5.2 <i>Vliv diskretizace obrazu</i>	23
3.6 TESTOVACÍ PROGRAM PRO REKONSTRUKCI PROSTOROVÝCH SOUŘADNIC SNÍMANÝCH OBJEKTŮ.....	24
3.6.1 <i>Vývojový diagram programu Recon3D</i>	24
3.6.2 <i>Komunikační okno programu Recon3D</i>	26
4 ZÁVĚR	27
LITERATURA	29
CURRICULUM VITAE	32
ABSTRACT	33

1 ÚVOD

1.1 FORMULACE PROBLÉMU

V průmyslové praxi i dalších oborech často vyvstává potřeba bezdotykového měření rozměrů a ploch, přesněji vyjádřeno - plošných projekcí trojrozměrných objektů různých tvarů. Typickým příkladem mohou být např. úlohy v mikroelektronice, kde je měření ploch nezbytné pro technologické propočty. Řešení takového případu si lze jen stěží představit bez využití bezkontaktního měření. A právě zde se jako výhodné jeví využití optoelektronických metod měření ploch. V takovém případě postačí CCD (CMOS) kamera a zařízení, které dokáže analyzovat snímaný obraz a získat z něj hledané údaje.

S rostoucím výkonem výpočetní techniky a klesající cenou video karet pro připojení kamer, tzv. frame-grabberů, se naskytá možnost přejít k softwarovému vyhodnocení rozměrů snímaných objektů. Cílem práce tak bude vývoj algoritmů pro měření 2D rozměrů a ploch. Hlavním tématem však bude popis možných metod rekonstrukce 3D scény na základě stereoskopických snímků, optimalizace velmi náročných výpočtů a návrh programu, který by rekonstrukci prostorových souřadnic ze snímané 3D scény prováděl automatizovaně.

Fotogrammetrie je vědní disciplína zabývající se rekonstrukcí trojrozměrných scén z dvou-rozměrných snímků. Její počátky se datují přibližně od poloviny minulého století. Dle českého Výkladového slovníku geodetických a kartografických názvosloví je fotogrammetrie obor, zabývající se rekonstrukcí tvaru, rozměru a polohy předmětů, zobrazených na fotografických snímcích. Základem fotogrammetrie jako měřické a mapovací metody je fotografický snímek. Od vytvoření definice tohoto oboru však uplynulo několik let a ve fotogrammetrii se stále více využívají digitální záznamy.

Poznámka: Speciální součástí fotogrammetrie je **stereofotogrammetrie**, ve které se vyšetřují geometrické rozměry 3D scény ze dvou (příp. i více) stereoskopických snímků. Právě této problematice bude věnována druhá část této práce.

Přechod od analogové k analytické fotogrammetrii nevedl k novým principům nebo výsledkům, ale pouze k určitým vylepšením. Přechod od analytické k digitální pak znamenal úplnou změnu hardwaru. V současné době se stereofotogrammetrické analýzy a výpočty uskutečňují převážně pomocí výpočetní techniky a vhodných speciálních programů a technické prostředky (hardware) slouží pro sejmutí a generování potřebných digitálních stereoskopických snímků. Kromě toho, že je možno implementovat již známé algoritmy k řešení úloh klasické fotogrammetrie, jako je triangulace, snímková orientace, ortoprojekce a stereoskopické měření, otevřela se cesta pro další metody a úlohy. Digitální fotogrammetrie tak v sobě obsahuje i některé metody zpracování obrazu (image processig) a počítačového vidění (computer vision). Jedná se například o filtrování, ostření a změnu kontrastu snímku. Jsou to metody, které jsou při digitálním zpracování velmi jednoduše implementovatelné, ale podobných výsledků lze klasickými postupy dosáhnout pouze s obtížemi. Z oboru počítačového vidění se jedná například o automatické

rozpoznávání objektu, což klasickými metodami není umožněno. Algoritmy pro porovnávání obrazu se dají využít při automatické orientaci snímku, triangulaci nebo při automatickém generování digitálního modelu terénu (DMT).

Mnohé současné vědní disciplíny (např. počítačové vidění, robotika a dálková měření atd.) užívají digitálních kamer k získávání informací o okolním světě. Jako rychlé, levné a přenosné zařízení je často užívána právě CCD, případně CMOS, kamera.

1.2 SOUČASNÝ STAV

V oblasti 2D měření rozměrů objektů je současným trendem využívat poměrně nákladné komplexní měřicí systémy sestávající z průmyslových CCD (CMOS) kamer, digitalizačních karet a příslušného softwaru. Ten umožňuje řešení velkého počtu úloh ve vyhodnocování 2D rozměrů objektů. Jako příklad lze uvést systém EPIX[®] společnosti Neovision.

Základní principy stereofotogrammetrie jsou známy již dlouho a současný výzkum na nich staví. Problém rekonstrukce lze vlastně rozdělit do dvou rovin, zjištění prvků vnitřní a vnější orientace a nalezení odpovídajících si bodů na snímcích. Snahou je tyto operace co nejvíce zautomatizovat.

Kalibrace kamery spočívá v nalezení vnějších a vnitřních prvků orientace kamery, zahrnující ohniskovou vzdálenost a polohu středu promítání snímku. Dříve byla kalibrace prováděna ze znalosti prostorových bodů a jejich korespondence na snímku. Příkladem může být tenký plát s pravidelným vzorem, jehož 3D souřadnice jsou známy, umístěný do zorného pole kamery. Pak mohou být snímkové souřadnice z množství dobře rozeznatelných a měřitelných vlastností vzoru použity k určení parametrů kamery [53]. Tato metoda určuje parametry kamery velmi přesně, ale má několik nevýhod. První je, že kalibrační mřížka nemusí být vždy dostupná a druhá, že nelze kameru zkalibrovat pokud se její parametry mění, např. ostřením a přibližováním.

Kalibraci kamery je ovšem možné provádět i bez použití kalibrační mřížky. Faugeras, Luong a Maybank [10] uvedli ideu, že kamera může být kalibrována pomocí korespondence bodů mezi snímky a pojmenovali ji jako automatickou kalibraci. Faugeras [13] a Hartley [18] ukázali, že, i bez znalosti kalibrace kamer, můžeme získat rekonstrukci až ke projektivní transformaci ze dvou nekalibrovaných snímků. Od té doby bylo navrženo několik algoritmů, které se liší dovoleným posunem kamery a efektivním nalezením parametrů kamery. Na základě práce Kruppy bylo vytvořeno několik algoritmů pro kalibraci kamer [10],[24],[55],[58], stejně jako algoritmů pro robustní a přesný odhad fundamentální matice [3],[5],[50],[57],[59]. Některé metody kalibrují kameru přímo v jednom kroku, zatímco jiné využívají rozvrstvený přístup. Projektivní, afinní a euklidovské rozvrstvení při rekonstrukci bylo poprvé předloženo v [36] a později formulováno jako obecný matematický systém pro 3D rekonstrukci [11]. Nicméně euklidovská rekonstrukce není vždy realizovatelná pomocí těchto dílčích rekonstrukcí. Vnitřní

nejednoznačnosti v rekonstrukci spojené se všemi typy kritických pohybů byly studovány v [46],[47],[60],[51],[27].

Částečná znalost snímané scény umožní snadnější kalibrační proces pro kamery, jedná se o kalibrační objekt [53], již zmiňovaný rovinný kalibrační obrazec [56], rovinné scény [52], ortogonalitu a paralelismus, pro něž jsou definovány tak zvané úběžné body (*vanishing points*). Postupy jak automaticky detekovat a vypočítat tyto body jsou uvedeny v [37],[7],[25].

Při rekonstrukci prostorových souřadnic snímaných objektů je stěžejní operací nalezení korespondence mezi dvojicí (trojicí, atd.) snímků. Korespondenční problém (*stereo matching*) byl zkoumán již před několika desetiletími. První důsledná teorie stereo vidění byla předložena v práci od Marr a Poggio [29]. Marr určil obecnou nejednoznačnost korespondenčního problému a definoval dvě základní omezení umožňující jasnou formulaci procesu sesouhlasení:

- jedinečnost: bod na jednom snímku může odpovídat nanejvýš jednomu bodu na druhém snímku (vycházející z předpokladu, že prostorový bod může být reprezentován v jednom snímku nejvýše jedním bodem)

- spojitost: disparita se všude mění téměř spojitě na povrchu objektů

Marr a Poggio navrhli přístup založený na ztotožnění základních rysů, odpovídajícím pozicím změn jasu – hrany, rohy, atd. (*feature matching*). Marrův princip, založený na předpokladu spojitosti povrchu byl zdokonalen pomocí PMF algoritmu navrženým Pollardem, Mayhewem a Frisbyem [35].

Na počátku devadesátých let minulého století se výzkumníci zaměřovali na modifikaci Marrovy teorie, kdy by se disparita určovala pro všechny pixely přímo. Takto byl vývoj algoritmů sesouhlasení rozdělen do dvou směrů. První směr, *globální metody*, reformuloval úlohu takovým způsobem, že byly disparita a všechny předpoklady o struktuře prostoru modelovány pomocí Bayesian proměnných a disparita pak určena pomocí Bayesian soustavy. Více o počátcích globálních metod a dynamického programování lze nalézt v [1],[2],[14],[32]. Další směr představovaly *lokální metody*. Tyto metody byly na počátku 90let nahrazeny globálními metodami, ale na konci devadesátých let se přešlo zpět k metodám lokálním. Vycházejí z předpokladu, že není potřeba žádné globální optimalizace, ale naopak, lokální informace snímku je dostatečná pro správnou formulaci úlohy sesouhlasení. Při lokálních metodách je sesouhlasení prováděno na základě výběru nejvíce podobných elementů. Podstata lokálních metod spočívá v definici a výběru vhodného okna (na něž se metoda aplikuje) a statistice určené přes tuto lokální část snímku. Typické statistiky mohou být SSD (*Sum of Squared Differences*), SAD (*Sum of Absolute Differences*), NCC (*normalized cross-correlation*) atd. Hojně využívaná studie, zabývající se korespondenčním problémem, je dána v [39]. Autoři implementovali řadu algoritmů na testovacích stereo snímcích a uvedli porovnání těchto algoritmů.

1.3 CÍLE DISERTACE

Hlavním tématem disertační práce je analýza a vývoj optoelektronických a stereofotogrammetrických systémů pro měření 2D a 3D rozměrů objektů snímaných kamerou s CCD nebo CMOS snímačem.

