

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

3D rekonstrukce objektů pomocí stereovize

3D reconstruction of objects using computer stereo vision

Diplomová práce

Studijní program: PRŮMYSL 4.0

Studijní obor: Studijní program je bez oborový

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Králík Ph.D.

Bc. Klára Chvalová

Praha 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci s názvem 3D rekonstrukce objektů pomocí stereovize vypracovala samostatně pod vedením Ing. Vlastimila Králíka Ph.D. a že jsem použila pouze podklady (literaturu, zdroje, software apod.) uvedené v textu práce a v příloženém seznamu.

V Praze 11. 8. 2019

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu této diplomové práce Ing. Vlastimilovi Králíkovi Ph.D. za pomoc při řešení problémů a Ing. Martinu Ronovi za konzultace.

Dále bych ráda poděkovala svým rodičům za podporu při studiu, bez níž by nebylo možné tuto práci vypracovat a všem dalším, kteří mi pomohli práci dokončit.

Anotační list

Jméno autora:	Klára CHVALOVÁ		
Název DP:	3D rekonstrukce objektů pomocí stereovize		
Anglický název:	3D reconstruction of objects using computer stereovision		
Rok:	2019		
Studijní program:	PRŮMYSL 4.0		
Ústav:	<i>Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky</i>		
Vedoucí DP:	Ing. Vlastimil Králík Ph.D.		
Bibliografické údaje:	počet stran	78	
	počet obrázků	35	
	počet tabulek	8	
	počet příloh	8	

Klíčová slova: Strojové vidění, stereovize, 3D rekonstrukce, pasivní triangulace, mrak bodů

Anotace

Tato práce se zabývá tématem strojového vidění, s důrazem na metodu stereovize. První část obsahuje popis současně používaných metod strojového vidění. Dále práce obsahuje podrobný popis snímání prostorových objektů za použití pasivní a aktivní triangulace spolu s popisem vstupních parametrů, které snímání ovlivňují. V další části je popsána optická sestava a algoritmus použitý pro digitální prostorovou rekonstrukci objektů pomocí stereovize. Dále práce obsahuje analýzu citlivosti prostorové rekonstrukce na kalibrační parametry a test kvality rekonstrukce pro různé skenovací podmínky. Závěrem práce je porovnání mraku bodů získaného pomocí stereovize s mrakem bodů získaným měřením na optickém profilometru RedLux.

Keywords: Machine vision, stereovision, 3D reconstruction, passive triangulation, point cloud

Abstract

This thesis is focused on topic of machine vision, with an emphasis on stereovision method. The first part contains a description of currently used methods of machine vision. Further the thesis contains a detailed description of scanning of spatial objects using passive and active triangulation together with a description of input parameters that affect the scanning. In the next part optical set and algorithm used for digital spatial reconstruction of objects using stereovision is described. Furthermore, thesis contains a sensitivity analysis of spatial reconstruction to calibration parameters and a reconstruction quality test for various scanning conditions. Last part of the thesis contains a comparison of a point cloud obtained by stereovision with a point cloud obtained by measurement on optical profilometer RedLux.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Bezkontaktní metody 3D rekonstrukce	10
2.1	Triangulace	10
2.1.1	Pasivní triangulace.....	11
2.1.2	Aktivní triangulace.....	11
2.1.3	Rekonstrukce z pohybu.....	18
2.2	Fokusovací metody	18
2.3	Optická interferometrie	19
2.4	Měření doby letu modulovaného světla	20
3	Parametry ovlivňující optický systém	21
3.1	Volba kamery	21
3.2	Zdroj světla	23
3.3	Vlastnosti snímaného objektu.....	24
3.4	Vlivy okolí.....	24
3.5	Uspořádání prvků stereo setu	25
3.5.1	Paralelní kamery	25
3.5.2	Neparalelní kamery	26
4	Matematický popis snímání bodu kamerou.....	30
4.1	Druhy projekce z 3D do 2D	31
4.1.1	Ortografická (paralelní) projekce	31
4.1.2	Perspektivní projekce.....	32
4.2	Model kamery	33
4.2.1	Tenká čočka.....	33
4.2.2	Dírkový model	34
4.3	Vzájemný vztah dvojice kamer	38
4.3.1	Epipolární geometrie	38
4.4	Kalibrace systému.....	41
4.4.1	Normalizovaný 8 point algoritmus podle Hartleyho.....	42
4.4.2	Metoda robustního určení fundamentální matice podle Zhanga	42
4.4.3	Jak vylepšit kalibraci?	43

4.5	Rektifikace a hledání korespondencí.....	44
5	Cíle práce.....	46
6	Optický systém pro stereovizi.....	47
7	Algoritmus testované metody.....	49
7.1.1	Kalibrace kamer.....	49
7.1.2	Získání stereo snímků.....	51
7.1.3	Rektifikace snímků a tvorba mapy disparit.....	51
7.1.4	Rekonstrukce prostorových souřadnic bodů.....	53
8	Citlivostní analýza 3D rekonstrukce.....	54
9	Vliv promítaných textur na 3D rekonstrukci.....	58
10	Porovnání se skeny z profilometru RedLux.....	65
10.1	Parametry měření.....	66
10.2	Vyhodnocení výsledků měření.....	67
11	Závěr.....	71
12	Seznam obrázků.....	76
13	Seznam tabulek.....	77
14	Seznam použitého software.....	78
15	Seznam příloh.....	78

1 Úvod

Strojové vidění je stále se rozvíjející odvětví, které se zabývá automatickým získáváním určitých informací o objektech či scénách za účelem jejich digitalizace a možnosti jejich dalšího využití. Jako příklad můžeme uvést rozpoznávání určitých objektů na snímku, sledování pohybu na sérii snímků nebo získávání informací o rozměrech, vlastnostech či poloze objektů.

Pro lidské oko je většina těchto úloh triviální díky tomu, že lidský mozek je schopen neobyčejně rychle zpracovávat data získaná skrze zrak a za použití předchozích zkušeností je většinou správně interpretovat (nesprávnou interpretaci můžeme pozorovat například u optických klamů). Díky rozvoji výpočetní techniky je dnes možné zpracovávat větší objemy dat i strojově. Ale i přes dostatečný výpočetní výkon, který nám umožňuje rychle zpracovávat například série snímků ve vysoké kvalitě, je správná interpretace stále výzvou.

Stroje nemusí získávat informaci o stavu okolí stejnými způsoby jako lidé, a proto existují různé přístupy k této problematice [1]. Metody používané v současné době jsou stručně popsány v první části této práce.

Tato práce se hlouběji zabývá využitím metody stereovize, která získává informaci o hloubce scény pomocí pasivní triangulace [2]. Výhodou metod založených na triangulaci je jejich rychlost a univerzálnost. Skenovací soustavy mohou být poměrně levné, kompaktní a mobilní, což jsou silné argumenty pro jejich využití v průmyslu. Teoreticky lze zjišťovat rozměry velmi komplexních objektů s dobrou přesností. Metoda je bezkontaktní, tedy nedochází k žádnému ovlivnění materiálu. Nevýhodou oproti kontaktnímu měření, například souřadnicovým strojem, je nižší a proměnlivá přesnost. Pro získání přesných výsledků je nutné zvolit správnou metodu pro konkrétní aplikaci, provést skenování za příznivých okolních podmínek, jako je například vhodné osvětlení a vhodně zvolit celou řadu dalších parametrů, které mohou měření ovlivnit.

Právě tato vysoká složitost brání rozšíření této metody do průmyslové výroby i přesto, že existuje mnoho způsobů, jak stereovizi v průmyslu využít. Patří mezi ně například získávání 3D modelů pro zpětné inženýrství, tvorba modelů pro 3D tisk, kontrola rozměrové kvality produktu, kontrola povrchů, kontrola počtu výrobků, či lokalizace objektu při automatické manipulaci a zakládání (tzv. Bin – Picking) [3]. V mnoha případech je vysoká rychlost skenování nutnou podmínkou. Z tohoto důvodu je stereovize perspektivní metodou, která si může najít své místo v mnoha průmyslových aplikacích.

2 Bezkontaktní metody 3D rekonstrukce

Všechny metody pro digitální prostorovou rekonstrukci objektů nějakým způsobem získávají souřadnice bodů v prostoru. Cílem je získat dostatečné množství bodů, které tvoří povrch zkoumaného objektu s požadovanou přesností.

Bezkontaktní metody se dají obecně rozdělit na metody pasivní, kdy je rekonstruovaný objekt pouze sledován snímačem a aktivní, kdy je k měření nutné využít dodatečný zdroj světla. Následující kapitola obsahuje přehled a popis současně používaných bezkontaktních metod pro rekonstrukci povrchu prostorových objektů [1].

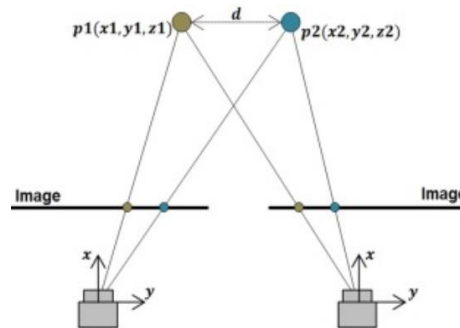
2.1 Triangulace

Pokud chceme získat trojrozměrný model objektu, musíme často řešit problém ztráty informace o hloubce objektu při měření. Většina běžně používaných snímačů totiž transformuje trojrozměrnou scénu na dvourozměrný obraz. Zpětné získání hloubkové souřadnice z dvourozměrného obrazu je tedy možné pouze na základě další doplňující informace. Tuto informaci je možné získat například pomocí různých forem triangulace.

Triangulace spočívá ve zjišťování hloubkové souřadnice ze známé geometrie systému a z naměřených údajů. Metody triangulace můžeme rozdělit na pasivní a aktivní podle toho, zda je triangulační trojúhelník tvořen pouze snímači a sledovaným bodem (pasivní) nebo zdrojem světla, snímačem a sledovaným bodem (aktivní). [1]

2.1.1 Pasivní triangulace

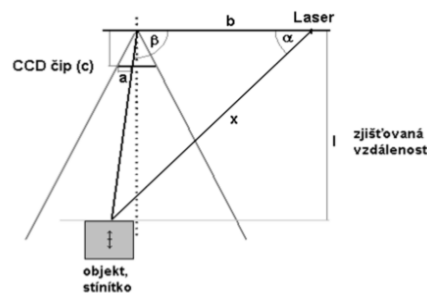
Pasivní triangulace je pravděpodobně nejstarší metodou 3D rekonstrukce. Jedná se v podstatě o metodu, která se snaží napodobit lidský zrak, kdy jsou oči nahrazeny dvěma snímači, jak je znázorněno na Obr. 1. Každý snímač sleduje stejný bod v prostoru z jiného místa. Z rozdílu těchto dvou pohledů lze při známé geometrii měřicího systému rekonstruovat hloubku [2].



Obr. 1. - Schéma optického systému využívajícího pasivní triangulaci [4]

2.1.2 Aktivní triangulace

Na Obr. 2 je vyobrazeno základní schéma aktivní triangulace. Trojúhelník je tvořen zdrojem, snímačem a zkoumaným bodem. Úhel α , který svírá paprsek světla ze zdroje s bází (spojnice snímače a zdroje) je neměnný. Úhel β mezi odrazeným paprskem a bází je určen proměnnou pozicí vysvíceného bodu CCD snímače. Za předpokladu, že známe velikost báze a parametry zdroje a kamery lze z velikosti tohoto úhlu určit hloubkovou souřadnici bodu. [5]



Obr. 2. - Aktivní triangulace [3]

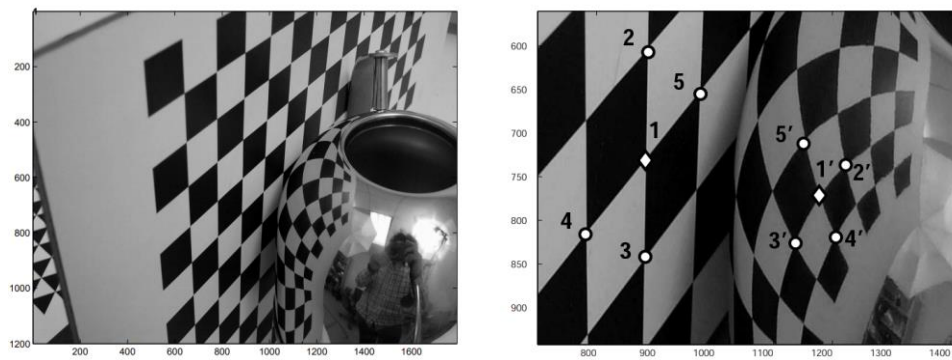
Osvětlení objektu nemusí být pouze bodové. Tento přístup je časově neefektivní, protože se, pro využití plného rozlišení, musí provést jedno měření pro každý pixel. Efektivnějším způsobem je promítání paprsku na zkoumaný objekt (z angl. light stripe projection) [6]. Zdroj světla v tomto případě vydává světlo ve tvaru plochy, která při průniku se zkoumaným objektem vytvoří na jeho povrchu pruh. Pruh se na objektu zakříví podle jeho tvaru a na snímač se promítne jako křivka. Z většího množství takových křivek lze následně zrekonstruovat tvar objektu. Pro využití plného rozlišení snímače je potřeba provést tolik měření, kolik má snímač řádků či sloupců pixelů, protože z jednoho měření jsou získány údaje vždy pouze o jednom řádku či sloupci.

Vzhledem k tomu, že rozpoznání laserového paprsku na zaznamenaném snímku je založeno na vyhodnocení pixelů s nejvyšší intenzitou, je nutné brát v úvahu odlesky světla z jiných zdrojů, než je laser, zvláště při skenování objektů s vyšší odrazivostí povrchu. Při nevhodných podmínkách osvětlení nelze tuto metodu spolehlivě aplikovat. Při použití vysokorychlostní kamery lze teoreticky získat velké množství snímků v krátkém čase. V tomto případě je ale skenovací sestava finančně náročná a musí se řešit problém přesné synchronizace snímače a světelného zdroje. V praxi bývá skenování většinou pomalé, protože pro získání skenu s vysokým rozlišením je nutné provést velké množství měření. Také je vždy nutné, aby jedna z částí systému byla pohyblivá, ať už je to skenovaný předmět nebo laserový zdroj. To výrazně zvyšuje komplikovanost sestavy. Poslední nevýhodou je určité bezpečnostní riziko, které je vždy spojeno s použitím laseru. Tato metoda skenování je vhodná například pro aplikace, při kterých se výrobky pohybují po dopravníku a při tom jsou skenovány. Musí být ale zajištěn přesný pohyb a správná synchronizace všech částí sestavy.

Poslední metodou využívající aktivní triangulaci je takzvaná 3D aktivní triangulace, kdy se na celý zkoumaný povrch zároveň promítá určitý vzor, jehož analýza umožní rekonstrukci hloubky scény [6]. Zatím co u předchozích metod je typickým zdrojem světla laser, na promítnutí vzoru na celou plochu zároveň již nestačí. K tomuto účelu se používají většinou projektory s vhodnými parametry pro požadovanou aplikaci.

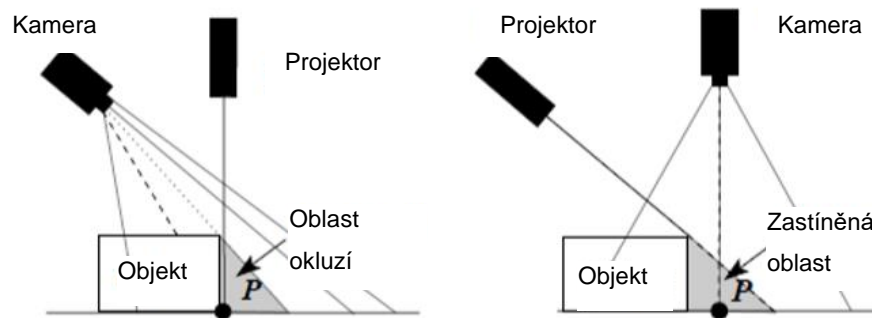
Promítnutý vzor skenovanou scénou zakóduje tak, že přiřadí určitou vlastnost bodům na scéně. Takovéto unikátní označení bodů umožní vyhodnocení změny mezi původním vzorem a vzorem zakřiveným podle povrchu zkoumaného objektu.

V případě lesklého povrchu nemusí být vzor promítán, ale textura může být na objekt zobrazena pouhým odrazem vzoru. Jestliže bude zkoumaný povrch rovný, textura zůstane tvarově nezměněna. Pokud bude ale povrch zakřivený, změní se i tvar textury, jak je ukázáno na Obr. 3. [7]



Obr. 3. - Odraz známého vzoru na povrchu zkoumaného objektu [7]

Správné umístění prvků skenovacího zařízení je klíčové pro dosažení uspokojivých výsledků. Oblast, do které projektor promítá, se musí co nejvíce shodovat se zorným polem kamery. V opačném případě nevyužíváme plné rozlišení a ubíráme na přesnosti skenů. Zároveň je žádoucí, aby projektor promítal na co největší povrch skenovaného objektu. Je také ale nutné, aby celou tuto plochu zaznamenávala kamera. Výsledky můžeme vyhodnotit pouze z bodů na který svítí projektor a zároveň je vidí kamera, jak je znázorněno na Obr. 4. Pokud na určitou oblast projektor svítí ale kamera ji nevidí vznikají okluze. Pokud kamera vidí místo, na které nesvítí projektor, nedokáže oblast vyhodnotit [8].



Obr. 4. - Vliv uspořádání prvků optického systému při aktivní triangulaci [8]

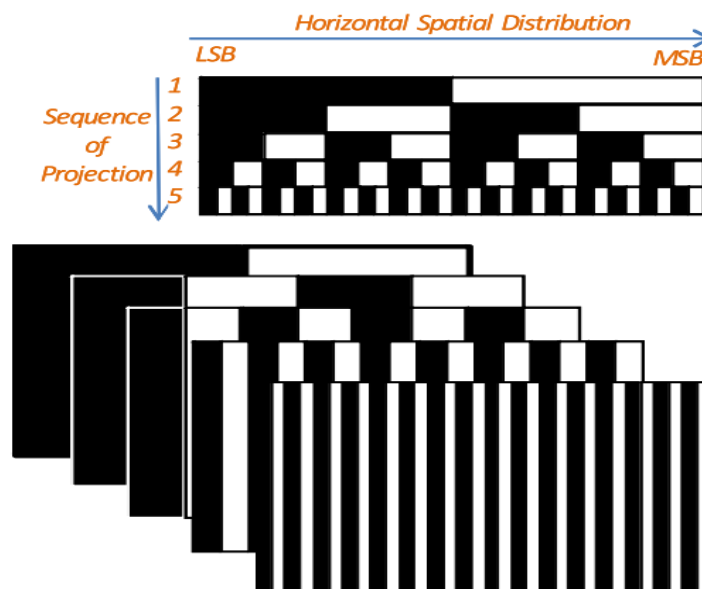
Pro aktivní 3D triangulaci obecně platí, že skenovací sestava musí obsahovat minimálně jeden zdroj světla a jeden snímač. Běžně se ale používá sestava se dvěma kamerami a jedním projektorem. V tu chvíli se otevírají dvě možnosti, jak tuto sestavu využít. První možností je přejít na postupy pasivní triangulace s tím, že je nutno kalibrovat obě kamery, ale polohu a parametry projektoru znát nepotřebujeme. V tomto případě je projektor pasivním prvkem, který ale může promítnutím vzoru přidat povrchu texturu a tím zjednodušit hledání korespondencí na stereo snímcích. Druhou možností je kalibrovat i projektor a vyhodnocovat obě dvojice kamera – projektor. Tento přístup je náročnější, ale zvyšuje přesnost výsledků.

