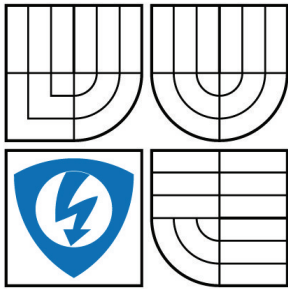


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

3D TRIANGULAČNÍ TECHNIKA REKONSTRUKCE OBJEKTŮ

3D TRIANGULATION TECHNIQUE FOR OBJECT RECONSTRUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

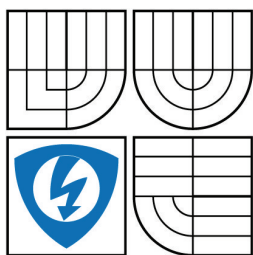
Bc. PETR POSPÍŠIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ILONA KALOVÁ, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Petr Pospíšil

ID: 88745

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

3D triangulační technika rekonstrukce objektů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte algoritmy pro automatickou detekci promítaného vzoru a ověřte je na snímcích pořízených na sestaveném měřicím triangulačním systému. Sestavte 3D model objektů podle znalostí získaných v rámci semestrálních prací. Posudťe omezení dané metody rekonstrukce 3D objektů obecně i vzhledem k použitému způsobu detekce vzoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

HLAVÁČ, V., ŠONKA, M. Počítačové vidění. Praha: Grada, 1992.

HAUßECKER, H. - GEIßLER, P. Handbook of Computer Vision and Applications. San Diego: Academic press, 1999.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 25.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Ilona Kalová, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

3D TRIANGULAČNÍ TECHNIKA REKONSTRUKCE OBJEKTŮ

Diplomová práce

Studijní obor: Kybernetika, automatizace a měření
Student: Bc. Petr Pospíšil
Vedoucí práce: Ing. Ilona Kalová, Ph.D.

Abstrakt :

Práce pojednává o 3D aktivní triangulační metodě rekonstrukce objektů. Byl sestaven měřicí triangulační systém. Poté byl navržen a následně také zrealizován způsob jeho automatické kalibrace. Dále byly navrženy algoritmy pro automatickou detekci promítaného vzoru. Algoritmy byly prezentovány na několika vzorových objektech. Výsledkem algoritmů jsou 3D modely jednotlivých objektů. Závěrem byly zhodnoceny dosažené výsledky a omezení navrženého systému.

Klíčová slova:

optické měření, rekonstrukce 3D objektů, 3D aktivní triangulační metoda, CCD, optika, triangulace.

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Control and Instrumentation

**3D TRIANGULATION TECHNIQUE FOR OBJECT
RECONSTRUCTION**

Diploma thesis

Specialization of study: Cybernetics, Control and Measurement
Student: Bc. Petr Pospíšil
Supervisor: Ing. Ilona Kalová, Ph.D.

Abstract :

My paper work deals with the 3D active triangular method of building reconstruction. First, there was a measuring triangular system created. Then the way of its automatic calibration was proposed and consequently also performed. Also algorithms for the automatic detection of the sample projected were proposed. Algorithms were presented with several sample buildings. The result of these algorithms are 3D models of individual buildings. In the end achieved results and restrictions of the system proposed were assessed.

Keywords:

optical measurement, reconstruction 3D objects, 3D active triangular method, CCD, optic, triangulation.

POSPÍŠIL, P. *3D triangulační technika rekonstrukce objektů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ilona Kalová, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma 3D triangulační technika rekonstrukce objektů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Iloně Kalové, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne:

.....

podpis autora

1. OBSAH

1. OBSAH	1
2. ÚVOD	3
3. PRINCIPY 3D SNÍMÁNÍ	4
3.1 Úvod.....	4
3.2 Stereoskopické snímání	4
3.3 Jednobarevné osvětlení předmětu	6
3.3.1 Technika světelného paprsku (2D triangulace)	7
3.3.2 Technika světelného vzoru (3D triangulace).....	7
3.4 Technika barevného kódu	9
3.5 Měřicí systémy s teodolitem	10
3.6 Fokusovací techniky	11
3.7 Podoba ze stínování	11
4. REALIZACE MĚŘICÍHO SYSTÉMU	12
4.1 Úvod.....	12
4.2 Volba druhu světelného vzoru	13
4.3 Volba zdroje světla	14
4.3.1 Vysoce svítivá LED	15
4.3.2 Diodové pole.....	15
4.3.3 Halogenová žárovka	15
4.4 Realizace projektoru	16
4.5 Volba a realizace mechanického posuvného systému	17
5. ALGORITMY PRO NALEZENÍ DAT VHODNÝCH PRO KALIBRACI	20
5.1 Úvod.....	20
5.2 Návrh metody pro automatickou kalibraci.....	20
5.3 Kroky kalibračního algoritmu	22
5.3.1 Segmentace kalibračních snímků	23
5.3.2 Prahování aktivní oblasti	24
5.3.3 Nalezení středů proužků v aktivní oblasti	25
5.3.4 Nalezení pomocných značek ve spodní pomocné oblasti.....	27

5.3.5 Sestavení balíku dat potřebných ke kalibraci	28
6. KALIBRACE MĚŘICÍHO SYSTÉMU A VYHODNOCENÍ CHYB.....	31
6.1 Úvod.....	31
6.2 Návrh transformační matice.....	31
6.3 Návrh rozšířené transformační matice	35
6.4 Výpočet kalibračních koeficientů	39
6.5 Redukce vlastních chyb metody kalibrace.....	40
6.6 Zhodnocení způsobů kalibrace.....	43
7. ALGORITMY PRO AUTOMATICKÉ MĚŘENÍ ROZMĚRŮ OBJEKTU	44
7.1 Úvod.....	44
7.2 Prahování a odstranění spodního pruhu	44
7.3 Separace středů	47
7.4 Vyhlazení snímků hledáním linearit	48
7.5 Odstranění čar příslušejících podložce	50
7.6 Trasování čar a výpočet prostorových souřadnic.....	51
8. MĚŘENÍ.....	54
8.1 Úvod.....	54
8.2 Výsledky měření	54
8.3 Zhodnocení výsledků měření.....	59
8.4 Technické podmínky a omezení	62
8.4.1 Závislost kvality rekonstrukce na materiálu	63
8.4.2 Vhodný tvar měřeného předmětu	66
8.5 Možnosti využití systému	68
9. ZÁVĚR.....	70
10. SEZNAM LITERATURY.....	71
10.1 Knihy.....	71
10.2 Odborné články a práce.....	71
10.3 Internetové stránky.....	71
11. PŘÍLOHY.....	72
12. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	73

2. ÚVOD

Tato práce je zaměřena na téma „3D triangulační technika rekonstrukce objektů“. Obecně lze říci, že v současné době je výzkum týkající se 3D velice perspektivní a rychle se rozvíjející oblastí vědy. Optické metody měření 3D povrchů patří k nevhodnějším metodám, jsou totiž velice přesné, rychlé a hlavně nekontaktní, což je předurčuje k využití v mnoha průmyslových aplikacích.

V práci je uveden přehled používaných optických metod rekonstrukce trojrozměrných objektů (Kapitola 3). Je zde především rozvedena metoda fotogrammetrické rekonstrukce objektu s použitím světelného vzoru a CCD kamery (3D aktivní triangulační metoda). Vzhledem k tomu, že popis všech principů by přesahoval rozsah této práce, jsou zde upřednostněny pouze ty, které autor považuje za nejdůležitější.

Dále je v práci popsán měřicí systém navržený a sestrojený pro danou metodu složený z CCD kamery, projektoru a přídatných mechanických součástí (Kapitola 4). Jsou popsány algoritmy pro automatické nalezení dat vhodných ke kalibraci tohoto sestrojeného systému (Kapitola 5), samotná kalibrace systému a vyhodnocení chyb kalibrace (Kapitola 6).

V následujícím oddílu jsou popsány, a na jednom vzorovém předmětu prakticky znázorněny algoritmy pro automatické měření rozměrů objektů (Kapitola 7). Nakonec jsou v práci prezentovány výsledky měření navrženého systému, technické podmínky a omezení a možnosti jeho využití v praktických aplikacích (Kapitola 8).

3. PRINCIPY 3D SNÍMÁNÍ

3.1 ÚVOD

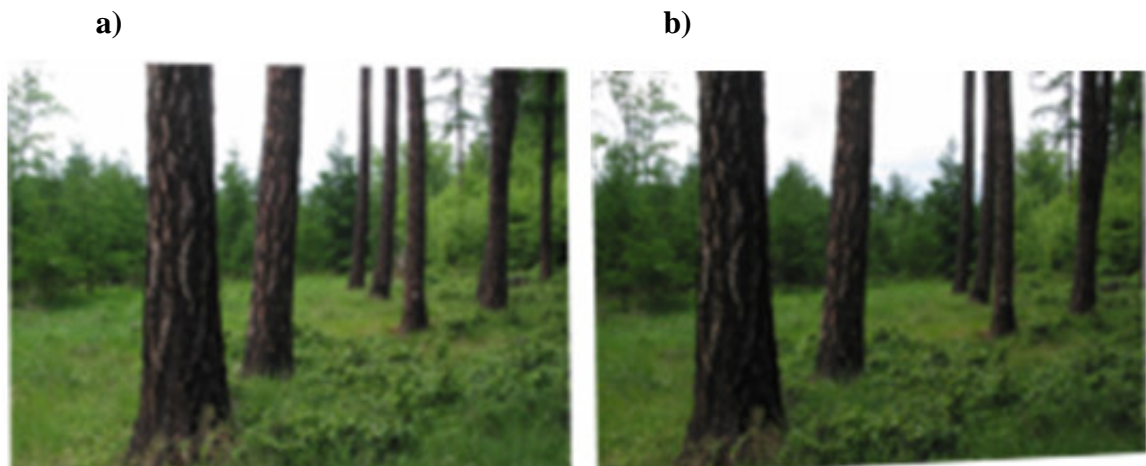
Abychom dokázali přesně identifikovat skutečný tvar snímaného předmětu, musíme mít k dispozici kromě nasnímaného 2D obrázku ještě další informaci, která nám poslouží k určení třetí z-ové souřadnice. K tomu slouží tři základní principy, pomocí kterých se tato informace získá. Jsou to metody triangulace, optická interferometrie a měření doby letu modulovaného světla. Jelikož popis těchto metod by překračoval požadovaný rozsah této práce, uvedu pouze některé z nich, výhradně však metody založené na principu triangulace. Triangulační metody se dělí na dvě základní skupiny, podle nutnosti dodatečného osvětlení objektu. Jsou to metody pasivní, které dodatečné osvětlení nepotřebují, a metody aktivní, u kterých se dodatečného a často velice specifického osvětlení využívá.

Dále jsou popsány následující metody: Stereoskopické snímání (Kapitola 3.2), jednobarevné osvětlení předmětu (Kapitola 3.3), vícebarevné osvětlení předmětu (Kapitola 3.4), měřicí systémy s teodolitem (Kapitola 3.5), fokusovací techniky (Kapitola 3.6) a podoba ze stínování (Kapitola 3.7).

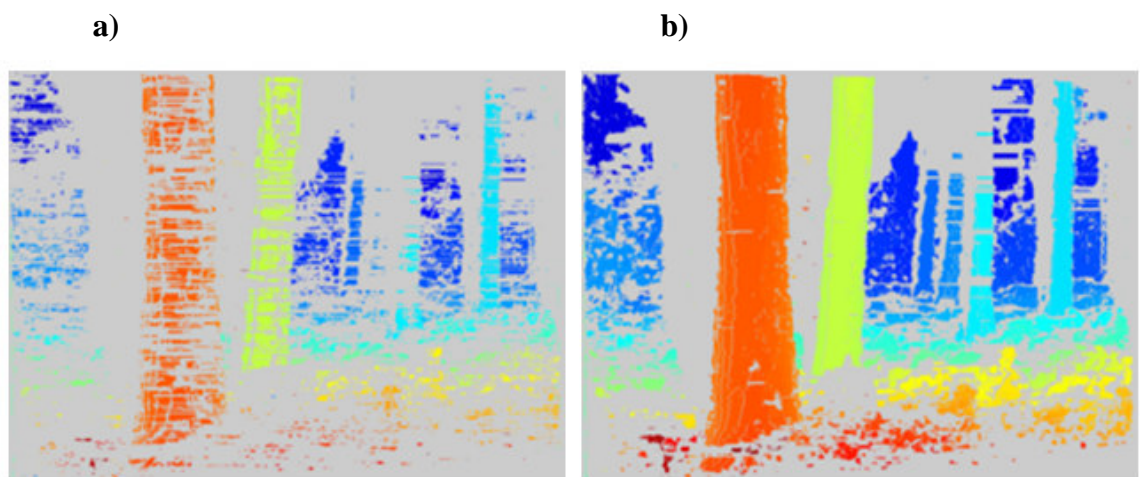
3.2 STEREOSKOPICKÉ SNÍMÁNÍ

První metodou používanou pro rekonstrukce 3D objektů je stereoskopické snímání. Tato metoda je speciální případ pasivní triangulace. Pro použití této metody je zapotřebí buď minimálně dvou nezávislých snímacích zařízení, nebo je s pomocí jednoho snímacího zařízení scéna nasníмана z více míst. Vzdálenost míst, ze kterých je obraz pořízen, činí přibližně desítky centimetrů. Tato vzdálenost je odvozena od vzdálenosti lidských očí, aby byl nasnímaný objekt pro člověka co nejrealnějším. Každé oko vytváří na sítnici vlastní obraz, a vzniknou tak dva stereoskopické snímky. Také na našich snímačích je výsledkem snímání několik 2D obrázků, které je možno dále zpracovávat a zpětně z nich rekonstruovat snímanou 3D scénu. Nezávislá se ovšem kompletní 3D scéna, ale jen její viditelná část. Příklad

stereoskopického vidění znázorňují následující obrázky. Nejprve je předmět nasnímán ze dvou nepříliš vzdálených míst (obrázky 3.1). Po nasnímání je provedeno rozpoznání (obrázky 3.2). [9]



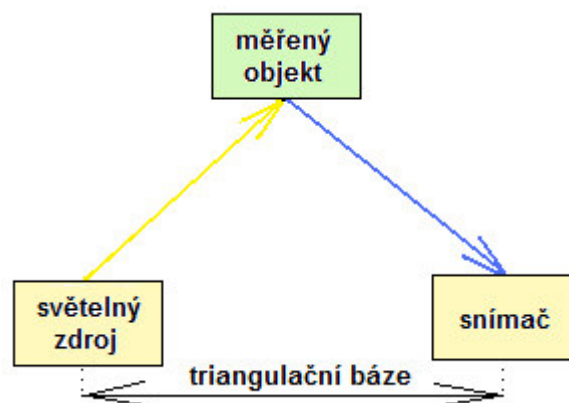
Obr. 3.1 a),b) - Stereoskopické snímání ze dvou míst



Obr. 3.2 a) - Stabilní rozpoznávání , b) - Hloubkové rozpoznávání

3.3 JEDNOBAREVNÉ OSVĚTLENÍ PŘEDMĚTU

Další způsob rekonstrukce je založený na jednobarevném osvětlení předmětu (Binary Illumination). Jedná se o metodu aktivní. Při použití této techniky nasvěcujeme na zkoumaný předmět světelným zdrojem předem definovaný vzor, který poté snímáme CCD snímačem z jiného úhlu. Spojnice od zdroje k CCD kameře se nazývá triangulační báze a celá soustava, zdroj světla – měřený objekt – kamera, se pak nazývá triangulační trojúhelník.

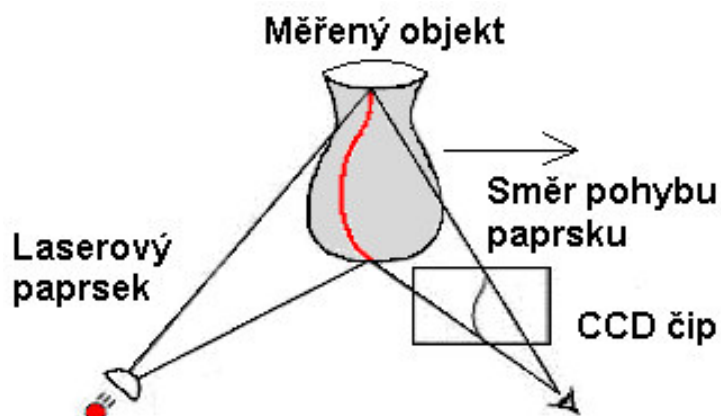


Obr. 3.3 - Triangulační trojúhelník

K označení povrchu zkoumaného předmětu se používají různé světelné vzory. Nejjednodušší způsob je označení světelným bodem, pak se jedná o jednorozměrnou triangulaci (1D triangulace). Druhý ze způsobů je označení světelným pruhem, nazývá se dvourozměrná triangulace (2D triangulace). Třetím a nejsložitějším ze způsobů označení je strukturovaný světelný svazek neboli trojrozměrná triangulace (3D triangulace). Při použití strukturovaného světelného svazku je objekt změřen najednou, což je jednak rychlejší než v předchozích dvou případech, ale také vhodnější pro pohybující se předměty. U 1D a 2D triangulace se musí totiž měření předmětu provádět postupně. Zásadní nevýhodou triangulačních metod je, že promítaný vzor musí být z prostoru kamery viditelný. Nedají se tedy určit místa, která nevidíme kamerou ani která nejsou osvětlena světlem. Na těchto místech potom informaci o z-ové souřadnici nejsme schopni určit.

3.3.1 Technika světelného paprsku (2D triangulace)

Tato metoda spadá do kategorie jednobarevného nasvícení předmětu a je založená na vlastnostech laserového paprsku, který je zde nejčastěji použit jako zdroj světla. Laserovým paprskem osvětlujeme postupně celý měřený předmět. Kvalita zdigitalizovaného tělesa je dána hustotou, s jakou laserový paprsek pokryl plochu reálného tělesa. Výstupem je soubor dat o polygonech, definujících geometrii povrchu tělesa. Jako přijímací zařízení se využívá CCD čipů. Výhodou tohoto způsobu detekce 3D objektů je jeho vysoká přesnost.

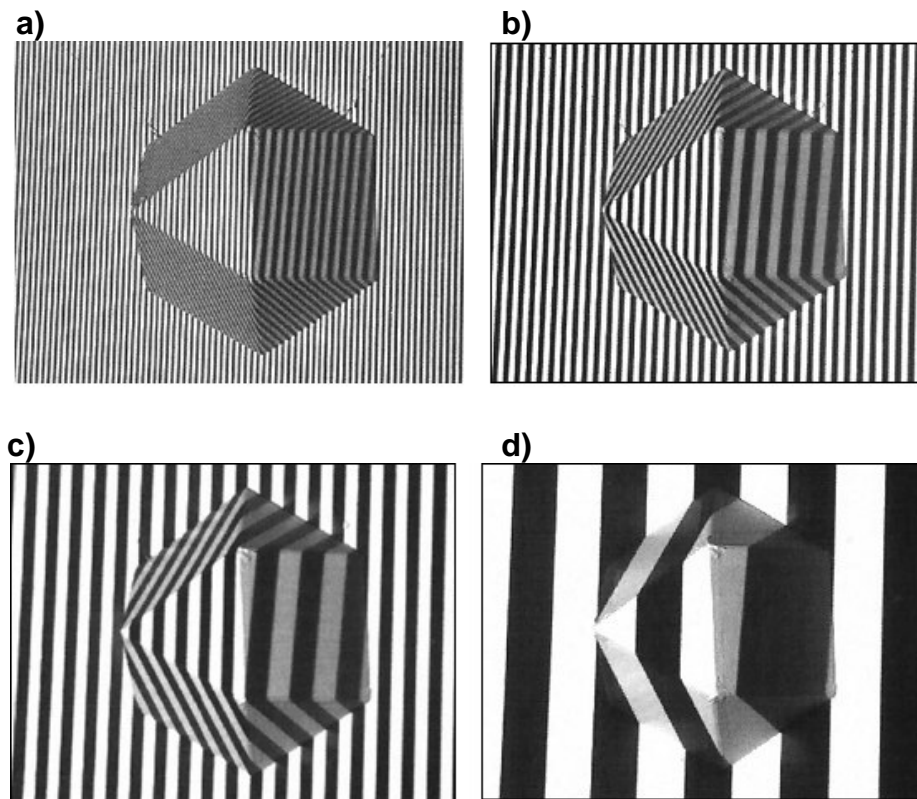


Obr. 3.4 - Princip trojrozměrné rekonstrukce

3.3.2 Technika světelného vzoru (3D triangulace)

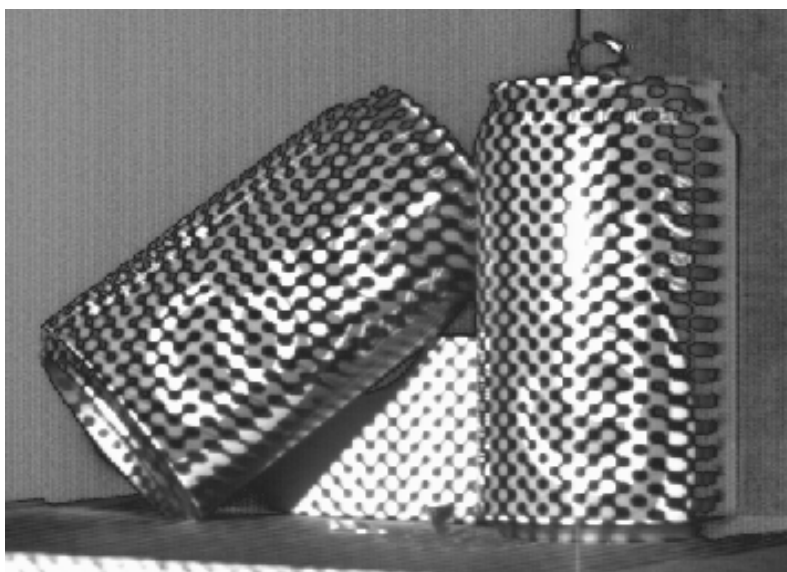
Pro tuto práci je zásadní právě technika světelného vzoru. Při této technice se na předmět promítá předem definovaný světelný vzor, který nám poslouží k získání informace o z -ové souřadnici. Promítaný vzor neboli mřížka může obsahovat různé pomocné značky nebo také pomocný kód, sloužící k pozdější jednodušší identifikaci jednotlivých polí mřížky. Předmět původně pravidelnou mřížku deformuje, a tak umožňuje z deformace vyčíst hodnotu z -ové souřadnice.