V části zabývající se měřením velikosti ploch a rozměrů rovinných objektů představují cíle disertace:

- analytický rozbor a systémový návrh autonomních bezdotykových měřičů ploch pracujících na základě analogového i číslicového zpracování obrazového signálu kamery, snímající měřený objekt,
- analýza a z ní vyplývající odhad dosažitelné přesnosti měření na základě vyhodnocení systémových i dalších přídatných chyb dílčích funkčních bloků,
- vytvoření uživatelsky příjemného aplikačního softwaru pro vyhodnocení obrazových dat z obrazu měřeného objektu snímaného digitálním fotoaparátem nebo kamerou

Druhá část práce je věnována oblasti stereofotogrammetrie. Je zaměřena na analýzu a vývoj algoritmů pro rekonstrukci prostorových souřadnic snímaných objektů. Na základě podrobného zhodnocení doposud známých postupů automatické kalibrace kamery a ztotožňování bodů na stereosnímčích, představují cíle disertace v této oblasti:

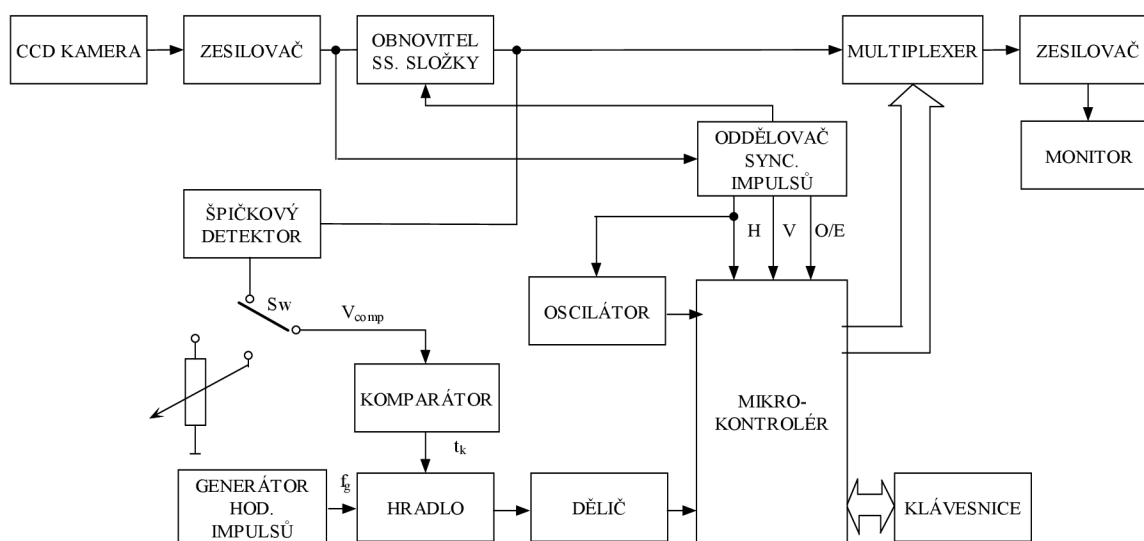
- návrhy originálních přístupů pro určování parametrů orientace kamery a vyhledávání totožných bodů na jednotlivých snímcích nutných pro rekonstrukci scény,
- analýza přesnosti určení prvků vnější a vnitřní orientace spolu s analýzou přesnosti při ztotožňování bodů na snímcích,
- Program pro rekonstrukci prostorových souřadnic snímaných 3D objektů na základě analýzy stereoskopických snímků,
- analýza přesnosti určení parametrů pro nejpoužívanější metody automatické kalibrace a způsoby sesouhlasení bodů na stereoskopických snímcích.

2 ANALÝZA A SYSTÉMOVÝ NÁVRH OPTOELEKTRONICKÝCH BEZDOTYKOVÝCH MĚŘIČŮ PLOCH

2.1 MĚŘIČE S ANALOGOVÝM ZPRACOVÁNÍM OBRAZOVÉHO SIGNÁLU

Funkce tohoto měřiče vychází z principu rozkladu televizního obrazu, kdy se úroveň jasu na jednotlivých řádcích přeměňuje v časově proměnný signál. Měří se doba t_k , kdy je obrazový signál na úrovni, která překlopí komparátor. Čas je měřen digitálně pomocí čítače. Mírou plochy tedy je počet impulsů kalibračního oscilátoru, které projdou přes hradlo po dobu t_k . Jejich sečtením v čítačích a vzájemným podělením získáme údaj o měřené ploše v procentech referenční plochy. Na základě tohoto byl navržen mikropočítačem řízený měřič ploch, jehož blokové schéma je na Obr.1. Detailní popis lze nalézt v [41], modifikace zapojení synchronizační části pak v [45],[44].

Blokové schéma



Obr. 1. Blokové schéma měřiče s analogovým zpracováním obrazového signálu

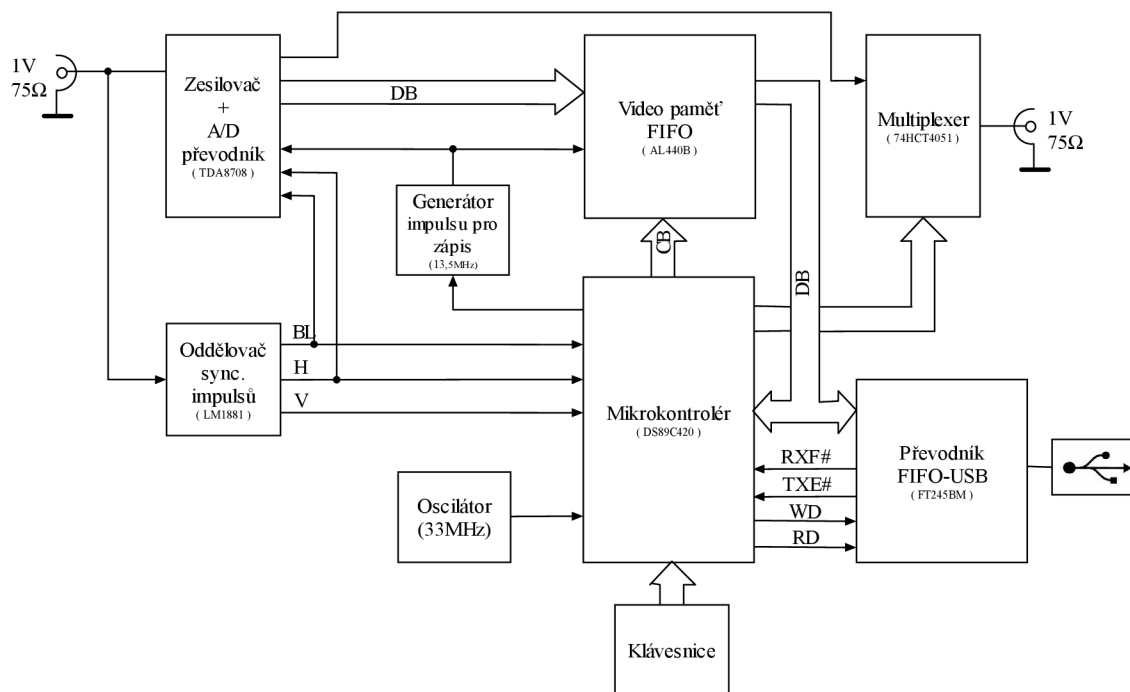
2.2 MĚŘIČ S ČÍSLICOVÝM ZPRACOVÁNÍM OBRAZOVÉHO SIGNÁLU

Měření plochy se zde vyhodnocuje zcela jinak než v případě analogového zpracování [41]. Analogový obrazový signál z kamery je po obnově stejnosměrné složky (v obvodu vstupního zesilovače) digitalizován v A/D převodníku. Vzorkovaná data v rozlišení např. 8bit/vzorek se ukládají do pulsníkové nebo snímkové paměti. Jsou-li data zapsána v paměti, může procesor provést číslicovou

komparaci a vyhodnocení plochy měřeného obrazce, případně uchovaná data upravit. Po získání výsledku měření poté procesor tyto informace předá do obvodu zobrazovače.

Poznámka: Použití digitální kamery je komplikováno skutečností, že výstupní digitální obrazový signál je obvykle komprimován v některém kompresním formátu, který obvykle snižuje informační obsah snímaného obrazu v oblasti vysokých prostorových kmitočtů.

Blokové schéma



Obr. 2. Blokové schéma měřiče s číslicovým zpracováním obraz signálu

Detailnímu popisu blokového schématu se věnuje [42].

2.3 SYSTÉMOVÁ RELATIVNÍ CHYBA MĚŘENÍ

Systémová relativní chyba δ_{vq} vzniká vzorkováním svislého rozměru, tedy řádkovým rozkladem obrazu. Její maximální hodnota dosahuje hodnoty vzorkovacího intervalu, tedy přesně vzdáleností mezi dvěma řádky. Pak absolutní a relativní hodnotu kvantizační chyby

$$\Delta V_q = \frac{V_{\max}}{n_v}, \quad (2.1)$$

$$\delta_{vq} = \frac{\Delta V_q}{V} = \frac{1}{n_v} \frac{V_{\max}}{V}, \quad (2.2)$$

kde n_v je počet řádků na maximálním rozměru V_{\max} ,
 ΔV_q je absolutní chyba vodorovného rozměru V .

Obdobně lze vyjádřit systémovou relativní chybu δ_{hq} měření, způsobenou rozlišením kamery ve vodorovném směru, které je dáno počtem obrazových elementů a proto obdobně jako pro vertikální směr (rozměr V) bude pro rozměr H platit dle vztahu (2.2) pro relativní chybu

$$\delta_{hq} = \frac{\Delta H_q}{H} = \frac{1}{n_h} \frac{H_{max}}{H}, \quad (2.3)$$

kde n_h je počet obrazových elementů CCD snímače na maximálním rozměru H_{max} ,

ΔH_q je absolutní chyba vodorovného rozměru H.

Systémové chyby δ_{hq} a δ_{vq} jsou nezávislé a proto lze vyjádřit výslednou relativní chybu δ_s (pro měření největší měřitelné obdélníkové plochy $S_{max} = V \cdot H$) vztahem

$$\delta_s = \frac{\Delta S}{S_{max}} = \frac{\sqrt{n_v^2 + n_h^2}}{n_h \cdot n_v}. \quad (2.4)$$

Například pro digitální kameru s rozlišením $n_v \cdot n_h = 6 \cdot 10^6$ pixelů a poměr stran $n_h/n_v = 1,5$ bude počet pixelů v horizontálním a vertikálním směru $n_v = 3 \cdot 10^3$ pixelu a $n_h = 2 \cdot 10^3$ pixelů. Poté s ohledem ke vztahu (2.4) dostáváme

$$\delta_s = \frac{\sqrt{(3 \cdot 10^3)^2 + (2 \cdot 10^3)^2}}{3 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3} = 0,37 \cdot 10^{-3}. \quad (2.5)$$

Při měření menších ploch $S_{měř}$ bude chyba větší (v prvním přiblížení bude lineárně závislá na poměru $S_{max}/S_{měř}$). Její hodnota bude také závislá na tvaru a orientaci měřeného povrchu vzhledem k rozkladovému rastru.