2.1.2.1 Sekvenční více snímkové kódování

Existuje celá řada možností, jak scénu pomocí plošného promítání zakódovat. Jedním z parametrů, který tyto způsoby rozděluje, je počet potřebných snímků. Pro některé metody je nutné pořídit sekvenci několika snímků s různými vzory. Mnoho metod ale kóduje scénu jedním vzorem a stačí pak pořídit jediný snímek.

Základní více snímkovou metodou je **binární kódování** [6]. Na snímaný objekt se promítá sekvence černobílých pruhů o takových tloušťkách, že každá sekce ve snímaném prostoru má unikátní binární kód, jak je ukázáno na Obr. 5. Rozlišení závisí na počtu promítnutých vzorů. Každý promítnutý vzor obsahuje pruhy o dvojnásobné tloušťce než na vzoru předcházejícím. Tím je jednotlivým sekcím postupně přiřazován binární kód skládající se z jedniček, v případě promítnutí bílé barvy, a nul, v případě

promítnutí barvy černé. Sekvence o n vzorech tedy přiřadí unikátní kód 2^n sekcím. Při využití plného rozlišení snímače mají nejtenčí proužky šířku jednoho pixelu, načež v každém dalším snímku je šířka dvojnásobná. U tenkých pruhů hrozí nebezpečí, že nebudou na snímcích zřetelně viditelné. To může být způsobeno různými příčinami jako je lesklost povrchu skenovaného objektu či velké natočení skenovaných ploch. Rozlišení je limitováno rozlišením projektoru, je tedy nutné volit vhodný projektor, aby mohla být zachována požadovaná přesnost. Pokud chceme unikátně kódovat každý pixel, musíme scénu kódovat v obou osách, čímž se počet potřebných snímků zdvojnásobí.



Obr. 5. - Binární kódování [6]

Úhel mezi bází (spojnice kamera - projektor) a spojnicí projektor – bod je určen binárním kódem sekce. Úhel mezi bází a spojnicí kamera – bod může být určen ze zaznamenaných snímků. Tyto údaje jsou dostatečné k dopočtení hloubkové souřadnice bodů.

Nevýhodou této metody je, že pro dosažení dobrého rozlišení je nutné použít dlouhou sekvenci vzorů. Při zaznamenávání snímků se nesmí zkoumaná scéna pohnout a celý

proces může trvat příliš dlouho pro požadovanou aplikaci. Teoreticky může být proces poměrně rychlý, je pak ale velmi náročný na synchronizaci. [8]

Jednoduchý způsob, jak snížit počet potřebných snímků je **kódování ve stupních šedi** [6]. Tato metoda nepoužívá v promítaných vzorech jen minimální a maximální intenzitu osvětlení (černá a bílá), ale i různé stupně šedi. Při m stupních šedi a n vzorech zakódujeme m^n sekcí scény.

Další metodou je **kódování pomocí fázového posunu** [9]. Na objekt se promítne sekvence vzorů, jejichž intenzita má v jednom směru sinusový průběh. Vzory mají vůči sobě fázové posunutí. Hloubková souřadnice se získává z porovnání součtu všech intenzit v jednom bodě a referenční intenzity (na referenční ploše). Periodicita promítnutého vzoru ale logicky zapříčiňuje periodicitu vypočtených intenzit jednotlivých pixelů, což způsobuje nepřesnosti při rekonstrukci povrchu. Tento problém se většinou řeší kombinací této metody s dalším přístupem jako je například kódování ve stupních šedi. Přidání další metody ale prodlužuje skenovací čas a zvyšuje celkovou složitost. Dalším přístupem, který tento problém odstraňuje, je výpočet absolutních hodnot fáze, nejspíše tak, že se k hodnotám přičítá příslušný násobek 2π . Tento přístup ale vykazuje dobré výsledky pouze pro hladké povrchy bez hloubkových skoků, což je výrazně omezuje použitelnost. [10]

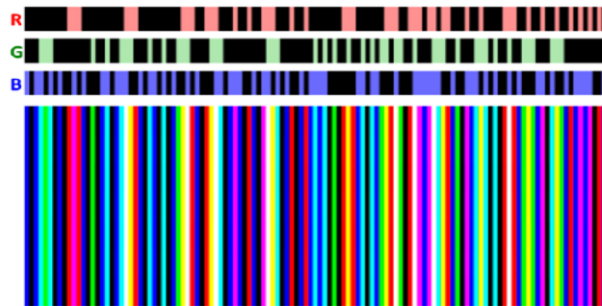
2.1.2.2 Jedno - snímkové kódování

Metody, které vyžadují pouze jediný snímek k rekonstrukci hloubky scény mají velkou výhodu ve svojí rychlosti. Je také možné je použít i pro pohyblivé objekty. Tato rychlost je ale bohužel často na úkor přesnosti, protože zakódovat jedním obrazcem celou scénu ve velkém rozlišení není jednoduché. Existuje mnoho metod založených na různých vlastnostech promítaných obrazců [8].

V první řadě lze využít takzvané **barevné kódování** [6]. Při kódování scény pomocí barev je využito prostorové projekce s kontinuálně se měnící vlnovou délkou. Přiřazení této vlastnosti pro každý pruh scény zajistí zjednodušení při hledání korespondencí mezi získaným obrazem a původním vzorem.

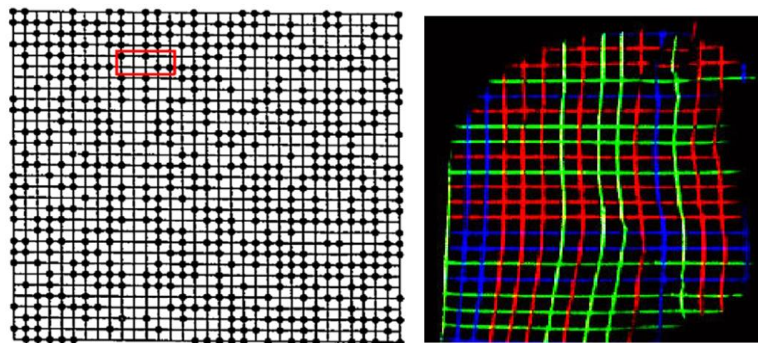
Při rekonstrukci hladkých spojitých povrchů funguje kódování pomocí pruhů či barevných přechodů poměrně spolehlivě, ale při projekci vzoru na členitý povrch můžou být pruhy kamerou zaznamenány v jiném pořadí a tím vnést chyby do interpretace korespondencí. Tento problém je možné řešit tak, že vzory budou uspořádány v takovém pořadí, že jejich sekvence jsou unikátní. Tím pádem při vyhodnocení nejen vlastního pixelu ale i jeho okolí nemůže být bod zaměněn za jiný a vyhodnocení korespondencí proběhne správně.

Kódování pruhy probíhá například pomocí **De Bruijnovy sekvence** [6], znázorněné na Obr. 6, ve které je libovolně zvolená trojice sousedících pruhů unikátní.



Obr. 6. - Kódování pomocí De Bruijnovy sekvence [6]

kódování nemusí probíhat pouze v jedné ose. Existuje několik metod takzvaného mřížkového kódování, které má za úkol unikátně označit každé okno určité velikosti na obrazci. Toto kódování může probíhat jak v černobílé, pomocí tvaru, tak v barvách, jak je znázorněno na Obr. 7.



Obr. 7. - Mřížkové kódování [6]

2.1.3 Rekonstrukce z pohybu

Pro rekonstrukci scény touto metodou teoreticky stačí pouze jedna kamera, která scénu opakovaně snímá z různých úhlů [11]. V tomto případě je ale nutné používat pokročilejší algoritmy pro hledání významných bodů na snímcích. Je nutné, aby algoritmus správně vyhodnotil a označil stejný bod vyfocený z různých úhlů, vzdáleností, a dokonce i s jiným osvětlením. Existují různé algoritmy snažící se o co největší robustnost. Původní algoritmus pro rekonstrukci z pohybu z roku 1999 se nazývá *scale invariant feature transform (transformace prvků nezávislá na změně velikosti)*. Tento algoritmus je schopen párovat stejné body na sérii snímků i přes změnu velikosti snímaných objektů, což umožňuje provést rekonstrukci hloubky scény. [12] Problémem je chybějící údaj o transformaci kamery z jednoho místa, kde byl pořízen snímek, do následujícího. Tento údaj se dá získávat buď přímo, jako tomu je například ve *structure from motion (struktura z pohybu)* mobilních aplikacích, kde tento údaj zaznamenává akcelerometr, nebo je nutné tyto informace dopočítat ze snímků. V druhém případě je ale nutné, aby snímky obsahovaly několik jasně daných, rozpoznatelných bodů, které se označí jako korespondující a informace o transformaci se získá obdobně jako při kalibraci běžného setu pro stereovizi.

Tato metoda se využívá převážně pro velké objekty, jako jsou budovy či krajina, které není možné efektivně skenovat jiným způsobem [11]. Výhodou této metody je nízká cena potřebného zařízení, měření může být realizováno s jedním libovolným fotoaparátém či kamerou. Nevýhodou metody je nepříliš dobrá přesnost a velká závislost na konkrétních podmínkách. Také je potřeba pro jedno měření změnit polohu snímače což způsobuje zdržení. Pro tuto práci tedy není metoda vhodnější než klasická stereovize.

2.2 Fokusovací metody

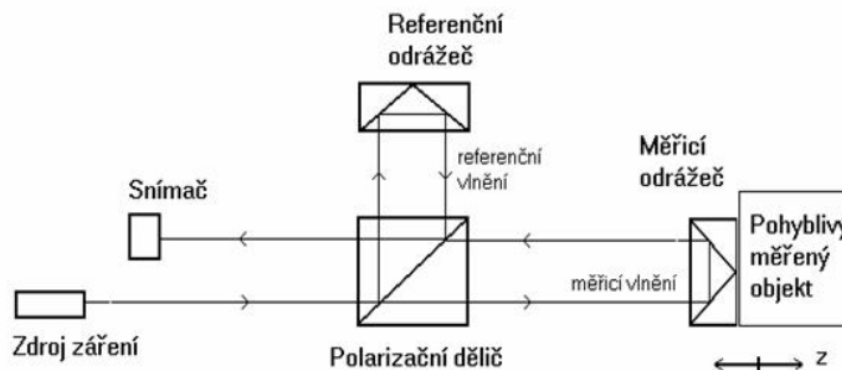
Dále existují metody fokusovací, které využívají toho, že objektiv kamery je vždy zaostřen pouze na jednu hloubku a body ve všech ostatních hloubkách se na snímači jeví jako kruhy, a ne jako body. Hloubka různých bodů na objektu se tedy musí měřit

zvlášť pro každou hloubku podle požadované přesnosti měření, nebo je možno ji odvozovat z průměrů zaznamenaných kruhů.

Tato metoda je výrazně omezena rozlišením snímače. Pokud bude rozdíl v hloubkách na objektu natolik malý, že se neprojeví zvětšením kruhu alespoň o pixel, nebude vůbec zaznamenan. Také je nutné řešit problém do kterého směru od zaostřené roviny je bod vychýlen, protože stejný průměr kruhu bude zaznamenan pro bod nacházející se před i za zaostřenou rovinou. Další nevýhodou této metody je nízká rychlost měření. [1]

2.3 Optická interferometrie

Interferometrie je bezkontaktní metoda určení rozměru existujícího objektu, která je založena na zcela jiném principu. Princip spočívá v rozdělení jednoho paprsku koherentního světla (laseru) na dva paprsky, jak je znázorněno na Obr. 8. Každý paprsek následně prochází jinou dráhou. První dráha je dráha referenční, na které se paprsek odrazí od referenčního zrcadla a putuje do detektoru s tím, že jeho dráha je známa. Druhý, měřicí, paprsek se odrazí od povrchu zkoumaného objektu a taktéž putuje do detektoru. Paprsky s původně stejnou fází dopadají na detektor s fází posunutou a interferují. Vzniklý interferenční obrazec je identifikován detektorem. Fázové posunutí může být způsobeno jak rozdílem v délce dráhy obou paprsků, tak změnou indexu lomu prostředí, jímž paprsek prochází. [13]



Obr. 8. - Princip interferometru [1]

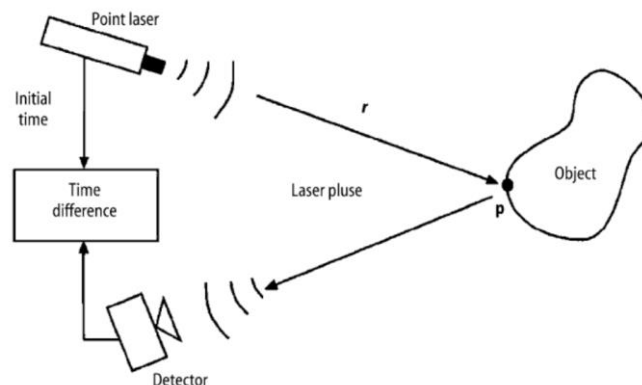
Teoretická přesnost měření interferometrem je určena přesností, s jakou známe vlnovou délku světla použitého k měření. Ovšem v reálných podmínkách je přesnost ovlivněna okolím a klesá. Vlivy okolí je možné do určité míry kompenzovat, ale nikdy jejich vliv nevymizí zcela. Interferometry se používají k velmi přesnému měření malých rozdílů vzdáleností nebo k určování indexu lomu látky [13].

Tato metoda je časově i finančně náročná a zároveň nedovoluje zaznamenat větší rozptyl hloubek najednou. Pro tuto práci je tedy nevhodná.

2.4 Měření doby letu modulovaného světla

Princip metody *time-of-flight* je založen na měření doby letu světelného pulzu. Zdroj vyšle světelný puls, ten se odrazí od měřeného povrchu a senzor ho zase zachytí [14]. Tím je možné velmi rychle zjistit vzdálenost objektu na který je zdroj namířen (Obr. 9). Tato metoda není ale dostatečně přesná, proto není pro tuto práci vhodná.

Nejznámějším využitím této metody je zařízení Kinect od společnosti Microsoft, které bylo původně vyvinuto pro herní průmysl. Zařízení dokáže velmi rychle vyhodnocovat scénu, kterou sleduje a tím umožňuje například ovládání gesty. Podobná zařízení se používají také pro orientaci robotů či autonomních aut v prostoru. Dalším využitím je automatické zaměřování fotoaparátu, kdy fotoaparát pomocí pulsu zjistí vzdálenost od objektu, na který se má zaměřit a tím pádem není potřeba provádět běžný algoritmus pro zaostřování kdy se porovnává rozmazání obrazu pro různé nastavení čoček.



Obr. 9. - Princip metody měření doby letu světla [13]

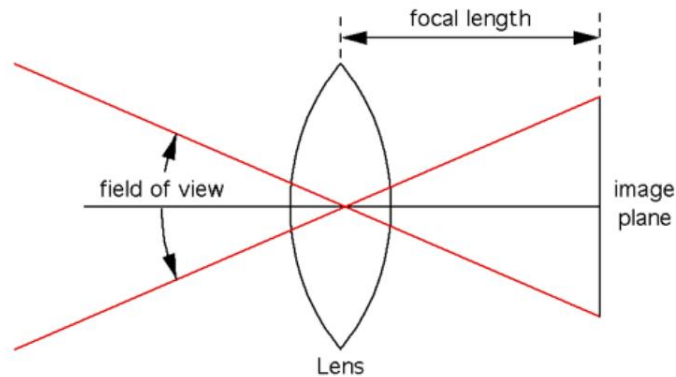
3 Parametry ovlivňující optický systém

Existuje celá řada parametrů, které ovlivní podobu výsledného mraku bodů. Kromě zvolené metody rekonstrukce to jsou vlastnosti snímače a popřípadě zdroje světla sloužícímu ke kódování scény. Dále záleží na vlastnostech objektu, který má být rekonstruován a na vzájemné poloze snímačů, zdroje světla a snímaného objektu. Roli mohou hrát i další konstanty úlohy a vlivy okolí.

3.1 Volba kamery

Volba kamery ovlivní kvalitu snímků a tím pádem i kvalitu zrekonstruovaného objektu. Prvním důležitým parametrem je velikost a kvalita snímače (čipu) který bude udávat počet pixelů a rozměr fotografie. Počet pixelů na snímači přímo omezuje přesnost, s jakou bude možné zaznamenat objekt zkoumat, protože počtem pixelů je dána horní hranice počtu bodů, které je v ideálním případě možné zrekonstruovat. Další otázkou je, zda zvolit kameru barevnou či černobílou. Pro některé aplikace je černobílá kamera zcela dostačující, protože vyhodnocování snímků probíhá ve stupních šedi. Pokud je zvolená metoda triangulace založená na vyhodnocování barev je nutné použít finančně náročnější kameru barevnou.

Druhou zásadní částí kamery, která ovlivňuje podobu snímků je objektiv, jehož základní charakteristikou je ohnisková vzdálenost čočky. Ta, společně s rozměrem snímače, ovlivňuje velikost záběru kamery. Na Obr. 10 je znázorněn vztah těchto tří hodnot. Vzhledem k tomu, že nejčastější tvar snímačů je obdélník, je potřeba vyhodnotit zorné pole pro dva směry, tedy výšku i šířku snímače, popřípadě pro jeho diagonálu.



Obr. 10. - Vztah mezi zorným polem, ohniskovou vzdáleností a velikostí senzoru kamery [14]

Úhel záběru AoW se vypočítá z podobnosti trojúhelníků takto (1):

$$AoW = 2 * \operatorname{arctg}\left(\frac{d}{2f}\right) \quad (1)$$

kde d je zkoumaný rozměr snímáče a f je ohnisková vzdálenost čočky.

Ohnisková vzdálenost ovlivňuje kromě zorného pole ještě jeden důležitý parametr, a to hloubku ostrosti. Kromě ohniskové vzdálenosti závisí hloubka ostrosti ještě na nastavení clony a vzdálenosti, na kterou je objektiv zaostřen. Hloubka ostrosti je oblast omezená dvěma plochami rovnoběžnými s obrazovou rovinou, ve které je dodržena požadovaná ostrost snímání. Objektiv je vždy dokonale zaostřen pouze na jednu vzdálenost, body v této vzdálenosti se na senzor promítnou opravdu jako body. Kterékoliv body, které jsou blíže nebo dále se promítnou jako kruhy. Pokud je ale například tento kruh menší než velikost pixelu na senzoru, pak není ostrost nijak ovlivněna a stále dostáváme tak dokonale ostrou fotografii jaké je kamera schopna.