Přesnost detekce závisí nejen na přesnosti snímané kamery, ale také na hustotě a kontrastu promítané mřížky. Na obrázcích 3.5 je tato závislost zřejmá. Zatímco na obrázku a) je hustota i přesnost vysoká, na obrázku d) už bychom tvar předmětu určovali jen velice přibližně. [3]

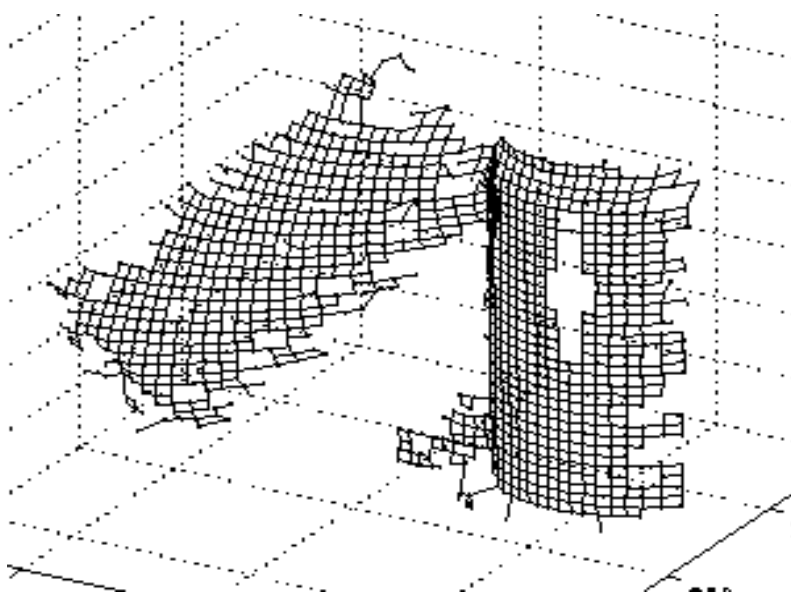


Obr. 3.5 a),b),c),d) - Závislost přesnosti na hustotě mřížky

Je mnoho způsobů, jak může promítaná mřížka vypadat. Jedním ze způsobů jsou výše uvedené proužky, dále to mohou být nejrůznější obrazce od čtverců, kosočtverců až po velmi složité tvary. Pro volbu typu mřížky je zásadní co nejvyšší jednoznačnost, aby bylo možno v každém bodě přesně určit, kde se právě nacházíme. Výhodou techniky světelného vzoru je nízká cena potřebného zařízení, která je ovšem na úkor rozlišovací schopnosti. Na obrázcích 3.6. a 3.7. je uveden příklad rekonstrukce předmětu pomocí mřížkové struktury. [3]



Obr. 3.6 - Předmět nasvícený mřížkovou strukturou

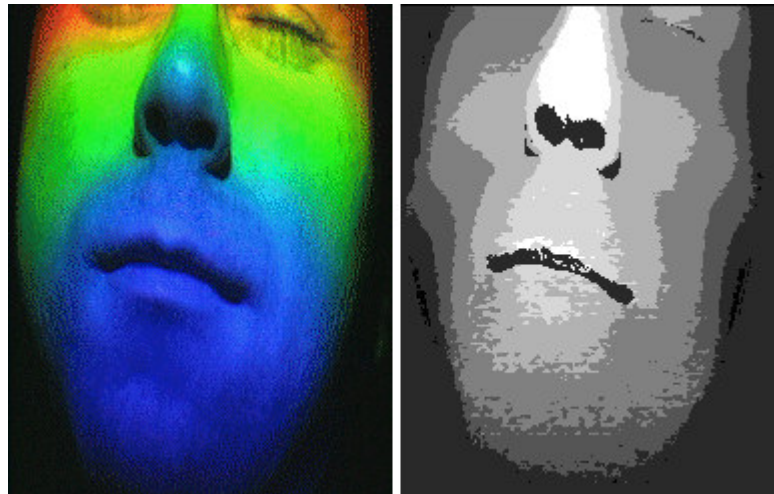


Obr. 3.7 - Rekonstrukce nasvíceného předmětu

3.4 TECHNIKA BAREVNÉHO KÓDU

Další z metod používaných pro rekonstrukci 3D objektů je metoda vícebarevného osvětlení předmětu, nazývaná taktéž technika barevného kódu. Jedná se o metodu aktivní. Předmět je zde nasvícen přesně definovaným spojitým barevným přechodem, takzvanou duhou. Strany předmětu kolmé ke zdroji osvětlení

mají světlejší barvu než strany odkloněné. Tedy čím více je stěna odkloněna od kolmé roviny, tím tmavší odstín odráží. Pro tento způsob rekonstrukce je nutné použít speciální projektor, který je schopný takto nasvítit požadovaný předmět, a také vhodnou snímací kameru. Mezi výhody této metody patří schopnost výpočtu tvaru 3D modelu v reálném čase, zásadní nevýhodou je ovšem přesnost, neboť jsme schopni určit pouze orientační tvar předmětu. Příklad rekonstrukce lidské tváře technikou barevného kódu je uveden na obrázku 3.8. [10]



Obr. 3.8 - Rekonstrukce předmětu technikou barevného kódu

3.5 MĚŘICÍ SYSTÉMY S TEODOLITEM

Další z možností rekonstrukce 3D objektů je použití měřicího systému s teodolitem. Tento systém je vůbec nejpřesnějším triangulačním systémem s relativní chybou menší než pět miliontin procenta. K měření se využívá minimálně dvou teodolitů, které zaostřují měřený předmět. Měření trvá dlouhou dobu a výsledné souřadnice jsou určeny z měřených úhlů a ze známých umístění teodolitů. Tento způsob není díky dlouhé době měření vhodný pro pohybující se předměty, je však díky vysoké přesnosti hojně využíván například ve stavebnictví. [6]

3.6 FOKUSOVACÍ TECHNIKY

Tyto techniky se dělí na konfokální mikroskopii, kontrolované fokusování a metody rozfokusování. U všech těchto technik je zásadní hloubka ostrosti a průměr kroužku vzniklého difrakcí v ohniskové rovině. U technik založených na konfokální mikroskopii se využívá dvojitého prostorového filtrování detekovaného objektu i osvětlení do ohniskové roviny pomocí malého otvoru. Skenování se provede ve všech třech osách zvlášť a z naměřených hodnot je možno zpětně zrekonstruovat měřený 3D objekt. U metody kontrolovaného fokusování se přenášejí profily povrchu $Z(x,y)$ skenováním roviny x,y s pevnou kontrolou Z . U metody rozfokusování je vzdálenost určena z průměru, nebo z intenzity kroužku. [6]

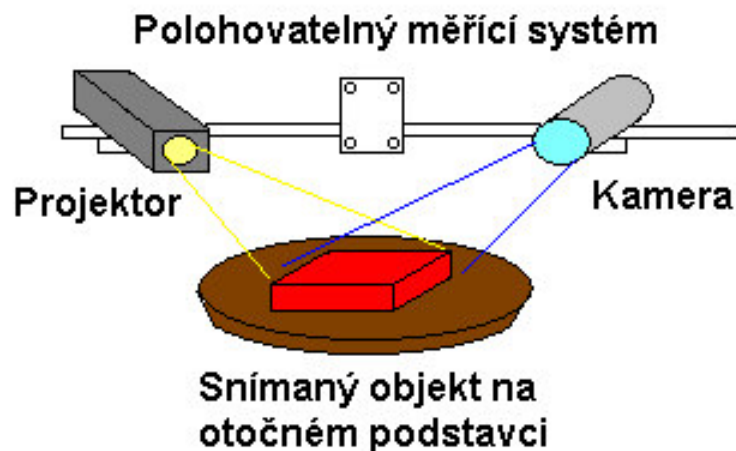
3.7 PODOBA ZE STÍNOVÁNÍ

Poslední zmíněnou technikou je technika nazývaná “podoba ze stínování“. U technik tohoto typu se určují normály povrchových elementů z ozáření, stínů a odlesků na obraze. Pro identifikaci je nutné znát přesnou polohu kamery a zdrojů světla. Z normál jsou poté vypočteny tvary měřeného 3D objektu. [6]

4. REALIZACE MĚŘICÍHO SYSTÉMU

4.1 ÚVOD

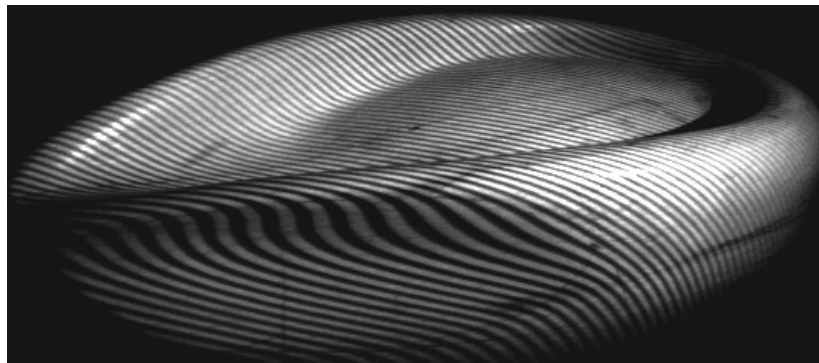
V rámci této práce byl navržen měřicí systém určený pro identifikaci 3D objektů. Systém je sestaven z kamery, diaprojektoru a úchytného polohovacího mechanismu. Na počátku práce byl k dispozici projektor bez světelného zdroje a bez promítaného vzoru, kamera a PC. Pro zadaný způsob triangulace byl navržen druh světelného vzoru v projektoru (Kapitola 4.2). Následně byla provedena volba zdroje světla v projektoru (Kapitola 4.3) a vlastní realizace projektoru (Kapitola 4.4). Poté byl navržen a realizován mechanický posuvný systém, sloužící pro uchycení kamery a projektoru k polohovatelnému stojanu dostupnému v laboratoři UAMT (Kapitola 4.5). Všechny dále popsané součásti tvoří výsledný měřicí systém.



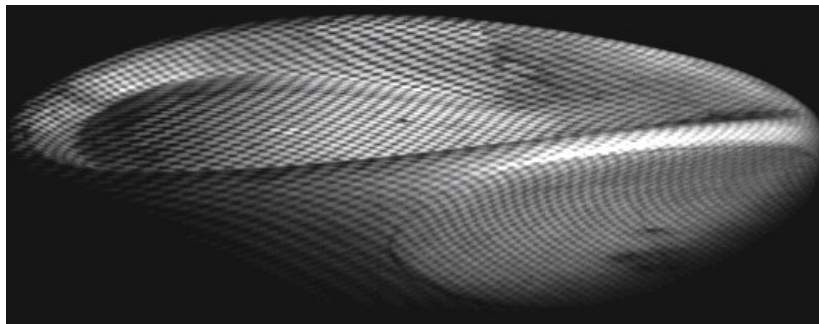
Obr. 4.1 - Schéma pracoviště

4.2 VOLBA DRUHU SVĚTELNÉHO VZORU

U volby druhu světelného vzoru je rozhodující, aby předmět nasvícený tímto zdrojem bylo možné co nejlépe zpětně identifikovat. Vzor tedy musí být dostatečně složitý, aby pokryl co nejlépe povrch předmětu, ale také dostatečně jednoznačný, aby bylo možné předmět zpětně identifikovat. Složitost promítané textury také přímo souvisí s rozlišením použité kamery a především s tím, k jakému účelu bude projektor použit. Nejběžnějším druhem textury je binární textura, složená z rovnoběžných proužků definované šířky s konstantní vzdáleností proužků. Dalším používaným druhem textury jsou různé varianty, složené ze čtverců, popřípadě kosočtverců, definované velikosti.



Obr. 4.2 - Příklad předmětu nasvíceného proužkovou texturou



Obr. 4.3 - Příklad předmětu nasvíceného kosočtvercovou texturou

Pro lepší zpětnou identifikaci předmětu lze dále texturu doplnit pomocnými značkami. Tyto značky nám poté slouží k lepší orientaci na příslušném snímku, a tím

ke zmenšení pravděpodobnosti chyb, způsobených záměnou příslušného proužku za proužky v jeho okolí.

Návrh a realizace vlastního světelného vzoru:

Při realizaci měřicího systému bylo vyzkoušeno velké množství nejrůznějších proužkových a kosočtvercových textur. Poté bylo navrženo a následně vyzkoušeno mnoho vlastních návrhů proužků, doplněných o orientační značky, z nichž byl vybrán nejvhodnější návrh. Při návrhu textury vhodné pro navrhovaný měřicí systém bylo rozhodující předpokládané použití systému a také předpokládaný způsob kalibrace tohoto systému. Byla zvolena taková hustota textury, která jednak dostatečně pokryje předpokládanou oblast použití, a která bude také vyhovovat předpokládanému způsobu kalibrace a rozlišení použité CCD kamery. U výsledného návrhu je použito horizontálních proužků s poměrem průsvitné bílé ku černému pozadí 2:3 a pěti pomocnými vertikálními čarami, kde je každý pátý proužek označen bílou zesílenou značkou. Pro účely automatické kalibrace je dále v návrhu diapozitivu použita plná bílá svislá čára. Důvody jejího použití budou podrobněji popsány v kapitole č. 5. Takto vytvořený návrh byl poté vytištěn na fólii a zasazen do rámečku diapozitivu. Výsledný návrh je uveden na obrázku 5.1.

4.3 VOLBA ZDROJE SVĚTLA

Základní součástí projektoru je zdroj světla. Zdroj světla musí být navržen tak, aby byl schopen nasvítit předmět požadované velikosti s dostatečnou intenzitou a ostrostí promítaného vzoru. Promítaný vzor je vsunut mezi zdroj světla a snímáný předmět, což výrazně snižuje intenzitu světla dopadajícího na předmět. Intenzitu také výrazně snižuje objektiv vložený mezi promítaný vzor a předmět. Pro zvýšení intenzity lze u některých zdrojů světla použít obvod se zábleskovým zařízením. Tento obvod umožňuje přerušovaně spínat zdroj světla jen na dobu, která je pro expozici postačující. Takto lze zdroj krátkodobě přebudit, a zvýšit tím jeho intenzitu světla. Obvod se zábleskovým zařízením lze ovšem použít pouze u zdrojů světla s rychlým náběhem, vhodným pro impulzní režim. Při návrhu světelného zdroje bylo postupováno tak, že bylo nejdříve prakticky odzkoušeno více zdrojů a následně zvoleno nejvýhodnější řešení.

4.3.1 Vysoce svítivá LED

Prvním z navrhovaných zdrojů světla byla vysoce svítivá LED dioda s vlastní optikou. Dioda měla výkon 3W a vyznačovala se velmi dobrými světelnými vlastnostmi. Světlo vržené diodou mělo výraznou bílou barvu s rovnoměrně rozloženou intenzitou. Problém nastal při umístění do projektoru. Dioda s tímto výkonem nebyla schopna přes promítaný vzor a objektiv nasvítit předmět s intenzitou postačující pro použitou snímací kameru. U tohoto zdroje nebylo možno použít obvodu se zábleskovým zařízením, neboť tento zdroj světla přebudit nelze, není to technicky možné.

4.3.2 Diodové pole

Druhým navrženým způsobem bylo diodové pole. Pole obsahovalo padesát červených LED diod uspořádaných do kruhového tvaru. Tento zdroj světla se vyznačoval červenou barvou a také velmi dobrým rozložením intenzity světla. Intenzita světla ovšem také nebyla po zabudování do projektoru dostačující pro použitou snímací kameru. U tohoto zdroje ovšem lze použít obvod se zábleskovým zařízením, neboť klasická dioda se může krátkodobě přebudit. Zábleskové zařízení bylo řízeno signálem FLASH, který je přímo pro tento účel navržen. Do kamery byl nahrán program, pomocí kterého byl signál FLASH vyveden na příslušný PIN výstupu kamery. Ovšem ani při krátkodobém přebuzení diodového pole nebyla intenzita světla dostatečná pro navrženou snímací kameru.

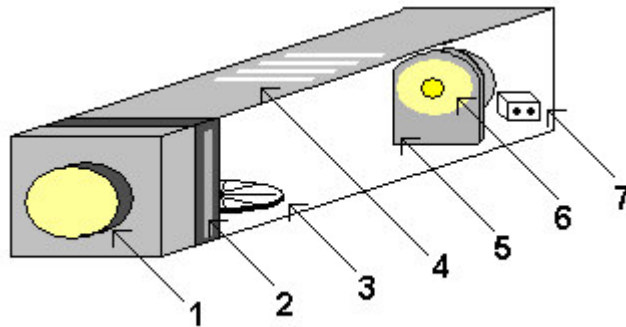
4.3.3 Halogenová žárovka

Třetím navrženým řešením bylo použití halogenové žárovky o výkonu 35W. Halogenová žárovka se vyznačovala bílou barvou s nerovnoměrným rozložením intenzity světla a velkými tepelnými ztrátami. Světlo vržené tímto zdrojem mělo díky rastrovanému zrcadlovému reflektoru „zubaté“ kraje světelného kuželu a přesvícený střed. Tyto nedostatky však lze dostatečně eliminovat vhodným umístěním zdroje a projektoru, popřípadě vložením vhodného filtru mezi zdroj světla a promítaný vzor. Obvod se zábleskovým zařízením u tohoto zdroje světla použít nelze, protože náběh

světla je u žárovky příliš pomalý. Díky svému vysokému výkonu byla po umístění do projektoru intenzita světla dostatečná. Drobný problém nastal pouze s velkými tepelnými ztrátami zdroje při jeho dlouhodobém použití v projektoru. Vysoká teplota vedla k poškození diapozitivu s promítaným vzorem. Tento problém byl ovšem následně eliminován použitím ventilátoru, který byl umístěn pod diapozitiv tak, aby ho aktivně ochlazoval. Tento zdroj světla byl jako jediný schopen dostatečně nasvítit předmět, a proto byl použit do výsledného návrhu projektoru.

4.4 REALIZACE PROJEKTORU

Navržený projektor se skládá z pevného plechového obalu, halogenové žárovky, stojanu na halogenovou žárovku, diapozitivu s promítaným vzorem, ventilátoru, obvodů pro úpravu napětí pro ventilátor a vhodného objektivu. Halogenová žárovka byla kvůli vysokým tepelným ztrátám umístěna co nejdále od diapozitivu s promítaným vzorem. Žárovka byla umístěna do stojanu vyrobeného z hliníku, který zároveň sloužil jako pasivní chlazení. Stojan byl vyroben tak, aby se střed žárovky nacházel ve stejné ose jako střed otvoru pro objektiv. Materiál byl navržen s ohledem na vysokou teplotu žárovky při jejím dlouhodobějším použití. Byly vyzkoušeny dva typy objektivů s různou ohniskovou vzdáleností. Jeden byl vhodnější pro nasvícení celých předmětů najednou a druhý pro detaily. Vzhledem k použitému zdroji osvětlení s vysokými tepelnými ztrátami byl u návrhu projektoru kladen důraz především na chlazení. To bylo realizováno vhodným umístěním aktivního chlazení pod diapozitiv. Jako aktivní chlazení byl použit ventilátor od firmy GM Electronics o průměru 60 mm. Projektor byl dále doplněn obvodem pro usměrnění střídavého napětí na napětí stejnosměrné, potřebné k napájení ventilátoru.