2.3.1 Vliv dílčích funkčních částí na výslednou chybu měření

Vliv dílčích funkčních bloků měřiče s analogovým zpracováním na výslednou chybu měření je popisován podrobněji v [38]. Je zde studována následující skupina vlivů:

- Vliv geometrického zkreslení snímače a použitého objektivu
- Vliv kolísání frekvence kalibračního oscilátoru f_g
- Vliv kolísání komparačního napětí ΔU_{komp}
- Vliv kolísání stejnosměrné složky obrazového signálu na výstupu obnovitele ss. složky DCR

V případě měřiče s digitálním zpracováním obrazu platí pro celkovou relativní systémovou chybu měření stejné vztahy popisované v kap. 2.3. Na rozdíl od předešlého zde přibývají tyto vlivy:

- Vliv kolísání stejnosměrné složky obrazového signálu a zesílení předzesilovače
- Přesnost A/D převodu

2.3.2 Odhad celkové chyby měření a porovnání obou metod

Je zřejmé, že přídatná relativní chyba vzrůstá při měření ploch zabírající menší plochu senzoru. Nicméně je tato chyba pro největší měřitelnou oblast stokrát menší než systematická relativní chyba δ_s . Optické zvětšení měřené oblasti je nastaveno prostřednictvím vhodného objektivu ve skutečných podmínkách tak, aby měřená oblast zakrývala 50% rastru snímače. V těchto podmínkách systematická relativní chyba δ_s představuje, evidentně, limit dosažitelného přesnosti měření. Žádané zvýšení přesnosti měření může být dosaženo jen aplikací zvláštní optoelektronického snímače s vysokým rozlišením.

Při snaze o vyčíslení celkové chyby měření u analogového i digitálního měřiče ploch docházíme k závěru, že digitalizace analogového videosignálu nepřináší výrazné zlepšení výsledné přesnosti měření. Výhoda spočívá především v číslicovém zpracování obrazu, v možnosti velkého počtu způsobů vyhodnocování velikosti měřené plochy v případě, že data by byla přenesena do PC. Tato možnost se jeví jako docela jednoduchá, při doplnění měřiče o sériové rozhraní a jeho využití pro zachytávání obrazu.

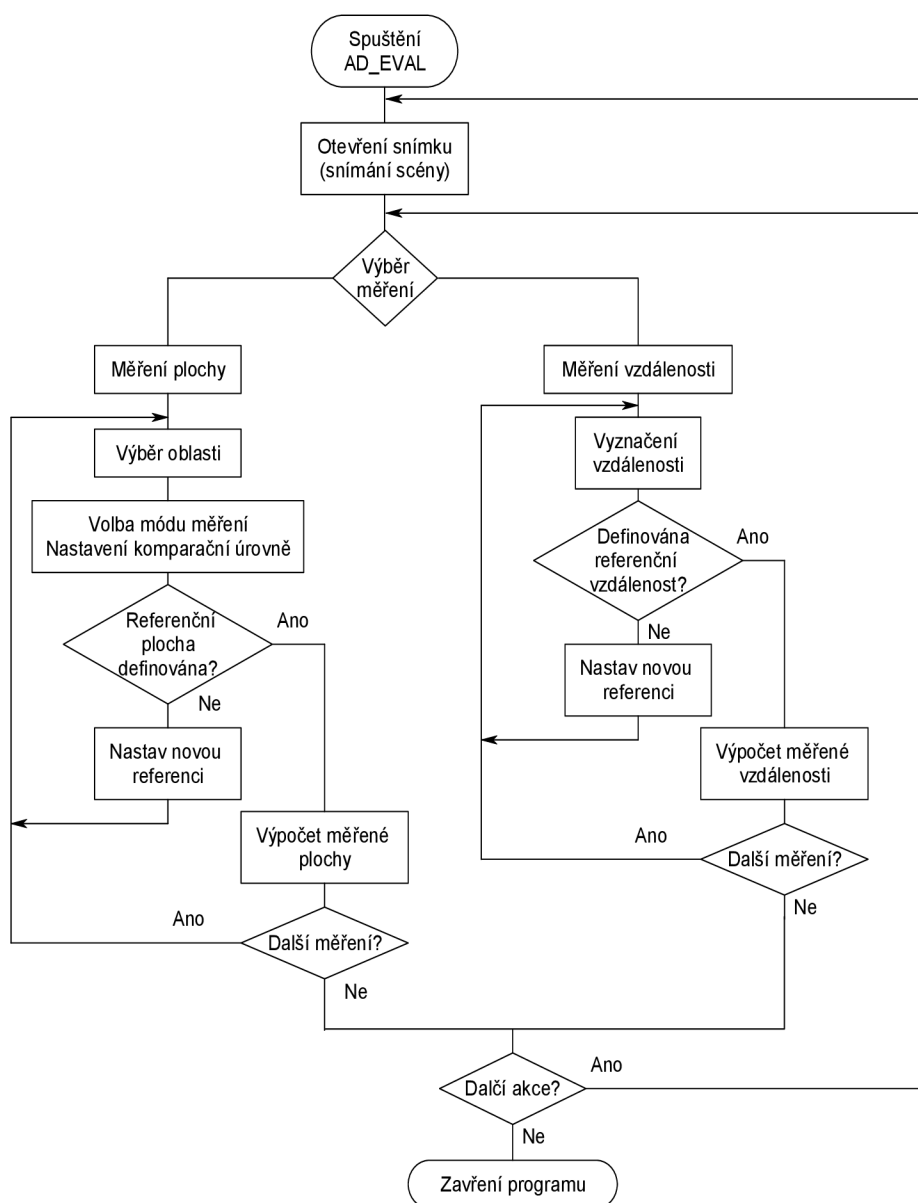
2.4 PROGRAM AD-EVAL PRO MĚŘENÍ PLOCH A ROZMĚRŮ

Vytvořený program AD-EVAL slouží k softwarovému změření velikosti plochy, případně vzdálenosti mezi dvěma zvolenými body v plošné projekci snímané 2D nebo 3D scény, kterou představuje digitální snímek pořízený jakýmkoliv snímacím zařízením, např. digitálním fotoaparátem. Jelikož se využívá poměrového vyhodnocení, předpokládáme scénu s rovinnými objekty a optickou osu objektivu kolmo na ni. K vytvoření uživatelsky příjemného prostředí bylo vybráno vývojové prostředí Builder C++. Obrázek 3 představuje vývojový diagram programu AD-EVAL.

Spuštění programu

Po spuštění programu AD_EVAL lze otevřít snímek uložený v PC. Podporovaným formátem je BMP s 8 bitovou hloubkou na pixel. Při získávání dat z digitálního fotoaparátu či digitální kamery se využívá API (application programming interface) funkcí implementovaných v knihovnách DLL či LIB dodávaných k ovladačům či SDK (Software Developer Kit) jednotlivých zařízení. Pomocí těchto API funkcí se přes ovladač komunikuje s příslušným zařízením a je možné uložit snímanou scénu do souboru či paměti PC.

Po otevření snímku či neskenování scény volíme typ měření, tedy měření velikosti plochy či měření vzdálenosti mezi dvěma body. Defaultním módem je měření velikosti ploch. Není-li požadována další akce, lze program ukončit.



Obr. 3 Vývojový diagram programu AD-EVAL

Měření velikosti ploch

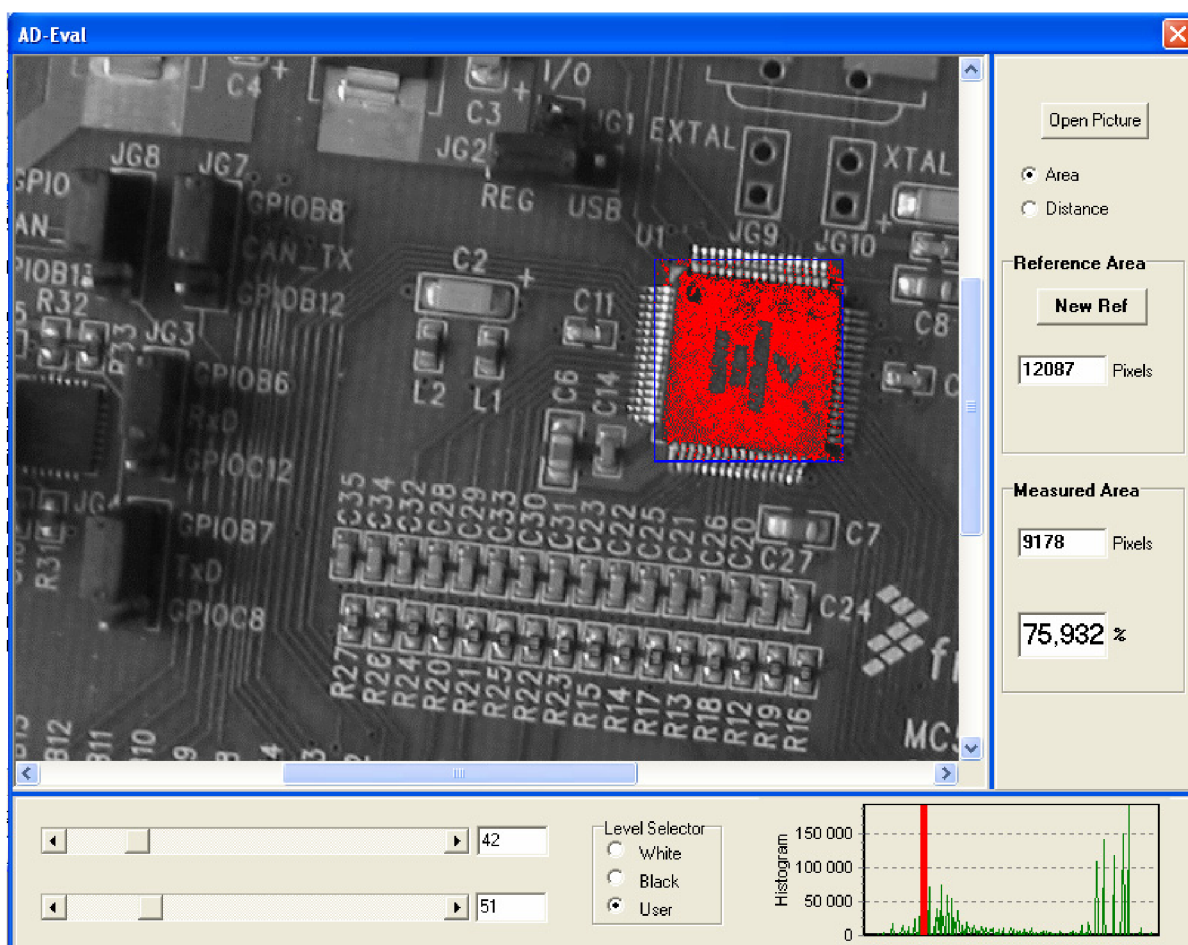
Při měření velikosti ploch je využito poměrové měření. Je proto nutné zvolit referenční plochu známé velikosti a k této je měřená plocha vztažena. Pro výběr části snímku se využívá nastavitelného rámečku. Zvolí se mód měření (bílá, černá, uživatel) a nastaví se prahová úroveň pro měření. Pokud ještě nebyla určena referenční plocha, nastaví se zvolená plocha jako referenční. Opět se provede selekce pro požadovanou část snímku, případně se upraví prahová úroveň a vykoná se kalkulace velikosti zvolené plochy poměrem k ploše referenční. Celý cyklus lze libovolně opakovat.