Pro vypočtení šířky pásma s požadovaným zaostřením nejprve spočteme tzv. hyperfokální vzdálenost H (2). To je taková vzdálenost, na kterou když zaostříme kameru, tak bude hloubka ostrosti maximální, konkrétně od poloviny hyperfokální vzdálenosti do nekonečna. Následně můžeme spočítat minimální vzdálenost D_{min} (3) a maximální vzdálenost D_{max} (4) pro určitou vzdálenost objektu d .

$$H = \frac{f}{Nc} + f \quad (2)$$

$$D_{min} = \frac{d(H - f)}{H + d - 2f} \quad (3)$$

$$D_{max} = \frac{d(H - f)}{H - d} \quad (4)$$

<i>H</i>	<i>Hyperfokální vzdálenost, mm</i>
<i>f</i>	<i>Ohnisková vzdálenost, mm</i>
<i>d</i>	<i>Zaostřená vzdálenost, mm</i>
<i>D_{min}</i>	<i>Nejmenší vzdálenost s požadovaným zaostřením, mm</i>
<i>D_{max}</i>	<i>Největší vzdálenost s požadovaným zaostřením, mm</i>
<i>N</i>	<i>Clonové číslo</i>
<i>c</i>	<i>Circle of confusion – průměr akceptovaného kruhu, který se zobrazí místo bodu, mm</i>

Nastavováním clony je měněna funkční plocha čočky. Čím menší je otvor, kterým proniká světlo, tím tmavší bude výsledný snímek. Nízkou světlost lze kompenzovat delší dobou expozice, ale je nutné zajistit nehybnost snímáče i scény, aby nevznikl rozmazaný snímek. Malá funkční plocha čočky také snižuje vliv chromatické aberace, jejíž příčinou je závislost indexu lomu světla na vlnové délce světla.

Posledním parametrem objektivu je ISO citlivost, která udává, jak bude zacházeno se světlem dopadajícím na snímáč. Vysoká citlivost umožní získat zřetelnou fotografii i za nedostatečného osvětlení či s velkým clonovým číslem, bude ale umocňovat šum na fotografii.

3.2 Zdroj světla

Pro vytvoření kvalitní fotografie je nutné vhodné osvětlení prostoru. Přirozené světlo může být dostačující, ale tento zdroj světla je proměnlivý, a proto jej nelze využít vždy.

Běžné umělé osvětlení místností může sloužit jako zdroj světla při pasivní triangulaci. Při vhodném nastavení parametrů (clona, ISO citlivost, doba expozice) mohou být pořízeny snímky dostatečné a konzistentní kvality. Přídavný zdroj světla může zvýšit robustnost systému, ale zároveň zvyšuje i pořizovací náklady. V případě aktivní triangulace je zdroj světla nutností. Tato práce se nezabývá v detailu metodami využívajícími laser, proto není volba laserových světelných zdrojů jejím obsahem.

Pro promítání textur či strukturovaných vzorů světla se využívá převážně projektor. Při výběru projektoru je nutné myslet na jeho konkrétní aplikaci. Podle toho lze zvolit technologii na které bude projektor založen. Dalšími důležitými parametry projektoru jsou rozlišení, svítivost, kontrast, barevnost, minimální, respektive maximální projekční vzdálenost a zorné pole. Osvětlení pomocí projektoru zvyšuje robustnost systému v tom smyslu, že systém není tak silně závislý na okolním osvětlení. Ovšem v případě lesklých předmětů může dodatečné osvětlení škodit tím, že přidává výrazné odlesky, které mohou negativně ovlivnit hledání korespondencí.

3.3 Vlastnosti snímaného objektu

Pomocí stereovize je možné rekonstruovat jak drobné předměty, tak velké objekty, jako jsou například budovy. Velikost objektu bude ovlivňovat zvolenou metodu, volbu snímačů a vzdálenost měřicí sestavy od objektu. Důležité jsou také vlastnosti povrchu předmětu jako je spojitost, drsnost, odrazivost světla, barva či textura.

3.4 Vlivy okolí

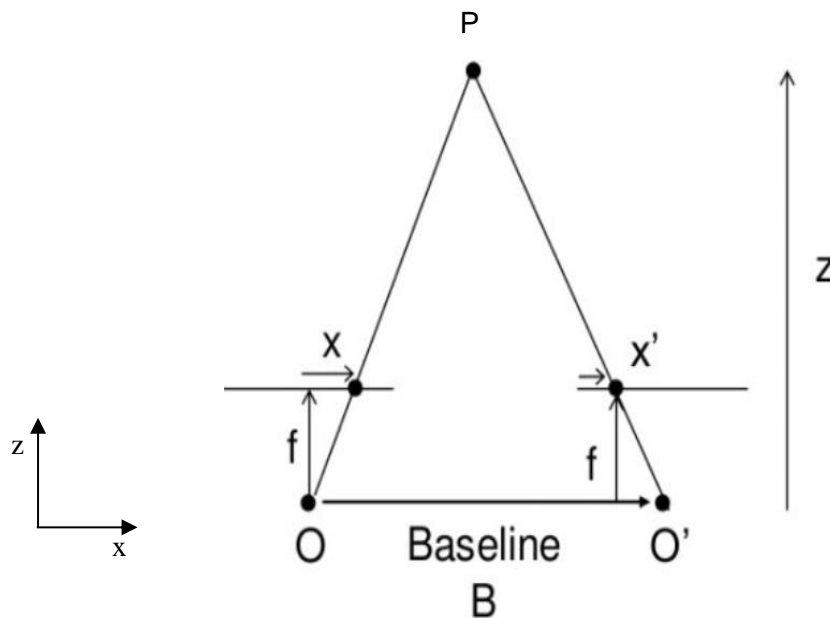
Mezi hlavní vlivy okolí patří vlastnosti okolních zdrojů světla (intenzita, spektrum, koherence), dále například přístupnost k měřenému objektu a maximální možné rozměry měřicího systému. Podstatná je i možná doba měření či otázka, zda bude možné systém kalibrovat.

3.5 Uspořádání prvků stereo setu

Snímače lze uspořádat různým způsobem. Jako první uvádím idealizovaný případ, kdy jsou optické osy kamer dokonale rovnoběžné a ohnisková vzdálenost obou objektivů je totožná. Na tomto případě je nejjednodušší popsat princip pasivní triangulace, kterým se zabývá tato kapitola.

3.5.1 Paralelní kamery

Na Obr. 11 vidíme zjednodušený model stereo setu se dvěma paralelně umístěnými kamerami jejichž vzájemná vzdálenost je B .



Obr. 11. - Geometrie paralelního stereo setu [18]

Kamera se skládá z optického středu O , respektive O' a obrazové roviny, která je od středu vzdálena o ohniskovou vzdálenost objektivů f .

Obě kamery zároveň vidí bod P , který se tím pádem promítne na obě obrazové roviny. Na každé obrazové rovině bude ale poloha promítnutého bodu jiná vzhledem ke středu příslušné obrazové roviny. Na levém stereo snímku je promítnutí bodu P vzdáleno od

středu projekční plochy o vzdálenost x a na pravém o vzdálenost x' . Rozdíl vzdáleností x a x' se nazývá disparita. Závislost mezi disparitou a hloubkovou souřadnicí z bodu P vypadá následovně (5):

$$disparita = x - x' = \frac{Bf}{Z} \quad (5)$$

Mezi disparitou a vzdáleností objektu od kamer je nepřímá úměrnost, která je ovlivněna absolutní vzdáleností kamer od sebe a ohniskovou vzdáleností objektivů. [14]

3.5.2 Neparalelní kamery

U reálné dvojice kamer nebudou optické osy nikdy dokonale paralelní. Obecně může být jedna kamera vzhledem k druhé natočena do třech různých směrů. Pro rotaci kolem osy x a z můžeme předpokládat, že úhly budou malé (jedná se pouze o nedokonalé umístění kamer) a můžeme použít aproximaci. Pro rotaci kolem osy y existují dva případy. V první případě mají být kamery stereo setu paralelní a rotace kolem osy y je znovu pouze malá, nebo máme stereo set s kamerami natočenými kolem osy y tak, aby jejich společné zorné pole bylo větší. V tomto případě již nemůžeme uvažovat, že obrazové roviny dvou kamer jsou rovnoběžné.

Rotace kolem osy x ovlivňuje při rekonstrukci pouze souřadnici y . Pokud je úhel rotace α , potom pro souřadnice X, Y, Z bodu P ve světových souřadnicích platí rovnice (6-8):

$$Z = \frac{Bf}{x - x'} \quad (6)$$

$$X = x \frac{Z}{f} \quad (7)$$

$$Y = y \frac{Z}{f + \operatorname{tg}(\alpha) * Z} \quad (8)$$

kde x, y jsou souřadnice bodu na obrazové rovině kamery. Rotace kolem osy z způsobí natočení obrazové roviny, přičemž bude stále zachována rovnoběžnost s druhou

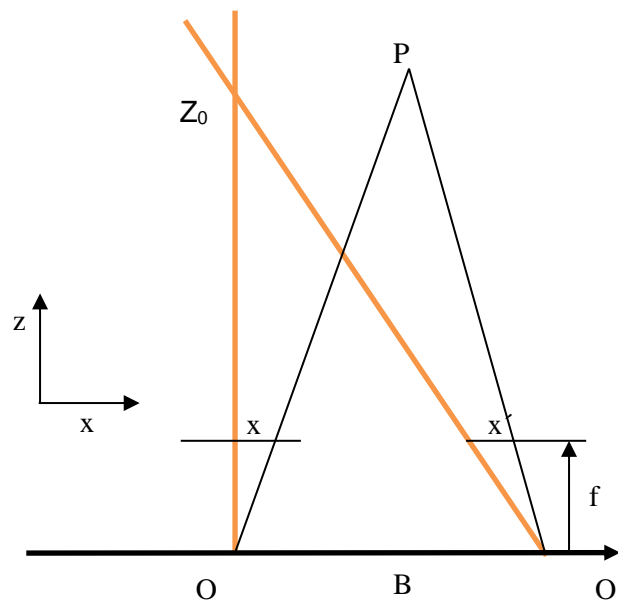
obrazovou rovinou. Toto natočení je potřeba eliminovat v dalším zpracování získaných snímků, aby bylo možno mezi nimi lépe najít korespondence. Této problematice se práce věnuje v kapitole rektifikace. Pokud je jedna kamera vůči druhé otočena kolem osy y (Obr. 12) nejsou optické osy kamer rovnoběžné, ale stále leží ve společné rovině xz . Bod $(0,0,Z_0)$, ve kterém se obě optické osy protnou, se nazývá fixační bod (*angl. fixation point*). Pokud uvažujeme malý úhel natočení, pak platí:

$$Z_0 = \frac{B}{\operatorname{tg}(\alpha)} \quad (9)$$

$$Z = \frac{Bf}{x - x' + \frac{Bf}{Z_0}} \quad (10)$$

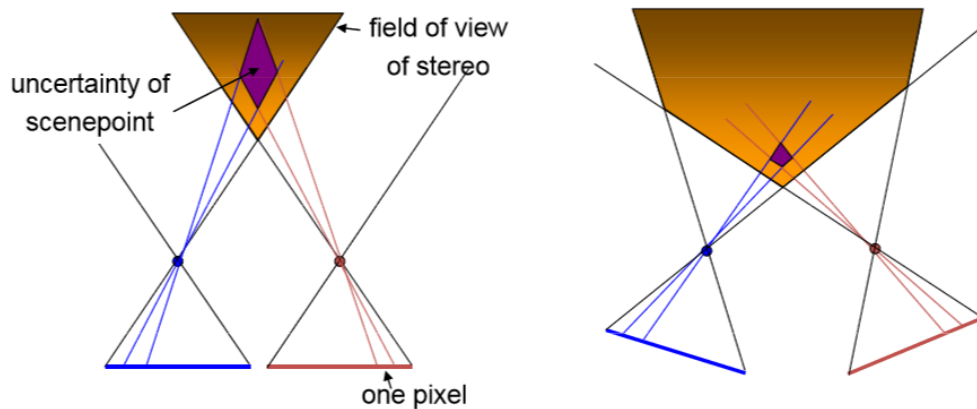
$$X = x \frac{Z}{f} \quad (11)$$

$$Y = y \frac{Z}{f} \quad (12)$$



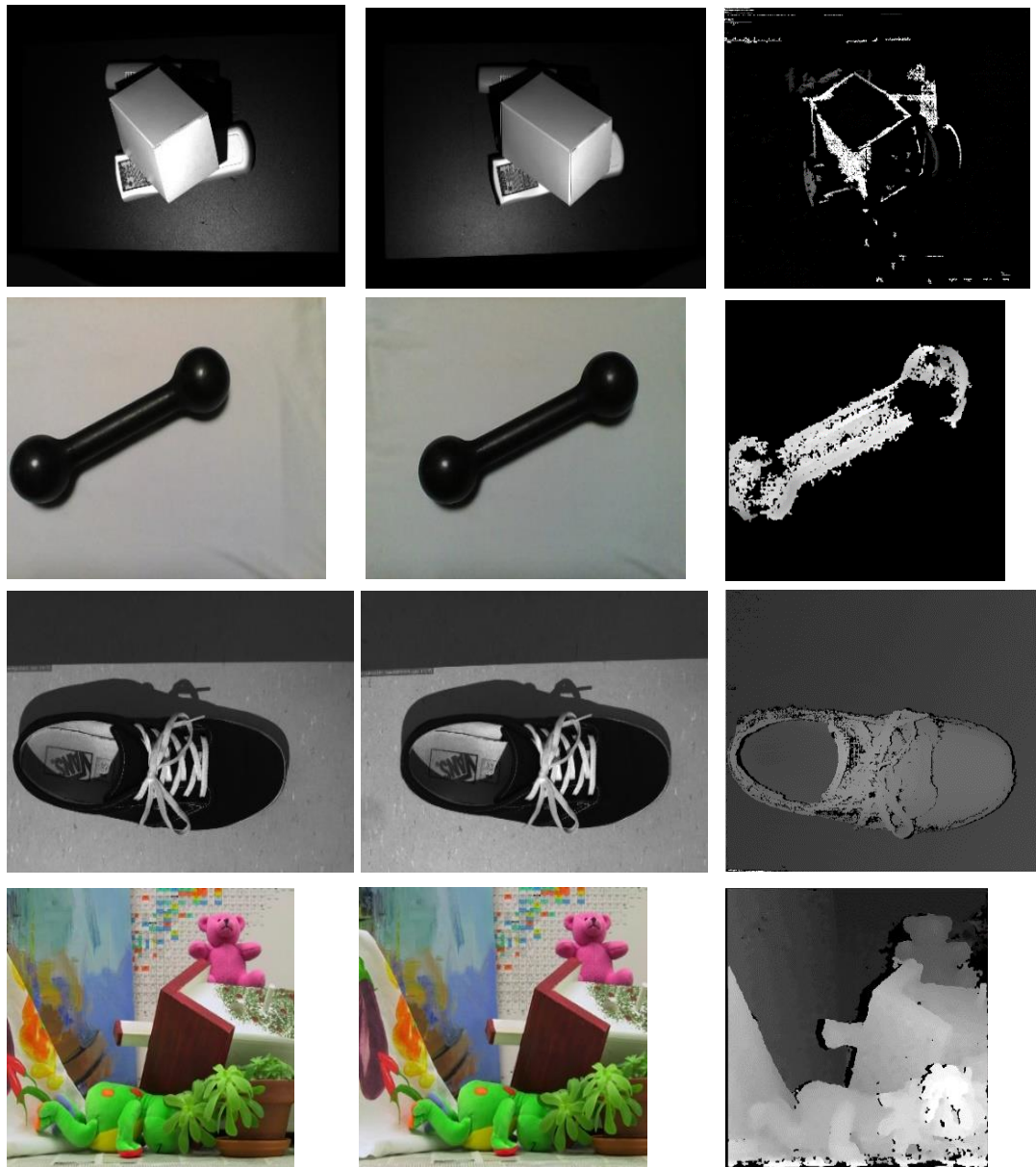
Obr. 12. - Geometrie optického systému při rotaci kamery kolem osy y

Natočení kolem osy y zvětšuje společné zorné pole kamer a zvyšuje přesnost určení hloubkové souřadnice bodu, jak je znázorněno na Obr. 13 [15]. Při polohování kamer je ale nutné myslet na průběh zvolené metody. Pokud je například hledání korespondencí ve scéně založeno na podobnosti dvou snímků, nesmí být kamery příliš daleko od sebe, protože poté se podobnost snímků snižuje.



Obr. 13. - vliv natočení kamery kolem osy y na velikost zorného pole a přesnost vyhodnocení polohy bodu [15]

Pro ověření vlivu velikosti báze na hledání korespondencí v páru stereo snímků byl zrealizován test pro několik různých případů pomocí optického systému, který je detailně popsán v kapitole 6 této práce. Výsledky testu jsou znázorněny na Obr. 14. První pár je vyfocen kamerami s bází 271 mm a s výrazným natočením kolem osy y . Je zřejmé, že obrázky jsou příliš odlišné na to, aby v nich byla nalezena korespondence. Další páry jsou vyfoceny kamerami s menší bází s tím, že je zvětšována vzdálenost scény od kamer a tím se zvyšuje podobnost snímků. Všechny snímky byly zpracovány stejným algoritmem pro rektifikaci a tvorbu mapy disparit, který je popsán dále v této práci.

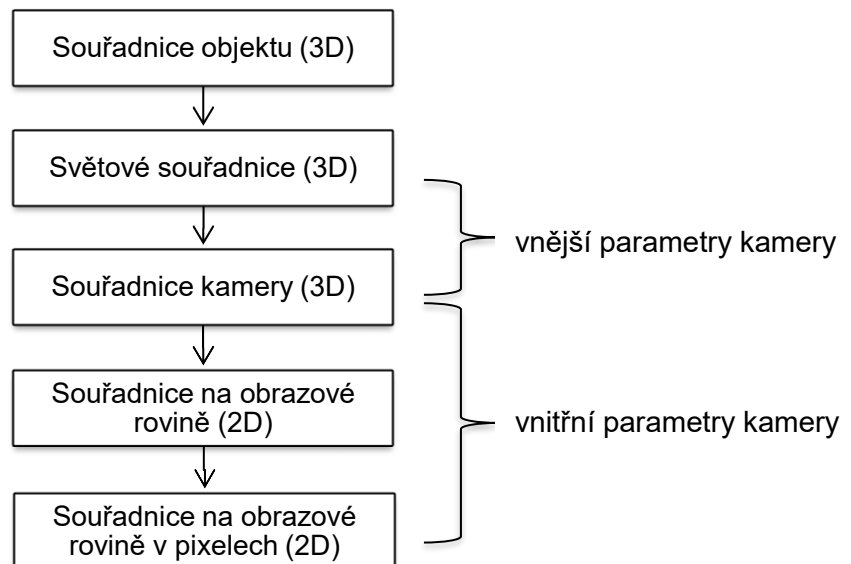


Obr. 14. - Kvalita mapy disparit vytvořená pomocí algoritmu SGM v závislosti na podobnosti páru snímků

- a) Scéna ve vzdálenosti cca 800 mm, vzdálenost kamer 271 mm
- b) Scéna ve vzdálenosti cca 600 mm, vzdálenost kamer 110 mm
- c) Scéna ve vzdálenosti cca 800 mm, vzdálenost kamer 67 mm
- d) Ukázkový stereo snímek scény ve velké vzdálenosti [34]

4 Matematický popis snímání bodu kamerou

Při snímání trojrozměrné scény kamerou probíhá promítnutí bodu v prostoru do pixelové souřadnice na získaném snímku. Aby bylo možné provést rekonstrukci hloubky z 2D snímků je nutné znát transformace, kterými snímané body při tomto procesu prochází a všechny parametry systému, které tyto transformace ovlivňují. Na Obr. 15 je znázorněna posloupnost transformací, kterou prochází bod v prostoru při snímání kamerou [16].