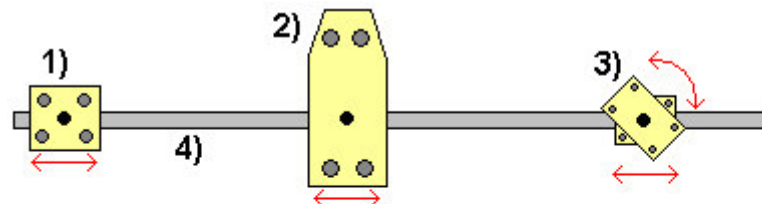
Obr. 4.4 - Schematické zapojení projektoru

1- objektiv, 2- diapozitiv, 3- aktivní chlazení, 4- pevný obal se žebrováním 5- hliníkový držák na žárovku, 6- halogenová žárovka, 7- ovládací obvody

4.5 VOLBA A REALIZACE MECHANICKÉHO POSUVNÉHO SYSTÉMU

Aby bylo možno realizovat zadanou triangulační metodu, bylo potřeba sestrojít úchytný systém, který bude pevně fixovat projektor a kameru k nastavitelnému stojanu, dostupnému v laboratoři UAMT, a také umožňovat pohyb těchto dvou hlavních prvků vůči sobě s minimálně dvěma stupni volnosti. Jako nosný prvek systému byla navržena mosazná tyč o průměru 20mm délky 600mm. Na tuto tyč byly sestrojeny tři části systému. První část slouží k pevnému uchycení projektoru, druhá část k uchycení kamery a třetí k uchycení celého systému na nastavitelný stojan. Všechny tři části byly vyrobeny ze silonu, který je výhodný pro své vhodné mechanické vlastnosti. Tento materiál je velice tvrdý, stabilní a je také snadno obrobitelný. Pro požadovanou metodu bylo potřeba, aby kamera a projektor byly vůči sobě pohyblivé v rozsahu minimálně dvou stupňů volnosti. První stupeň je zajištěn volným pohybem držáků po nosné tyči a druhý je zajištěn natáčecím mechanismem umístěným na držáku pro kameru. Tento mechanismus umožňuje kromě pohybu kamery po tyči také její volné natáčení v horizontální rovině o úhel 0-360°, což splňuje požadavek dvou stupňů volnosti, a tedy potřebnou polohovatelnost obou prvků vůči sobě. Veškeré volně polohovatelné části systému lze jednoduše

dotahovat prostřednictvím křídlových matic, které nevyžadují žádné přídatné nářadí, a zrychlují tak práci se systémem.



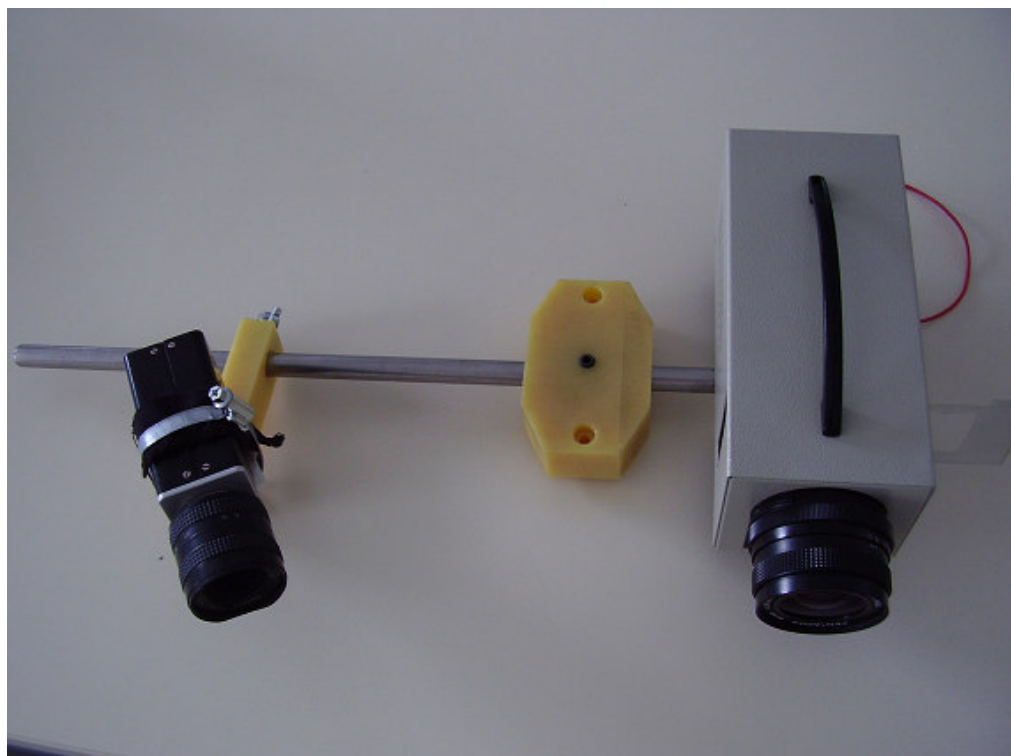
1) Držák na projektor

2) Ukotvení do polohovatelného stojanu laboratoře UAMT

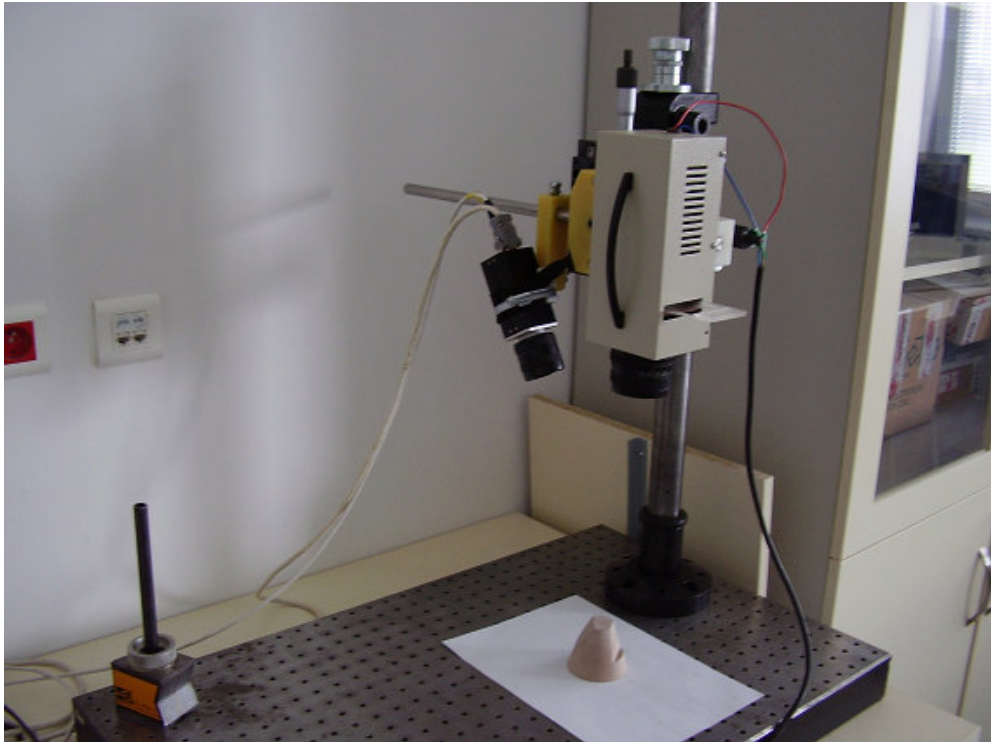
3) Otočný držák na kameru

4) Nosná tyč

Obr. 4.5 - Schéma mechanického polohovacího systému



Obr. 4.6 - Sestrojený měřicí systém



Obr. 4.7 - Pracoviště

5. ALGORITMY PRO NALEZENÍ DAT VHODNÝCH PRO KALIBRACI

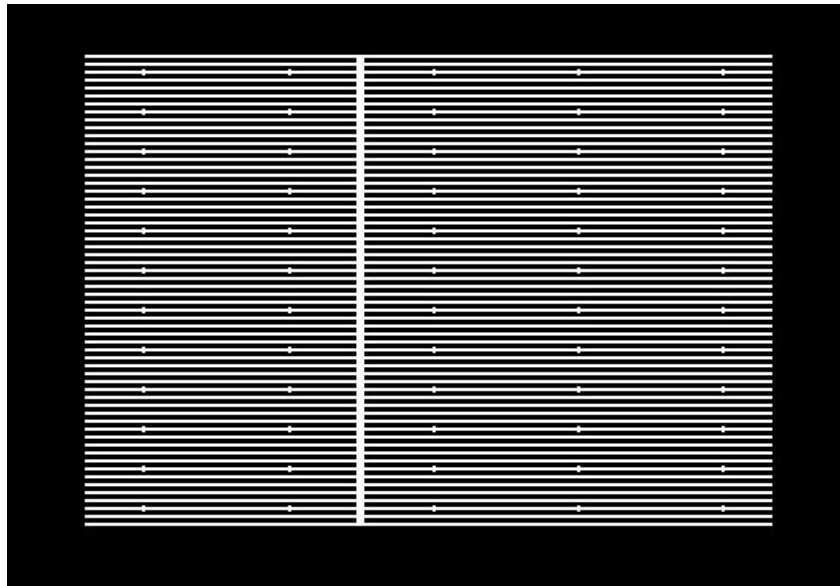
5.1 ÚVOD

Pro kalibraci měřicího systému nestačí znát pouze středy proužků v obraze. Je nutné znát také skutečné hodnoty souřadnic x , y , z , ve kterých se proužky ve skutečnosti nachází. Všechny tyto data je nutné znát pro každý proužek zvlášť a to v dostatečném množství, aby bylo dosaženo adekvátní přesnosti. Zjišťování všech těchto dat ručně by bylo velmi pracné. Byla tedy navržena metoda pro automatické zjištění těchto dat z kalibračních snímků. Metoda byla poté využita v praxi při tvorbě algoritmů pro nalezení všech dat potřebných pro automatickou kalibraci navrženého měřicího systému. Výsledný program má název „data_pro_kalibraci.m“ a jeho výsledkem je struktura dat, která se používá v dalších částech této práce.

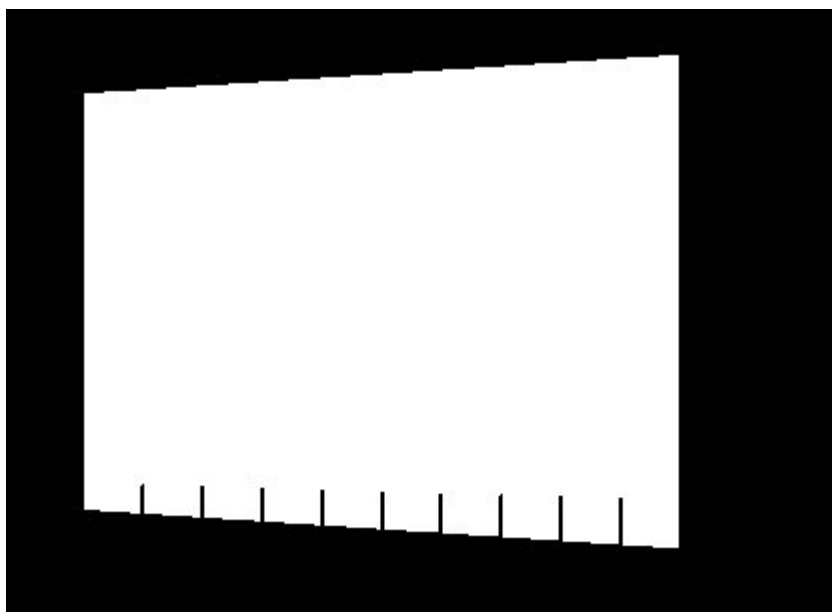
5.2 NÁVRH METODY PRO AUTOMATICKOU KALIBRACI

Bylo vymyšleno postupně několik způsobů, jak lze realizovat danou problematiku. Většina z nich se ovšem v praxi setkala s problémy, které nebylo možno v rámci této práce vyřešit. Výsledná metoda vychází z faktu, že pro kalibraci i výsledné rozpoznávání předmětů v obraze volíme polohu předmětu tak, že začátky a nejlépe i konce proužků pokrývajících měřený objekt nejsou deformované tvarem předmětu. Nachází se tedy na rovné podložce. V použité metodě se zvolil vhodný návrh diapozitivu a také kalibrační podložky, na kterou je přes navržený diapozitiv promítána proužková struktura. Diapozitiv je navržen tak, že začátky proužků v obraze protíná vynechanou bílou čarou. Tento diapozitiv je uveden na obrázku 5.1. Zároveň byla zhotovena kalibrační podložka černé barvy, na které je bílý kosodélník, který má v místech, ve kterých se na diapozitivu nacházejí vynechané pruhy, přesně definované značky. Podložka je uvedena na obrázku číslo 5.2. Zkosení tohoto kosodélníku je rovno geometrickému zkreslení osy „y“ vlivem snímání s jistou triangulační bází. Jde tedy o perspektivu pořízených snímků. Takto lze poté z polohy proužku mezi značkami určit skutečnou hodnotu „x“ proužku v obraze. Skutečnou

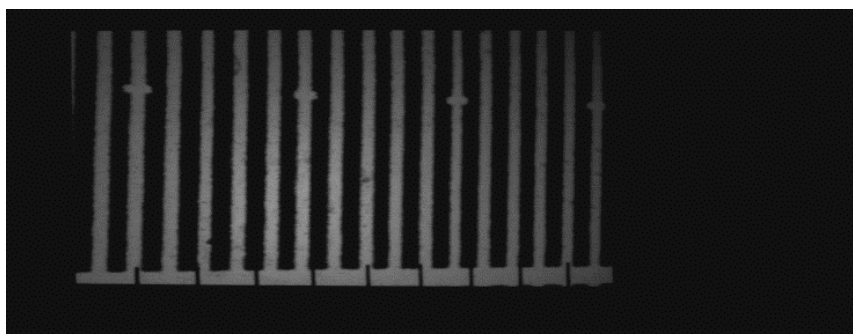
hodnotu „y“ lze určit poměrovou metodou ze začátků a konců čar viditelných na černobílém podkladu a rovnic přímek stěn navrženého kosodélníku. V této ose nedochází při kalibraci ke zkreslení, a tedy není nutné vkládat do této osy značky a lze vystačit pouze se začátkem a koncem proužku. Skutečnou hodnotu souřadnice „z“ není nutné zjišťovat algoritmy. Tato hodnota je daná polohou výškově nastavitelného stojanu při kalibraci a do programu se zadává ručně. Výsledný snímek s použitím navrženého diapozitivu a kalibrační podložky je uveden na obrázku číslo 5.3.



Obr. 5.1 - Navržený diapozitiv



Obr. 5.2 - Navržená kalibrační podložka



Obr. 5.3 - Výsledný kalibrační snímek

5.3 KROKY KALIBRAČNÍHO ALGORITMU

Při návrhu kalibračního algoritmu jsem vyšel z několika faktů. Promítaný světelný vzor je lineární a při zvolené metodě vytvoří na kalibrační podložce obdélníkový útvar. Okolí tohoto útvaru má díky navržené kalibrační podložce a vhodně zvolenému materiálu, ze kterého je vyrobena, souvislou černou barvu.

Algoritmus se dá rozdělit do několika kroků, které budou dále rozebrány:

- 1) Segmentace kalibračních snímků
- 2) Prahování aktivní oblasti
- 3) Nalezení středů aktivní oblasti

- 4) Nalezení pomocných značek ve spodní pomocné oblasti
- 5) Sestavení balíku dat potřebných ke kalibraci

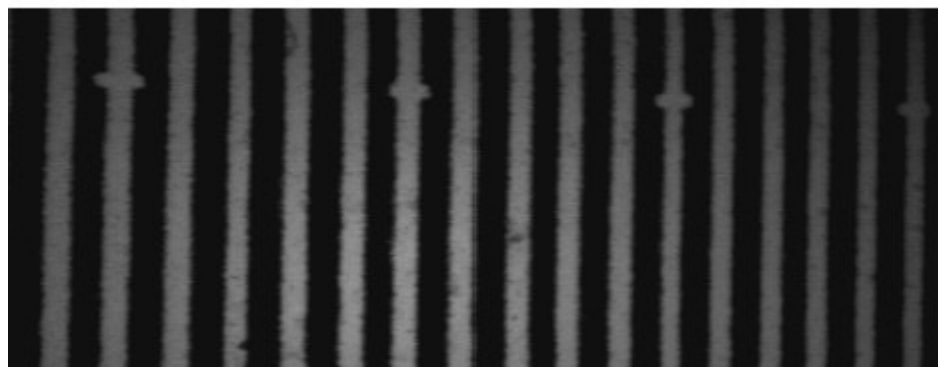
5.3.1 Segmentace kalibračních snímků

Jako první krok kalibračního algoritmu je potřeba oddělit jednotlivé segmenty na kalibračních snímcích. Kalibrační snímek se skládá ze tří základních částí:

- 1) Tmavě černé pozadí kalibrační podložky
- 2) Aktivní oblast kalibrovaných proužků
- 3) Spodní pomocná oblast s pomocnými značkami


Segmentace spočívá v oddělení těchto částí. Nejprve je z histogramu snímků vypočtena hodnota jasu odpovídající tmavému pozadí, které je poté postupně ze všech stran snímku odstraněno, přičemž počet odstraněných řádků, respektive sloupců je z důvodu pozdějších výpočtů zaznamenáván. Poté je oddělena spodní pomocná část snímku se značkami, sloužícími k nalezení x-ové souřadnice. K tomuto oddělení se využívá nadprůměrné světlosti řádků na snímku v místech, kde se nachází světlý kalibrační pruh. Výřez aktivní oblasti snímku je vyobrazen na obr. č. 5.4 a výřez spodní pomocné oblasti snímku na obr. č. 5.5.

vyřez aktivni oblasti snimku



Obr. 5.4 - Výřez aktivní oblasti snímku

pomocna oblast snímku



Obr. 5.5 - Spodní pomocná oblast snímku

5.3.2 Prahování aktivní oblasti

Jako další krok kalibračního algoritmu následuje nalezení středů proužků v aktivní oblasti. Jako výchozí objekt pro tento proces je použito výřezu aktivní oblasti, uvedeném na obrázku 5.4. Na takto provedeném výřezu je nejprve nutná segmentace jednotlivých proužků. Tato segmentace je provedena nejjednodušší metodou, a to prahováním. Byly naprogramovány a odzkoušeny tři metody prahování, a to prahování z histogramu, procentní prahování a prahování po částech.

Prahování z histogramu

Jednou z metod bylo nalezení prahu z tvaru histogramu. Při této metodě byl nalezen první vrchol v histogramu, tedy barva pozadí. Od této hodnoty byl histogram trasován na obě strany a celý vrchol byl vhodně odstraněn. Poté byl nalezen druhý vrchol histogramu, tedy jednotlivé pruhy. Z hodnot obou vrcholů lze vhodně poměrovou metodou spočítat hledanou hodnotu prahu. Tato metoda se dá ještě rozšířit v případě, že pozadí kalibrační podložky by se lišilo od pozadí snímku, k čemuž došlo při malé hodnotě clony na kameře. V tom případě lze vhodně odstranit z histogramu nejprve pozadí kalibrační podložky, a poté pozadí snímku, a tedy práh stanovit z druhého a třetího vrcholu histogramu.

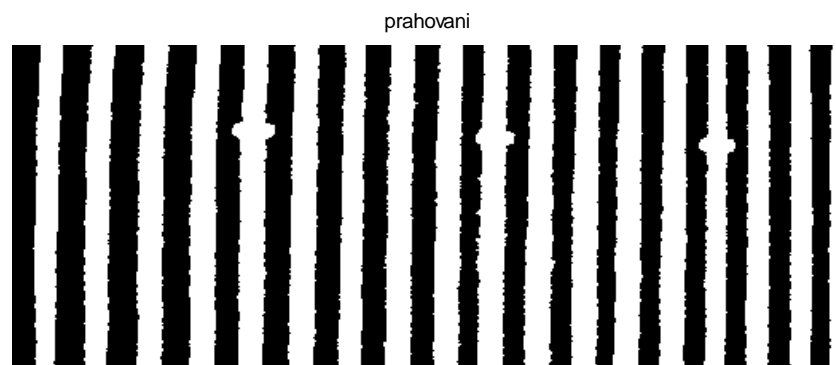
Procentní prahování

Druhou použitou a odzkoušenou metodou prahování bylo prahování procentní. Tato metoda je zde obzvláště výhodná, jelikož již před samotným procesem prahování víme z návrhu diapozitivu, že bílé pruhy zabírají 40% oblasti snímku a černé pozadí zabírá 60% snímku. Lze tedy jednoduše sumací hodnot histogramu po dosažení 40% nastavit práh na tuto hodnotu histogramu.

Prahování po částech

Třetí metodou prahování, která byla vyzkoušena, bylo prahování po částech. Princip této metody spočívá v tom, že se prahovaný celek rozdělí na menší části, pro které se nejprve určí jednotlivé subprahy. Výsledný prah se poté dá určit nejrůznějšími variacemi jednotlivých okolních subprahů.

Ve výsledném programu pro nalezení dat vhodných ke kalibraci byla použita metoda procentního prahování, výsledek této metody je uveden na obr. 5.6. Metody prahování po částech bylo využito při vytváření algoritmů pro automatické měření objektů, které budou blíže popsány v kapitole č. 7.