Měření vzdálenosti mezi 2 body

Měření vzdálenosti probíhá opět na základě poměrového měření. Znamou vzdálenost označíme na snímku dvěma body, nastavíme ji jako referenční vzdálenost. Neznámá vzdálenost je po opětovném označení vyhodnocena jako poměrný údaj vzhledem ke známé (referenční) vzdálenosti.

2.4.1 Komunikační okno ovládacího programu

Vzhled ovládacího programu je na Obr.4 a představuje situaci při měření velikosti plochy. Okno programu lze rozdělit do tří částí. První a největší část zabírá snímaná scéna. Zde lze po natažení obrázku pomocí myši volit oblast měření, ve které je automaticky zvýrazněna měřená plocha. Spodní část okna obsahuje přepínač módu měření (černá, bílá, uživatel) a posuvníky, sloužící k nastavení komparační úrovně pro měření. V pravé dolní části pak histogram zobrazeného obrázku. Poslední třetí část okna je vyčleněna pro zobrazení výsledku měření a obsahuje hodnoty „načtených“ pixelů referenční i měřené plochy a výslednou procentuální hodnotu měřené plochy k ploše referenční. V případě měření vzdálenosti je volba komparační úrovně a modu měření neaktivní. Zobrazované údaje se vztahují k měřené vzdálenosti mezi 2 body.



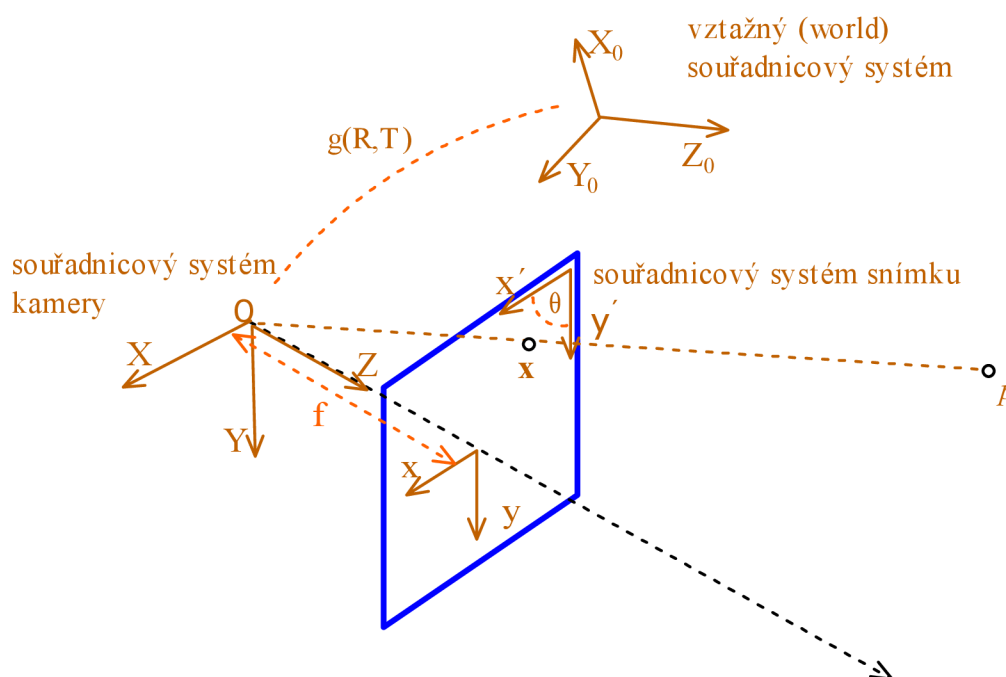
Obr. 4. Vytvořený ovládací program AD-EVAL, měření plochy.

3 REKONSTRUKCE PROSTOROVÝCH SOUŘADNIC NA ZÁKLADĚ STEREOFOTOGRAMMETRIE

Určení třírozměrných dat z dvourozměrných snímků je stěžejním problémem počítačového vidění a fotogrammetrie. Jednou z mnoha cest k získání prostorové scény ze snímků je stereovize. Ta má uplatnění v širokém okruhu oblastí, například tvorba třídimenzionálních map, prostorová vizualizace objektů, prostorová navigace robotů, a tak dále. Pro 3D rekonstrukci jsou charakteristické dvě základní operace – kalibrace kamery a sesouhlasení bodů na snímcích. Cílem procesu kalibrace kamery je nalezení projekce ze prostorových souřadnic do souřadnic snímku. K řešení korespondenčního problému může být využito velké množství omezení. Například, je-li známa kalibrace kamery, je možné využít epipolárního omezení a tímto proces sesouhlasení bodů zjednodušit. V následujících kapitolách budou popsány právě tyto dvě stěžejní operace, spolu s nezbytným matematickým popisem transformací v prostoru a geometrickým modelem kamery, přičemž je využito poznatků uvedených v [26].

3.1 GEOMETRICKÝ MODEL KAMERY

Pro popis vztahu mezi 2D a 3D prostorem je využíván geometrický model kamery, v tomto případě model označovaný jako *pinhole camera model* (Obr.5). Pro tento model kamera provádí ideální perspektivní projekci. Předpokládejme obecný bod p se souřadnicemi $X_0 = [X_0, Y_0, Z_0]^T \in \mathbb{R}^3$ vztažený k referenční souřadné soustavě.



Obr. 5 Geometrický model kamery

Souřadnice $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ téhož bodu vztažený k souřadné soustavě kamery je dána transformací $g = (\mathbf{R}, \mathbf{T})$ a sice

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}\mathbf{X}_0 + \mathbf{T} \in \mathbb{R}^3. \quad (3.1)$$

Bod X se promítne do roviny kamery v bodě

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

kde f je ohnisková vzdálenost.

V homogenních souřadnicích lze tento vztah zapsat jako

$$Z\mathbf{x} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X}, \quad (3.3)$$

kde $\mathbf{X} = [X, Y, Z, 1]^T$ a $\mathbf{x} = [x, y, 1]^T$ jsou teď v homogenním vyjádření.

Protože souřadnice Z není obvykle známa, můžeme ji zapsat jako libovolný pozitivní skalár $\lambda \in \mathbb{R}_+$. Matici z předešlého vztahu je možné rozložit

$$\begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Definujme dvě matice

$$\mathbf{K}_f \doteq \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \quad \mathbf{\Pi}_0 \doteq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 4} \quad (3.5)$$

Matice $\mathbf{\Pi}_0$ se často označuje jako standardní matice projekce. Pomocí transformace souřadnic máme pro bod $\mathbf{X} = [X, Y, Z, 1]^T$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

S použitím výše uvedeného zápisu můžeme souhrnně psát pro celkový geometrický model ideální kamery

$$\lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

Ideální model je specifikován vzhledem k referenčnímu snímku centrovanému v optickém středu a osou souběžnou s optickou osou. V praxi, když je pořízen snímek s digitální kamerou, je měření získáváno v pixelech s počátkem souřadnic snímku typicky v levém horním rohu snímku. Aby byl ideální model použitelný přepíšeme jej jako

$$\lambda \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fs_x & fs_\Theta & o_x \\ 0 & fs_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

nebo v maticové formě

$$\lambda \mathbf{x}' = \mathbf{K} \mathbf{\Pi}_0 \mathbf{X} = \mathbf{K} \mathbf{\Pi}_0 \mathbf{g} \mathbf{X}_0. \quad (3.9)$$

kde $\mathbf{X}_0 = [X_0, Y_0, Z_0]^T$ jsou souřadnice bodu v prostoru vzhledem ke zvolenému souřadnému systému a odpovídajícím souřadnicím na snímku $\mathbf{x}' = [x', y', 1]^T$

Matice \mathbf{K} obsahuje všechny parametry které jsou vlastní specifické kameře a proto se nazývá matice prvků vnitřní orientace nebo také kalibrační matice kamery. Jednotlivé prvky matice mají následující význam:

- f : ohnisková vzdálenost
- o_x : x-ová souřadnice středu snímku v pixelech
- o_y : y-ová souřadnice středu snímku v pixelech
- s_x : velikost pixelu v horizontálních směru
- s_y : velikost pixelu ve vertikálním směru
- s_Θ : šikmost pixelu, často blízko nule.

Pokud je kalibrační matice známa, mohou být kalibrované souřadnice získány ze souřadnic v pixelech jednoduše inverzí matice \mathbf{K} ,

$$\lambda \mathbf{x} = \lambda \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}' = \mathbf{\Pi}_0 \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

3.2 REKONSTRUKCE ZE DVOU KALIBROVANÝCH SNÍMKŮ

Tato kapitola popisuje základní geometrii dvou snímků, zvanou epipolární geometrie. Počátky epipolární geometrie sahají do poloviny 19.století do práce Hesse, jenž studoval geometrii dvou snímků s použitím sedmi bodů (více v [30]). Kruppa dokázal že 5 bodů v obecné poloze je dostačující pro vyřešení geometrii dvou snímků až na konečný počet řešení. Jeho důkazy byly později zdokonaleny a byl prokázán konkrétní počet řešení s jednoduchým důkazem daným později v [19]. Praktický důkaz lze nalézt v [34] s konkrétním lineárním algoritmem používajícím šest sesouhlasených bodů.

Epipolární omezení se poprvé objevilo v [49]. Osmi bodový algoritmus byl dán v [23] a [21], který vyvolal v této oblasti široký zájem, což vedlo k vývoji řady lineárních a nelineárních algoritmů pro odhad pohybu ze dvou snímků. První práce lze nalézt v [12],[22],[31]. Zdokonalení osmi bodového algoritmu založeného na normalizovaných snímkových souřadnicích byl dán v [17].

3.2.1 Epipolární geometrie, esenciální matice

Předpokládejme dva snímky stejné scény pořízené z různých bodů. Jestliže předpokládáme, že kamera je zkalibrována (kalibrační matice \mathbf{K} je jednotková), homogenní snímkové souřadnice \mathbf{x} a prostorová souřadnice \mathbf{X} bodu p jsou dány vztahem

$$\lambda \mathbf{x} = \mathbf{\Pi}_0 \mathbf{X}, \quad (3.11)$$

kde $\mathbf{\Pi}_0 = [\mathbf{I}, 0]$. To znamená, že se bod na snímku liší od skutečné prostorové souřadnice bodu o neznámý rozměr λ . Jestliže uvážíme body $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ jako totožné body na dvou snímcích, pak budou tyto body popsány přesným geometrickým vztahem.