Obr. 15. - Transformace souřadnic při snímání objektu kamerou

Transformaci bodu v prostoru do souřadného systému svázaného s kamerou nazýváme vnějšími parametry kamery. V případě stereo vidění je také nutné znát vzájemnou polohu obou kamer, která musí být neměnná, a jejich vztah ke světovému souřadnému systému.

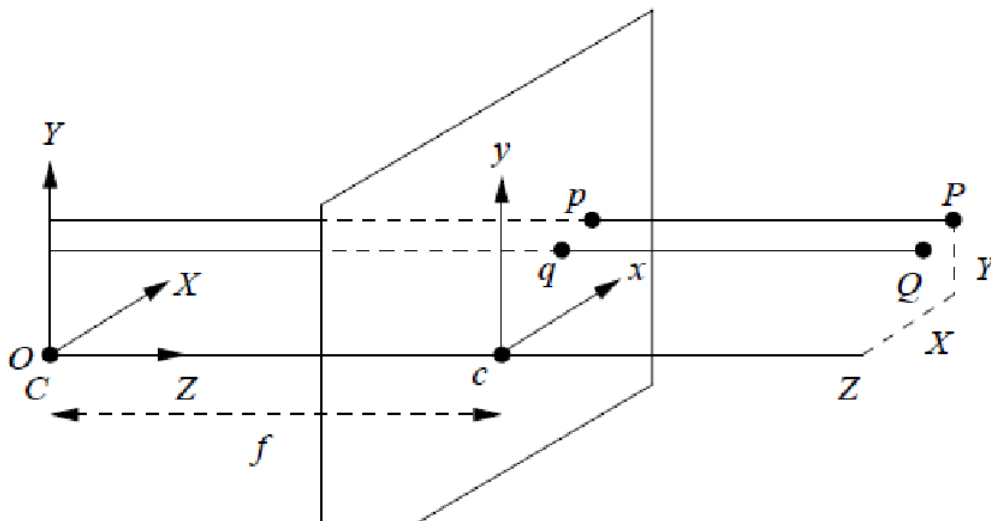
Vnitřní parametry kamery jsou potřebné k tomu, abychom mohli získat souřadnice pixelů ze souřadnice na obrazové rovině konkrétní kamery.

4.1 Druhy projekce z 3D do 2D

Existuje několik používaných modelů projekce bodu na obrazovou rovinu [14]. Při volbě vhodného modelu pro konkrétní aplikaci je nutné brát v úvahu především druh objektu, vzdálenost snímaného objektu od kamery a druh informace, který chceme měřením získat.

4.1.1 Ortografická (paralelní) projekce

Nejjednodušším typem projekce je projekce ortografická znázorněná na Obr. 16. Objekty se vzdáleností nemění svoji velikost, střed projekce tedy je v nekonečné vzdálenosti od zobrazovací roviny a všechny projekční přímky jsou rovnoběžné s optickou osou.



Obr. 16. - Schéma ortografické projekce [14]

Ortografická projekce je přibližný model pro čočky s dlouhou ohniskovou vzdáleností (teleobjektivy) a objekty jejichž hloubka je malá v porovnání s jejich vzdáleností k objektivu. Tento model je přesný jen pro telecentrické čočky.

Čočkou projdou pouze rovnoběžné paprsky a obraz tudíž ztrácí perspektivu. Snímaný předmět musí tedy být dostatečně malý nebo být v dostatečné vzdálenosti od objektivu, aby byl viditelný v úzkém zorném poli.

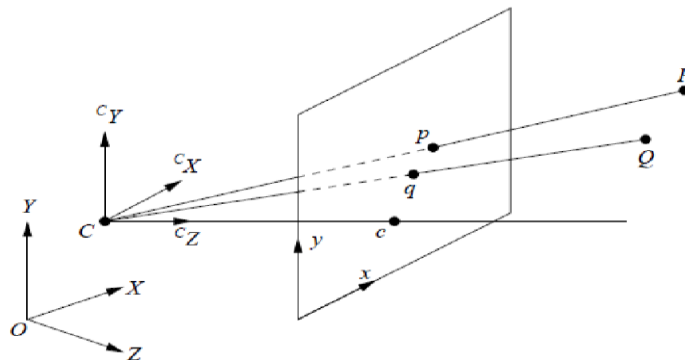
Pro případy, kdy je hloubka sledované scény zanedbatelná oproti vzdálenosti scény od objektivu je možné použít paralelní projekci škálovanou. Hloubka všech bodů projekce bude stejná, ale na rozdíl od předchozího případu není zorné pole tak výrazně omezeno, protože objekt se na obrazovou rovinu promítne poměrně zmenšený, popřípadě zvětšený.

Výhodou této projekce je značné zjednodušení určitých výpočtů oproti projekci perspektivní, která je popsána v následující kapitole.

4.1.2 Perspektivní projekce

Tento druh projekce bere v úvahu perspektivu, což znamená, že objekty, které jsou blíže objektivu se jeví větší než objekty o stejné velikosti, které se nacházejí ve větší vzdálenosti od objektivu (Obr. 17). Tuto vlastnost využívá stereovize pro rekonstrukci hloubkové souřadnice bodu.

Střed projekce je dán jedním až třemi body podle toho, v kolika osách se perspektiva uplatňuje. Pro rekonstrukci běžných objektů je nutné počítat s perspektivním promítáním.



Obr. 17. - Schéma perspektivní projekce [14]

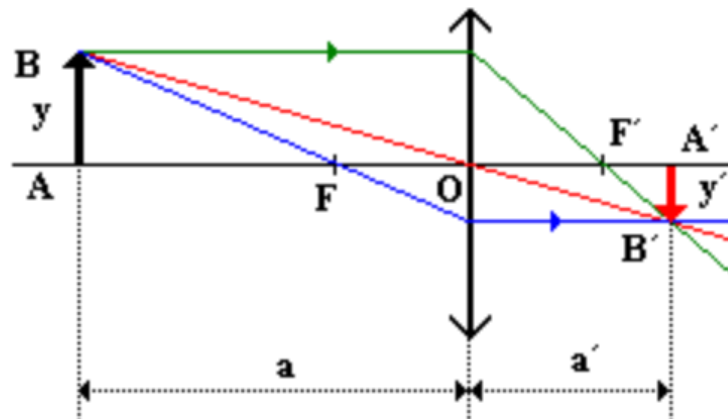
4.2 Model kamery

Reálné moderní objektivy, které společně se snímačem tvoří kameru, jsou tvořeny soustavou mnoha čoček. Tato soustava má za účel primárně eliminaci různých optických chyb. Mezi nejvýraznější chyby odstraněné soustavou čoček patří chromatická nebo sférická aberace.

Další funkcí soustavy čoček je možnost měnit vzdálenost na kterou je kamera zaostřena tím, že se vzájemné polohy čoček mění a tím se upravuje celková ohnisková vzdálenost soustavy.

4.2.1 Tenká čočka

Pro zjednodušený popis ideálního objektivu lze použít model tenké čočky. Model na Obr. 18. zobrazuje tři význačné paprsky při průchodu světla z bodu B čočkou. Bod, který se nachází ve vzdálenosti a od středu čočky se zobrazí za čočkou ve vzdálenosti obrazové roviny a' .



Obr. 18. - Zobrazení tenkou čočkou [17]

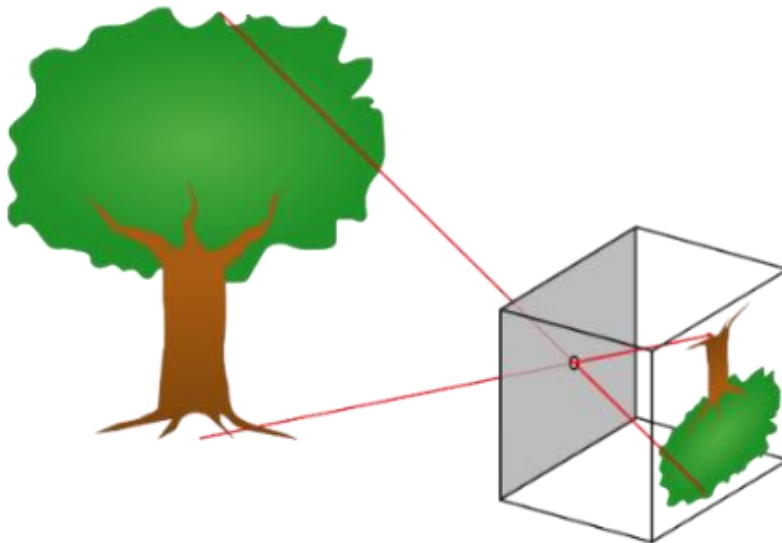
Závislost vzdálenosti objektu a , jeho obrazu a' a ohniskové vzdálenosti čočky f je dána rovnicí pro tenkou čočku (13).

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (13)$$

Pokud je objekt ve větší vzdálenosti, než je dvojnásobek ohniskové vzdálenosti, bude jeho obraz zmenšený. Pokud ale bude objekt blíže, bude jeho obraz zvětšený [17].

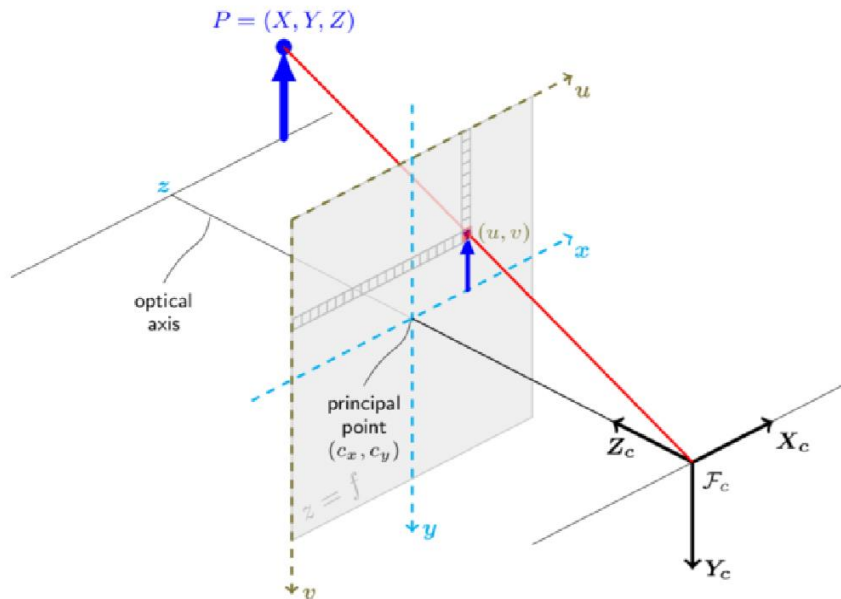
4.2.2 Dírkový model

Výpočet vnitřních parametrů kamery je nejčastěji prováděn pomocí modelu jednoduché kamery bez čočky známé jako dírkový model (*angl. pinhole camera model*) znázorněný na Obr. 19.



Obr. 19. - Dírkový model kamery [32]

Jde o model kamery, kde je obraz tvořen projekcí bodů z trojrozměrného prostoru do zobrazovací roviny za použití perspektivní transformace (Obr. 20). Jedná se o zjednodušení modelu tenké čočky v takovém smyslu, že světlo proniká pouze nekonečně malou štěrbinou ve středu čočky.



Obr. 20. - Pin hole Camera model [18]

X, Y, Z - souřadnice bodů v trojrozměrném prostoru ve světových souřadnicích
 u, v - souřadnice místa projekce v pixelech
 c_x, c_y - souřadnice principiálního bodu v pixelech
 f_x, f_y - ohnisková vzdálenost

Kalibrace kamery slouží ke zjištění těchto vnitřních parametrů. Se znalostí těchto parametrů je možné zpětně upravit získaný obraz, tak, aby nebyl ovlivněn deformací kamery a byl použitelnou reprezentací scény.

Matice vyjadřující vnitřní parametry kamery se uvádí v různých tvarech. Nejjednodušší vyjádření parametrů zapsané pomocí matice K vypadá takto (14):

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

kde f je ohnisková vzdálenost čočky objektivu a c_x, c_y jsou souřadnice principiálního bodu, který by v ideálním případě byl přesně uprostřed obrazu, ale v realitě je většinou posunut.

Existuje několik dalších vlivů, které ovlivňují vnitřní parametry kamery a mohou matici K zpřesnit, pokud se rozhodneme brát je v úvahu. Prvním vlivem může být nepřesnost při výrobě čipu kamery, kdy jednotlivé pixely nejsou dokonale čtvercové. To lze vyjádřit následujícím způsobem dle rovnic (15-16), kde k a l jsou parametry škálování [px/m].

$$x = kf \frac{X}{Z} \quad (15)$$

$$y = lf \frac{Y}{Z} \quad (16)$$

Rám obrazu nemusí být dokonale pravouhlý. Pomocí úhlu Θ vyjádříme zkosení mezi osou x a y (17-18).

$$x = f_x \frac{X}{Z} - f_x \cot \Theta \frac{Y}{Z} + c_x \quad (17)$$

$$y = \frac{f_y}{\sin \Theta} \frac{Y}{Z} + c_y \quad (18)$$

Při uvážení těchto vlivů dostáváme matici vnitřních parametrů v tomto tvaru:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & -f_x \cot \Theta & c_x \\ 0 & \frac{f_y}{\sin \Theta} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Běžně se používá matice K ve zjednodušeném tvaru [18], viz rovnice (14).

Matice vnitřních parametrů nezávisí na poloze, či orientaci kamery v prostoru. Závislost polohy a natočení kamery vůči světovým souřadnicím určuje vnější transformační matice $[R|t]$, což je matice o rozměru 3×4 skládající se z matice rotací a translačního vektoru. Transformační matice popisuje převod souřadnic bodů v trojrozměrném prostoru ze světových souřadnic do souřadnic kamery. Matice je znázorněna v rovnici (21).

Celkový převod z prostorových souřadnic bodu P ze světového souřadného systému do plošné souřadnice pixelu, na který se bod promítne, lze modelovat takto (21).

$$s p = K [R|t] P$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Vzájemná poloha snímačů musí být v průběhu 3D rekonstrukce neměnná a jejich zorné pole se musí překrývat. Z takto uspořádané soustavy snímačů lze následně získat stereoskopické snímky.

Kalibrace kromě zjištění vnějších a vnitřních parametrů také může vyhodnocovat distorzi neboli zakřivení snímků. Toto zakřivení způsobuje nedokonalost čočky objektivu. Kompenzování distorze kalibrací probíhá například takovým způsobem, že je sledováno zakřivení čar na fotografii známého vzoru, který obsahuje původně čáry rovné. Následně se mohou snímky transformovat takovým způsobem, aby se zakřivení kompenzovalo [18].

Čočky mají převážně distorzi radiální a v menší míře distorzi tangenciální (Obr. 21). Ostatní deformace jsou ve většině případu zanedbatelné. Radiální distorze je nejvýraznější u objektivů typu *rybí oko*, které mají velmi široké zorné pole a malou ohniskovou vzdálenost. [19]

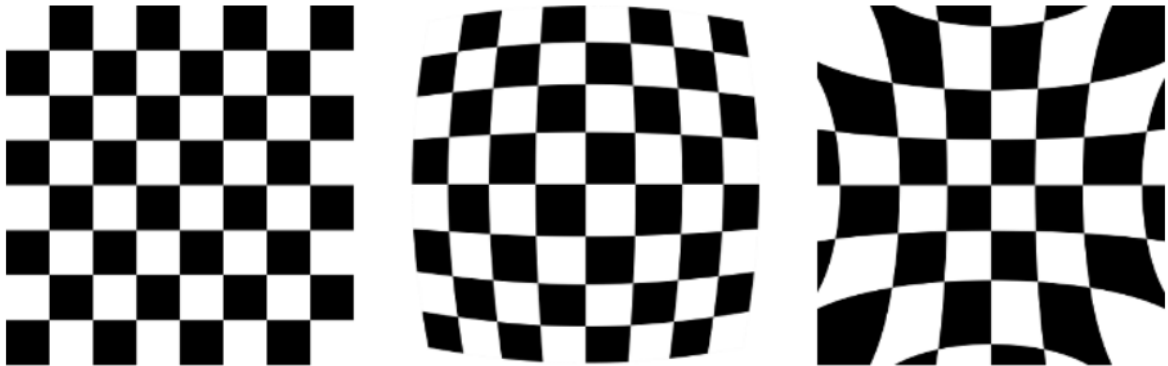
Distorzi lze korigovat přesunem pixelů obrázku definovaným kalibrací kamery. Pro zmírnění vlivu radiální distorze se používá například následující korekce podle openCV (22),

$$\begin{aligned} x_{\text{corrected}} &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{\text{corrected}} &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (22)$$

kde k_1 , k_2 , k_3 jsou radiální koeficienty deformace a $r^2 = x^2 + y^2$. Tangenciální distorze vzniká kvůli nerovnoběžnosti obrazové roviny a čoček objektivu. Tuto distorzi lze zmírnit použitím korekcí v následujícím tvaru (23),

$$\begin{aligned}x_{\text{corrected}} &= x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\y_{\text{corrected}} &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy]\end{aligned}\quad (23)$$

kde p_1 a p_2 jsou tangenciální koeficienty deformace. Koeficienty distorze rovněž patří mezi vnitřní parametry kamery (nezávisí na snímané scéně).



Obr. 21. - Snímek bez distorze a dva běžné typy radiální distorze snímků – pozitivní $k_1 > 0$ a negativní $k_1 < 0$
[18]

4.3 Vzájemný vztah dvojice kamer

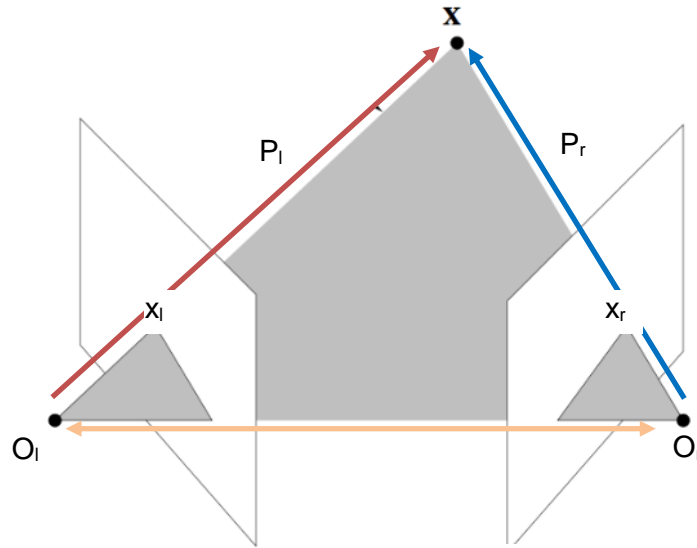
Vzájemný vztah průmětů jednoho objektu do dvou obrazových rovin popisujeme takzvanou esenciální, popřípadě fundamentální maticí. Tyto matice vycházejí z geometrického omezení popsaného pomocí epipolární geometrie, jak je znázorněno na Obr. 22.