Obr. 5.6 - Výsledek prahování

5.3.3 Nalezení středů proužků v aktivní oblasti

Dalším úkolem bylo nalezení středů čar ve vyprahovaném obrazu. Byly zrealizovány a odzkoušeny dva způsoby nalezení středů čar. Prvním způsobem bylo nalezení středů ztenčováním. Druhým způsobem pak bylo využití linearit světelného vzoru.

Nalezení středů čar ztenčováním

Pro nalezení středů čar ztenčováním jsem použil kombinaci metody Stover-Iverson a metody Sekvenční ztenčování sadou strukturálních elementů. Jedná se o postupné odmazávání jednotlivých pixelů podle toho, zda vyhovují, nebo

nevyhovují příslušným maskám. Použité masky jsou uvedeny na obrázku 5.7. U hodnot označených „X“ na konkrétní hodnotě nezáleží.

X	0	0	0	0	X	X	1	X	X	1	X
1	P	0	0	P	1	0	P	1	1	P	0
X	1	X	X	1	X	0	0	X	X	0	0
0	0	0	1	1	1	1	X	0	0	X	1
X	P	X	X	P	X	1	P	0	0	P	1
1	1	1	0	0	0	1	X	0	0	X	1

Obr. 5.7 - Použité mazací masky

Takto získaný obrázek obsahoval ještě mnoho vad. Na odstranění těchto vad bylo použito dalších maskových operací. Jednalo se o odstranění rozeklanosti skeletu, spojování přetržených částí proužků a prodloužení čar. Princip těchto operací je stejný jako u ztenčování, jenom každá operace používá jinou sadu příslušných masek.

Využití lineariry světelného vzoru

V této metodě bude využíváno lineariry světelného vzoru. Z principu převodu 2D obrazových souřadnic na 3D skutečné souřadnice vyplývá zavedení určitého omezení. Toto omezení je v našem případě právě linearita. Jako linearita byla zvolena proužková struktura stejnoměrně od sebe vzdálených proužků s pomocnými značkami.

Právě této vlastnosti se dá efektivně využít v úloze nalezení středů proužků. Jelikož totiž víme, že jednotlivé nalezené objekty (proužky) jsou lineární, stačí procházet jednotlivé řádky z obou stran a z počátku a konce jednotlivých proužků lze efektivně určit jejich střed.

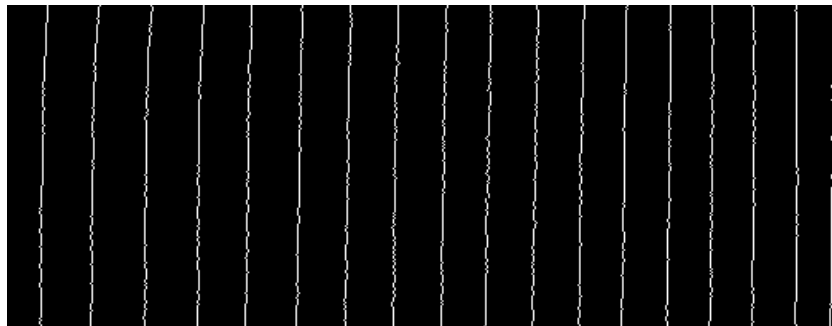
Praktická realizace nalezení středů proužků

Ve výsledném programu bylo použito metody využívající lineariry světelného vzoru. Jako výchozí matici pro úpravu využijeme matici objektů nalezenou příkazem „bwlabel“ v MATLABu. Tento příkaz vygeneruje matici o rozměrech shodných s původní velikostí obrázku, na který byl příkaz aplikován. Příkaz nalezne jednotlivé objekty v obrázku (v tomto případě proužky) a přidělí jim příslušné indexy od 1 do n .

Poté už lze pracovat s každým objektem zvlášť. Pro dosažení maximální rychlosti byl každý objekt „vyříznut“ z původního obrázku a zkopírován do pole o rozměrech přizpůsobených velikosti objektu. Poté již lze procházet postupně obrázek po řádcích nejprve zleva a poté zprava a aritmetickým průměrem lze jednoduše určit střed proužku. Zároveň lze jednoduše zjistit z maximální šířky proužku, zda-li se jedná o proužek označený značkou, či nikoli.

Takto nalezené středy jsou pro jednotlivé proužky zaznamenány do příslušných vektorů a nakonec z nich lze zpětně složit obrázek původního tvaru. Výsledek tohoto procesu je uveden na obrázku 5.8.

stredy aktivního pole



Obr. 5.8 - Nalezené středy aktivního pole

5.3.4 Nalezení pomocných značek ve spodní pomocné oblasti

Další z úloh pro úspěšnou automatickou kalibraci měřicího systému je nalezení pomocných značek ve spodní pomocné oblasti, značících skutečné hodnoty souřadnice „x“ ve snímku. Tato úloha byla řešena dvěma metodami, a to využitím hranových detektorů a prahováním po částech.

Využití hranových detektorů

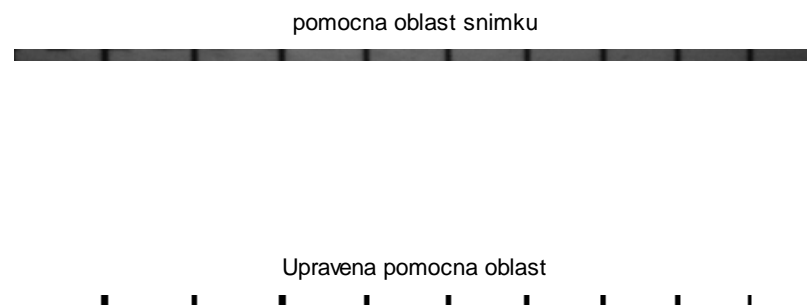
První metodou bylo využití hranových detektorů, jako je sobel, prewitt a nebo canny. Tyto detektory jsou v MATLABu implementovány do příkazu „edge“. Jako nejvhodnější hranový detektor pro danou problematiku byl shledán Cannyho detektor, ačkoli jako jediný neumí separovat nalezené hrany na vertikální

a horizontální, a výsledek musel být ještě doplněn příslušnou funkcí, mazající horizontální hrany.

Prahování po částech

Druhou metodou použitou pro tuto detekci bylo prahování po částech. Při této metodě je prahovaný obrázek rozdělen na části a práh je stanoven pro každou část zvlášť. Tento způsob je pro danou problematiku velice výhodný, jelikož může pomoci zmapovat nerovnoměrné nasvícení předmětu (kalibračních snímků) projektorem a pomoci při jeho případné softwarové kompenzaci.

Ve výsledném programu byla použita metoda prahování po částech. Takto vyprahovaná část snímku byla poté ještě upravena pomocným algoritmem a následně z ní byly odečteny souřadnice jednotlivých pomocných značek, které jsou následně použity pro určení skutečné hodnoty „x“ ve snímku. Výsledný upravený obrázek pomocné oblasti je uveden spolu s původní neupravenou pomocnou oblastí na obrázku 5.9.



Obr. 5.9 - Výsledek nalezení pomocných značek

5.3.5 Sestavení balíku dat potřebných ke kalibraci

Aby bylo možné provést automatickou kalibraci měřicího systému, je nutná znalost jistého balíku dat potřebného k výpočtu kalibračních koeficientů. Tento balík dat je jiný pro každý kalibrovaný proužek, a skládá se z:

- 1) Obrazových souřadnic u,v
- 2) Skutečných souřadnic x,y,z
- 3) Indexů jednotlivých proužků

Nalezení obrazových souřadnic u,v

Hledané obrazové souřadnice u,v odpovídají středům jednotlivých proužků v obraze. Hodnoty středů jednotlivých proužků jsou tedy trasovány podle souřadnice „ v “ s určitým krokem a jejich hodnoty jsou zapisovány do výsledného datového souboru. Velikost kroku je volitelný faktor. Větší krok urychluje běh algoritmu, naopak volbou menšího kroku je docíleno větší přesnosti. Ve výsledném programu byl použit krok 10 pixelů.

Nalezení skutečných souřadnic x,y,z

Skutečnou hodnotu souřadnice x lze získat z pomocných značek, jejichž nalezení je popsáno v kapitole 5.3.4. Algoritmus vychází z obrazových souřadnic u,v . Trasuje tyto souřadnice a každé dvojici bodů v obraze u,v přiřadí příslušnou skutečnou hodnotu x poměrovou metodou ze znalosti polohy značek, u kterých je souřadnice x pevně dána.

Skutečné hodnoty y algoritmus počítá poměrově z počátků a konců jednotlivých proužků na snímku. Pro „vymazání“ nepodstatných částí promítané struktury slouží vhodně navržená kalibrační podložka. Tyto hodnoty počátků a konců jsou na kalibrační podložce přesně dány a dají se stanovit z úhlu kosodélníku a vzdálenosti od počátku kalibrační podložky. Úhel kosodélníku odpovídá perspektivě snímku. Perspektiva je zapříčiněna úhlem kamery oproti úhlu projektoru a vychází z principu této triangulační metody.

Skutečné hodnoty „ z “ není nutné zjišťovat algoritmy. Jelikož je kalibrace prováděna na rovině, tyto hodnoty jsou konstantní pro jednotlivé kalibrační snímky a jsou dány už při pořízení jednotlivých kalibračních snímků.

Nalezení indexů jednotlivých proužků

Poslední hodnotou, a zároveň jedinou hodnotou v kalibračním procesu, která vyžaduje „lidskou inteligenci“, je index nalezených proužků. Každý pátý proužek v kalibračním snímku je označen značkou. Jeden z proužků je zvolen jako výchozí. Tento výchozí proužek je ovšem viditelný např. jen pro pár prvních snímků, a poté se vlivem perspektivy „ztratí“. (Viz Obr. 6.2. – pohyb kalibrační roviny ve snímku.) Na obsluhu kalibrace zůstává stanovit, kolikátý proužek v obraze odpovídá onomu výchozímu proužku. Obsluha tedy zhlédne kalibrační snímek, provede vizuální kontrolu výsledků jednotlivých částí algoritmu a vloží do programu pro každý snímek jednu hodnotu.

Výsledný balík dat je výstupem výše popsáných algoritmů pro nalezení dat vhodných pro kalibraci (soubor „*data_pro_kalibraci.m*“). Data jsou na konci algoritmu uložena do souboru „*Data.mat*“ a je s nimi následně pracováno. Celkem bylo zpracováno 12 kalibračních snímků. Pomocí nich bylo následně zkalibrováno 18 proužků.

6. KALIBRACE MĚŘICÍHO SYSTÉMU A VYHODNOCENÍ CHYB

6.1 ÚVOD

Kalibrací měřicího systému de facto nazýváme jeho matematický popis. Byl zvolen způsob kalibrace měřicího systému a tímto způsobem byl teoreticky popsán přepočít obrazových souřadnic u, v na prostorové souřadnice x, y, z (Kapitola 6.2). Tento způsob byl poté ještě rozšířen tak, aby počítal všechny požadované souřadnice v jednom kroku (Kapitola 6.3).

Následně byl popsán výpočet kalibračních koeficientů a vizuální kontrola správnosti těchto výpočtů obsluhou (Kapitola 6.4), redukce vlastních chyb metody kalibrace (Kapitola 6.5) a nakonec byl použitý způsob kalibrace zhodnocen (Kapitola 6.6).

6.2 NÁVRH TRANSFORMAČNÍ MATICE

Mezi hodnotami skutečných souřadnic v prostoru x, y, z a souřadnicemi na 2D snímku u, v existuje vztah určený transformační maticí \mathbf{T} . Pro každý proužek existuje jiná transformační matice \mathbf{T} . Úkolem kalibrace je nalezení této matice \mathbf{T} , která nám poté poslouží k nalezení souřadnic x, y, z pouze ze znalosti souřadnic u, v a identifikátoru proužku. K získání koeficientů transformační matice nám slouží maticový výpočet vycházející z teorie reprezentace roviny v prostoru.

$$\begin{pmatrix} wY \\ wZ \\ w \end{pmatrix} = T * \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Aby mohl být pro výpočet použit celý soubor bodů, byly matice rozšířeny na \mathbf{B} a \mathbf{X} . Toto rozšíření vychází z metody nejmenších čtverců, a poté lze vypočítat vektor transformačních souřadnic \mathbf{t} , který nám později poslouží k určení transformační matice \mathbf{T} .

$$B^* t = X \quad (6.2)$$

Maticový zápis lze schematicky rozepsat jako:

$$\begin{pmatrix} u1 & v1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u1 * y1 & -v1 * y1 \\ 0 & 0 & 0 & u1 & v1 & 1 & -u1 * z1 & -v1 * z1 \\ u2 & v2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u2 * y2 & -v2 * y2 \\ 0 & 0 & 0 & u2 & v2 & 1 & -u2 * z2 & -v2 * z2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} t11 \\ t12 \\ t13 \\ t21 \\ t22 \\ t23 \\ t31 \\ t32 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y1 \\ z1 \\ y2 \\ z2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

Každé dva řádky matice **B** a vektoru **X** představují jeden bod nalezený při kalibraci. Vektor transformačních souřadnic **t** poté vypočteme pomocí vztahu:

$$t = B^* * X \quad (6.4)$$

Kde B^* je pseudo-inverzní matice, kterou určíme jako:

$$B^* = [B^T * B]^{-1} * B^T \quad (6.5)$$

Výsledkem kalibrace bylo tedy nalezení kalibrační matice **T**, která definuje vztah mezi souřadnicemi odečtenými na 2D snímku a skutečnými souřadnicemi y,z v prostoru. Matici **T** utvoříme z koeficientů vektoru **t** takto:

$$T = \begin{pmatrix} t11 & t12 & t13 \\ t21 & t22 & t23 \\ t31 & t32 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

Kde lze poté zapsat rovnici pro přepočtení obrazových souřadnic u, v na prostorové souřadnice y, z :

$$\begin{pmatrix} wY \\ wZ \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t11 & t12 & t13 \\ t21 & t22 & t23 \\ t31 & t32 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

Po roznásobení matice dostaneme vztahy pro výpočet hodnot y a z .

$$y = \frac{t11 * u + t12 * v + t13}{t31 * u + t32 * v + 1} \quad (6.8)$$

$$z = \frac{t21 * u + t22 * v + t23}{t31 * u + t32 * v + 1} \quad (6.9)$$

Tato transformační matice určuje vztah pouze mezi hodnotami y a z a hodnotami souřadnic na snímku u a v . Souřadnice x se dá poté jednoduše dopočítat ze znalosti rovnice roviny v prostoru. Rovina v prostoru je dána vztahem:

$$a * x + b * y + c * z + d = 0 \quad (6.10)$$

Kde a, b, c jsou obecné koeficienty. Pro náš případ na posunutí d nezáleží, jde nám pouze o lineární závislost v prostoru mezi jednotlivými souřadnicemi. Můžeme si ho tedy zvolit. Kvůli pozdějšímu využití při maticovém počtu je výhodné zvolit $d = -1$ Pak platí:

$$a * x + b * y + c * z = 1 \quad (6.11)$$

Hodnota chybějící souřadnice x je tedy dána vztahem:

$$x = \frac{1 - b * y - c * z}{a} \quad (6.12)$$

Koeficienty **a**, **b**, **c** určíme opět metodou nejmenších čtverců z následné maticové rovnice:

$$H * M = 1 \quad (6.13)$$

Kde **H** značí matici tvořenou souřadnicemi bodů, které byly použity pro kalibraci, a **M** je vektor koeficientů **a**, **b**, **c**. Rovnici lze rozepsat jako:

$$\begin{pmatrix} x1 & y1 & z1 \\ x2 & y2 & z2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (6.14)$$

Kde každý řádek matice **H** představuje jeden kalibrační bod. Vektor **M** lze poté vypočítat jako:

$$M = H^* * 1 \quad (6.15)$$

Kde H^* je pseudo-inverzní matice, kterou určíme jako:

$$H^* = [H^T * H]^{-1} * H^T \quad (6.16)$$

Z hlediska přesnosti bylo výhodné navrhovat transformační matici pro výpočet hodnot y a z , jelikož tyto hodnoty se při kalibraci výrazně mění a hodnota x zůstává při kalibraci téměř konstantní. Tento poznatek vyplynul z praktické zkoušky všech kombinací souřadnic a následným vyhodnocením jejich chybových funkcí.

6.3 NÁVRH ROZŠÍŘENÉ TRANSFORMAČNÍ MATICE

V předešlé kapitole bylo popsáno nalezení transformační matice způsobem výpočtu vyčteným z literatury jako jistá modifikace metody nejmenších čtverců. Tento způsob byl ovšem založen na výpočtu pouze dvou ze třech počítaných souřadnic a je popsán v kapitole 6.2. Třetí souřadnice musela být tedy dopočítána ve druhém kroku výpočtu. Z důvodu zjednodušení výpočtu transformační matice jsem navrhl nový způsob tohoto výpočtu, který vypočítá všechny tři souřadnice již v prvním kroku výpočtu. Opět je potřeba nalézt transformační matici **T**. Nyní budeme pro její nalezení využívat všech tří souřadnic.

$$\begin{pmatrix} wx \\ wy \\ wz \\ w \end{pmatrix} = T * \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.17)$$

Aby mohl být pro výpočet použit celý soubor bodů, byly matice rozšířeny na **B** a **X**. Toto rozšíření vychází z metody nejmenších čtverců a lze poté vypočítat vektor transformačních souřadnic **t**, který nám později poslouží k určení transformační matice **T**.

$$B * t = X \quad (6.18)$$

Navržený maticový zápis lze schematicky rozepsat jako:

$$\begin{pmatrix} u1 & v1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u1*x1 & -v1*x1 \\ 0 & 0 & 0 & u1 & v1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u1*y1 & -v1*y1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u1 & v1 & 1 & -u1*z1 & -v1*z1 \\ u2 & v2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u2*x2 & -v2*x2 \\ 0 & 0 & 0 & u2 & v2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u2*y2 & -v2*y2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u2 & v2 & 1 & -u2*z2 & -v2*z2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} t11 \\ t12 \\ t13 \\ t21 \\ t22 \\ t23 \\ t31 \\ t32 \\ t33 \\ t41 \\ t42 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x1 \\ y1 \\ z1 \\ x2 \\ y2 \\ z2 \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} \quad (6.19)$$

Každé tři řádky matice **B** a vektoru **X** představují jeden bod nalezený při kalibraci. Vektor transformačních souřadnic **t** poté vypočteme pomocí vztahu:

$$t = B^* * X \quad (6.20)$$

Kde B^* je pseudo-inverzní matice, kterou určíme jako:

$$B^* = [B^T * B]^{-1} * B^T \quad (6.21)$$

Výsledkem kalibrace bylo tedy nalezení kalibrační matice **T**, která definuje vztah mezi souřadnicemi odečtenými na 2D snímku a skutečnými souřadnicemi x , y , z v prostoru. Matici **T** utvoříme z koeficientů vektoru **t** takto:

$$T = \begin{pmatrix} t11 & t12 & t13 \\ t21 & t22 & t23 \\ t31 & t32 & t33 \\ t41 & t42 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.22)$$

Kde lze poté zapsat rovnici pro přepočet obrazových souřadnic u , v na prostorové souřadnice y , z :

$$\begin{pmatrix} wx \\ wy \\ wz \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t11 & t12 & t13 \\ t21 & t22 & t23 \\ t31 & t32 & t33 \\ t41 & t42 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.23)$$

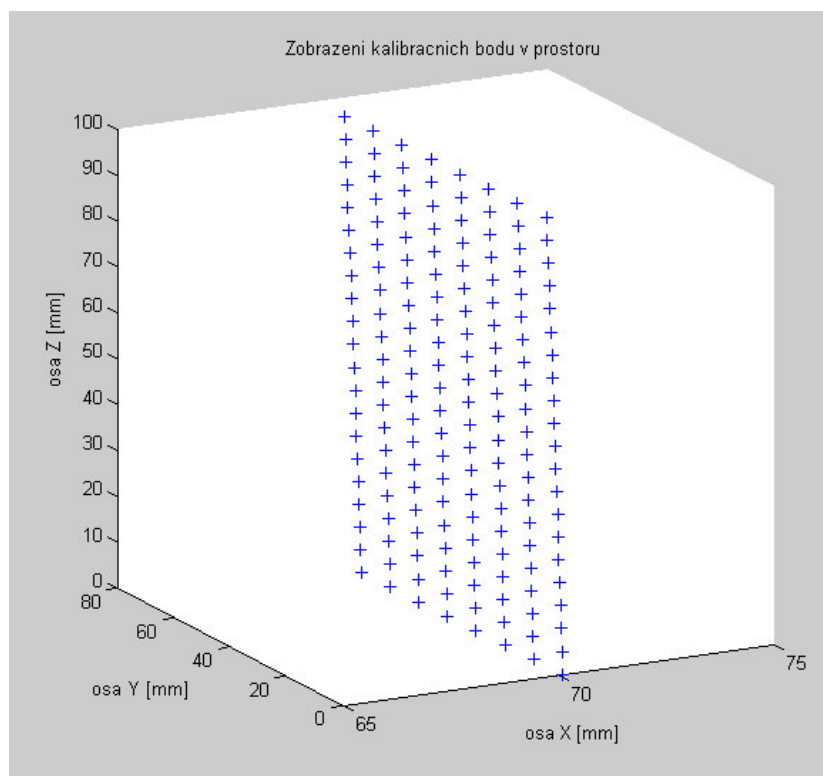
Po roznásobení matice dostaneme vztahy pro výpočet hodnot x , y a z .

$$x = \frac{t11 * u + t12 * v + t13}{t41 * u + t42 * v + 1} \quad (6.24)$$

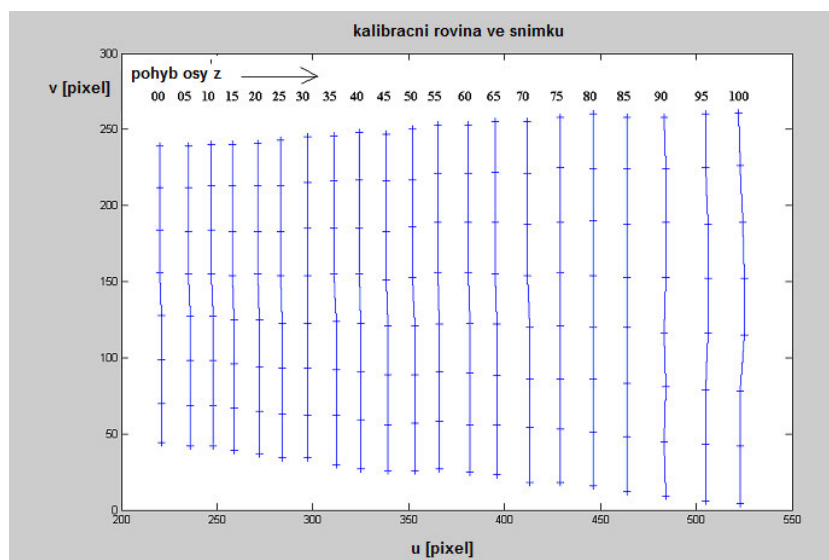
$$y = \frac{t21 * u + t22 * v + t23}{t41 * u + t42 * v + 1} \quad (6.25)$$

$$z = \frac{t31 * u + t32 * v + t33}{t41 * u + t42 * v + 1} \quad (6.26)$$

Pro názornost byla nalezena rovina bodů v prostoru, reprezentující pohyb daného proužku (Obrázek 6.1). Jak se tato rovina chová v obrazovém prostoru souřadnic u, v , je znázorněno na Obrázku 6.2. Z obrázku je zřejmé, že se stoupající prostorovou souřadnicí z dochází k posunu obrazových souřadnic a k rozšíření jejich roztečí.