Vztah mezi 3-D souřadnicí bodu ve vztažném souřadném systému a souřadným systémem kamery může být vyjádřen transformací $g=(\mathbf{R}, \mathbf{T})$. Předpokládejme vztažný systém totožný s jednou kamerou. Označíme-li prostorové souřadnice bodu p vzhledem ke snímkům kamer $\mathbf{X}_1 \in \mathbb{R}^3$ a $\mathbf{X}_2 \in \mathbb{R}^3$ pak je vztah mezi nimi dán transformací

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{R}\mathbf{X}_1 + \mathbf{T}. \quad (3.12)$$

Nyní předpokládejme $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^3$ jako homogenní souřadnice projekce stejného bodu p na snímek kamery. Protože $\mathbf{X}_i = \lambda_i \mathbf{x}_i, i = 1, 2$, může být vztah přepsán

$$\lambda_2 \mathbf{x}_2 = \mathbf{R}\lambda_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{T}. \quad (3.13)$$

Pokud eliminujeme rozměr λ_i vynásobením obou stran rovnice vektorem \mathbf{T} , dostáváme

$$\lambda_2 \hat{T}x_2 = \hat{T}R\lambda_1 x_1. \quad (3.14)$$

Jelikož vektor $\hat{T}x_2 = T \times x_2$ je kolmý k x_2 , vnitřní produkt $\langle x_2, \hat{T}x_2 \rangle = x_2^T \hat{T}x_2$ je nulový. Vynásobením předchozího vztahu x_2^T dává nulový taktéž $x_2^T \hat{T}R\lambda_1 x_1$. Jelikož $\lambda_1 > 0$ dokázali jsme následující.

Předpokládejme dvě souřadnice na snímku x_1, x_2 téhož bodu ze dvou pozic kamery se vtahem (R, T) , pak x_1, x_2 splňují podmínku

$$\langle x_2, T \times R x_1 \rangle = 0, \text{ nebo } x_2^T \hat{T}R\lambda_1 x_1 = 0. \quad (3.15)$$

Matice

$$E = \hat{T}R \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad (3.16)$$

se ve vztahu určujícím epipolární omezení nazývá *esenciální matice*. Zakódovává relativní pozici mezi dvěma kamerami.

3.3 REKONSTRUKCE ZE DVOU NEKALIBROVANÝCH SNÍMKŮ

Epipolární omezení definované v předchozí kapitole pro kalibrované kamery může být použito pro nekalibrované kamery rovněž

$$x_2^T \underbrace{K^{-T} \hat{T}R K^{-1}}_F x_1 = 0. \quad (3.17)$$

Matice F definována v předešlém se nazývá fundamentální matice.

$$F = K^{-T} \hat{T}R K^{-1} = \hat{T}' K R K^{-1} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}. \quad (3.18)$$

Jestliže $K = I$, matice F je identická s maticí E . Matice F může být odhadnuta ze souboru osmi a více sesouhlasených bodů na dvou snímcích. Algoritmus použitý v případě kalibrovaných kamer lze využít i zde, nicméně pro případ nekalibrovaných kamer nelze snadno získat R a T z jediné fundamentální matice F , což vede k využití rozvrstveného přístupu při rekonstrukci. Ten byl poprvé představen v [4] a později formulován jako obecný matematický systém pro 3D rekonstrukci [1]. Další způsoby pro kalibraci kamery jsou založeny na dílčí znalosti scény, jedná se o kalibrační objekt [53], již zmiňovaný rovinný kalibrační obrazec [56], rovinné scény [5], ortogonalitu a paralelismus, pro něž jsou definovány tak zvané úběžné body (*vanishing points*). Postupy jak automaticky detekovat a vypočítat tyto body jsou uvedeny v [37],[7],[25].

3.4 ZPŮSOBY ZTOTOŽŇOVÁNÍ BODŮ NA SNÍMCÍCH

Ztotožňování bodů na snímcích je další stěžejní operací při rekonstrukci prostorové scény. Máme-li k dispozici sesouhlasený pár, je výpočet prostorové souřadnice bodu snadný. Nicméně právě nalezení korespondence na snímcích je poměrně obtížná úloha. Obvykle se však předpokládá, že je geometrie kamer známá a tak lze aplikovat epipolární omezení. Toto omezení zaručuje, že příslušný bod na jednom snímku leží na odpovídající epipolární přímce na druhém snímku a naopak. Použitím epipolárního omezení mohou být snímky upraveny (rektifikovány), tzn. transformovány tak, aby se epipolární přímka shodovala s odpovídajícím řádkem snímku. Tato transformace redukuje korespondenční proces z 2D úlohy na 1D úlohu, kdy je prozkoumáván pouze odpovídající řádek. Jakmile je korespondence nalezena, lze rekonstruovat 3D model scény. Z souřadnice, nebo-li též hloubka, je nepřímo úměrná disparitě – rozdílu snímkových souřadnic odpovídajících si bodů na dvou snímcích.

K tomu, aby se určila korespondence mezi dvěma snímky, je nezbytné definovat základní prvky, elementy, které se mají sesouhlasovat. V postupech sesouhlasení mohou být rozlišeny dvě hlavní třídy základních prvků: tvary (rysy) a jas pixelu. Tvary jsou typicky snadno rozlišitelné elementy či regiony ve snímcích a vyhledávání je prováděno pouze pro tyto tvary. Metody používající tyto základní rysy náleží do skupiny tzv. *feature-based stereo* metod. Na druhé straně metody zpracovávající hodnoty jasu pixelu provádějí vyhledávání přes pixely. Tyto metody náleží do skupiny označované jako *area-based stereo* metody.

Feature-based stereo

Marr definoval tvary na pozicích ve snímku, kde se jas ostře mění (hrany, rohy), protože prohlásil, že tyto rozdíly v jasu jsou zachovány v obou snímcích, zatímco jas pixelu se může velmi snadno měnit v důsledku rozličných geometrických zkreslení, vzorkování obrazu, atd. Tvary jsou získávány různými detektory [4],[28],[40],[16].

Vyhledávání je prováděno pouze mezi získanými tvary. Proto je disparita vyhodnocena pouze v pozicích těchto tvarů, tudíž velmi řídkce. Proto je pro sesouhlasení ze dvojice snímků nevýhodná. Pro získání mapy disparity je nezbytné provést určitý postprocesing, jako např. interpolaci přes plynulou plochu. Nicméně tento proces může přinést spoustu chyb. Dalším problémem je detekce tvarů samotná. Ta může být také snadno zdrojem chyb a proto celý proces sesouhlasení nemusí být správný.

Ačkoliv výzkumy opustily testování *feature-based* metod pro sesouhlasení ve dvojici snímků, zájem byl opětovně obnoven v odlišné oblasti vývoje, např. pro *wide-baseline stereo*. Problém v této oblasti spočívá v nalezení geometrie kamer z daného souboru snímků. Pro tuto aplikaci malé množství hodnot disparit nevedí. Definice tvarů se odlišuje od předešlých a jsou definovány jako význačné regiony – nejvíce se odlišující části snímku vzhledem k okolí.

Area-based stereo

Základní elementy pro sesouhlasení v area-based metodách jsou jednotlivé pixely, přes které se vyhledávání provádí. Metody se soustředí na hledání korespondence mezi pixely s výsledkem ve formě mapy disparit. Vyhledávání vychází pouze z funkcí jasů pixelu, a proto není potřeba žádné určení tvarů a rysů.

Proces vyhodnocení vzájemného sesouhlasení je vyčíslen na základě podobnostních statistik. Nejjednodušší statistikou je porovnávání jasů pixelu [8],[9], které je ovšem velice citlivé na šum a zkreslení snímku. Robustnější přístupy používají porovnávací okno předdefinované velikosti, které určuje okolí pixelu zahrnutého do vyhodnocení. Nejvíce používanými statistikami jsou např. SSD (*Sum of Squared Differences*) [9],[33],[48], SAD (*Sum of Absolute Differences*) [15],[20], NCC (*normalized cross-correlation*) [6].

Area-based metody mají nevýhodu oproti předešlé metodě v tom, že porovnávají funkci jasů pixelu, která může kolísat vlivem zkreslení.

3.5 ANALÝZA PŘESNOSTI V URČENÍ PROSTOROVÉ SOUŘADNICE BODU

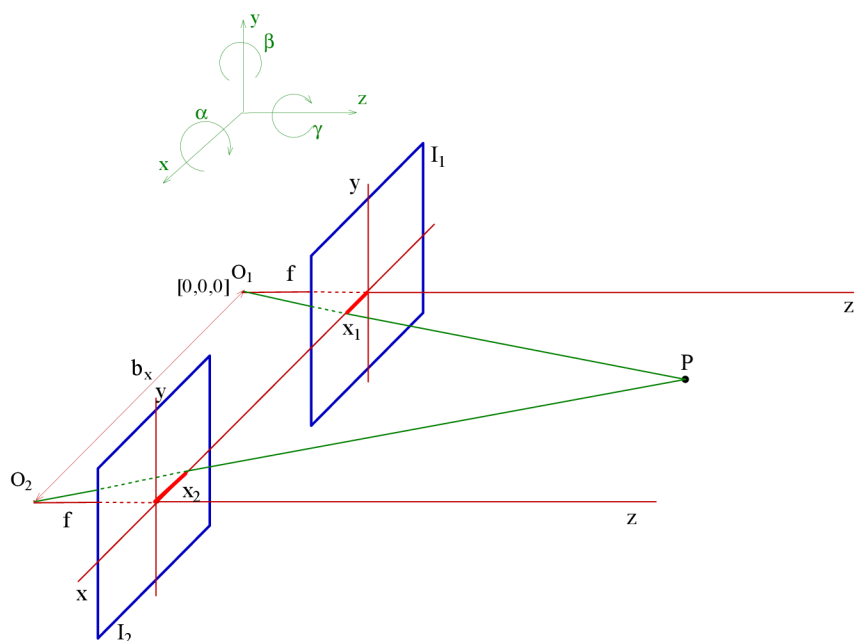
3.5.1 Vliv kalibrace kamer

Kalibrace kamer je velice důležitým krokem při určování 3D souřadnice ze získaných stereosnímků. Pro danou dvojici snímků, jakmile je vyřešen problém korespondence bodů, přesnost v určení 3D souřadnice závisí na celé geometrii kamer, t.j. přesnosti v určení prvků vnitřní a vnější orientace. V následujícím textu bude sledována předpokládaná chyba v určení Z souřadnice bodu v závislosti na nedokonalém určení polohy kamer vůči sobě. Přesné určení vzájemné polohy ovlivňuje epipolární předpoklad používaný v procesu korespondence bodů, jakožto i ustanovení oblasti korespondence na počátku.

Z praktického hlediska je teda poloha kamer důležitá pro 3D měření založeném na stereosnímcích. I když je kalibrace dokonalá, parametry kamer se mohou měnit během užívání. To naskýtá několik otázek. Jakým způsobem ovlivní nedokonalá kalibrace určení 3D souřadnice? Jak velkou chybu jednotlivých parametrů při kalibraci je možné akceptovat pro zadanou přesnost měření s použitím reálného měřicího systému.