4.3.1 Epipolární geometrie

Středy dvou kamer a bod na objektu, který obě kamery pozorují tvoří plochu v prostoru. Tato plocha, obsahující spojnici obou kamer (bázi), se nazývá epipolární rovina.

Bod, který se nachází v průsečíku epipolární roviny a báze se nazývá epipól. Speciální případ, kdy epipól leží v nekonečnu, nasává, když jsou osy obou kamer rovnoběžné.

Epipolární přímka je průsečík epipolární roviny s rovinou obrazovou. Všechny epipolární přímky se protínají v epipólu. Pokud je na jedné obrazové rovině zobrazen bod, bude poloha tohoto bodu na druhé obrazové rovině omezena pouze na příslušnou epipolární přímku. Toto omezení se nazývá *epipolar constraint*. [20]



Obr. 22. - Epipolární geometrie

Epipolární rovina je omezena třemi vektory. Vzhledem k tomu, že vektory leží v jedné rovině, platí:

$$(P_l - T)^T \cdot T \times P_l = 0, \quad (24)$$

kde T je vektor translace mezi kamerami, P_l je vektor spojující levou kameru a snímáný bod x a P_r je vektor spojující pravou kameru a snímáný bod x . Pokud známe vektor translace T a matici rotace R , které popisují transformaci ze souřadného systému levé kamery do souřadného systému kamery pravé, můžeme řešit rovnici:

$$P_r = R(P_l - T) \quad (25)$$

Z této rovnice vyjádříme

$$(P_l - T)^T = P_r^T R \quad (26)$$

a můžeme tedy psát:

$$P_r^T R T \times P_l = 0 \quad (27)$$

Vektorový součin lze převést na maticové násobení vyjádřením antisymetrické matice S :

$$S = \begin{pmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{pmatrix}$$

a dostaneme rovnici:

$$P_r^T R S P_l = 0 \quad (28)$$

Součin matice R a matice S se nazývá esenciální matice E a rovnici (28) lze tedy upravit takto:

$$P_r^T E P_l = 0 \quad (29)$$

Matice E tedy obsahuje informaci o vztahu dvou obrazových rovin. Bere v úvahu ale pouze vnější parametry kamer, tedy translaci a rotaci. Pokud chceme vyjádřit transformaci bodu z levé obrazové roviny do odpovídajícího bodu na rovině pravé v pixelových souřadnicích musíme vzít v úvahu také vnitřní parametry kamer, vyjádřené pomocí rovnic:

$$\begin{aligned} x_l &= K_l P_l \\ x_r &= K_r P_r, \end{aligned} \quad (30)$$

kde x_l je souřadnice průmětu bodu x na levé obrazové rovině, x_r je souřadnice průmětu bodu x na pravé obrazové rovině a K_l resp. K_r jsou matice vnitřních parametrů levé resp. pravé kamery. Po dosazení do rovnice (29) dostáváme rovnici:

$$x_r^T K_r^{-T} E K_l^{-1} x_l = 0 \quad (31)$$

Součin esenciální matice a vnitřních matic kamery nazýváme fundamentální matice F .
Rovnici (31) lze tedy vyjádřit jako:

$$x_r^T F x_l = x_r^T \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix} x_l = 0 \quad (32)$$

Fundamentální matice F má, stejně jako matice esenciální, rozměr 3×3 ale její hodnota je rovna dvěma, protože hodnota matice S (vektorový součin) je dvě. Matice má sedm stupňů volnosti. Tři pro translaci, tři pro rotaci a jeden pro škálování.

Pokud máme dány souřadnice bodu x v jedné obrazové rovině, můžeme pomocí fundamentální matice získat odpovídající epipolární přímku v druhé obrazové rovině pomocí rovnice (33). Známe tedy přímku, na které se bude průmět bodu x nacházet. [20]

$$u_r = F x \quad (33)$$

4.4 Kalibrace systému

Existují různé přístupy k problematice kalibrace kamer. První faktor, který tyto přístupy rozlišuje je obsah kalibračních fotografií. V případě takzvané auto kalibrace se kamera kalibruje při snímání obecné scény. Tento přístup většinou neposkytuje kalibraci přesnou. Častějším případem je kalibrace podle snímků různých známých objektů či vzorů, které se opakovaně zaznamenávají a následně se provádí analýza získaných obrazů. Podle výsledků analýzy se vyhodnocují nejvhodnější hodnoty parametrů (vnitřních a vnějších) které popisují pozorování, stejně tak, jako koeficienty charakterizující distorzi.

Kalibrace založené na kalibračních obrazcích spočívá v sestavení fundamentální matice pro dvojici kamer. To je uskutečněno získáním korespondujících bodů. Jedním z prvních algoritmů pro určení fundamentální matice je *8 point algorithmus* představený již v roce

1981. Více používanou verzí tohoto algoritmu je jeho normalizovaná verze známá pod názvem *normalizovaný 8 point algoritmus podle Hartleyho* z roku 1997. [21]

4.4.1 Normalizovaný 8 point algoritmus podle Hartleyho

Před použitím tohoto algoritmu je nutné obrázky normalizovat (tzn. principiální bod je ve středu a byly použity totožné kamery). Dále sestavíme rovnice pro známé dvojice korespondujících bodů. Najdeme nejmenší vlastní číslo a příslušný vlastní vektor matice A což je soustava rovnic vytvořena pomocí osmi bodových korespondencí. Dostaneme vektor o devíti prvcích a ten napíšeme jako matici 3×3 , tak získáme první odhad fundamentální matice. Dále je nutné matici normalizovat, provést rozklad matice pomocí singulárního rozkladu na tři matice. Posledním krokem je denormalizace matice. [22]

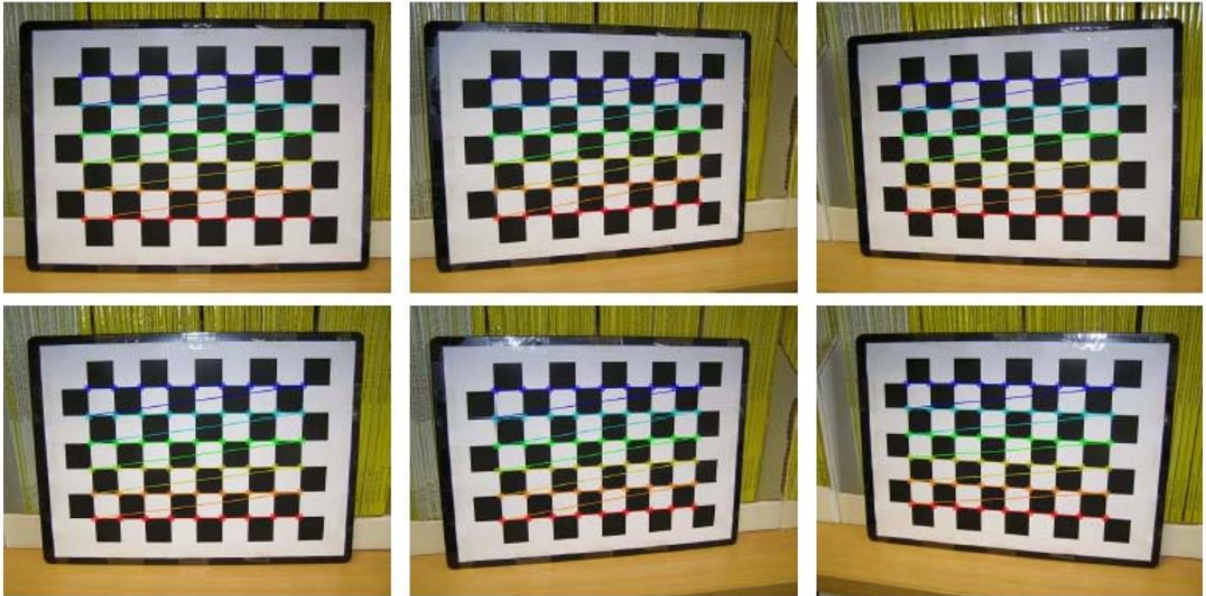
4.4.2 Metoda robustního určení fundamentální matice podle Zhanga

Tento algoritmus, uvedený v roce 1998, je v dnešní době hojně používán a je implementován i v knihovně openCV [18].

Prvním krokem algoritmu je rozdělení obrázku rovnoměrně na 8×8 dílů. Dále následuje náhodný výběr osmi dílů a získání souřadnic korespondujících bodů z těchto dílů a použití Hartleyho metody pro tyto body. Pro zjištění, jak dobrá Fundamentální matice je, počítáme chybu pro další korespondující body. Pro různé sady bodů zkusíme kvalitu různých fundamentálních matic. Odstraníme statisticky odlišné matice a určíme nejlepší fundamentální matici pomocí metody nejmenších čtverců. [23]

V praxi vyžaduje tento způsob kalibrace minimálně dva snímky plošného pravidelného vzoru, jako je například šachovnice. Algoritmus detekuje křížení čtverců (Obr. 23) a díky tomu, že skutečná velikost čtverce na šachovnici je známá, je možné vyjádřit rozdíl mezi levým a pravým stereo snímkem a stejně tak zajistit deformaci obrazu. I když lze provést

kalibraci pouze se dvěma dvojicemi snímků, se zvyšujícím počtem kalibračních obrázků se kvalita kalibrace zvyšuje.



Obr. 23. - Detekce vnitřních rohů šachovnice na kalibračních snímcích [18]

4.4.3 Jak vylepšit kalibraci?

- Zlepšit kompenzaci distorze. V některých případech stačí brát v úvahu pouze nejčastější druh distorze – radiální, někdy je nutné počítat i s dalšími vlivy.
- Zlepšit kalibrační snímky. Snímaný vzor musí být vždy dobře viditelný ale zároveň zabraný v různých, vzdálenostech, natočeních a polohách na snímku. Pro správné vyhodnocení distorze je nutné kalibrační objekt zachytit na okrajích a v rozích zorného pole kamery.
- Zkontrolovat kalibrační snímky a pro kalibraci použít pouze takové, které mají nízkou reprojekční chybu.

4.5 Rektifikace a hledání korespondencí

Rektifikace, ve smyslu počítačového vidění, je transformace obrazu v takovém smyslu, aby skenovací přímky na levém a pravém stereo obrázku byly rovnoběžné (Obr. 24). Pokud by dvojice kamer byla ideální v tom smyslu, že poloha jedné kamery od druhé by se lišila pouze translací v ose x a tím pádem by i jejich optické osy byly rovnoběžné, kamery by byly dokonale totožné a snímky nebyly ovlivněny distorzí, nebylo by nutné rektifikaci provádět. V reálných případech je nutné vlivy distorze, nedokonalého umístění kamer a vzájemné odlišnosti kamer kompenzovat.

Rektifikace se provádí z toho důvodu, že výrazně usnadňuje problém hledání korespondencí. Transformace obrázku omezí možnost umístění korespondujícího bodu z jednoho obrázku na odpovídající přímku na obrázku druhém, vyhledávání korespondujících bodů pak již probíhá pouze v jedné souřadnici, a ne v celém obrázku. [14]

Informaci, v jakém smyslu obrázek transformovat můžeme získat z kalibrace kamer, kdy známe epipolární geometrii optické sestavy, nebo, v případě kamer nekalibrovaných, z význačných korespondujících bodu na dvojici obrázků.



Obr. 24. - Příklad rektifikace [18]

Po rektifikaci snímků je nutné nalézt korespondence. Ty lze hledat na základě různých proměnných jako je například intenzita pixelu nebo detekovaná hrana ve snímku. Z této operace získáme údaje o posunutí bodů od středu snímku na levém a pravém obrázku. Z těchto údajů je možné již zrekonstruovat hloubkovou souřadnici Z .

Problém hledání korespondencí je největší při skenování objektů bez výrazné struktury. Takové povrchy, jako je například lidská kůže, je obtížné správně vizuálně interpretovat, a proto jsou do měření vneseny nepřesnosti.

Jakým způsobem bude algoritmus postupovat je vždy dáno určitou sadou podmínek či omezení jako je například již zmíněná epipolární podmínka (epipolar constraint) či omezení založené na jiných vlastnostech jako je například podobnost (similarity constraint) unikátnost (uniqueness constraint) či spojitost (continuity constraint) prvků na zkoumané dvojici snímků. [24]

Přístup algoritmů se také liší podle způsobu vyhodnocení těchto podmínek. Algoritmy s lokálním přístupem hledají odpovídající pixel podle jeho okolí. To probíhá vyhodnocováním pixelů v určitém okně, které se posouvá po snímku. Algoritmy s globálním přístupem kontrolují pixel po pixelu na celém snímku (případně pouze epipolární přímku). Algoritmy s lokálním přístupem jsou obecně rychlejší, takže se lépe hodí pro real-time aplikace. Co se týče přesnosti, vyhrávají většinou algoritmy s přístupem globálním [25].

Pomocí při hledání korespondencí může přídavný zdroj světla (nejčastěji projektor), který pokryje povrch promítnutou texturou.

5 Cíle práce

Stereovize je jednou z významných metod pro tvorbu 3D modelů získaných skenováním reálných objektů. Jak bylo ukázáno v úvodní kapitole této práce, hlavními výhodami stereovize, oproti jiným metodám, je rychlost, nízká finanční náročnost systému a také mobilita a univerzálnost. Díky těmto výhodám si stereovize postupně nachází využití v průmyslu v oblasti Bin-Pickingu či kontroly kvality, kdy je možné optický systém zakomponovat do výrobní linky a pro kontrolu tedy není nutné výrobek nikam přemísťovat. Kontrola může probíhat přímo ve výrobní lince bez časových ztrát. Zároveň také s rozvojem aditivních výrobních technologií může stereovize pomoci s rychlým získáním modelů složitých tvarů pro tisk.

Hlavním problémem při reálném nasazení této metody je vysoká složitost procesu 3D rekonstrukce, která zapříčiňuje nízkou robustnost systému pro různé vstupní parametry a vysoký počet různých vstupů, které ovlivní podobu výsledného mraku bodů. Vliv těchto vstupů je často obtížně zjištělný. Hlavním cílem práce je tedy vytvořit systém pro stereovizi a otestovat jeho reakce na různé vstupní podmínky při skenování.

Dílčí cíle:

- Sestavení optického systému pro stereovizi.
- Vytvoření algoritmu pro 3D rekonstrukci sledovaných objektů.
- Citlivostní analýza 3D rekonstrukce na kalibrační parametry.
- Zjištění vlivu různých promítaných textur na snímaný objekt při 3D rekonstrukci.
- Porovnání skenů z unikátního optického profilometru RedLux se skeny získanými pomocí stereovize.

6 Optický systém pro stereovizi

Pro sestavení optického systému byly vybrány černobílé kamery *Basler acA3088-57um* s objektivem o minimální ohniskové vzdálenosti 16 mm. Objektiv je vybaven kroužky pro manuální zaostření a nastavení clony. Sestava má následující vlastnosti (Tab. 1):

Tabulka 1. - Parametry kamer testovaného optického systému

Velikost senzoru	7.4 mm x 5 mm
Rozlišení	6 MP (3088 px x 2064 px)
Velikost pixelu	2.4 μm x 2.4 μm
Počet snímků za sekundu	59
Ohnisková vzdálenost min.	16 mm

Kamery jsou připevněny na konstrukci vytvořené z hliníkových profilů a jsou upevněné na společně základně pomocí šroubů (Obr. 25). Vzdálenost kamer od sebe a jejich natočení v jedné ose je plynule nastavitelné. Kamery lze ovládat připojením do počítače přes konektor USB 3.0.



Obr. 25. - Stereo sestava pro 3D skenování

Sestava je doplněna projektorem *Optoma EH 461* s následujícími vlastnostmi (Tab. 2):

Tabulka 2. - Parametry projektoru testovaného optického systému

Technologie	DLP
Rozlišení	1920 px x 1080 px
Světelný výkon	5000 lm
Kontrast	20 000:1

Projektor je připevněn na hliníkovém profilu nezávisle na dvojici kamer, aby bylo možno jeho polohu měnit bez ovlivnění kamer. Připojení projektoru k počítači je realizováno pomocí HDMI konektoru.

Kamery a projektor jsou uspořádány tak, aby trojice měla dostatečné společné zorné pole pro pořízení stereo snímků.

7 Algoritmus testované metody

Pro testování metody pasivní stereovize byl vytvořen algoritmus v jazyce Python ve vývojovém prostředí Pycharm. Pro zaznamenávání snímků a kalibraci optického systému byla použita knihovna StereoVision [26], která obsahuje třídy pro kalibraci stereo kamer využívající funkce knihovny openCV [18]. Knihovna openCV používá jako kalibrační vzor černobílou šachovnici, popřípadě pravidelně rozmístěná černá kolečka na bílém pozadí. Celý algoritmus je k dispozici na přiloženém CD. Tato kapitola obsahuje popis funkce jednotlivých programů, které slouží k vytvoření digitální reprezentace prostorového objektu pomocí dvojice kamer. Popsané programy a jejich funkce jsou pro přehlednost uvedeny v následujícím seznamu:

Funkce

Pořízení kalibračních snímků
Kalibrace kamer
Pořízení snímku skenovaného objektu
Rektifikace a tvorba mapy disparit
Rekonstrukce hloubkové souřadnice a vygenerování mraku bodů

Program

take_photos.py
calibrate_cameras.py
take_photos.py
disparity_gui.py
create_pointcloud.py

7.1.1 Kalibrace kamer

V prvním kroku je potřeba získat dostatečný počet stereo snímků, ze kterých bude kalibrace vycházet. K tomu slouží skript *take_photos.py*, který spouští kamery připojené do počítače pomocí USB konektoru a zaznamená požadovaný počet snímků. Aby program byl schopen propojit zařízení je třeba definovat, která kamera snímá na levé a pravé straně. Dobu čekání mezi zaznamenáním jednotlivých stereo snímků je možné nastavit, dále je nutné specifikovat požadovaný počet snímků a složku, do které se mají fotografie uložit. Pokud specifikovaná složka neexistuje, je automaticky vytvořena. Snímky se do složky ukládají pod jménem *left*, resp. *right* a jsou automaticky číslovány. Program používá třídu *StereoPair* z knihovny *StereoVision* pro zacházení s oběma kamerami současně.