Obr. 6.1 - Kalibrační rovina v prostoru



Obr. 6.2 - Kalibrační rovina ve snímku

6.4 VÝPOČET KALIBRAČNÍCH KOEFICIENTŮ

Samotný výpočet kalibračních koeficientů je proveden metodou nejmenších čtverců. Výsledkem kalibrace je pro každý proužek soubor jedenácti kalibračních koeficientů. Z těchto koeficientů poté vychází 3 rovnice pro stanovení skutečných souřadnic x, y, z z obrazových souřadnic u, v .

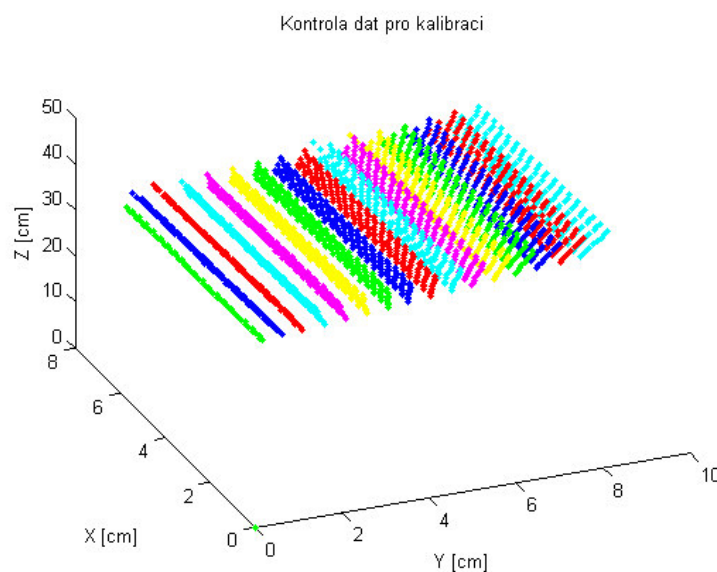
Tyto rovnice mají tvar:

$$x = \frac{t11 * u + t12 * v + t13}{t41 * u + t42 * v + 1} \quad (6.27)$$

$$y = \frac{t21 * u + t22 * v + t23}{t41 * u + t42 * v + 1} \quad (6.28)$$

$$z = \frac{t31 * u + t32 * v + t33}{t41 * u + t42 * v + 1} \quad (6.29)$$

Výpočet kalibračních koeficientů v této práci provádí přiložený soubor „automaticka_kalibrace.m“. Nejdříve je nutné separovat z datového souboru „DATA.mat“, který byl výsledkem algoritmů pro nalezení dat vhodných ke kalibraci, data od jednotlivých proužků a vyřadit nulové členy. Poté byla provedena vizuální kontrola správnosti odečtu předchozích algoritmů. Výsledek této kontroly je vyobrazen na obr. č. 6.3.



Obr. 6.3 - Kontrola algoritmů pro nalezení dat vhodných pro kalibraci

Dalším krokem je naplnění bodů do příslušných matic, sloužících dále pro výpočet kalibračních koeficientů. (vzorec 6.19). Posledním krokem je už samotný výpočet koeficientů matice **T** (vzorec 6.22), které jsou poté opět uloženy do formátu .mat pro další operace.

6.5 REDUKCE VLASTNÍCH CHYB METODY KALIBRACE

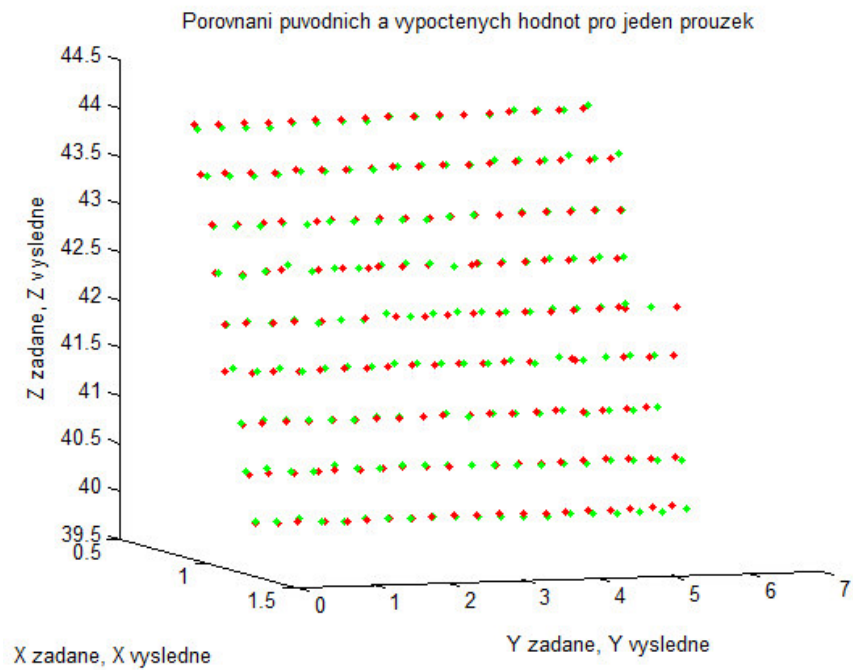
Aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků měření, byla provedena redukce vlastních chyb kalibrace. Tato redukce spočívala v porovnání vypočtených obrazových souřadnic s původními a následném vyřazení bodů s největší chybou. Pro zvýraznění nejvíce chybných bodů bylo použito metody kvadrátu odchylek.

$$\Delta X = (X_{změř} - X_{skut})^2 \quad (6.30)$$

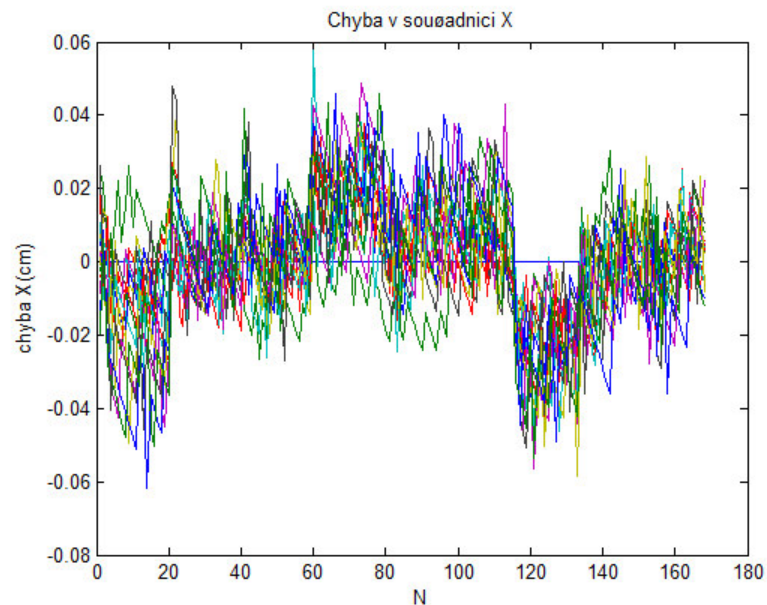
$$\Delta Y = (Y_{změř} - Y_{skut})^2 \quad (6.31)$$

$$\Delta Z = (Z_{změř} - Z_{skut})^2 \quad (6.32)$$

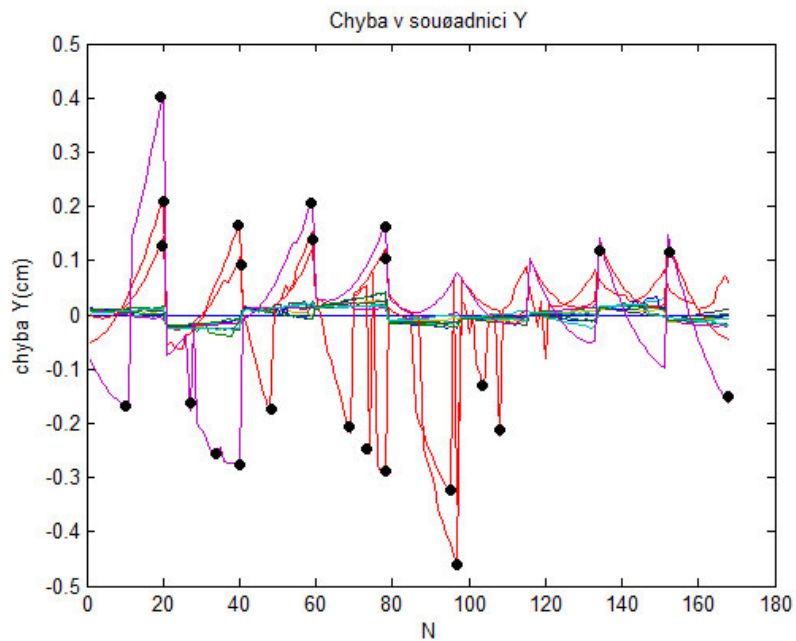
Tyto chyby byly poté vyneseny do sloupcového grafu. Z této grafické závislosti bylo jasně zřetelné, ve kterých bodech je odchylka největší. Tyto body se tedy odchylují od ostatních bodů v rovině a je pravděpodobné, že při jejich odečítání došlo k chybě, nebo nepřesnosti. Takovéto výrazně se odlišující body byly následně z kalibrace odstraněny pomocným algoritmem. Na obrázku 6.4 je uvedeno porovnání původních a vypočtených bodů pro jeden proužek. Dále jsou uvedeny původní chybové funkce a jsou v nich vyznačeny body, které je vhodné z kalibrace vyřadit. Vyřazeny byly body přesahující chybu 1mm.



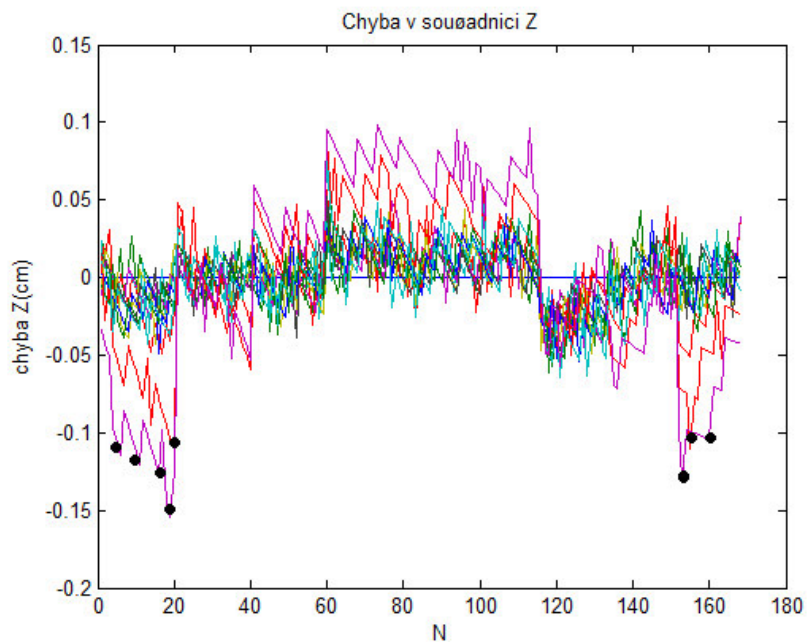
Obr. 6.4 - Vyobrazení původních a vypočtených bodů pro jeden proužek



Obr. 6.5 - Chyba v souřadnici X



Obr. 6.6 - Chyba v souřadnici Y



Obr. 6.7 - Chyba v souřadnici Z

6.6 ZHODNOCENÍ ZPŮSOBŮ KALIBRACE

Byly vypočteny průměrné odchylky vypočtených bodů od původních pro jednotlivé proužky. Chyby pro první a poslední proužek nebyly do souhrnu započteny. Tyto proužky se totiž z důvodu posuvu roviny proužku v obraze (obr. 6.2) vyskytují pouze na malém počtu kalibračních snímků, a tak by výpočet chyb na nich nebyl statisticky vypovídajícím údajem. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 6.1.

proužek	2	3	4	5	6	7	8	9
chyba X (mm)	-0,0008	-0,0001	-0,0005	-0,0001	0,0001	0,0001	-0,0004	-0,0002
chyba Y (mm)	0,0009	-0,0040	0,0003	0,0013	0,0001	-0,0007	0,0000	-0,0001
chyba Z (mm)	-0,0019	-0,0021	-0,0011	0,0001	0,0002	0,0004	-0,0003	0,0002
proužek	10	11	12	13	14	15	16	17
chyba X (mm)	-0,0016	0,0000	-0,0001	-0,0009	-0,0004	-0,0010	-0,0009	-0,0013
chyba Y (mm)	0,0028	0,0012	0,0106	0,0010	0,0013	0,0051	0,0016	0,0122
chyba Z (mm)	-0,0006	0,0003	0,0024	-0,0008	0,0000	0,0006	-0,0012	-0,0001

Tab. 6.1 - Souhrn absolutních hodnot chyb kalibrace

Z tabulky č. 6.1. je zřejmé, že největší chyby dosahuje navržený způsob kalibrace v hodnotách Y pro vyšší čísla proužků. Tento nedostatek má zcela jistě za následek nedokonalý přepočet perspektivy navrženého triangulačního systému pro hodnoty Y. Tedy koeficient, o který je každý následující proužek vlivem perspektivy delší než předchozí. Chyba by se tedy dala odstranit přesnějším výpočtem tohoto koeficientu. Ovšem pro experimentální měření v rámci této práce byla maximální průměrná chyba v řádech setin milimetrů vyhodnocena jako dostatečně malá.

7. ALGORITMY PRO AUTOMATICKÉ MĚŘENÍ ROZMĚRŮ OBJEKTU

7.1 ÚVOD

Dalším úkolem této práce bylo data, získaná předchozími algoritmy, prakticky použít při automatickém měření rozměrů objektu. Poté, co byl měřicí systém automaticky zkalibrován (Kapitola 6. a 7.), byla kalibrační podložka nahrazena bílým podkladem a bylo na ni nasnímáno množství předmětů s nejrůznějšími nedokonalostmi. Poté byl postupně navrhován algoritmus pro automatické měření rozměrů těchto objektů. Algoritmus byl navrhován s důrazem na robustnost. Obsahuje několik částí, kde je možno vhodnou volbou určitých konstant snížit, nebo zvýšit citlivost těchto částí algoritmu, a tím také výrazně vylepšit výsledky. Na tyto konstanty bude upozorněno v části věnované měření. Výsledný algoritmus pro automatické měření rozměrů objektů se jmenuje „automaticka_detekce_objektu.m“.

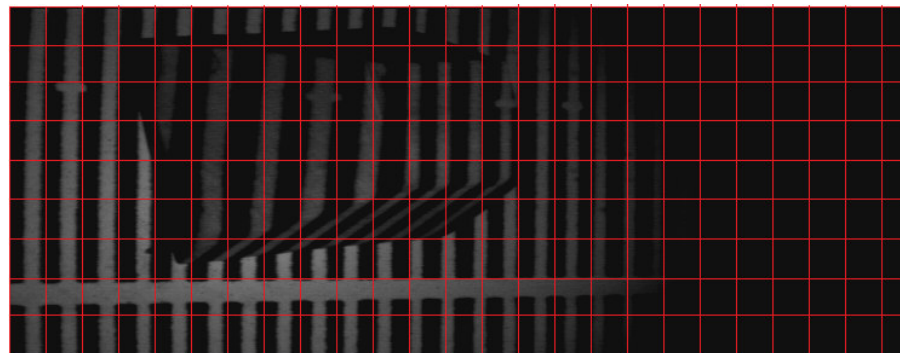
7.2 PRAHOVÁNÍ A ODSTRANĚNÍ SPODNÍHO PRUHU

Prvním krokem tohoto algoritmu je, stejně jako ve většině úloh v počítačovém vidění, vhodná segmentace obrazu. Vzhledem k faktu, že v navržené triangulační metodě byla použita proužková struktura diapozitivu, byl zvolen jeden z nejjednodušších druhů segmentace, a to segmentace prahováním. Úkolem segmentace je oddělení světlých pruhů v obraze od veškerého pozadí. Pro tento úkol byla zvolena metoda prahování po částech. Nejprve tedy byla plocha snímku vhodně rozdělena na čtvercové části. Na obrázku 7.1. je uveden původní snímek obsahující měřený předmět. Na obrázku 7.2. je pak naznačeno rozdělení snímku do částí, dále využívaných pro metodu prahování po částech.

Original



Obr. 7.1 - Originální snímek s měřeným objektem



Obr. 7.2 - Naznačení rozdělení snímků do částí

Nyní se pro každou část takto rozděleného snímku vypočítají jednotlivé subprahy jako aritmetický průměr všech jasových hodnot v příslušné části. Samotné prahování poté vychází z vhodného použití těchto subprahů. Byla navržena prahovací maska na výpočet jednotlivých lokálních prahů. Při návrhu masky se vycházelo z faktu, že ve snímcích, pro které je prahování určeno, se vyskytují převážně svislé pruhy, méně pak šikmé pruhy a pruhy vodorovné se ve snímcích nevyskytují vůbec. Vodorovný pruh by totiž odpovídal předmětu se sklonem 90° . Jelikož projektor, který pruhy promítá, je promítá taktéž pod úhlem 90° , tyto pruhy se na snímcích nemůžou vyskytovat. Z těchto důvodů byla tedy navržena lokální prahovací maska, která klade důraz především na změny ve vodorovném směru. Mnohem méně jsou pak do masky započítány změny ve směru svislém. Tato navržená maska je uvedena na obrázku č. 7.3. nahoře. Pokud ovšem identifikujeme předmět, který je velmi prudký, tato prahovací maska už není ideálním řešením, protože v ní kladený důraz na změny v horizontálním směru je příliš velký. Pro tyto

předměty byla navržena nová prahovací funkce využívající masku na obrázku 7.3. dole. Pro první a poslední řádek a taktéž první dva a poslední dva sloupce se tyto masky využít nedají. Pro tyto segmenty byly navrženy zvláštní, o něco jednodušší masky.