V této kapitole je tak analyzován efekt různých chyb v kalibraci na celkovou přesnost měřicího systému. Tato analýza je důležitá neboť jakákoliv sebepřesnější metoda kalibrace kamer nebo sesouhlasení bodů přináší určitou větší či menší chybu. A proto je důležité pochopit, která s jednotlivých chyb má největší vliv na přesnost určení 3D souřadnice. Při této analýze je využíváno poznatků uvedených v [60].

Předpokládejme základní stereoskopický systém popsany [43] a zobrazený na Obr.6.



Obr.6. Princip stereofotogrammetrie

Při určování chyb kalibrace bude nejprve brán v potaz vždy jen jeden zdroj chyby, ostatní parametry považujeme za správné. Následně bude vliv jednotlivých chyb sloučen. Předpokládejme, že je korespondenční problém vyřešen a je nalezená správná dvojice bodů na snímcích. Zdroj chyb v určení Z souřadnice je možné rozdělit do několika kategorií.

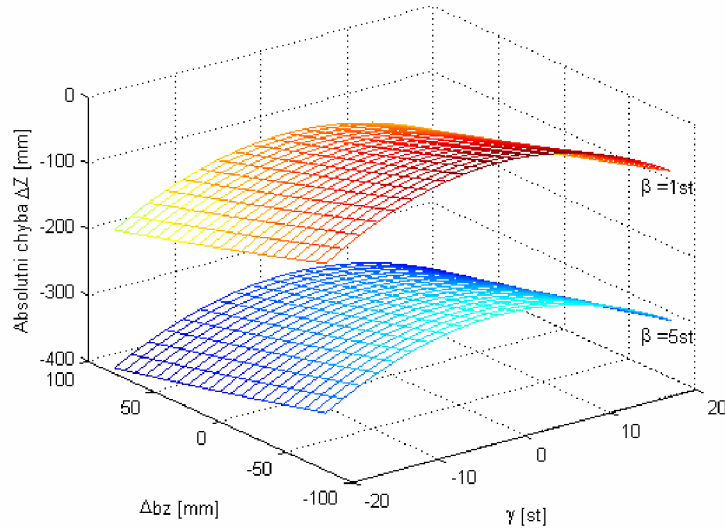
- vliv pootočení kamery v ose snímku o chybový úhel γ
- vliv pootočení kamery kolem osy y o chybový úhel β
- vliv posunutí kamery v ose x o Δb_x
- vliv posunutí kamery v ose z o Δb_z

Na základě těchto dílčích výsledků lze usuzovat, který z parametrů vyžaduje větší pozornost při kalibraci kamer. Nejkritičtější je chyba v určení natočení kamer kolem osy y , dále posunutí v ose x a dále otočení kolem optické osy z .

V případě, že nebudeme uvažovat pouze jeden zdroj chyby, což je v praxi pravděpodobnější, můžeme zkombinovat vliv otočení kolem os a posunutí v osách dohromady. Tak například pokud jsou kamery kalibrovány s chybovými parametry Δb_x , β a γ pro absolutní chybu Z souřadnice, můžeme psát

$$\Delta Z = Z \left(\frac{x_2 - \frac{fZ}{Z + \Delta b_z} \frac{x_2 \cos \gamma + f \tan \beta}{f - x_2 \cos \gamma \cdot \tan \beta}}{x_1 - x_2} \right). \quad (3.19)$$

Obr.7 ilustruje závislost absolutní chyby Z souřadnice v případě aplikace více chybových parametrů, zde posunutí v ose z , otočení kolem osy y a z . Při výpočtu bylo použito: $b_x = 1500\text{mm}$, $f=8\text{mm}$, referenční bod s $X=1000\text{mm}$ a $Z = 2000\text{mm}$.



Obr.7 Chyba souřadnice Z v závislosti na Δbx , β a γ .

3.5.2 Vliv diskretizace obrazu

Z důvodu diskretizace obrazu se snímkové souřadnice mění skokově s kvantizační chybou $\pm 1/2$ pixelu. Pro souřadnice v ose x to znamená, že jsou získány s chybou $\pm \delta/2$, kde δ představuje vzorkovací interval snímku. Proto disparita, definovaná jako rozdíl snímkových souřadnic, může nabývat minimální chyby $\pm \delta$. Definujeme-li chybu disparity jako $\Delta d = d' - d$, kde d' je disparita vzniklá diskretizací, pak může být tato chyba v rozsahu $-\delta$ až δ . Uvažujeme-li stereoskopický systém znázorněný na Obr.6, můžeme napsat podobný vztah pro určení absolutní chyby Z souřadnice jako v kapitole 3.5.1,

$$\begin{aligned}
 \Delta Z &= Z_{disk} - Z_{skut} = \frac{b_x f}{d'} - Z_{skut} = \\
 &= \frac{b_x f}{d + \Delta d} - Z_{skut} = \frac{b_x f}{b_x f / Z_{skut} + \Delta d} - Z_{skut} = \\
 &= \frac{-Z_{skut}^2 \Delta d}{b_x f + Z_{skut} \Delta d}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

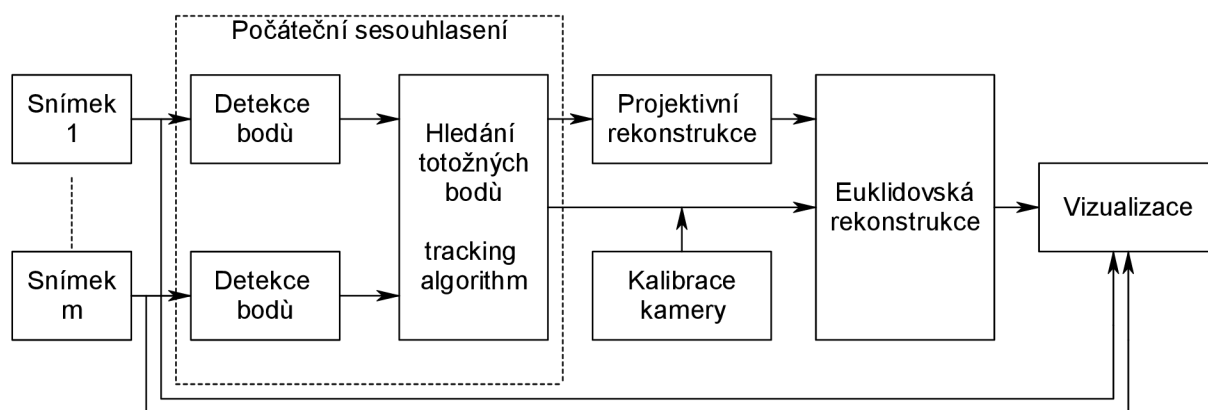
Ze vztahu je patrné, že chyba z -tové souřadnice vzrůstá, se zmenšujícím se členem $b_x f$ a tedy pro případ přibližujících se kamer. Vezmeme-li v úvahu konkrétní hodnoty, např. $b_x = 1000 \text{ mm}$, $f = 8 \text{ mm}$, $Z = 4000 \text{ mm}$, pak změna x -ové souřadnice o jeden pixel (tedy chyba disparity $\Delta d = 0,0033 \text{ mm}$ pro 2Mpixelový snímač velikosti $1/2,7''$) způsobí chybu Z souřadnice $\Delta Z = 6,2 \text{ mm}$. Z tohoto lze rovněž usuzovat, že pokud je chyba, způsobená nepřesným určením parametrů kamery, menší než 3,1 mm, pak již další zpřesnění parametrů kamery neovlivní výslednou chybu Z souřadnice. Přesnost snímacího systému je tak limitována rozlišením snímače.

3.6 TESTOVACÍ PROGRAM PRO REKONSTRUKCI PROSTOROVÝCH SOUŘADNIC SNÍMANÝCH OBJEKTŮ

Vytvořený testovací program Recon3D slouží pro ověření výše uvedených postupů pro rekonstrukci prostorových souřadnic ze dvou či tří snímků, tedy kalibraci kamery a nalezení korespondujících bodů jakožto i konečnou rekonstrukci prostorové souřadnice bodu.. Program používá digitální fotoaparát k pořízení stereosnímků. Komunikace probíhá přes USB rozhraní a snímky jsou ukládány do PC v nekomprimovaném formátu BMP s 8bitovou hloubkou na pixel (barevný nebo v odstínu šedé). K vytvoření uživatelsky příjemného prostředí bylo opět využito vývojového prostředí Builder C++. Při vývoji bylo rovněž využito OpenCV[®] knihovny pro urychlení řešení některých úloh rekonstrukce prostorové souřadnice. Tato knihovna nabízí programátorům celou řadu algoritmů, které mohou být využity pro velké množství úloh počítačového vidění. Rovněž obsahuje ucelenou knihovnu pro maticový počet, který je zde hojně využíván.

3.6.1 Vývojový diagram programu Recon3D

Testovací program v této verzi vyhodnocuje 3D strukturu snímané scény na základě informace získané ze sesouhlasených bodů ve dvojici či trojici snímků. Obecný přehled systému je zobrazen na Obr. 8.



Obr. 8 Postup při rekonstrukci 3D prostorové scény

a) Pořízení sekvence snímků

Vytvořený program Recon3D nabízí dvě možnosti získání snímku. První možností je otevření dříve uložených snímků v PC. Podporovanými formáty jsou 8bitové BMP (barevné nebo v odstínu šedé) formáty. Jestliže program komunikuje přímo s digitálním fotoaparátem či kamerou, data jsou získávána pomocí API rozhraní a funkcí implementovaných v knihovnách DLL nebo LIB. Tyto knihovny jsou součástí ovladačů nebo vývojového prostředí dodávaného k jednotlivým zařízením. Pomocí těchto API funkcí program komunikuje s fotoaparátem nebo kamerou a takto je možné uložit snímanou scénu do souboru či paměti PC.

b) Detekce bodů na snímcích

Automatické nalezení základních geometrických prvků (rohů, atd.) je využito v procesu zjištění projektivní geometrie. Body jsou nalezeny pro jednotlivé snímky a v následném kroku přes dané snímky sesouhlaseny.

c) Nalezení korespondence mezi snímky

Jakmile jsou v předchozím kroku význačné body nalezeny, je snahou určit korespondenci mezi body přes jednotlivé snímky. Tyto páry (trojice) jsou poté využity pro nalezení epipolární geometrie a následně fundamentální matice.

Body mohou být sesouhlaseny na základě vyhledávací statistiky měřící podobnost zvolených bodů na snímcích. Toto je sice výpočetně náročné, nicméně pro tento účel dostačující, protože vyhodnocení se provádí pouze přes omezený počet bodů. Pro zvolené body se souřadnicemi x_1 na prvním snímku a x_2 na druhém snímku je určeno okolí $W(x_1)$, $W(x_2)$. Toto okolí je obvykle porovnáváno pomocí NCC.

d) Kalibrace kamery

Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, je důležité získat parametry vnitřní a vnější orientace pro správné určení prostorové souřadnice. Jestliže program komunikuje přímo s digitálním fotoaparátem nebo kamerou, je možné získat vnitřní parametry přímo například s využitím kalibračního obrazce, pokud je ten taktéž k dispozici. Poté je nutné určit pouze matici rotace a vektor posunutí. Tato transformace definuje pozici kamer vůči sobě. Jestliže není přímý přístup ke snímacímu zařízení a snímky jsou otevřeny z PC bez znalosti kalibrace je možné provést rekonstrukci prostorové souřadnice pomocí rozvrstveného přístupu.

e) Projektivní a Euklidovská rekonstrukce

Jakmile jsou korespondence mezi snímky nalezeny, lze určit 3D strukturu scény až k projektivní rekonstrukci. Jestliže nejsou dány či známy další informace o kameře je projektivní rekonstrukce maximum co je možné nalézt.