Následná kalibrace pomocí pořízených snímků šachovnic proběhne při spuštění programu `calibrate_cameras.py`, který využívá třídu `StereoCalibrator` z knihovny `StereoVision`. Uživatel musí upřesnit cestu ke složce s kalibračními snímky a složku, kam se mají uložit kalibrační údaje. Dále je potřeba zadat počet vnitřních rohů šachovnice v řadách a sloupcích a velikost čtverce šachovnice. Při kalibraci jsou nejprve nalezeny všechny vnitřní rohy šachovnic na snímcích a pomocí těchto bodů je dvojice kamer kalibrována.

Šachovnice musí být na všech stereo snímcích zachycena celá a dobře viditelná. Dále se doporučuje, aby byl kolem šachovnice bílý rámeček o šířce alespoň jednoho políčka, aby nalezení vnitřních rohů proběhlo bez problému. Pokud není na některé dvojici snímků nalezena šachovnice, kalibrace není provedena.

Program vrátí kalibrační soubory a údaj o kvalitě kalibrace tzv. reprojekční chybu (*angl. reprojection error*). Reprojekční chyba by měla být co nejmenší, ideálně menší než jeden pixel. Kalibrační soubory obsahují matici vnitřních parametrů pro obě kamery, distorzní koeficienty, údaj o vzájemné transformaci kamer, fundamentální a esenciální matici, projekční matice, matici pro přepočet disparity na hloubku, matici pro rektifikaci obrázků a pro odstranění distorze na obrázcích.

Kalibrace tohoto systému byla provedena ze 30 párů snímků šachovnice o rozměru 10 x 9 polí s velikostí čtverce 10 mm. Konkrétní výsledky kalibrace jsou uvedeny v Tab. 3. Reprojekční chyba měla v tomto případě hodnotu 0,76312 px.

Tabulka 3. - Výsledky kalibrace optického systému

Ohnisková vzdálenost	$F = 6\,777,671 \text{ px (16,266 mm)}$
Souřadnice principiálního bodu	$c_x = 1\,521,682 \text{ px}$ $c_y = 1\,027,275 \text{ px}$
Matice rotace	$R = \begin{bmatrix} 0,99914352 & 0,02305705 & -0,03435965 \\ -0,02301118 & 0,99973371 & 0,00172968 \\ 0,03439038 & -0,00093754 & 0,99940803 \end{bmatrix}$
Translační vektor	$T = [58.294625 \quad -1.74846819 \quad 6.3917414]$

Koeficienty distorze	$d_l = [-0.26807866 \quad 1.64221596 \quad 0. \quad 0. \quad -14.86312844]$
	$d_r = [-0.29033277 \quad 2.41089827 \quad 0. \quad 0. \quad -25.0630239]$

7.1.2 Získání stereo snímků

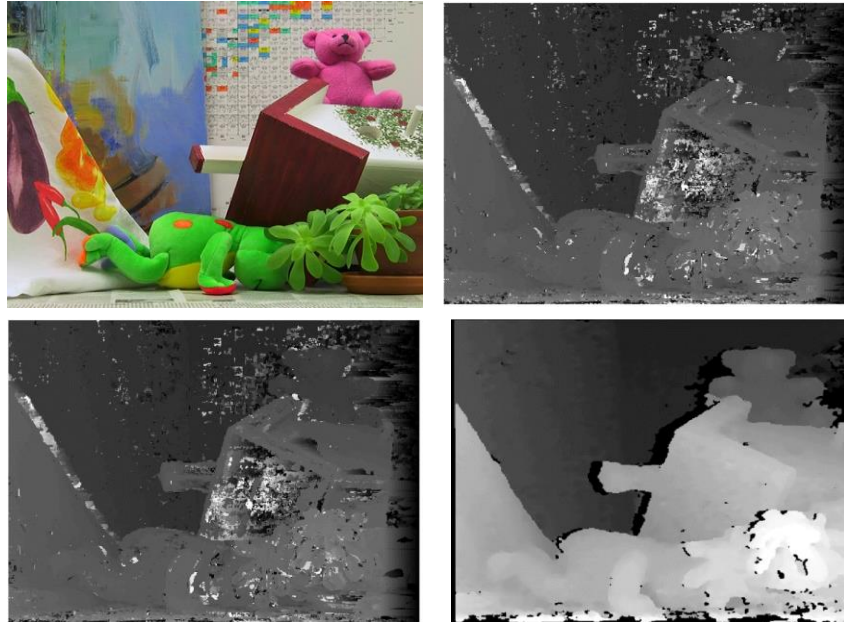
Dalším krokem je pořízení stereo snímků scény, kterou chceme rekonstruovat. Kvalita snímku může výrazně ovlivnit výsledky 3D rekonstrukce. Je tedy potřeba vytvořit vhodné podmínky k fotografování. Snímek nesmí být ani příliš přesvětlený ani příliš tmavý. Při zachycování různých scén bylo zjištěno, že tmavší snímky lze rekonstruovat lépe než světlé. Pokud je na snímku čistě bílá plocha, její rekonstrukce není téměř nikdy správná. To platí i pro odlesky na například kovových objektech. V místě odlesku nejsou body zrekonstruovány a ve výsledném mraku bodů tato část chybí. Pro odstranění odlesků může pomoci například polarizační filtr připevněný před projektor a kamery. Při správném natočení filtr odlesky eliminuje a lesklá místa jsou správně zrekonstruována.

Pro pořízení snímků je možné znovu použít program `take_photos.py`.

7.1.3 Rektifikace snímků a tvorba mapy disparit

Před vytvořením mapy disparit je nutné stereo snímek rektifikovat. Tyto kroky jsou zrealizovány pomocí programu `disparity_gui.py`, který načte levý a pravý stereo obrázek a složku s kalibračními údaji a generuje hloubkovou mapu. Rektifikace je provedena pomocí třídy `StereoCalibrator` z knihovny `StereoVision` [26].

Existují různé algoritmy pro tvou mapy disparit od zcela základních postupů jako je párování pixelů podle shody jejich intenzit po pokročilé algoritmy obsahující neuronové sítě. Kvalita mapy silně závisí na volbě tohoto algoritmu, jak je znázorněno na Obr. 26.



Obr. 26. - Mapa disparit vytvořená za použití různých algoritmů

- e) Originální obrázek [33]
- f) Korespondence podle intenzit pixelů (pixel intensity matching)
- g) Korespondence podle nalezených gradientů (gradient feature matching)
- h) Algoritmus SGM [18]

V knihovně openCV je implementován jeden z vysoce pokročilých algoritmů s názvem Semi-Global Matching (SGM) [27], který kromě vlastního hledání korespondencí obsahuje pre a post processing obrázku.

Korespondence jsou hledány na principu *sum of absolute differences* (suma absolutních rozdílů), což je algoritmus, který hledá nejlepší shodu intenzit pixelů na dvojici obrázků. Nejedná se ale pouze o porovnávání jednoho pixelu z levého obrázku s pixelem v obrázku pravém, ale bere se v potaz i blízké okolí zkoumaného pixelu. Podobnost mezi okny se vyhodnotí porovnáním rozdílu intenzit všech odpovídajících pixelů v okně s originálním oknem. Kromě toho je ještě rozhodnutí o korespondenci ovlivněno dalšími podmínkami jako je například spojitost povrchů. Kombinace několika rozhodovacích kritérií zvyšuje robustnost algoritmu pro nepříznivé oblasti snímku, jako jsou například odlesky, stíny či výrazně nespojitý povrch objektu. Skenovací přímka se prohledává pomocí okna o předem zvolené velikosti až do určité vzdálenosti. Okno

s největší shodou určí polohu korespondujícího pixelu a podle této korespondence je vyhodnocena hloubka tohoto pixelu.

O vytvoření hloubkové mapy se postará knihovna OpenCV a její třída StereoSGBM_create. Tato třída obsahuje několik parametrů, které ovlivní výslednou podobu mapy disparit. Je užitečné mít možnost nastavit tyto parametry plynule a sledovat jejich vliv na kvalitu rekonstrukce. Proto bylo vytvořeno jednoduché uživatelské rozhraní pomocí knihovny Tkinter, díky kterému lze mapu disparit interaktivně ladit.

Po spuštění programu se otevře uživatelské rozhraní a uživatel může nastavovat tři parametry: velikost SAD okna (sum of absolute differences – velikost okna, které hledá korespondence v obrázcích), minimální disparitu a počet disparit. Po stisku tlačítka *Update* se zobrazí mapa disparit se zadanými parametry. Uživatel může aktualizovat obrázek, dokud není spokojen se vzhledem mapy a následně tlačítkem *Save* mapu uložit jako pole numpy.

7.1.4 Rekonstrukce prostorových souřadnic bodů

Z hloubkové mapy lze následně rekonstruovat hloubkovou souřadnici z všech bodů podle světlosti daného pixelu. Výsledkem jsou prostorové souřadnice bodů, které po vykreslení tvoří zrekonstruovaný 3D objekt. Prostorovou souřadnici bodu z mapy disparit získáme vynásobením disparity maticí Q , která v sobě obsahuje údaj o ohniskové vzdálenosti a o velikosti báze systému. Z těchto údajů již lze zrekonstruovat objekt v jeho reálné velikosti.

Posledním programem je tedy `create_pointcloud.py` pro který je vstupem mapa disparit a kalibrační údaje o převodu mapy disparit na prostorové souřadnice. To lze udělat za pomoci knihovny OpenCV a její třídy `reprojectImageTo3D` [18]. Souřadnice bodů jsou uloženy ve formátu xyz, který je možné otevřít například ve volně dostupném software Meshlab.

8 Citlivostní analýza 3D rekonstrukce

Kalibrace kamer výrazně ovlivňuje výslednou podobu zrekonstruovaného mraku bodů. Vstupní data pro kalibraci jsou získána analýzou snímků známých objektů pořízených kalibrovaným systémem. To může bohužel do procesu vnést celou řadu nepřesností, a proto se výsledky kalibrace stejného systému mohou zásadně lišit v závislosti na tom, které konkrétní kalibrační snímky jsou použity, jaký kalibrační objekt je zaznamenáván a jaký kalibrační algoritmus je použit.

Vnitřní a vnější parametry kamer získané kalibrací jsou ohnisková vzdálenost čočky, poloha principiálního bodu (souřadnice x a y na snímku) a transformace kamer v prostoru (rotační matice a translační vektor). Dalším údajem, který je získán kalibrací jsou koeficienty distorze snímku. Všechny tyto parametry vstupují do rekonstrukce bodu v prostoru z jeho plošné souřadnice na snímači kamery. Žádný z těchto parametrů není, kvůli výše zmíněným důvodům, pomocí kalibrace určen přesně. Nepřesnost určení jednotlivých parametrů má ale různý dopad na polohu zrekonstruovaného bodu. Z tohoto důvodu byl vytvořen algoritmus zkoumající citlivost rekonstrukce prostorového bodu na změnu vstupních kalibračních parametrů.

Pro realizaci citlivostní analýzy byla zvolena metoda Monte Carlo a to z několika důvodů. V první řadě bylo zjištěno že funkce popisující závislost polohy zrekonstruovaného bodu na hodnotě určitého kalibračního parametru je nelineární a velmi složitá. Citlivostní analýza provedená pomocí sestavování inverzních funkcí by nemusela přinést výsledky, zatímco u metody Monte Carlo je jisté, že bude možné učinit nějaké závěry. Další výhodou je rychlost metody, a hlavně možnost model snadno rozšiřovat a měnit. Realizace citlivostní analýzy byl a provedena pomocí volně dostupného softwaru Octave.

Vytvořený program s názvem `calibration_sensitivity.m` spustí citlivostní analýzu zadané kalibrace. Určitý kalibrační parametr je změněn o náhodnou malou hodnotu. S takto pozměněnou kalibrací je zrekonstruován prostorový bod z plošných souřadnic určitého bodu na levém a pravém snímku. Tento postup je opakován mnohokrát, pokaždé s jinou změnou kalibračního parametru. Náhodné číslo je generováno pomocí funkce `randn`,

která vrací náhodná čísla z normálního rozdělení. Tímto postupem je získáno mnoho prostorových souřadnic jednoho bodu pro různé verze kalibrace. Tyto souřadnice jsou vycentrovány a pomocí singulárního rozkladu je zjištěn směr a velikost největších odchylek. V posledním kroku je zjištěna citlivost jako převrácená hodnota nejvyššího singulárního čísla. Tento postup je postupně opakován pro všechny parametry a pro libovolné množství vstupních bodů.

Vstupními daty pro tento program jsou matice vnitřních parametrů kamer K_l a K_r , dále matice rotace R a translační vektor T . Uživatel může zvolit, kolik různých bodů chce zkoumat a kolikrát má být každý kalibrační parametr variován. Následně je vygenerován požadovaný počet 3D bodů a jejich promítnutí do 2D. Dále jsou variovány parametry v následujícím pořadí:

1. f_l - ohnisková vzdálenost levé kamery,
2. c_{xl} - souřadnice x principiálního bodu levé kamery,
3. c_{yl} - souřadnice y principiálního bodu levé kamery,
4. f_r - ohnisková vzdálenost pravé kamery,
5. c_{xr} - souřadnice x principiálního bodu pravé kamery,
6. c_{yr} - souřadnice y principiálního bodu pravé kamery,
7. T_x - translace v ose x,
8. T_y - translace v ose y,
9. T_z - translace v ose z.

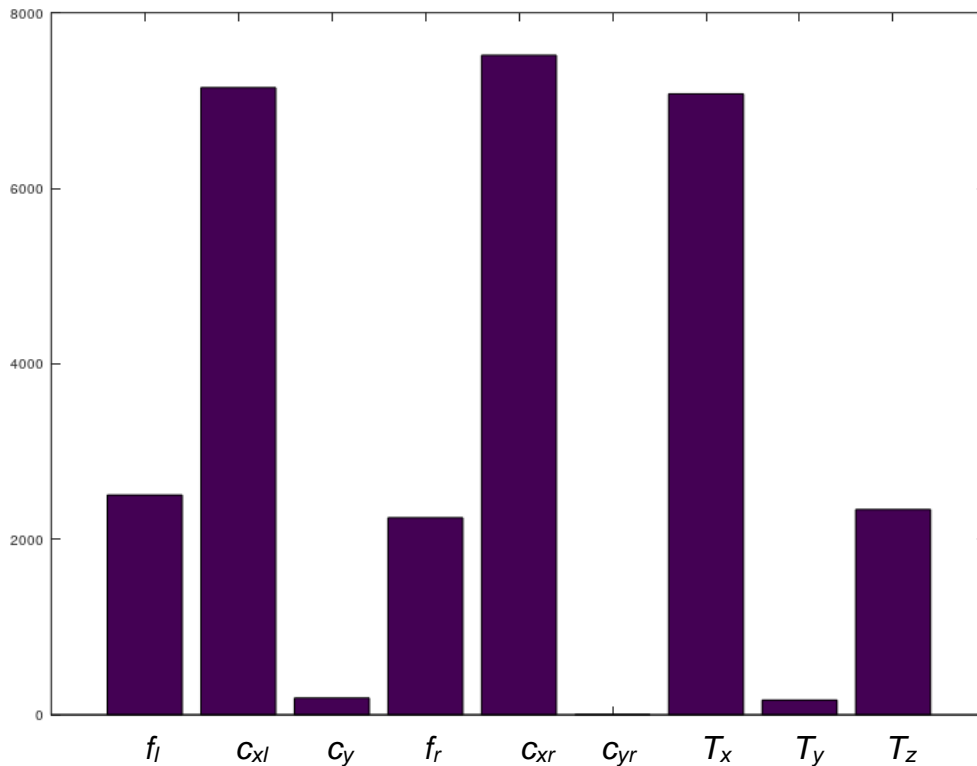
Při zkoumání kalibrace uvedené v kapitole 7.1.1 bylo vygenerováno 50 náhodných bodů a pro každý tento bod byly parametry variovány 1000x. Citlivostní analýza měla při těchto vstupech výsledky uvedené v Tabulka 4.

Tabulka 4. – Výsledky citlivostní analýzy

Parametr	S1	S2	S3	Citlivost
fl	2504,151	254,507	87,481	$0,39934 \cdot 10^{-3}$
cxl	7147,069	1002,429	263,316	$0,13992 \cdot 10^{-3}$
cyl	191.996	31.452	14, 216	$5,2085 \cdot 10^{-3}$
fr	2246,038	293,669	83,382	$0,44523 \cdot 10^{-3}$
cxr	7516,072	1023,348	264,001	$0,13305 \cdot 10^{-3}$
cyr	$5,2771 \cdot 10^{-9}$	$1,6767 \cdot 10^{-9}$	$1,0568 \cdot 10^{-9}$	$0,18949 \cdot 10^9$
Tx	7075,932	1833,948	1153,22	$0,14132 \cdot 10^{-3}$
Ty	167,874	43,167	27.251	$5,9569 \cdot 10^{-3}$
Tz	2339,872	764,957	426,759	$0,42737 \cdot 10^{-3}$

Citlivosti na různé parametry nelze snadno porovnávat mezi sebou. Pro přehlednost byly všechny parametry variovány stejně, a to náhodnými čísly z normálního rozdělení s průměrem nula a variancí jedna. Ale ani v tomto případě nelze parametry různých typů porovnávat mezi sebou.

Z Obr. 27, na kterém jsou výsledky analýzy zobrazeny graficky, je vidět, že ohniskové vzdálenosti levé a pravé kamery mají přibližně stejný vliv, stejně jako poloha souřadnice x principiálních bodů. Poloha y má menší vliv pro pravou kameru. Nejvyšší dopad na polohu zrekonstruovaného bodu má translace v ose x, menší vliv má translace v ose z a nejmenší translace v ose y.



Obr. 27. - Výsledky citlivostní analýzy pro různé parametry

- Osa x - parametry 1. – 9.
- Osa y – kvantifikace citlivosti 3D rekonstrukce na změny vstupních parametrů o náhodné číslo vybraná z normálního rozdělení s průměrem nula a variancí jedna

Tato analýza může posloužit k hlubšímu pochopení vlivu kalibrace na rekonstrukci 3D objektu. Například při zjištění opakované deformace zrekonstruovaného mraku bodů v určitém směru, lze určit, který z parametrů může mrak bodů v takovém smyslu ovlivnit. Některé parametry ovlivňují převážně hodnotu hloubkové souřadnice a některé mají větší vliv na souřadnice x a y zrekonstruovaných bodů. Při nesprávné rekonstrukci poloh bodů se lze tedy zaměřit na parametry které problém způsobují. Analýza také napovídá, které vstupní parametry je třeba kontrolovat se zvýšenou pozorností.

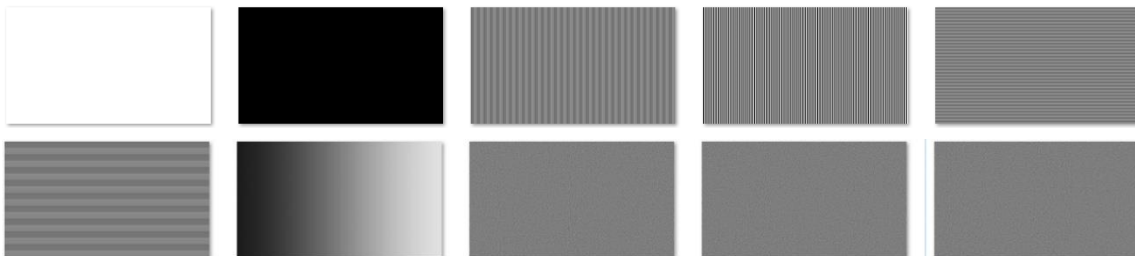
Je pravděpodobné, že velikost citlivosti bude pro různé kalibrace odlišná, nelze proto považovat výsledky citlivostní analýzy pro tuto kalibraci jako obecně platné.