0	1	1	1	0
4	4	4	4	4
0	1	1	1	0

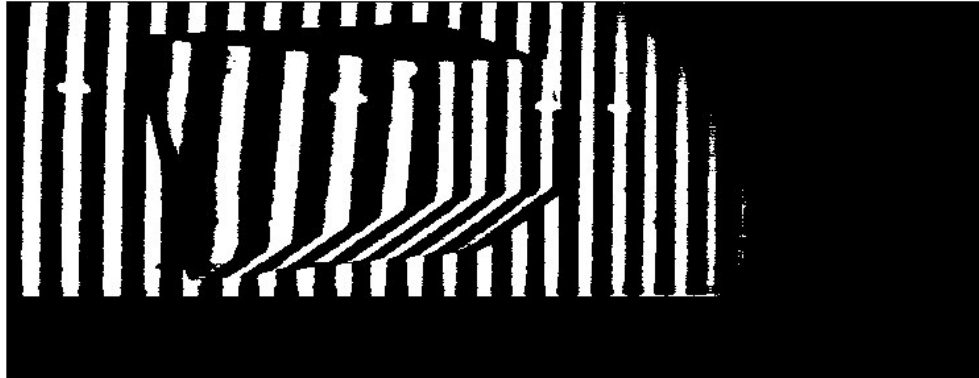
0	1	2	1	0
2	3	4	3	2
0	1	2	1	0

Obr. 7.3 - Prahovací masky

Na takto vyprahovaném obrázku byl ještě dále nalezen spodní světlý pruh. Tento světlý pruh byl využíván při kalibraci pro určení skutečné hodnoty x v kalibračních snímcích. Jelikož použitý projektor nedovoluje za chodu měnit diapozitivy, musel být diapozitiv s pomocným pruhem použit také pro měření rozměrů objektů. Tento pruh byl pro zjednodušení následných operací včetně hodnot, které se nacházely pod ním, z obrázku odebrán. Toto tedy značí určité omezení při měření objektů. Systém byl navržen tak, že se měřený objekt musí nacházet nad tímto světlým pruhem. Toto omezení by se dalo eliminovat projektorem schopným měnit jednotlivé diapozitivy za chodu, tedy například dataprojektorem.

Výsledek prahování po částech a následného odebrání spodního pomocného pruhu je uveden na obrázku č. 7.4.

Výsledek prahování po částech a odstranění spodního pruhu

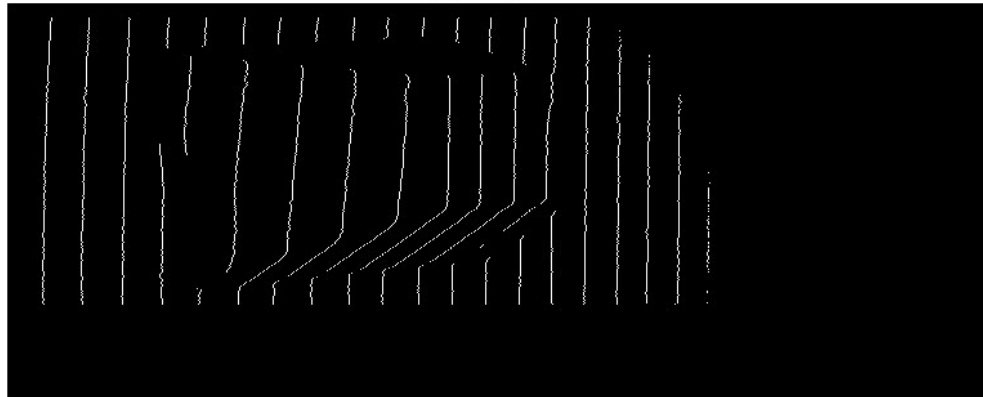


Obr. 7.4 - Výsledek prahování po částech a odstranění pomocného pruhu

7.3 SEPARACE STŘEDŮ

Dalším důležitým algoritmem pro automatické měření rozměrů objektů je separace středů jednotlivých proužků vyprahovaného obrazu. Tato úloha byla řešena již v kapitole 5.6.3. Pro tento algoritmus ale dříve popsané metody nepostačovaly. Řešení zde vychází z dříve popsané metody využívající linearitu světelného vzoru, které je však poupraveno tak, aby vedlo k větší robustnosti algoritmu. Algoritmus již totiž nepracuje s předem připravenými kalibračními snímky, ale se snímky reálných předmětů s množstvím nedokonalostí, což má za následek mimo jiné také nedokonalosti při prahování. Tyto nedokonalosti jsou odstraněny nahrazením striktních hranic černé a bílé hranicí relativní. Algoritmus tedy postupně po řádcích prochází snímek. V okamžiku, kdy je minimálně 6 z 11 následujících pixelů hodnoty 255, tedy bílé barvy na snímku, algoritmus zaznamená počátek pruhu. Stejným způsobem je dále určen i konec pruhu pro pixely černé. Z počátků a konců proužků lze pak jednoduše spočítat a vyobrazit středy jednotlivých proužků (obrázek 7.5).

Středy jednotlivých proužků



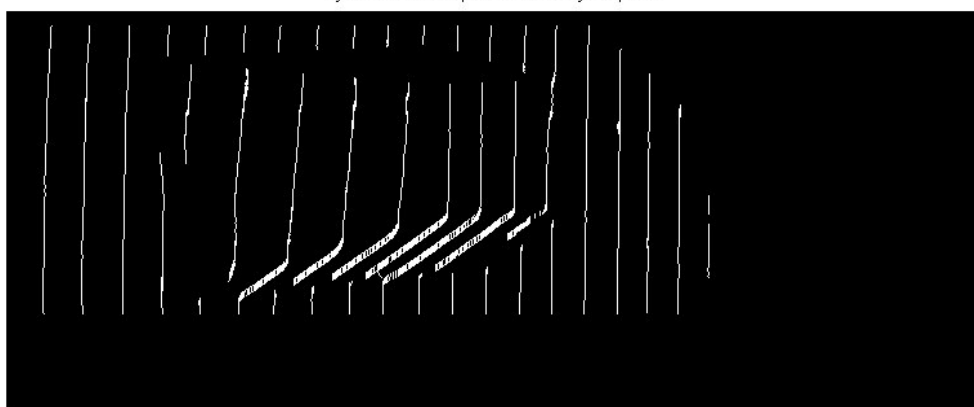
Obr. 7.5 - Středy jednotlivých proužků

7.4 VYHLAZENÍ SNÍMKŮ HLEDÁNÍM LINEARIT

Jelikož zde popisovaný algoritmus pracuje se snímky reálných předmětů se spoustou povrchových vad a nedokonalostí, tyto nedokonalosti se v jisté míře promítnou také do operace nalezení středů jednotlivých proužků. Aby bylo tyto proužky následně možno jednoduše trasovat, bylo použito určitých maskových operací pro odstranění šumu, vyhlazení proužků a sjednocení pixelů náležících jednomu proužku. Podstatou těchto operací je postupná separace lokálních částí obrázku velikosti 10x10 (20x20) a hledání linearit v těchto částech. Je využíván předpoklad, že technické objekty jsou většinou složeny z lineárních úseků. Z obrázku je tedy vyříznuta určitá lokální část předem definované velikosti a s tou je následně pracováno. Pokud by například tento subprostor obsahoval šikmou čáru o nějaké strmosti a některé pixely by se od této strmosti lišily, byly by následně posunuty tak, aby obsah tohoto subprostoru tvořil jako celek co nejdokonalejší linearitu. Operace jsou opět opatřeny určitou robustností, a to z důvodu např. jednoho či dvou chybějících pixelů, které tyto operace automaticky doplní. Vhodným nastavením této robustnosti lze mnohdy výsledek algoritmu značně vylepšit. Nevýhodou těchto operací je při příliš velké zvolené robustnosti nalezení linearit, které linearitami ve skutečnosti nejsou. Operace jsou prováděny ve dvou krocích. Nejdříve jsou doplněny pixely chybějící v nalezené linearitě, případně nahrazeny pixely, které z těchto linearit vybočují. Tato operace má za následek rozšíření šikmých čar, u kterých je

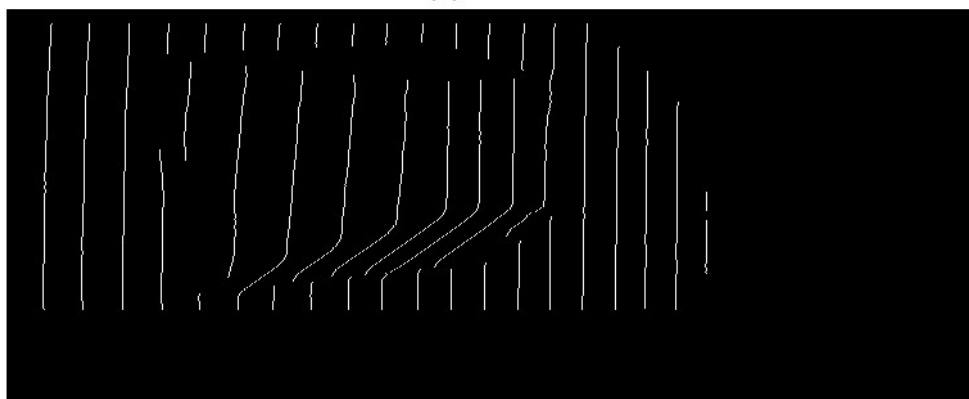
linearita neurčitá. Jedná se o operaci připomínající morfologickou operaci dilatace, ovšem symetrickou na obě strany a nevyplňující uzavřený prostor uvnitř tohoto rozšíření. Tento jev se dá snadno eliminovat použitím masky velikosti 20x20, kde je nalezení konkrétní linearit u šikmých čar snazší. Druhým krokem je pak opětovné nalezení středů těchto čar. Výsledek doplnění a nahrazení linearit v obraze je uveden na obrázku č. 7.6. a výsledek následného opětovného nalezení středů čar je uveden na obrázku 7.7.

Vyhlazení snímku pomocí maskových operací



Obr. 7.6 - Doplnění a nahrazení linearit v obraze

Středý vyhlazeného snímku

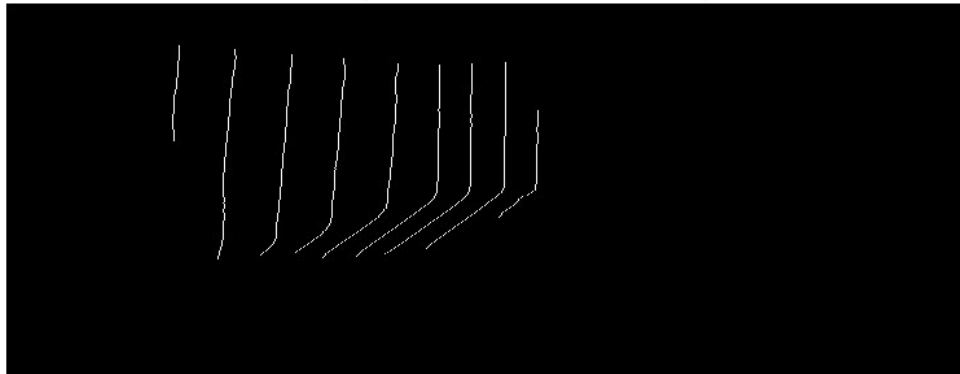


Obr. 7.7 - Středý vyhlazeného obrázku

7.5 ODSTRANĚNÍ ČAR PŘÍSLUŠEJÍCÍCH PODLOŽCE

Dalším důležitým krokem pro následné trasování čar je odstranění všech nevhodných částí snímku. Jedná se o čáry náležící podložce, objekty nacházející se celým objemem za hranicemi definujícími obrys měřeného předmětu, a případně o čáry zanedbatelné délky, které nemají dostatečnou vypovídající hodnotu. Základem této části algoritmu je skutečnost, že je promítaná světelná struktura lineární. Jak je patrné na obrázku 7.7., promítaná lineární struktura utváří na pozadí svislé pruhy se sklonem 90° . Byla tedy navržena trasovací maska, která trasuje tyto čáry na pozadí a s nastavenou citlivostí detekuje přítomnost objektu na snímku. Tato operace je provedena nejprve odshora, a poté odspodu a kolmé čáry, které jsou ohodnoceny jako pozadí, jsou ze snímku postupně odstraněny. Nastavená citlivost představuje robustnost této části algoritmu a musí v sobě zahrnout nedokonalosti snímku při jejich pořízení. Jde o hranici mezi křivostí čar způsobenou zkreslením čočky objektivu kamery, zkreslením čočky objektivu projektoru, nedokonalostí na navrženém diapozitivu, rovností podkladu a dalších pro měření nepříznivých vlivů, oproti křivosti způsobené přítomností objektu. Při této detekci kolmosti čar je vždy zaznamenána hranice začátků a konců objektu. Po odstranění všech kolmých čar na pozadí jsou dále odstraněny všechny objekty, které nenáleží vymezené hranici objektu. Nakonec jsou odstraněny ještě všechny objekty, které spolu se svým okolím netvoří v určitých tolerancích uspořádaný celek dostatečné velikosti. Na snímku tedy zůstanou pouze objekty odpovídající promítané struktuře na objektu. Výsledek těchto operací je uveden na obrázku č. 7.8.

Ořezání řar z pozadí a odstranění nežádoucích částí snímku)

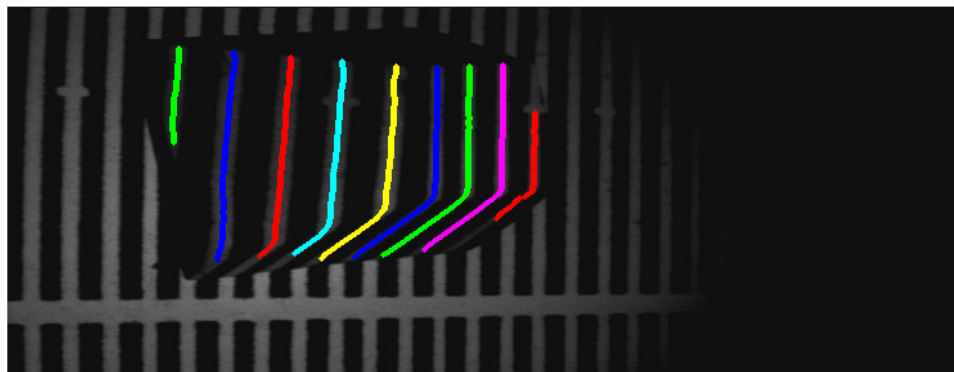


Obr. 7.8 - Výsledek odstranění nevhodných částí snímku

7.6 TRASOVÁNÍ ČAR A VÝPOČET PROSTOROVÝCH SOUŘADNIC

Výsledkem předchozích operací byly obrázky obsahující pouze čáry náležící struktuře promítané na měřený objekt. Poslední, a zároveň nejdůležitější částí algoritmu je tyto čáry identifikovat. Podstatou identifikace je trasování jednotlivých částí čar. Tyto části čar jsou poté pospojovány do smysluplných celků tvořících jednotlivé promítané proužky. Příklad tohoto pospojování je uveden na obrázku č. 7.9.

Vyobrazení výsledků do původního obrázku

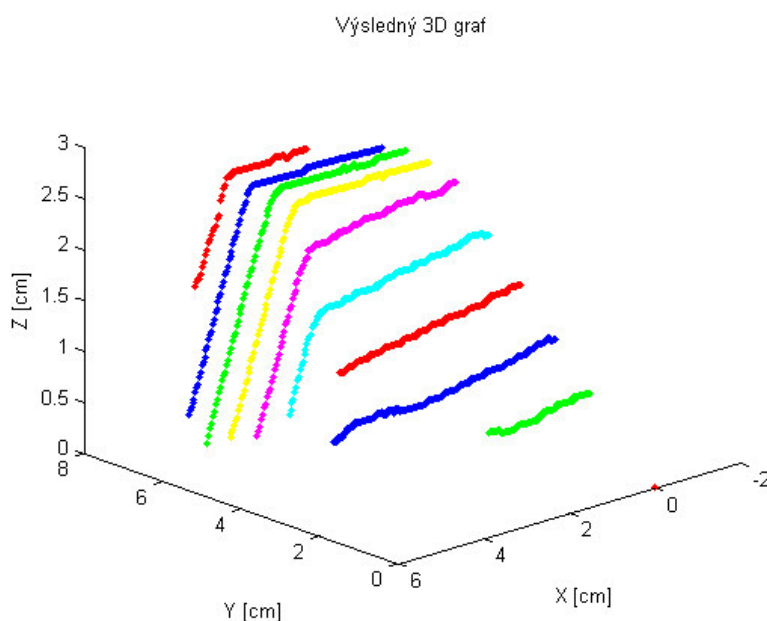


Obr. 7.9 - Výsledek trasování čar

Dále bylo potřeba přiřadit těmto celkům správné indexy odpovídající jejich dříve nalezenému matematickému popisu. Toto přiřazení do programu zanes

obsluha formou skutečného indexu prvního nalezeného proužku, který zjistí jednoduše po zhlédnutí obr. č. 7.9. Tento mezikrok slouží zároveň jako kontrola správnosti výsledků. Ostatní indexy se již doplní automaticky. Tuto operaci řeší funkce pracující s počátky a konci jednotlivých celků a jejich průměrnou hodnotou souřadnice x .

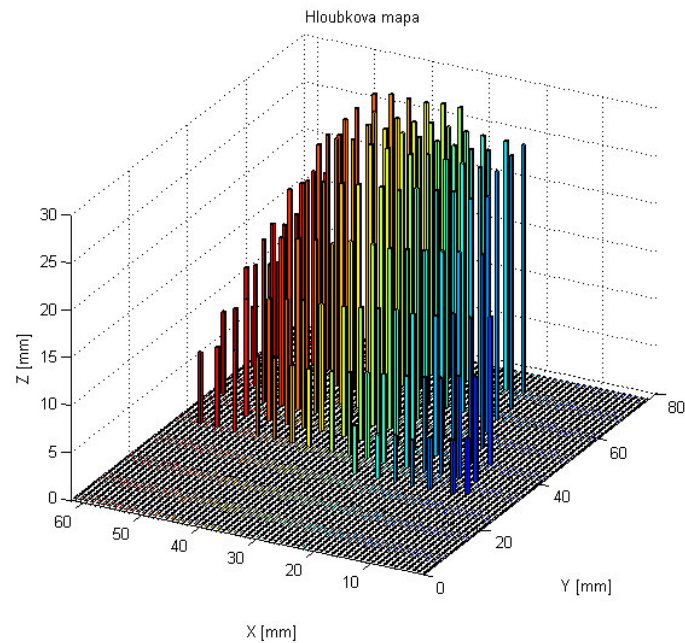
Potom již můžeme tyto celky postupně bod po bodu trasovat a z nalezených obrazových souřadnic u a v podle vzorců 6.24 6.25 a 6.26 nalézt jejich skutečné souřadnice x , y , z . Hodnoty $t11$ až $t43$, se kterými vzorce pracují, byly výsledkem funkcí popsanych v kapitolách 5 a 6 a byly po kalibraci uloženy pro každý proužek ve formátu .mat. Vyobrazením skutečných hodnot x , y , z do jednoho grafu získáme výsledný 3D graf měřeného objektu. Příklad tohoto grafu je uveden na obrázku č. 7.10. 3D grafy všech měřených objektů jsou uvedeny v příloze.



Obr. 7.10 - Výsledný 3D graf objektu

V některých případech není 3D graf dostatečně vypovídající. Pro tyto případy byla dále pro každý snímek zhotovena také hloubková mapa na snímku nalezeného objektu. Hloubková mapa dává již vždy dostatečně vypovídající výsledky o tvaru a přibližných rozměrech měřeného objektu. Hloubkové mapy lze také efektivně využít při kontrole přesnosti navrženého systému porovnáním vypočtené výšky měřených

objektů s jejich skutečnou výškou. Příklad hloubkové mapy je uveden na obrázku 7.11. Hloubkové mapy všech měřených objektů jsou uvedeny v příloze.



Obr. 7.11 - Hloubková mapa objektu

8. MĚŘENÍ

8.1 ÚVOD

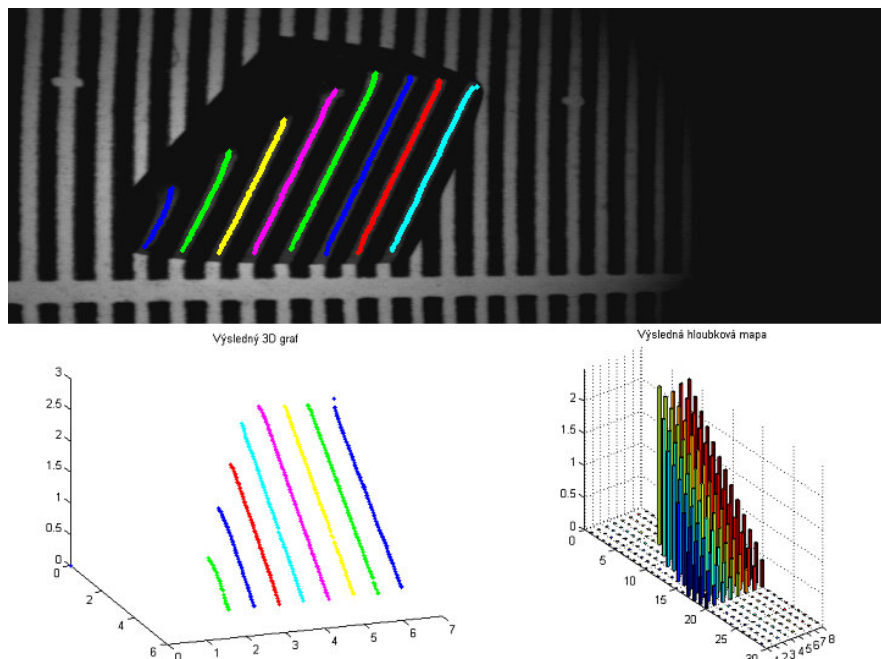
S pomocí zde popsané a realizované metody bylo provedeno a zhodnoceno měření několika vzorových předmětů (Kapitola 8.2.). Dále jsou uvedeny technické podmínky a omezení dané metody (Kapitola 8.3), zhodnocení výsledků měření (Kapitola 8.4) a možnosti využití realizované metody (Kapitola 8.5).