Z nalezených bodů ve dvojici snímků je možné určit fundamentální matici F použitím osmi bodového algoritmu. Určení projektivních matic a projektivní struktury tedy vychází z fundamentální matice.

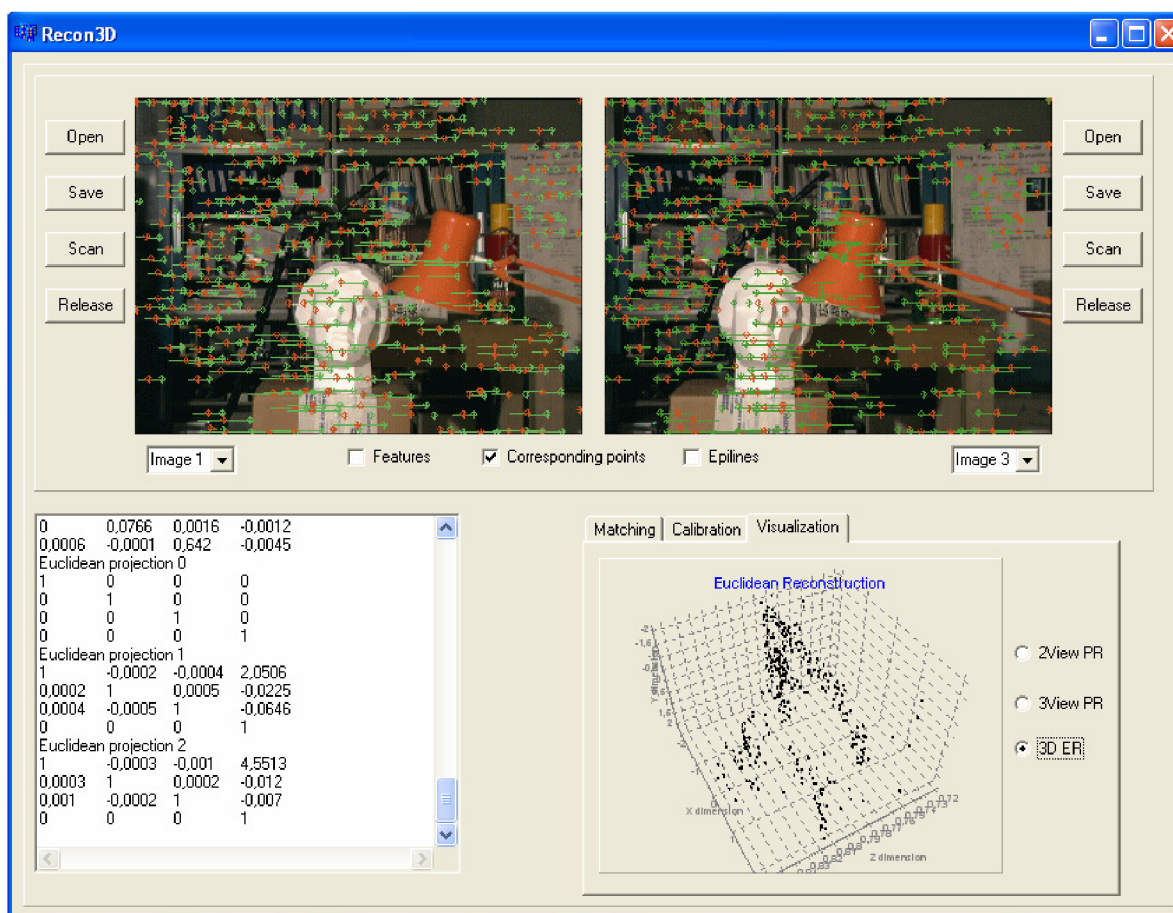
Pokud je k dispozici více snímků, lze pro zpřesnění odhadu projektivní matice a struktury použít například iterativní algoritmus minimalizující chybu zpětné projekce. Cílem je nalezení polohy kamer pro všechny snímky a 3D struktury pro jakýkoliv bod, který se objeví alespoň na dvojici snímků.

f) Vizualizace

Jakmile je kalibrace dána a vyřešen problém korespondence, výsledek, t.j. rekonstruovaná 3D souřadnice zvoleného či nalezeného bodu na snímku je zobrazená v 3D pohledu. Vzájemná poloha kamer je rovněž naznačena v 3D zobrazení jako souřadnicový systém kamery.

3.6.2 Komunikační okno programu Recon3D

Základní okno vytvořeného programu Recon3D je zobrazeno na Obr. 9. Lze jej rozdělit na tři hlavní části. První část patří zobrazení dvojice snímků. Ke každému snímku jsou přiřazeny čtyři tlačítka. Pomocí nich je možné otevřít či uložit snímek z PC respektive do PC nebo se připojit ke kameře a získat snímek přímo z fotoaparátu či kamery. Druhá část, v pravém dolním rohu, obsahuje přepínatelné lišty. Lišta *Calibration* nabízí možnost volby mezi automatickou kalibrací, kalibrací pomocí kalibračního obrazce nebo manuální kalibrací, kdy je známá matice K . Jakmile je kalibrace provedena jsou kalibrační parametry zobrazeny do příslušných kolonek. Je možné rovněž zadat kalibrační parametry přímo, pokud jdou známy. V liště *Matching* je možné vybrat metodu nebo nastavit parametry použité v procesu vyhledávání totožných bodů na snímcích. Poslední lištou je lišta *Vizualization*, ve které je k dispozici 3D pohled rekonstruované scény. Ve třetí části okna, levém dolním rohu je zobrazováno hlášení generované během běhu programu, jakožto i informace o získaných parametrech.



Obr.9 Okno testovacího programu Recon3D

4 ZÁVĚR

Tématem této práce byla analýza a vývoj optoelektronických a fotogrammetrických systémů pro měření 2D a 3D rozměrů objektů snímaných kamerou s CCD nebo CMOS snímačem.

V první části práce, zabývající se měřením velikosti ploch a rozměrů rovinných objektů, byl předložen systémový návrh autonomních měřičů ploch pracujících na základě analogového i číslicového zpracování obrazového signálu kamery, snímající měřený objekt. Pro tyto dva systémy byla provedena analýza a z ní vyplývající odhad dosažitelné přesnosti měření na základě vyhodnocení systémových i dalších přídatných chyb dílčích funkčních bloků. Z této analýzy je patrné, že výsledná přesnost měření závisí především na rozlišení optoelektronického snímače (počtu obrazových elementů) použitého v kameře či fotoaparátu a také na využití celé plochy snímače při měření, to znamená na poměru měřené plochy k celému rastru snímače. Rovněž je zřejmé, že digitalizace analogového videosignálu nepřináší výrazné zlepšení výsledné přesnosti měření. Výhoda spočívá především v číslicovém zpracování obrazu, v možnosti velkého počtu způsobů vyhodnocování velikosti měřené plochy v případě, že data jsou přenesena do PC. V závěru této části práce byl vytvořen uživatelsky příjemný PC program AD-EVAL, sloužící k softwarovému vyhodnocení velikosti plochy, případně vzdálenosti mezi dvěma zvolenými body v plošné projekci snímané 2D či 3D scény. Program využívá k pořízení scény kamery či fotoaparátu připojených přes USB rozhraní, přičemž tyto vstupní data jsou uložena ve formátu BMP pro pozdější zpracování. Program nabízí snadnou volbu měřené oblasti, volbu módu měření, pohled na histogram snímku a především zobrazení výsledku měření.

Druhá část práce byla věnována stereofotogrammetrii. Byla zaměřená na popis algoritmů pro rekonstrukci prostorových souřadnic snímaných objektů. V úvodu této části byl nastíněn matematický popis vztahů mezi body v prostoru spolu s popisem geometrického modelu kamery. V následné kapitole jsou uvedeny postupy pro získání kalibračních parametrů kamery, to znamená prvků vnitřní a vnější orientace. Další stěžejní operací pro rekonstrukci prostorové scény je vlastní ztotožnění bodů na jednotlivých snímcích, proto zde byla část práce věnována právě této oblasti. Byly popsány dvě základní metody, globální a lokální, přičemž větší důraz je kladen na metody lokální, využívající především korelačních funkcí pro porovnávání bodů na snímcích. V další kapitole byl analyzován vliv nepřesného určení parametrů spojených s rekonstrukcí. Byly odhadnuty chyby v určení Z -tové souřadnice na chybně určeném úhlu natočení či posunutí kamery. Rovněž byl popsán vliv diskretizace obrazu. Ze získaných výsledků je patrné, že nejkritičtější pohybem je natočení kamer kolem osy y , dále posunutí v ose x a dále otočení kolem optické osy z . Také vlastní diskretizace má významný vliv na výslednou přesnost 3D rekonstrukce. V závěru této části byl popsán vytvořený PC program Recon3D sloužící k testování postupů při 3D rekonstrukci. Program opět využívá připojeného fotoaparátu či kamery k pořízení vstupní sekvence snímků. Ty mohou být uloženy do formátu BMP s osmi bitovou hloubkou pro pozdější zpracování. Je možné volit

mezi automatickou kalibrací, kalibrací pomocí kalibračního obrazce a kalibrací při známých parametrech matice K . Program automaticky vyhledává a sesouhlasuje body na snímcích, jejichž prostorové souřadnice pak mohou být zobrazeny v 3D grafu.

Hlavním přínosem této práce je především ucelený popis optoelektronických a fotogrammetrických systémů pro měření 2D a 3D rozměrů objektů snímaných kamerou spolu s analýzou dosažitelné přesnosti měření a vývojem dílčích systémů. Takovýto popis jsem doposud nenašel v literatuře, kterou jsem měl k dispozici.