9 Vliv promítaných textur na 3D rekonstrukci

Při skenování pomocí metody stereovize může nastávat případ, kdy určité části scény nejsou zrekonstruovány i přes to, že tyto části byly v zorném poli obou kamer. Tento problém je většinou způsoben jednodílností dané části, která může být způsobena přílišnou tmavostí či světlostí snímku či odleskem na skenovaném objektu. V těchto případech totiž oblast postrádá texturu, která by umožnila provést spolehlivé hledání korespondencí. Z tohoto důvodu byl proveden test, zda promítání určitých vzorů či textur pomocí projektoru nemůže přispět ke zvýšení kvality rekonstrukce tím, že usnadní hledání korespondencí ve scéně.

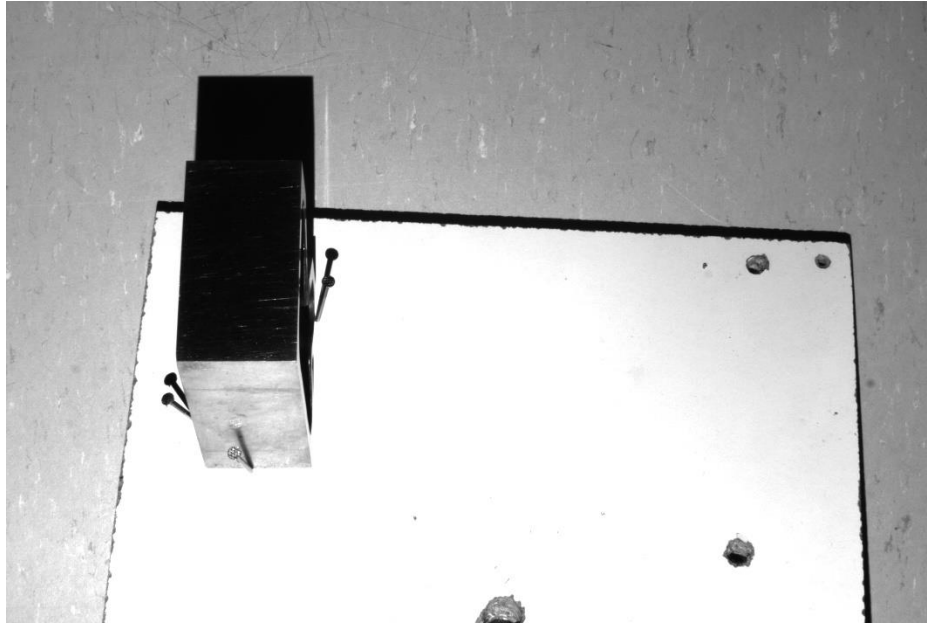
Test spočíval ve skenování totožné scény s různou promítanou texturou (Obr. 28). Testovací textury byly vybrány takto:

1. bez textury (nasvícení bílou barvou),
2. bez textury a bez nasvícení,
3. černobílé svislé pruhy (šířka 2 px),
4. černobílé svislé pruhy (šířka 8 px),
5. černobílé vodorovné pruhy (šířka 2 px),
6. černobílé vodorovné pruhy (šířka 8 px),
7. plynulý přechod z černé do bílé,
8. náhodný šum 1,
9. náhodný šum 2,
10. náhodný šum 3.



Obr. 28. - Vybrané testovací textury

Testovaná scéna, zobrazená na Obr. 29, se nachází ve vzdálenosti 700-850 mm od objektivů kamer a obsahuje kovový přípravek upevněný na dřevěné desce tak, aby horní plocha přípravku byla rovnoběžná s plochou desky. Roviny jsou od sebe vzdáleny 100 mm. Všechny snímky byly vyhodnoceny za použití stejné kalibrace a stejného nastavení algoritmu SGM pro tvorbu mapy disparit.



Obr. 29. - Vyhodnocovaná scéna se dvěma rovnoběžnými plochami

Objektivní posouzení kvality zrekonstruovaného mraku bodů je obtížně řešitelný problém, zvláště v případě, kdy není k dispozici reference, se kterou by bylo možné mrak porovnat. Z tohoto důvodu je vhodné mít možnost posoudit kvalitu mraku bodů nezávisle na určité referenci. Tento problém lze řešit například skenováním jednoduchých známých tvarů, jejichž rozměrové vlastnosti je následně možné vyhodnocovat. Proto byly naskenovány rovnoběžné roviny, jejichž kvalitu je již možno posoudit podle různých kritérií.

Kritéria pro posouzení kvality 3D rekonstrukce ploch byla zvolena takto:

- celkový počet zrekonstruovaných bodů,
- počet zrekonstruovaných bodů ve výřezu plochy 1,
- počet zrekonstruovaných bodů ve výřezu plochy 2,
- odchylka rovinatosti plochy 1,
- odchylka rovinatosti plochy 2,
- úhel, který plochy svírají,
- špičatost rozdělení četností odchylek plochy 1,
- špičatost rozdělení četností odchylek plochy 2,
- šikmost rozdělení četností odchylek plochy 1,
- šikmost rozdělení četností odchylek plochy 2,
- vzájemná vzdálenost ploch od sebe.

Pro posouzení těchto kritérií byl navržen a vytvořen program `planarity_test.m` obsahující algoritmus pro posouzení kvality libovolné naskenované plochy.

Jako první je nutné vyříznou z mraku bodů plochy, které budou zkoumány. To lze realizovat například pomocí přiloženého programu `cut_pointcloud.m`, který vyřízne části vstupního mraku bodů podle zadaných souřadnic x a y a uloží je ve formátu `xyz`. Program `planarity_test.m` pak načte oříznuté plochy. Tyto matice bodů jsou následně rozloženy pomocí singulárního rozkladu a tím je zjištěn směr normál ploch ve kterém jsou následně posuzovány odchylky.

Ze singulárního rozkladu získáme první metriku pro posouzení kvality skenu, a to normalizací singulárního čísla, které odpovídá směru normály. Z tohoto čísla po normalizaci získáme údaj o odchylce rovinatosti. Dále nám singulární rozklad pomůže zjistit četnosti a velikosti odchylek od nuly, a proto je možné zkoumat jejich rozložení. To nám dává informaci o tom, jak vypadá plocha jako celek, jestli je například celkově prohnutá a jaké jsou největší, respektive nejmenší odchylky. Lze zkoumat i šikmost a špičatost rozložení četností odchylek.

Šikmost rozložení četností odchylek G_1 byla určena podle vztahu:

$$g_1 = \sqrt{n} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (34)$$

$$G_1 = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} * g_1 \quad (35)$$

kde \bar{x} je výběrový průměr, g_1 je výběrový koeficient šikmosti a G_1 je nevychýlený výběrový koeficient šikmosti.

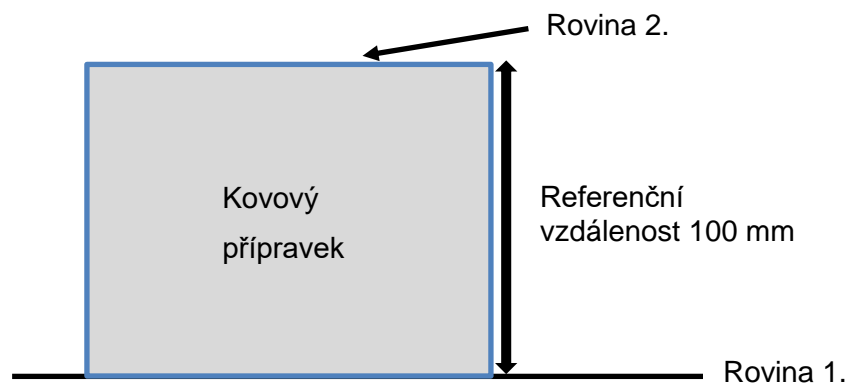
Špičatost rozložení četností odchylek G_2 byla určena podle vztahu:

$$g_2 = n \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)^2} \quad (36)$$

$$G_2 = \frac{(n-1)}{(n-2)(n-3)} ((n+1)g_2 + 6) \quad (37)$$

kde \bar{x} je výběrový průměr, g_2 je výběrový koeficient šikmosti a G_2 je nevychýlený výběrový koeficient šikmosti.

V případě, že je vyhodnocována více než jedna plocha, je možné, díky zjištěné informaci o normálách, spočítat úhel, který plochy svírají a jejich vzdálenost. V tomto případě byly plochy uspořádány podle Obr. 30.



Obr. 30. - Schéma skenované scény s plochami

Test s vyhodnocením dvou rovnoběžných rovin pro deset různých skenovacích textur na totožné scéně ukázal výsledky uvedené v Tabulce 5 – 7.

Tabulka 5. - Výsledek testu textur

Textura	Celkový počet bodů	Úhel mezi rovinami [°]	Odchyłka od ref. vzdálenosti [mm]
1	3855629	6.9852923	13.68024633
2	3915875	2.5629332	0.484431743
3	4017657	11.0420170	6.011010303
4	4614322	0.3478011	1.534025819
5	4603401	1.5006044	0.941469819
6	3151790	0.9988204	1.701807258
7	3435886	23.4412430	1.571728273
8	4648121	0.6049280	1.912789685
9	4645775	0.5335972	1.941483328
10	4650774	1.1336989	1.733508935

Tabulka 6. - Výsledek testu textur – rovina 1.

Textura	Počet bodů 1	Odchyłky rovinatosti 1 [mm]	Špičatost 1	Šikmost 1
1	256573	1.864817877466562	4.186982436083643	-0.879011130658766
2	303508	0.5487503308136331	3.088666185835987	0.1286481500015436
3	322268	14.71802946129996	2.463716132316693	0.5384235308305244
4	523455	0.249012647642901	2.830764096841796	0.371024952861138
5	520705	0.378601881250109	3.079448287359437	0.1265361229091015
6	161041	0.645078705519907	2.781118690422586	0.5412022590980001
7	17784	0.392432061964344	3.252733288227263	-0.184790279819017
8	523538	0.329750789393866	3.438120366034893	-0.064131601656297
9	523462	0.336396192293050	3.509117716268849	-0.123701738813701
10	523566	0.345598442871371	3.332361637587002	-0.033399397744606

Tabulka 7. - Výsledek testu textur – rovina 2.

Textura	Počet bodů 2	Odchyłky rovinatosti 2 [mm]	Špičatost 2	Šikmost 2
1	86920	0.5169519960468568	3.26772503829070	0.0410755721709762
2	46676	1.276083210205781	6.05291193882809	0.624420684051181
3	91826	0.1342152234245473	2.94813593197846	-0.263534213499535
4	91209	0.2726648190308966	3.18376759952422	0.0082799172704752
5	69309	0.8544616953284554	6.03149252780875	0.4649184583229008
6	64035	1.474854576074536	9.5975667781455	-8.29553387383269
7	26211	3.552290942409745	5.69559266966620	-1.342452473054625
8	86066	0.6748562437857577	3.67870460980346	0.5499917526157184
9	87997	0.5986644472183199	3.15182137938277	0.2874113244158105
10	87859	1.449224316474714	6.94731946048646	1.163526188373356

Vzhledem k tomu, že výsledkem testu jsou multidimenzionální data, není jednoduché říci, která textura vykazuje nejlepší výsledek a která nehorší. Pro získání alespoň určité představy byla použita empiricky určená funkce pro číslo textury $n = 1, 2 \dots 10$ v tomto tvaru:

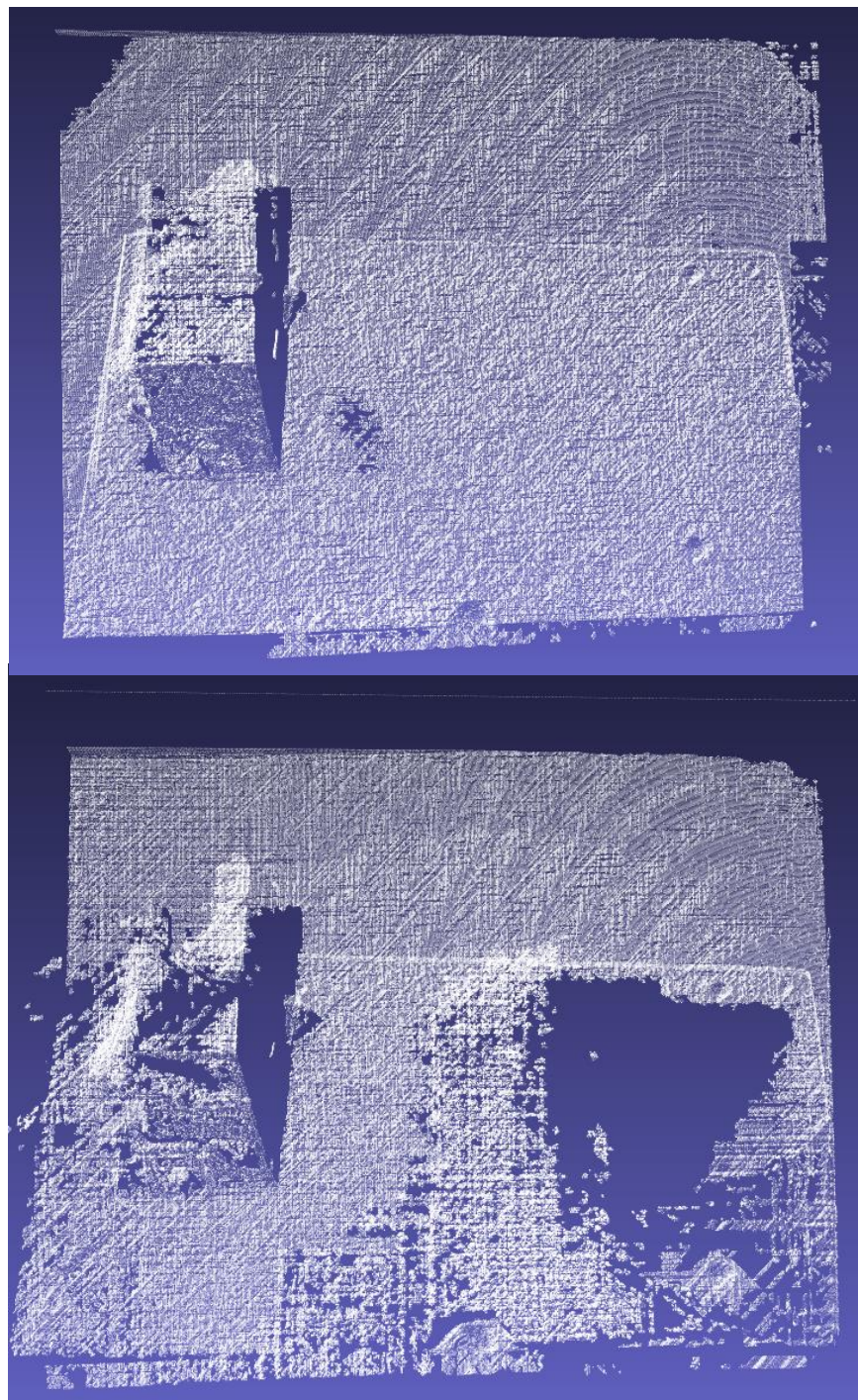
$$\begin{aligned} \text{Hodnocení}_{(n)} = & \frac{1}{\text{celkový počet bodů}_{(n)}} * 10^6 + \frac{1}{\text{počet bodů } 1_{(n)}} * 10^5 + \frac{1}{\text{počet bodů } 2_{(n)}} * 10^5 \quad (34) \\ & + \text{odchylka rovinatosti } 1_{(n)} + \text{odchylka rovinatosti } 2_{(n)} \\ & + \text{úhel mezi rovinami}_{(n)} + |\text{odchylka vzdálenosti}_{(n)}| + |\text{šikmost } 1_{(n)}| \\ & + |\text{šikmost } 2_{(n)}| - (\text{špičatost } 1_{(n)} - 3) - (\text{špičatost } 2_{(n)} - 3)/3 \end{aligned}$$

Čím menší celkové hodnotící skóre textura získala, tím lepší vznikl při jejím použití výsledný sken. Celkové výsledky hodnocení, od nejlepšího po nejhorší, jsou uvedeny v Tab. 8.

Tabulka 8. - Výsledky vyhodnocení vlivu promítané textury při skenování

Textura (od nejlepší po nejhorší)	Hodnocení [bezrozměrné]
černobílé vodorovné pruhy (šířka 2 px)	2.295071
bez textury a bez nasvícení	2.858477
náhodný šum2	3.335559
černobílé svislé pruhy (šířka 8 px)	3.873250
náhodný šum 3	3.960202
náhodný šum 1	4.035534
černobílé svislé pruhy (šířka 2 px)	9.014758
černobílé vodorovné pruhy (šířka 8 px)	11.058122
bez textury (bílá)	22.108998
plynulý přechod z černé do bílé	35.118220

Hodnocení pomocí empiricky určené kriteriální funkce se shoduje se subjektivním hodnocením vzniklých mračen bodů. Z výsledků vyplývá, že testované textury nepřispívají významně ke kvalitě rekonstrukce, mohou ale pomoci k výraznému zvýšení počtu zrekonstruovaných bodů. Promítnutí bílé barvy ovlivnilo sken ve výrazně negativním smyslu. To je způsobeno přesvětlením scény, na které následně není možné najít korespondence, kvůli velkým bílým plochám bez textury. Nejhorší výsledek vykázal sken s texturou plynulého přechodu od černé k bílé barvě. Mraky bodů s nejlepším a nejhorším výsledkem jsou ukázány na Obr. 31.