8.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Jak již bylo zmíněno v předešlém textu, programová část této diplomové práce je rozdělena do tří základních částí. V první části dochází k separaci dat vhodných pro kalibraci měřicího systému. Tento soubor má název „data_pro_kalibraci.m“ a jeho výstupem je soubor „Data.mat“ obsahující požadovaná data. Druhou částí je samotná kalibrace. Tu provádí soubor „automaticka_kalibrace.m“ a výsledkem této funkce jsou hodnoty kalibračních koeficientů, reprezentující aktuální matematický popis systému. Třetí část s těmito koeficienty pracuje, a využívá tak získaného matematického popisu pro praktická měření. Kalibrační podložka je zde nahrazena čistým bílým papírem a algoritmu jsou postupně předkládány obrázky reálných předmětů. Tento algoritmus nese název „automaticka_detekce_objektu.m“ a jeho výstupem je datový soubor obsahující hodnoty x, y, z povrchu měřeného objektu, 3D graf tohoto objektu a pro rychlé měření výšky objektů také hloubkovou mapu.

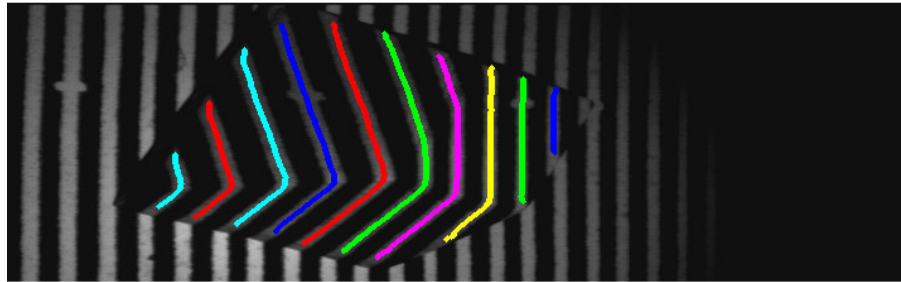
Tento výsledný algoritmus byl navržen tak, aby pracoval s co největší robustností. Tedy, aby v základním nastavení co nejlépe zidentifikoval co největší množství předložených snímků. Tato robustnost je reprezentována v algoritmu množstvím určitých tolerančních konstant. Jako příklad bych uvedl část algoritmu, která rozeznává sklon čar na pozadí snímku. Zde je například nastavena „tolerance kolmosti“ čar na pozadí. Jde o hranici mezi křivostí čar způsobenou zkreslením čočky objektivu kamery, zkreslením čočky objektivu projektoru, nedokonalostí na

navrženém diapozitivu rovností podkladu a dalších pro měření nepříznivých vlivů oproti křivosti způsobené přítomností objektu (Kapitola 7.5). Tyto toleranční konstanty se vyskytují u většiny z důležitých částí algoritmu. Každý snímek každého měřeného objektu je ale jiný a jeho „krizové místo“ se nachází jinde. Vhodným nastavením těchto tolerančních konstant oproti základnímu robustnímu nastavení lze výsledky měření značně vylepšit. Na následujících snímcích je uvedeno několik objektů včetně výsledků jejich identifikace se základními, nebo jen mírně poupravenými tolerančními konstantami oproti základnímu robustnímu nastavení. Všechny měřené objekty a výsledky jejich identifikací jsou součástí přílohy k tomuto dokumentu.



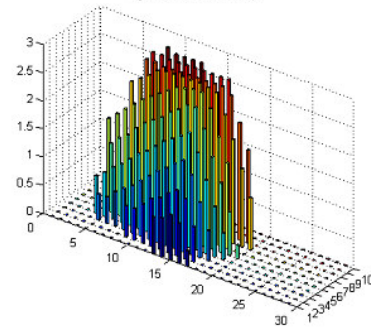
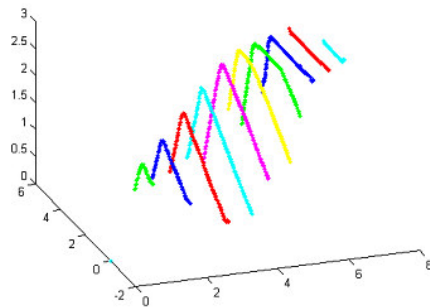
Obr. 8.1 - První ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa

Vyobrazení výsledků do původního obrázku

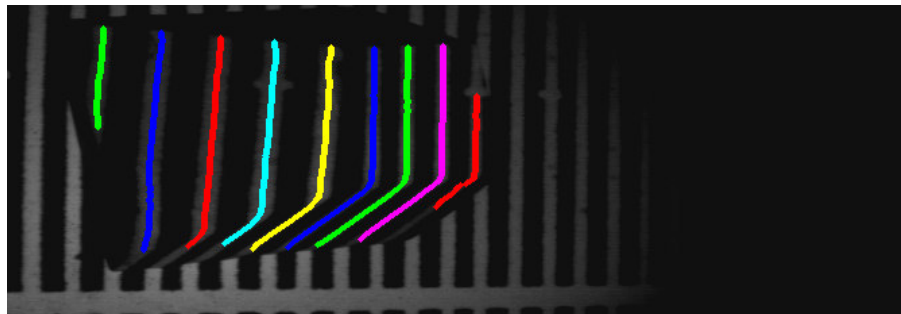


Výsledný 3D graf

Výsledná hloubková mapa

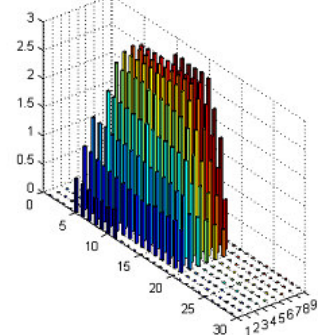
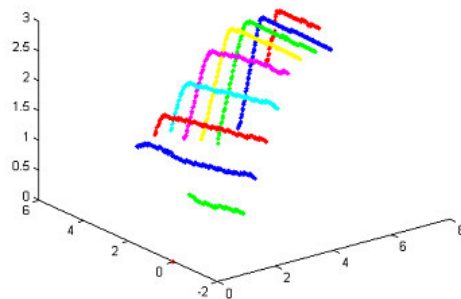


Obr. 8.2 - Druhý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa

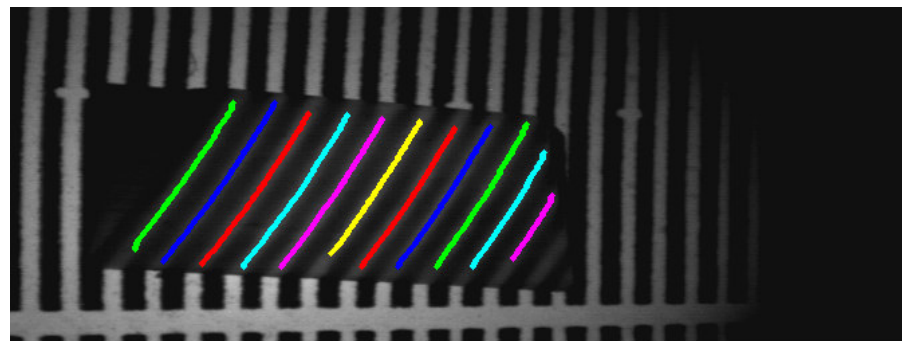


Výsledný 3D graf

Výsledná hloubková mapa

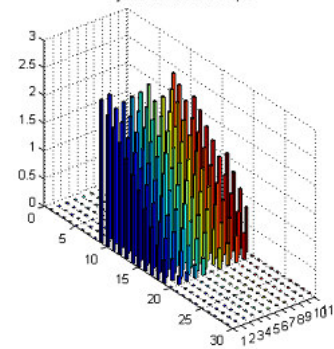
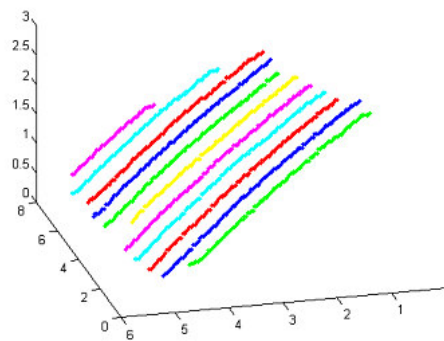


Obr. 8.3 - Třetí ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa

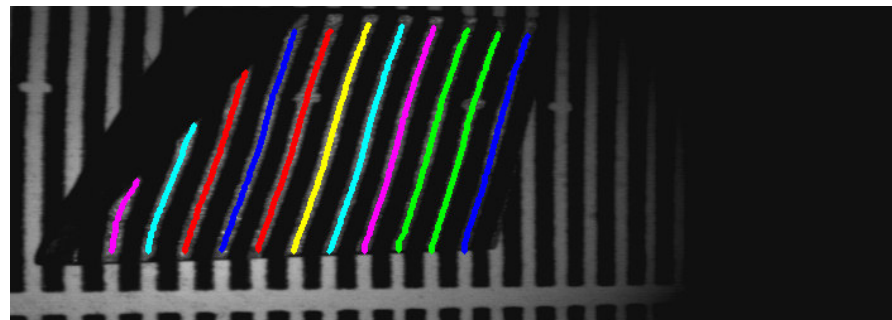


Výsledný 3D graf

Výsledná hloubková mapa

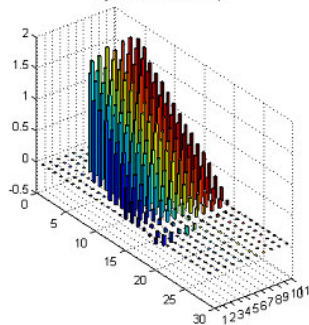
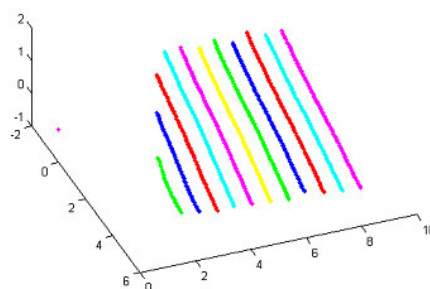


Obr. 8.4 - Čtvrtý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa

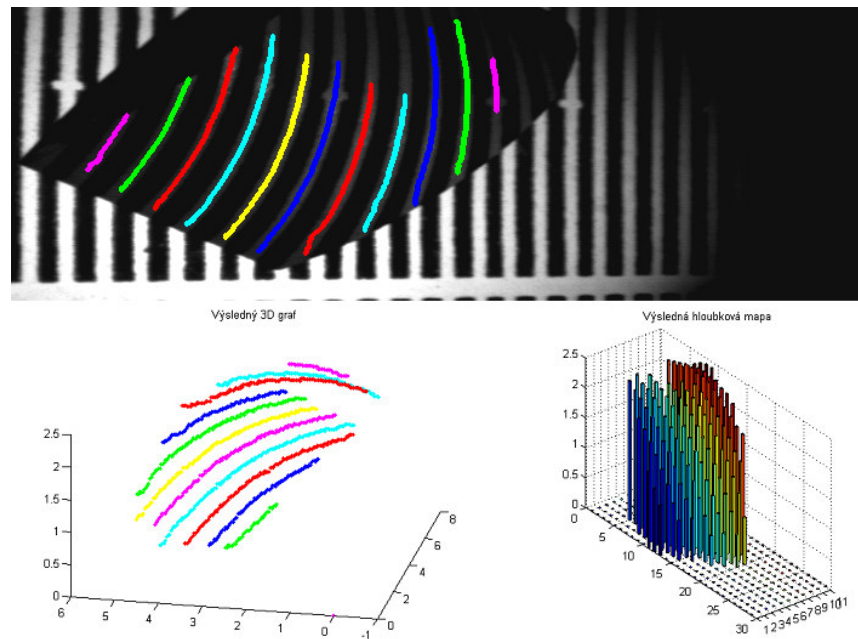


Výsledný 3D graf

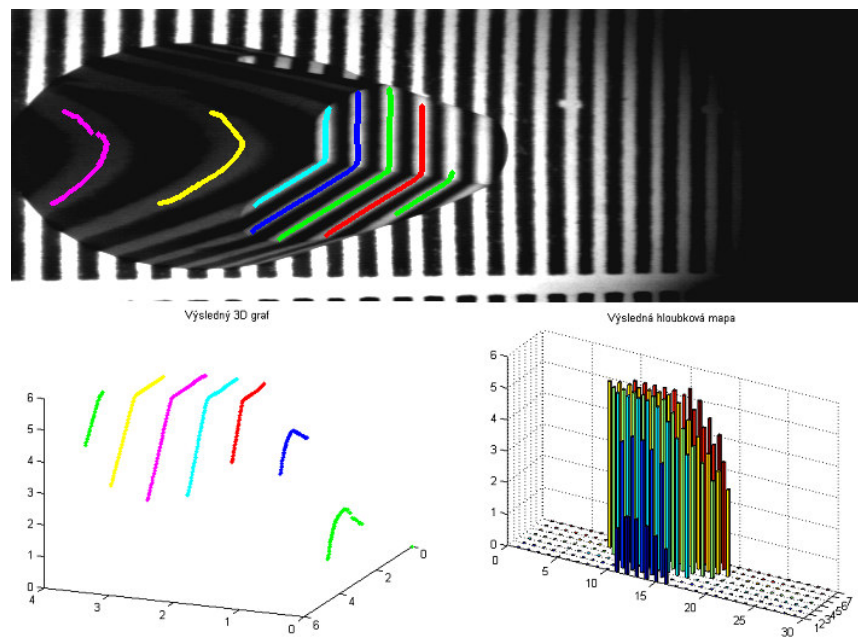
Výsledná hloubková mapa



Obr. 8.5 - Pátý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa



Obr. 8.6 - Šestý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa



Obr. 8.7 - Sedmý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa

8.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Navržený a zrealizovaný měřicí systém lze hodnotit ze dvou základních hledisek. Prvním je schopnost systému v co největší míře nalézt, sjednotit a identifikovat proužky, které jsou na předmět promítány. Druhým důležitým hlediskem je poté přesnost měření. Obě hodnocení budou provedena odděleně.

Hodnocení z hlediska schopnosti identifikovat promítanou strukturu

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, výsledné algoritmy byly navrženy tak, aby pracovaly s maximální robustností, a dokázaly si tak v určitém základním nastavení poradit s co největším počtem identifikovaných předmětů. Pro tyto účely bylo zhotoveno 10 předmětů s nejrůznějšími nedokonalostmi, se kterými si měl posléze navržený algoritmus co nejlépe poradit. Tyto předměty se lišily kromě tvaru také povrchovými vlastnostmi. Jako materiál bylo použito dřevo a silon a předměty byly opatřeny nátěry různých barev s různými povrchovými vlastnostmi. Všechny měřené předměty jsou uvedeny na obrázku 8.8. a také v příloze. Tyto předměty byly poté nasnímány z různých úhlů a celkem bylo vytvořeno 19 testovacích snímků.



Obr. 8.8 - Testovací předměty

První, a zároveň nejjednodušší skupinou snímků jsou snímky, které obsahují na svém prostředku předmět ideálního, nebo téměř ideálního tvaru, přičemž vrchní i spodní část snímku tvoří proužky příslušející pozadí. Za předmět ideálního tvaru pro tuto metodu je považován předmět, který splňuje následující požadavek - průmět předmětu v kterékoli jeho ose je funkce, která v každém bodě stoupá nebo klesá vždy pod úhlem menší než 90° . V nejideálnějších případech má pak tato funkce vždy pouze jeden vrchol, a úhel, pod kterým klesá, respektive stoupá je mnohem menší než 90° .

Za předmět téměř ideálního tvaru je pak považován předmět, který tuto podmínku splňuje buď alespoň v neklesající části ve směru na vrchol, nebo v nestoupající části ve směru od vrcholu. Za takovýto předmět lze považovat například předměty vyobrazené na obrázcích 8.1. a 8.2. Takovéto snímky navržený algoritmus vyhodnocuje naprosto bez problémů.

Algoritmus si ovšem poradí buď zcela, nebo s mírnými obtížemi i s řadou méně dokonalých snímků. Z dříve vyobrazených měřených předmětů mezi tyto nedokonalosti patří například:

- Snímky středně prudkých předmětů, kde předmět nezačíná postupným náběhem, ale skokem pod úhlem 90° a kde proužky na předmětu plynule navazují na nesprávné proužky pozadí (Obrázek 8.3).
- Snímky lesklých předmětů s malou odrazivostí, kde proužky na předmětu navazují na nesprávné proužky pozadí snímku (Obrázek 8.4).
- Snímky předmětů umístěných u horního, nebo dolního okraje snímku (Obrázek 8.5).
- Mnoho dalších snímků s různými vadami. Kompletní fotogalerie je umístěna v příloze.

Dále bych uvedl příklady snímků s vadami, se kterými si už algoritmus v plné míře poradit nedokáže:

- Snímky, kde předmět protíná horní, respektive dolní okraj snímku částí vodorovnou k podložce. Tato skutečnost má totiž za následek, že algoritmus nedokáže rozeznat tuto kolmou část předmětu od proužků na pozadí. Problém je zřejmý na obrázku 8.6. Zde části předmětu, které začínají kolmou částí, jsou odmazány až po místo, kde začíná být sklon předmětu větší.
- Velice prudké předměty s úhlem přesahujícím 80° s případnými prudkými zlomy. Zde algoritmus v základním nastavení naráží na problém již u prahování, jelikož

algoritmus používá prahování po částech s důrazem na změny v horizontální ose. Dalším problémem je poté trasování čar, kde má algoritmus nastavenou jistou robustnost na šum z důvodu lepší detekce více strukturovaných předmětů, předmětů s nerovným povrchem nebo také předmětů s povrchovými vadami, jako jsou škrábance nebo popisky. Snímek s takovými vadami je vyobrazen na obrázku 8.7.

Nedokonalosti algoritmu lze ovšem někdy do jisté míry eliminovat, pokud provedeme v algoritmu výrazné změny oproti základnímu robustnímu nastavení. Například problém snímků začínajících kolmými částmi předmětů by šel eliminovat například snížením robustnosti algoritmu v části věnované ořezání kolmých čar pozadí, nebo zavedením omezení tvaru předmětů pouze na identifikaci předmětů, které neobsahují výřezy. Problém s prahováním by šel eliminovat například použitím prahovací masky s důrazem na změny ve vertikální ose. Problém prudkých předmětů by šel jistě u některých snímků eliminovat snížením robustnosti na šum, případně zvětšením rozsahu do šířky u trasování čar.

V základním robustním nastavení dokáže algoritmus úplně, nebo s drobnými potížemi identifikovat předměty na 14 z 19 testovacích snímků. U dvou snímků dokáže algoritmus určit výšku předmětu a naznačit jeho tvar. U třech snímků nebylo dosaženo smysluplných výsledků.

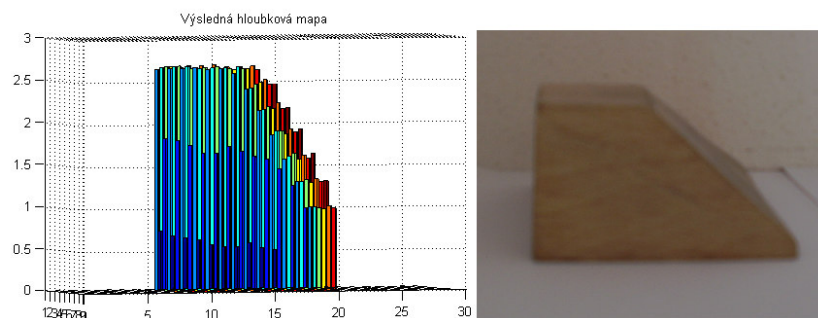
Hodnocení z hlediska přesnosti

Druhým kritériem pro vyhodnocení výsledků navrženého systému je hodnocení z hlediska přesnosti. Výsledným algoritmem byly postupně proměřeny všechny snímky vzorových předmětů. Naměřené hodnoty výšek předmětů byly poté porovnány s jimi odpovídajícími skutečnými výškami. Skutečné výšky byly měřeny šuplerou na předmětech vždy v místech, kde končila promítaná struktura. Porovnání naměřených a skutečných výšek je uvedeno v tabulce č. 8.1. Z tabulky vyplývá, že odchylka naměřených hodnot od hodnot skutečných nebyla nikdy vyšší než 1mm.