LITERATURA

- [1] BAKER, H.H., BINFORD, T.O. Depth from edge- and intensity-based stereo. In *Proceedings 7th Joint conference on Artificial Intelligence*, Vancouver, Canada, pages 631-636, August 1981.
- [2] BELHUMEUR, P. N. A bayesian approach to binocular stereopsis. *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, 19(3):237-262, 1996.
- [3] BOUFAMA, B. AND MOHR, R. Epipole and fundamental matrix estimation using the virtual parallax property. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 1030-1036, Boston, MA, 1995.
- [4] CANNY, J. A computational approach to edge detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6):679-698, 1986.
- [5] CHAI, J. AND MA, S. Robust epipolar geometry estimation using generic algorithm. *Pattern Recognition Letters*, 19(9):829-838, 1998.
- [6] CHEN, Q AND MEDIONI, G. A volumetric stereo matching method: Application to image-based modeling. In *Proceedings of International Conference On Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 29-34, 1999.
- [7] COLLINS, R. AND WEISS, R. Vanishing point calculation as a statistical inference on the unit sphere. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 400-403, 1990.
- [8] COX, I.J. A maximum likelihood n-camera stereo algorithm. In *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 733- 739, Seattle, Washington, 1994.
- [9] COX, I.J., HIGORANI, S.L., RAO, S.B., AND MAGGS, B.M. A maximum likelihood stereo algorithm. *Computer Vision and Image Understanding*, 63(3):542-567, 1996.
- [10] FAUGERAS, O.D., LUONG, Q.T., AND MAYBANK, S. Camera self-calibration: theory and experiments. In *Proc. European Conference on Computer Vision*, LNCS588, pages 321-334. Springer-Verlag, 1992.
- [11] FAUREGAS, O. Stratification of three-dimensional vision: projective, affine, and metric representation. *Journal of the Optical Society of America*, 12(3):465-484, 1995.
- [12] FAUREGAS, O. *Three-Dimensional Computer Vision*. The MIT Press, 1993.
- [13] FAUREGAS, O. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? In *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, pages 563-578. Springer-Verlag, 1992.
- [14] GEIGER, D., LADENDORF, B. AND YUILLE, A. Occlusions and binocular stereo. *International Journal on Computer Vision*, 14:211-226, 1995.
- [15] GONG, M. AND YANG, Z-H. Multi-resolution stereo matching using genetic algorithm. In *Proceedings of Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision*, pages 21-29, Kauai, Hawaii, 2001.
- [16] HARRIS, CH. AND STEPHENS, M. A combined corner and edge detector. In M. M. Matthews, editor, *Proceedings of the 4th ALVEY vision conference*, pages 147-151, University of Manchester, England, 1988.
- [17] HARTLEY, R. In defence of the eight-point algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(6):580-593, 1997
- [18] HARTLEY, R., GUPTA, R. AND CHANG, T. Stereo from uncalibrated cameras. In *Proceedings of international Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 761-764, Urbana Champaign, IL, USA, IEEE Comput. Soc. Press, 1992.

- [19] HEYDEN, A. AND SPARR, G. Reconstruction from calibrated cameras – a new proof of Kruppa Demazure theorem. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, pages 1-20, 1999.
- [20] HIRSCHMÜLLER, H. Improvements in real-time correlation-based stereo vision. In *Proceedings of Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision*, pages 141–148, Kauai, Hawaii, 2001.
- [21] HUANG, T. AND FAUREGAS, O. Some properties of E matrix in two-view motion estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(12):1310-1312, 1989
- [22] KANATANI, K. *Geometric Computation for Machine Vision*. Oxford Science Publications, 1993.
- [23] LONGUET-HIGGINS, H. C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293:133-135, 1981.
- [24] LUONG, Q.-T. AND FAUREGAS, O. The fundamental matrix: theory, algorithms, and stability analysis. *Int. Journal of Computer vision*, pages 589-599, 1994.
- [25] LUTTON, E., MAITRE, H., AND LOPEZ-KRAHE, J. Contribution to the determination of vanishing points using Hough transformation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(4):430-438, 1994.
- [26] MA, Y., SOATTO, S., KOSECKA, J., AND SASTRY, S. *An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models*. Springer-Verlag. New York. 2004. 526 p. ISBN 0-387-00893-4.
- [27] MA, Y., SOATTO, S., KOSECKA, J., AND SASTRY, S. Euclidean reconstruction and reprojection up to subgroups. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 773-780, 1999.
- [28] MARR, D. AND HILDRETH, E. Theory of edge detection. *Proceedings Royal Society London, B* 207:187–217, 1980.
- [29] MARR, D. AND POGGIO, T. A computational theory of human stereo vision. *Proc. R. Soc., B*-204:301-328, 1979.
- [30] MAYBANK, S. AND FAUREGAS, O. A theory of selfcalibration of moving camera. *Int. Journal of Computer vision*, 8(2):123-151, 1992.
- [31] MAYBANK, S., *Theory of Reconstruction from Image Motion*, Springer Series in Information Science, Springer-Verlag, 1993.
- [32] OHTA, Y AND KANADE, T. Stereo by intra- and inter-scanline search using dynamic programming. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(2):139–154, 1985.
- [33] OKUTOMI, M., KATAYAMA, Y., AND OKA S. A simple stereo algorithm to recover precise object boundaries and smooth surfaces. In *Proceedings of Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision*, pages 158–165, Kauai, Hawaii, 2001.
- [34] PHILIP, J. A non-iterative algorithm for determining all essential matrices corresponding to five point pairs. *Photogrammetric Records*, 15(88):589-599, 1996.
- [35] POLLARD, S.B., MAYHEW, J.E.W, AND FRISBY, J.P. PMF: a stereo correspondence algorithm using a disparity gradient constraint. *Perception*, 14:449-470, 1985
- [36] QUAN, L. Affine stereo calibration for relative affine shape reconstruction. In *Proceeding of British Machine Vision Conference*, pages 659-668, 1993.
- [37] QUAN, L., MOHR, R. Determining perspective structures using hierarchical Hough transform. *Pattern recognition Letter*, 9(4):279-286, 1989.
- [38] ŘÍČNÝ, V. Contactless Opto-Electronic Area Meters and their Attainable Measuring Accuracy. *Radioengineering*, roč. 2001, č. 2, s. 20, ISSN 1210-2512
- [39] SCHARSTEIN, D. SZELISKI, R. A taxonomy and evaluation of dense twoframe stereo correspondence algorithms. Technical Report MSR-TR-2001-81, Microsoft Corporation, Redmond, WA 98052, USA, 2001.

- [40] ŠONKA, M., HLAVÁČ, V., AND BOYLE, R.D. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. PWS, Boston, USA, second edition, 1998.
- [41] STANČÍK, P. *Televizní bezdotkový měřič ploch*, Diplomová práce UREL FEKT VUT Brno, 2000
- [42] STANČÍK, P. Digitální TV planimetr. *Elektrorevue - Internetový časopis*, (<http://www.elektrorevue.cz>), ISSN 1213-1539, 2002, roč. 2002, č. 75
- [43] STANČÍK, P. Algorithm for 3D Point Coordinates Reconstruction. In *RADIOELEKTRONIKA 2004 - Conference Proceedings*. 2004. s. 323648. ISBN: 8022720178
- [44] STANČÍK, P. System for contactless surface measuring. In *Proceedings of 8th Conference STUDENT EEICT 2002, volume 3.*, FEKT VUT Brno, 2002, p.347 - 350. ISBN 80-214-2116-9.
- [45] STANČÍK, P. TV contactless area meter. In *Proceedings of 12th International Czech-Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2002*. STU Bratislava, 2002, p. 425 - 428. ISBN 80-227-1700-2.
- [46] STURM, P. Critical motion sequences for monocular self-calibration and uncalibrated Euclidean reconstruction. In *Proceedings of international Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1000-1005, 1997.
- [47] STURM, P. Critical motion sequences for self-calibration of cameras and stereo systems with variable focal length. In *Proceeding of British Machine Vision Conference*, pages 63-72, 1999.
- [48] SZELISKI, R. AND SCHARSTEIN, D. Symmetric sub-pixel stereo matching. In *Proceedings 7th European Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 525-540, Copenhagen, Denmark, 2002.
- [49] THOMPSON, E. A rational algebraic formulation of the problem of relative orientation. *Photogrammetric Record*, 3(14):152-159.
- [50] TORR, P.H.S. AND MURRAY, D.W. The development and comparison of robust methods for estimating the fundamental matrix. *Int. Journal of Computer vision*, 24(3):271-300, 1997.
- [51] TORR, P.H.S., FITZGIBBON, A. AND ZISSERMAN, A. The problem of degeneracy in structure and motion recovery from uncalibrated images sequences. *Int. Journal of Computer vision*, 32(1):27-44, 1999.
- [52] TRIGS, B. Autocalibration from planar scenes. In *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, pages I: 89-105, 1998.
- [53] TSAI, R. Anefficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. In *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, 1986.
- [55] ZELLER, C. AND FAUREGAS, O. Camera self-calibration, form video sequences: the Kruppa equation revisited. *Research report 2793, INRIA, France*, 1996
- [56] ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. *Microsoft Technical Report MSR-TR-98-71*, 1998
- [57] ZHANG, Z. Determining the epipolar geometry and its uncertainty: a review. *Int. Journal of Computer vision*, 27(2):161-195, 1998.
- [58] ZHANG, Z., DERICE, R, FAUREGAS, O. AND LUONG, Q.-T. A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry. *Artificial Intelligence*, 78:87-119, 1995.
- [60] ZHAO W., NANDHAKUMAR, N. Effects of Camera Alignment Errors on Stereoscopic Depth Estimates. *Pattern Recognition* 29:2115-2126, 1996.
- [61] ZISSERMAN, A., LIEBOWITZ, D. AND ARMSTRONG, M. Resolving ambiguities in auto-calibration. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 356(1740):1193-1211.

CURRICULUM VITAE

Jméno: Ing. Petr Stančík
Datum narození: 29.4.1978
Státní občanství: Česká republika
Národnost: česká
Adresa: Nový Hrozenkov 751, 756 04
E-mail: petr.stancik@seznam.cz, petr.stancik@freescale.com

Vzdělání

- 2001-2004* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komuni-kačních technologií, doktorský studijní program Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika.
- 1996-2001* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, magisterský studijní program Elektronika a sdělovací technika.
- 1992-1996* SPŠ elektrotechnická v Rožnově pod Radhoštěm, studijní obor Elektronika a sdělovací technika.

Další zkušenosti

- 2001-2003* Pedagogické zkušenosti s výukou laboratorních a počítačových cvičení v rámci pedagogické praxe během doktorského studia.
- Zkušenosti s řešením technického projektu podporovaného Ministerstvem školství ČR na téma „Využití plošných světlocitlivých snímačů CCD pro měření ploch rovinných objektů“.
- Vedení Ročníkových projektů a diplomové práce.

Zaměstnání

- 2004–dosud* **Freescale Polovodiče ČR s.r.o.** Systémový aplikační inženýr

Jazykové znalosti

Angličtina - slovem i písmem (středně pokročilý)

ABSTRACT

Dissertation deals with analysis and design of optoelectronic and photogrammetric measuring systems. Specific design of optoelectronic contactless flat object area meters with analysis of attainable measurement accuracy is described. Next part is dedicated to stereophotogrammetry - principles of 3D reconstructions, methods of camera self-calibration and matching points in images are described. The analysis of attainable accuracy of monitored parameters is discussed too. Finally, the test program with implemented described routines is introduced. This test program enables practical application of stereophotogrammetric system for taking spatial coordinates of 3D objects.