Pro rychlou kontrolu správnosti naměřených dat byla pro každý předmět vyobrazena jeho hloubková mapa, tedy 3D sloupcový graf obsahující naměřené hodnoty z. Příklad porovnání měřeného předmětu s jeho vypočteným sloupcovým grafem je uveden na obrázku č. 8.9.

snímek	index prvního proužku	změřená výška	skutečná výška
1	5	26,7 mm	27 mm
2	5	27,1 mm	27 mm
3	5	27,0 mm	27 mm
4	4	26,7 mm	27 mm
5	4	24,3 mm	25 mm
6	5	69,0 mm	69 mm
7	5	24,8 mm	25 mm
8	4	24,4 mm	25 mm
9	4	28,2 mm	29 mm
10	5	27,0 mm	27 mm
11	4	26,9 mm	27 mm
12	5	24,5 mm	25 mm
13	3	24,3 mm	25 mm
14	2	53,3 mm	54 mm
15	3	24,0 mm	25 mm

Tab. 8.1 - Porovnání změřených a skutečných výšek



Obr. 8.9 - porovnání hloubkové mapy a měřeného objektu

8.4 TECHNICKÉ PODMÍNKY A OMEZENÍ

Při použití této triangulační metody je nutno brát ohled na některé technické podmínky a omezení. Proužky mají konečnou šířku řádově několika pixelů, což omezuje prostor pro rekonstrukci pouze na místa, kde dochází ke změnám jasových úrovní. Z podstaty triangulační metody dále plynou dvě základní omezující

podmínky pro zkoumaný předmět. Těleso musí mít vhodný tvar a také vhodné povrchové vlastnosti materiálu.

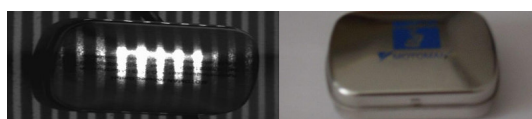
8.4.1 Závislost kvality rekonstrukce na materiálu

Kvalita rekonstrukce je závislá nejen na přesnosti snímacího zařízení, kvalitě a hustotě promítané mřížky, ale také na povrchu snímaného objektu. Povrch musí mít dobré optické vlastnosti. Mezi optické vlastnosti, které mají vliv na kvalitu rekonstrukce, se řadí například barva (především její světlost), odrazivost, propustnost, absorpce případně hrbolatost. Pomocí mřížky bylo nasvíceno velké množství nejrůznějších předmětů a byly zkoumány jejich vlastnosti. Z výsledků zkoumání vyplynulo, že primárními vlastnostmi pro určování kvality materiálů je jejich propustnost, odrazivost a absorpce, sekundárními pak barva případně hrbolatost. To znamená, že materiály se dělí do tří základních skupin. První skupinou jsou materiály pro měření zcela vhodné. Tyto materiály mají vhodnou kombinaci propustnosti, odrazivosti a absorpce. U této skupiny materiálů nezáleželo na barvě předmětu ani na hrbolosti povrchu a výsledky byly vždy přijatelné. Druhou skupinou jsou materiály vhodné pouze pod podmínkou vyhovující barvy případně hrbolosti. Poslední skupinou byly materiály pro měření zcela nevhodné. Výsledky zkoumání jsou shrnuty v tabulce č. 8.2. Snímky všech zkoumaných předmětů jsou uvedeny v příloze.

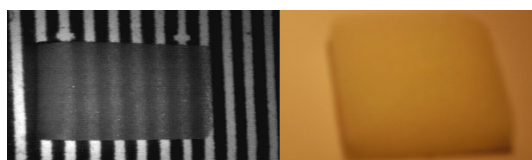
druh materiálu	vhodnost
dřevo	zcela vhodný
papír	zcela vhodný
kůže	zcela vhodný
modelářské dřevo	zcela vhodný
plast	dle barvy a hrubosti
silon	dle barvy a hrubosti
guma	dle barvy a hrubosti
železo	dle barvy a hrubosti
keramika	dle barvy a hrubosti
mramor	dle barvy a hrubosti
zrcadlo	nevhodný
sklo	nevhodný
polopropustný plast	nevhodný
molitan	nevhodný

Tab. 8.2 - Souhrn materiálů

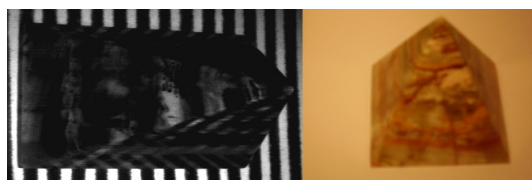
Z tabulky vyplívá, že nejvhodnějšími materiály pro rekonstrukci navrženým měřicím systémem jsou dřevo, modelářské dřevo, papír, případně kůže. Jako nevhodné byly vyhodnoceny materiály s příliš velkou, nebo naopak s příliš malou odrazivostí povrchu, nebo také materiály s příliš velkou absorpcí světelného záření. Na následujících obrázcích jsou uvedeny příklady nevhodných předmětů a také vliv barvy materiálu na kvalitu snímků.



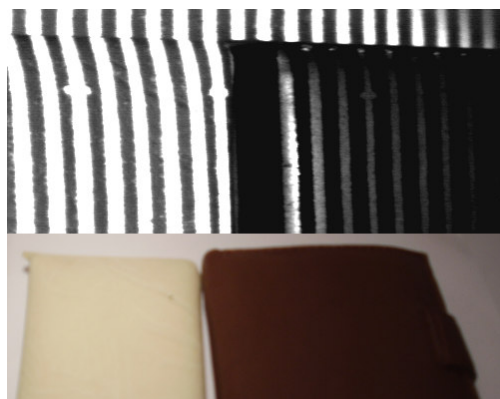
Obr. 8.10 - Ukázka odlesku na nevhodném předmětu



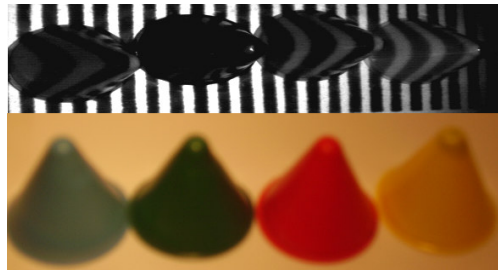
Obr. 8.11 - Ukázka nevhodného materiálu (velká absorpce)



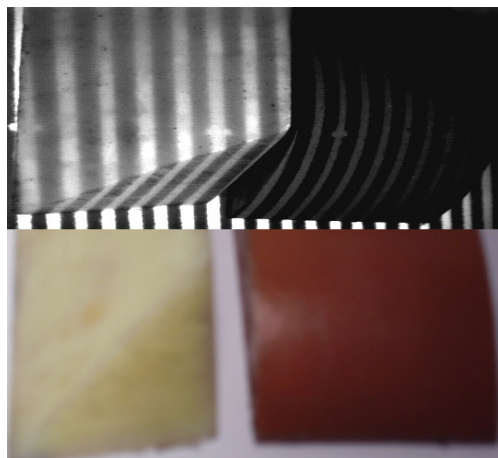
Obr. 8.22 - Ukázka nevhodného předmětu (nejednotná barva)



Obr. 8.13 - Porovnání předmětů stejných materiálů a různých barev (kůže)



Obr. 8.14 - Porovnání předmětů stejných materiálů a různých barev (plast)



Obr. 8.15 - Porovnání předmětů stejných materiálů a různých barev (silon)

Kromě povrchu tělesa nesmí mít špatné optické vlastnosti ani povrch, na kterém je těleso umístěno, protože případné odrazy světla od podložky by mohly měření značně znehodnotit. Typické ukázky vhodného a nevhodného povrchu jsou vyobrazeny na obrázcích č. 8.16 a 8.17.



Obr. 8.16 - Předmět s vhodným povrchem pro rekonstrukci

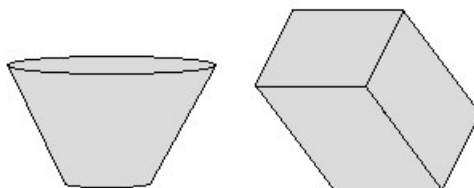


Obr. 8.17 - Předmět s nevhodným povrchem pro rekonstrukci (tmavý a lesklý)

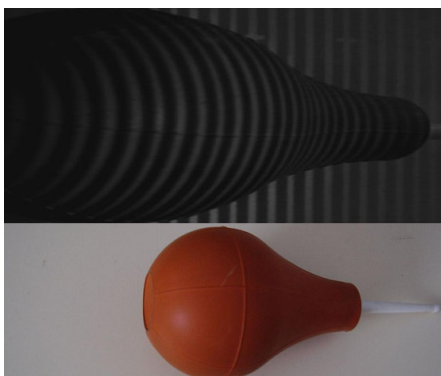
8.4.2 Vhodný tvar měřeného předmětu

Snad největším omezením triangulačních metod je problém stínů. Obecně platí, že se dá vždy identifikovat pouze místo, které kamera vidí a které je zároveň vhodně nasvíceno projektorem. Přitom platí, že abychom mohli zkalibrovaného proužku využít k rekonstrukci tvaru předmětu, musíme vědět, že jde právě o tento proužek. Proužek by měl tedy v ideálním případě začínat na podložce a být po celé svojí délce viditelný. Toto omezení je ovšem značně odstraněno pomocnými značkami na

promítané textuře, které orientaci značně vylepší. Předmět by měl mít zároveň minimum oblastí stínů, kam nevidí kamera nebo projektor, i oblastí kolmých k projektoru, kde ztrácíme proužek z dohledu.

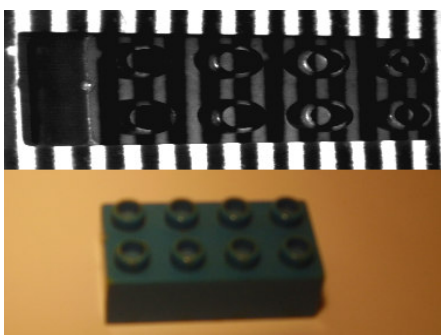


Obr. 8.18 - Ukázka nevhodných předmětů

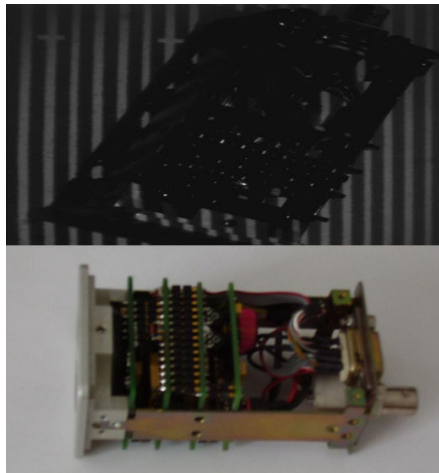


Obr. 8.19 - Příklad ne zcela vhodného předmětu

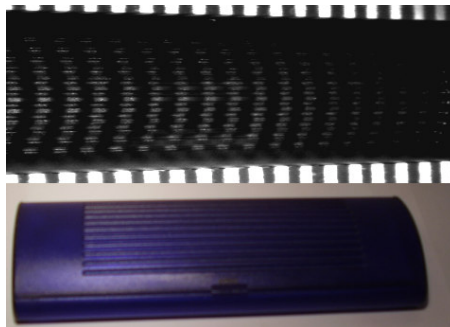
Měřený objekt dále také nemůže mít příliš členitý povrch. Na takovém povrchu se promítaná textura snadno ztratí. Příklady předmětů z příliš členitým povrchem jsou uvedeny na následujících obrázcích.



Obr. 8.20 - Ukázka příliš členitého povrchu



Obr. 8.21 - Ukázka příliš členitého povrchu



Obr. 8.22 - Ukázka příliš členitého povrchu

8.5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ SYSTÉMU

Obecně fotogrammetrická metoda s využitím použité proužkové textury je vhodná především pro rekonstrukci povrchů 3D objektů. Deformace proužkové textury na měřeném 3D objektu nám podává informaci o rozložení výšky objektu a umožňuje nám vytvoření 3D grafu měřeného objektu. Mezi největší výhody optických metod patří především skutečnost, že měření je prováděno bezkontaktně.

Vzhledem ke zvolenému rozlišení promítané textury a také přesnosti měření navrženého systému, je systém vhodný především pro rekonstrukci přibližného tvaru měřeného 3D objektu o velikosti minimálně jednotek centimetrů. U předmětů menších než 1cm by mohlo dojít k poměrně značné relativní chybě měření.

Maximální velikost předmětu je dána především rozsahem mechanického polohovacího systému a také výkonem zvoleného světelného zdroje. Mechanický polohovací systém je navržen tak, aby se kamera a projektor vůči sobě daly zcela libovolně natáčet. Omezením je pouze maximální velikost triangulační báze, která činí 600mm. Pro každou změnu natočení kamery a projektoru musí být ovšem provedena nová kalibrace. Systém by měl být teoreticky schopen měřit předměty libovolné velikosti, což ovšem není reálné, vzhledem k omezenému výkonu světelného zdroje. Systém byl testován na předmětech o velikosti maximálně 10 cm. Reálný odhad horní hranice velikosti předmětů, pro který je navržený systém ještě vhodný, činí při ideálních podmínkách osvětlení a vhodné použité optiky přibližně 100cm ve všech osách.

9. ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na téma „3D triangulační technika rekonstrukce objektů“. Měření povrchů 3D objektů optickými metodami patří obecně k nevhodnějším řešením problému pro svou přesnost, rychlost a hlavně bezkontaktní přístup k objektu.

V práci je uveden přehled používaných optických metod rekonstrukce trojrozměrných objektů (Kapitola 3). Je zde především rozvedena metoda fotogrammetrické rekonstrukce objektu s použitím světelného vzoru a CCD kamery (3D aktivní triangulační metoda).

Dále je v práci popsán měřicí systém navržený a sestrojený pro danou metodu (Kapitola 4). Byl navržen vhodný druh promítaného vzoru a vhodný druh zdroje světla, na jejichž základě byl sestrojen projektor. Dále byl navržen a realizován mechanický posuvný systém, sloužící k pevné fixaci a vzájemnému natočení projektoru a kamery. Posuvný systém, kamera a projektor dohromady utvořily měřicí systém.

Další důležitou částí práce je automatická kalibrace tohoto měřicího systému. Jsou popsány algoritmy pro automatické nalezení dat vhodných ke kalibraci sestrojeného systému (Kapitola 5), samotná kalibrace systému a vyhodnocení chyb kalibrace (Kapitola 6).

Následně jsou v práci popsány algoritmy pro automatické měření rozměrů objektů (Kapitola 7). Výsledky všech algoritmů byly vyhodnoceny na testovacích měřeních. Byly definovány podmínky a omezení pro použití realizované metody, především závislost kvality rekonstrukce na tvaru a materiálu měřeného objektu (Kapitola 8).

Při práci bylo použito programů Matlab 6.5 a MS Office. Veškeré výpočty, grafy a tabulky jsou uvedeny v elektronické příloze na CD.

10. SEZNAM LITERATURY

10.1 KNIHY

- [1] Hlaváč V., Šonka M.: Počítačové vidění, Grada, Praha 1992
- [2] Haubecker H., Geißler P., Jähne B.: Handbook of Computer Vision and Applications, Volume 1 – Sensors and imaging. Academic press, San Diego 1999.

10.2 ODBORNÉ ČLÁNKY A PRÁCE

- [3] Raymond Daley, Laurence Hassebrook: Channel capacity model of binary encoded structured light-stripe illumination
- [4] Komzák P. : Detekce 3D objektů na základě označení světelným zdrojem, VUT Brno 2001.
- [5] Ing. Pavel Tišnovský: Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru Minolta Vivid VI-700
- [6] Ing. Kalová Ilona, Ing. Horák Karel: Optické metody měření 3D objektů
- [7] Ing. Miloš Železný, Ph.D: Zpracování digitalizovaného obrazu
- [8] Jiří Sochor, Josef Pelikán: Modely prostorových těles

10.3 INTERNETOVÉ STRÁNKY

- [9] <http://cmp.felk.cvut.cz/demos/Stereo/New/Matching/smm.html> - stereovidění
- [10] www.3d.werdi.cz - Principy 3D snímání

11. PŘÍLOHY

Veškeré přílohy k této práci jsou uvedeny v elektronické podobě na přiloženém CD. Jednotlivé adresáře CD obsahují:

WORD – Diplomová práce v elektronické podobě

EXCEL – Grafy, tabulky, výpočty chyb

MFILE – Soubory programu Matlab 6.5

OBRAZKY – Obrázky použité v práci

FOTKY – Fotky nafocené digitálním fotoaparátem

KALIBRACE – Snímky použité pro kalibraci měřicího systému

MERENI – Snímky pořízené měřicím systémem a jejich vyhodnocení

KVALITA – Snímky příslušející hodnocení kvality

12. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.1 a),b) - Stereoskopické snímání ze dvou míst	5
Obr. 3.2 a) - Stabilní rozpoznávání , b) - Hloubkové rozpoznávání	5
Obr. 3.3 - Triangulační trojúhelník	6
Obr. 3.4 - Princip trojrozměrné rekonstrukce	7
Obr. 3.5 a),b),c),d) - Závislost přesnosti na hustotě mřížky.....	8
Obr. 3.6 - Předmět nasvícený mřížkovou strukturou	9
Obr. 3.7 - Rekonstrukce nasvíceného předmětu	9
Obr. 3.8 - Rekonstrukce předmětu technikou barevného kódu.....	10
Obr. 4.1 - Schéma pracoviště	12
Obr. 4.2 - Příklad předmětu nasvíceného proužkovou texturou	13
Obr. 4.3 - Příklad předmětu nasvíceného kosočtvercovou texturou	13
Obr. 4.4 - Schematické zapojení projektoru.....	17
Obr. 4.5 - Schéma mechanického polohovacího systému.....	18
Obr. 4.6 - Sestrojený měřicí systém	18
Obr. 4.7 - Pracoviště.....	19
Obr. 5.1 - Navržený diapozitiv.....	21
Obr. 5.2 - Navržená kalibrační podložka	22
Obr. 5.3 - Výsledný kalibrační snímek	22
Obr. 5.4 - Výřez aktivní oblasti snímku.....	23
Obr. 5.5 - Spodní pomocná oblast snímku.....	24
Obr. 5.6 - Výsledek prahování	25
Obr. 5.7 - Použité mazací masky	26
Obr. 5.8 - Nalezené středy aktivního pole.....	27
Obr. 5.9 - Výsledek nalezení pomocných značek	28
Obr. 6.1 - Kalibrační rovina v prostoru.....	38
Obr. 6.2 - Kalibrační rovina ve snímku.....	38
Obr. 6.3 - Kontrola algoritmů pro nalezení dat vhodných pro kalibraci.....	39
Obr. 6.4 - Vyobrazení původních a vypočtených bodů pro jeden proužek.....	41
Obr. 6.5 - Chyba v souřadnici X	41

Obr. 6.6 - Chyba v souřadnici Y	42
Obr. 6.7 - Chyba v souřadnici Z.....	42
Obr. 7.1 - Originální snímek s měřeným objektem.....	45
Obr. 7.2 - Naznačení rozdělení snímků do částí	45
Obr. 7.3 - Prahovací masky.....	46
Obr. 7.4 - Výsledek prahování po částech a odstranění pomocného pruhu.....	47
Obr. 7.5 - Středý jednotlivých proužků.....	48
Obr. 7.6 - Doplnění a nahrazení linearit v obraze	49
Obr. 7.7 - Středý vyhlazeného obrázku.....	49
Obr. 7.8 - Výsledek odstranění nevhodných částí snímků.....	51
Obr. 7.9 - Výsledek trasování čar.....	51
Obr. 7.10 - Výsledný 3D graf objektu.....	52
Obr. 7.11 - Hloubková mapa objektu.....	53
Obr. 8.1 - První ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa	55
Obr. 8.2 - Druhý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa.....	56
Obr. 8.3 - Třetí ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa	56
Obr. 8.4 - Čtvrtý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa.....	57
Obr. 8.5 - Pátý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa.....	57
Obr. 8.6 - Šestý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa	58
Obr. 8.7 - Sedmý ukázkový snímek, výsledný 3D graf a hloubková mapa.....	58
Obr. 8.8 - Testovací předměty.....	59
Obr. 8.9 - porovnání hloubkové mapy a měřeného objektu.....	62
Obr. 8.10 - Ukázka odlesku na nevhodném předmětu	64
Obr. 8.11 - Ukázka nevhodného materiálu (velká absorpce).....	64
Obr. 8.22 - Ukázka nevhodného předmětu (nejednotná barva)	64
Obr. 8.13 - Porovnání předmětů stejných materiálů a různých barev (kůže)	64
Obr. 8.14 - Porovnání předmětů stejných materiálů a různých barev (plast)	65
Obr. 8.15 - Porovnání předmětů stejných materiálů a různých barev (silon)	65
Obr. 8.16 - Předmět s vhodným povrchem pro rekonstrukci.....	66
Obr. 8.17 - Předmět s nevhodným povrchem pro rekonstrukci (tmavý a lesklý)	66
Obr. 8.18 - Ukázka nevhodných předmětů	67

Obr. 8.19 - Příklad ne zcela vhodného předmětu.....	67
Obr. 8.20 - Ukázka příliš členitého povrchu	67
Obr. 8.21 - Ukázka příliš členitého povrchu	68
Obr. 8.22 - Ukázka příliš členitého povrchu	68