Obr. 31. – Mraky bodů vzniklé při skenování stejné scény s různou promítnutou texturou

a) Textura černobílé vodorovné pruhy (šířka 2 px) s nejlepším výsledkem

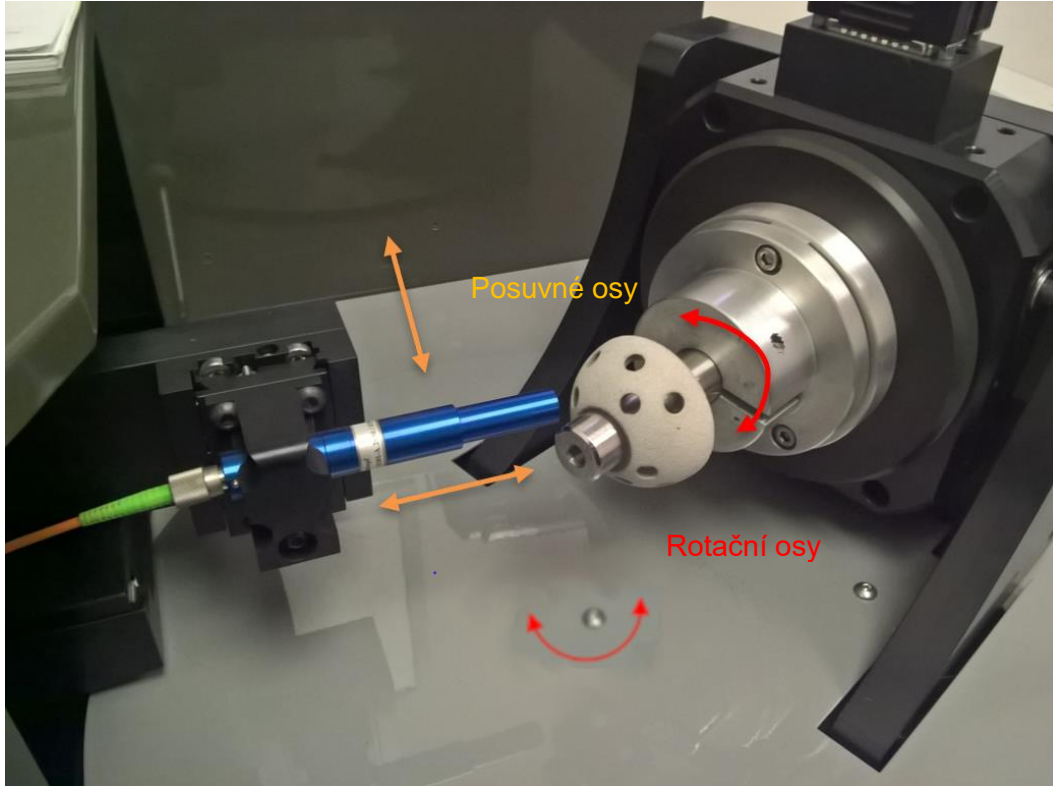
b) Textura plynulý přechod z černé do bílé s nejhorším výsledkem

10 Porovnání se skeny z profilometru RedLux

Pro zjištění kvality skenování tvarově složitých objektů je ideální mít možnost vzniklý mrak bodů porovnat s určitou referencí. U těchto objektů není snadné vytvořit věrný CAD model v 3D modelovacím software, a i v případě, že CAD model existuje, tak neodráží přesný stav reálně vyrobeného objektu. Jediná možnost, jak získat kvalitní referenci je použít výrazně přesnější způsob prostorové rekonstrukce objektů.

V tomto případě byla zkoumaným objektem náhrada kyčelní jamky. Tento objekt má tvar duté polokoule s několika dírami. Jeho přesné měření je potřebné například při kontrole vrstvy nanesené na jeho povrch, která slouží ke snadnější adaptaci náhrady v lidském těle. Dále je možné skenováním kontrolovat například opotřebení náhrady či správnost jejího tvaru pro konkrétního pacienta. Využití metod stereovize pro tyto účely by bylo velmi praktické, z důvodu její rychlosti a nízké finanční a prostorové náročnosti.

K naměření referenčních dat použit 4-osý optický profilometr firmy RedLux (RedLux Ltd., Southampton, UK), který je znázorněn na Obr. 32. Skládá ze dvou posuvných a dvou rotačních os, které využívají vzduchová ložiska pro dosažení vyšší přesnosti pohybu. Rotační osy pohybují vzorkem a posuvné osy pohybují senzorem. Všechny osy využívají optické snímače polohy a lineární motory. Senzorem je bodový konfokální snímač, jehož princip je založený na barevné vadě čočky (chromatická aberace) a používá se k velmi přesnému měření vzdálenosti od měřeného objektu. Podle hodnot udávaných výrobcem mají lineární osy rozlišení 100 nm, rotační osy 10". Výrobcem udávané rozlišení bodového konfokálního snímače je 20 nm. Profilometr zaznamenává polohu jednotlivých bodů povrchu s určitou frekvencí. Frekvenci snímání bodů lze nastavit jak v obvodovém, tak v podélném směru.



Obr. 32. - Čtyř-osý optický profilometr RedLux

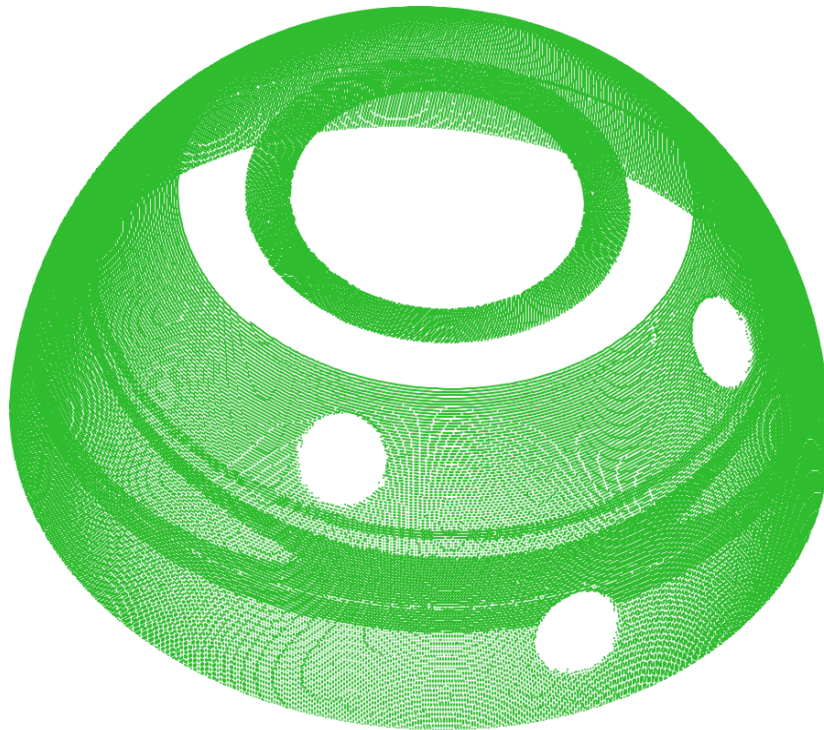
10.1 Parametry měření

Pro upevnění vzorku do rotační osy optického profilometru byl navržen a vyroben celokovový přípravek. Nasnímána byla jak kulová plocha, tak část čelní plochy, kde jsou vyraženy znaky k označení jamky, které sloužily pro spárování skenu z optického profilometru RedLux a skenu získaného stereovizí. Vzdálenost snímaných bodů byla 0,2 mm v radiálním směru. V obvodovém směru se vzdálenost snímaných bodů, při pevně nastavené frekvenci snímání, mění v závislosti na poloze od středu. Frekvence snímání byla tedy nastavena tak, aby střední vzdálenost snímaných bodů byla stejná jako v radiálním směru, tedy 0,2 mm. Na vzorku bylo naměřeno více než 160 000 bodů.

10.2 Vyhodnocení výsledků měření

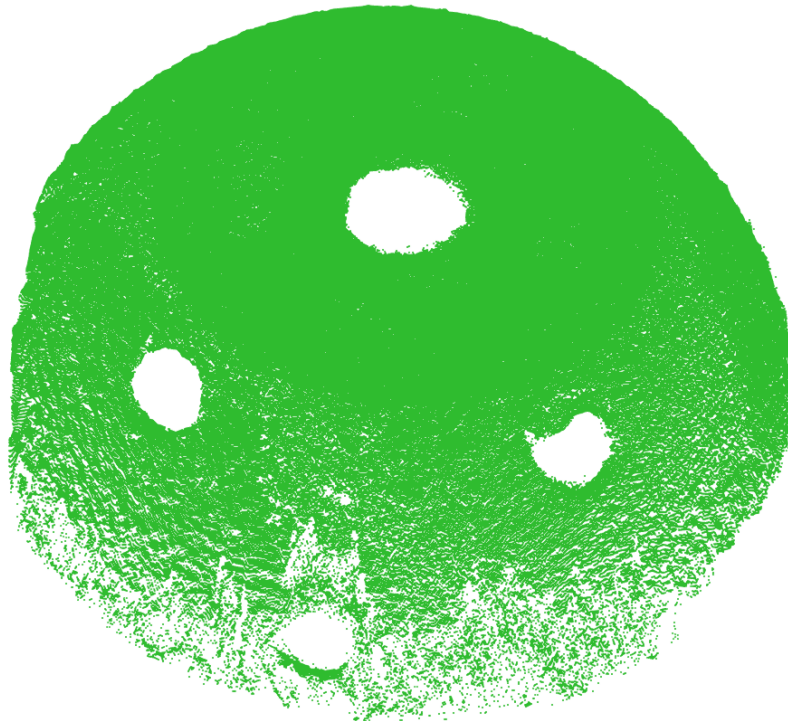
Pro vyhodnocení byl použit program GOM Inspect. Jedná se o software sloužící k analýze 3D měřicích dat pro kontrolu kvality, vývoj a výrobu produktů.

Ze skenování pomocí konfokální sondy na RedLuxu byl získán mrak bodů o souřadnicích x , y , z , které byly následně importovány do programu. Zobrazení importovaných bodů je na následujícím Obr 33.



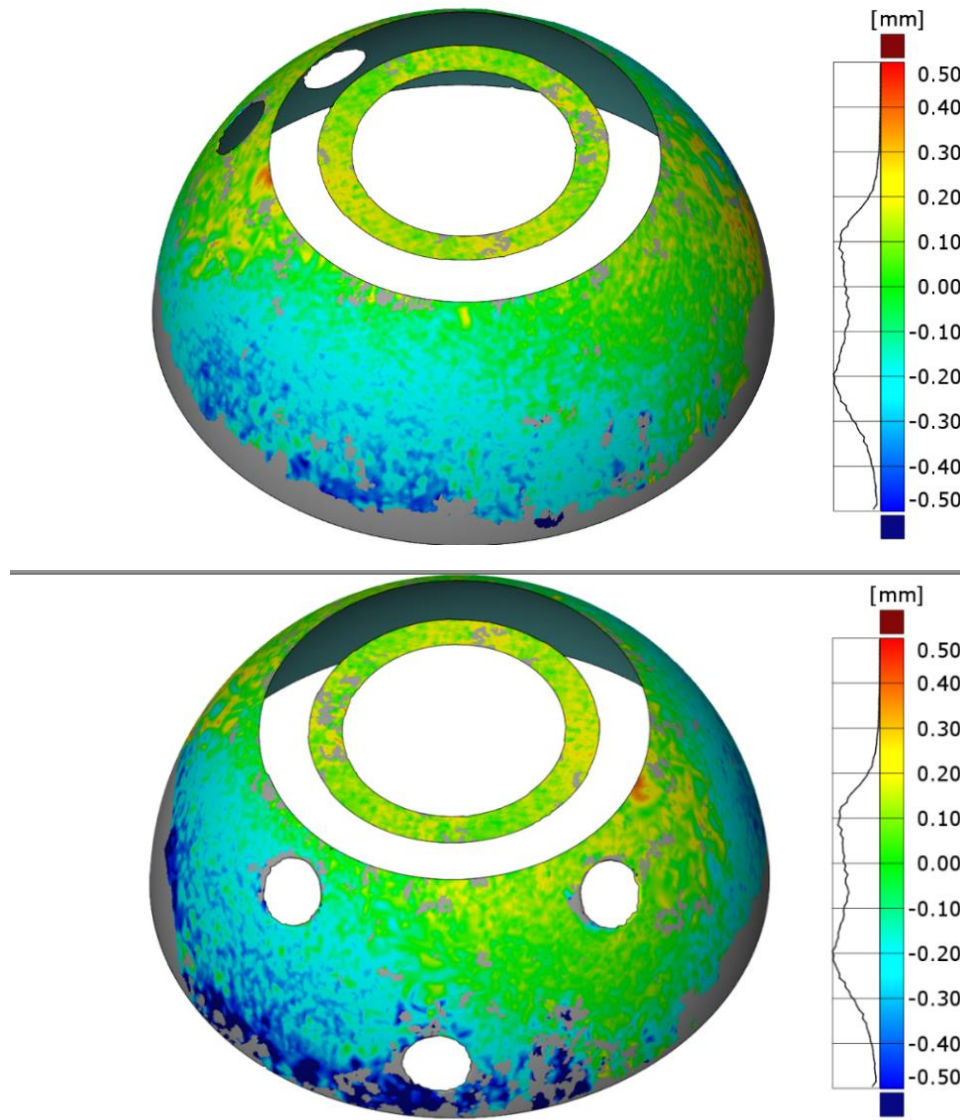
Obr. 33. - Mrak bodů získaný měřením na profilometru RedLux

Kontrolovaný mrak bodů získaný stereovizí je zobrazen na Obr 34.



Obr. 34. - Mrak bodů získaný pomocí stereovize

Pro složení skenů bylo využito funkce Alignment Local Best-Fit. Po spojení obou skenů byly generovány odchylky skenu ze stereovize od skenu z optického profilometru – ten byl vzat jako referenční (nominální). Odchylky byly vypočteny jako velikosti kolmé vzdálenosti každého polygonového bodu nominálních dat od aktuálních. Velikost odchylek se zobrazuje na Obr. 35 pomocí barevné stupnice od modré přes zelenou až k červené. Modrou barvou se zobrazují místa ležící pod nominálními daty (značí zápornou hodnotu vzdálenosti – úbytek), zelená představuje nulovou hodnotu a červená naopak místa nad nominálním povrchem (kladná odchylka – přírůstek). Vedle barevné stupnice je zobrazena křivka ukazující četnosti odchylek dané velikosti.



Obr. 35. - Výsledky porovnání skenu z optického profilometru a stereovize – pohled z jedné a druhé strany

Z porovnání je patrné, že převládají záporné odchylky. Odchylky s největším výskytem mají velikost 0,2 mm a maximální odchylky se pohybují okolo 0,5 mm. Na obr. lze pozorovat, že nízké odchylky se vyskytují ve středové části skenu, zatímco boční části vykazují odchylky záporné. Středová část skenovaného objektu byla kamerami pozorována pod podobným úhlem, zatímco části okrajové jsou pozorovány z jedné kamery pod úhlem větším než z kamery druhé. Je pravděpodobné, že tím je způsobena

deformace naskenovaného objektu. Z tohoto výsledku tedy vyplývá, že přesnost změřených bodů pomocí stereovize závisí i na poloze objektu v zorném poli kamer.

Dosahovaná přesnost při skenování pomocí stereovize se tedy v tomto případě pohybuje v jednotkách desetin milimetrů a nedosahuje přesnosti optického profilometru, která je o několik řádů vyšší. Přesnost skenování by bylo možné zvýšit použitím snímačů s vyšším rozlišením a, při skenování malých předmětů, využitím makro objektivů.

Přednosti metody stereovize se tedy nachází v rychlosti a nízké finanční náročnosti. Doba rekonstrukce mraku bodů se odvíjí od počtu rekonstruovaných bodů a v tomto případě trvá přibližně 20 sekund. Měření na optickém profilometru při rekonstrukci podobného počtu bodů může trvat i hodinu. I v případě, kdy je nutné provést několik skenů pro vytvoření kompletního 3D modelu objektu, je stále doba skenování velmi krátká.

Co se týče finanční náročnosti, použitá skenovací sestava má cenu přibližně 35 000 Kč, zatímco u měřících přístrojů typu optického profilometru RedLux je cena mnohonásobně vyšší.

Tento test ukázal, že je možné pomocí stereovize účinně skenovat i tvarově složité objekty. Pro vytvoření kompletního modelu je ale nutné provést několik skenování a výsledné mraky bodů spojovat, což do výsledku může vnášet další nepřesnosti.

11 Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na zkoumání metody stereovize pro digitální 3D rekonstrukci objektů. Vzhledem k vysoké složitosti procesu skenování prostorových objektů a velkému množství parametrů, které skenování ovlivňují bylo v první řadě nutné podrobně se seznámit s procesem rekonstrukce prostorového bodu z informací zaznamenanou snímačem. V první části této práce je tedy stručně popsán princip současně používaných bezkontaktních metod pro prostorové skenování společně s jejich výhodami a nevýhodami. Stereovize vychází z tohoto porovnání jako metoda s přijatelnou přesností skenování, která je zároveň metodou velmi rychlou a finančně nenáročnou.

V další kapitole jsou popsány parametry, které mohou skenování ovlivňovat. Mezi takové parametry nepatří pouze vlastnosti snímačů (v tomto případě dvojice kamer), ale i vlastnosti skenovaného objektu, vzájemné polohy všech prvků skenovacího zařízení i objektů ve skenované scéně a v neposlední řadě i vlastnosti okolí, jako je například osvětlení. Dále práce obsahuje matematický popis procesu prostorové rekonstrukce, jehož pochopení je nutné ke zhodnocení vlivu parametrů ovlivňujících skenování. Jsou zmíněny různé přístupy k modelování transformace bodu v prostoru na bod zaznamenaný snímačem a způsoby kalibrace kamer a jejich vzájemné polohy.

V rámci této práce byl sestaven optický skenovací systém pro stereovizi a vytvořen potřebný algoritmus pro získání praku bodů z pořízených stereo snímků. V rámci zkoumání vlivu parametrů na skenování tímto systémem byla provedena citlivostní analýza posuzující citlivost rekonstrukce prostorového bodu na změnu vstupních kalibračních parametrů. Tato analýza byla provedena metodou Monte Carlo a slouží k hlubšímu pochopení vlivu kalibrace na rekonstrukci 3D objektu.

Dále byl proveden test, zda promítání určitých vzorů či textur pomocí projektoru na skenovanou scénu nemůže přispět ke zvýšení kvality rekonstrukce. Test spočíval ve skenování totožné scény s deseti různými případy promítané textury. Byla určena kritéria, podle kterých je možné objektivně posoudit kvalitu rekonstrukce u naskenovaných ploch

a byl vytvořen program vyhodnocující tato kritéria. Výsledkem testu bylo zjištění, že testované textury nepřispívají významně ke kvalitě rekonstrukce, mohou ale pomoci k výraznému zvýšení počtu zrekonstruovaných bodů. Toto téma je vhodné k dalšímu rozpracování. Bylo by například vhodné vyzkoušet průměrování výsledků z totožné scény naskenované několikrát s různým šumem. S tímto přístupem by mohl být rekonstruován mrak kompletní a zároveň s hladkými plochami.

Závěr práce tvoří srovnání mraků bodů kyčelní jamky získaného pomocí stereovize s mrakem bodů naměřeného optickým profilometrem RedLux. Mrak bodů z optického profilometru byl při porovnání považován za referenci. Sken získaný stereovizí vykazoval odchylky od referenčního mraku o velikostech jednotek desetin milimetrů. Pomocí srovnání byla odhalena určitá šikmost skenu, která je způsobena umístěním skenovaného objektu v zorném poli kamer.

Metoda stereovize se ukázala být metodou, která má potenciál pro využití jak v průmyslu, tak u koncových zákazníků, a to hlavně díky nízké finanční náročnosti. Otevřená stále zůstává otázka robustnosti a univerzálnosti. Cestou k vysoké robustnosti by mohly být různé hybridní metody, které by kombinovaly různé metody hledání korespondencí tak, že by pro problematická místa bylo využito kódování scény přidavným světelným zdrojem.

12 Reference

- [1] H. K. KALOVÁ Ilona, „Optické metody měření 3D objektů,“ 2005. [Online]. Available: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>.
- [2] K. Horák, „Pasivní triangulace,“ 2010. [Online]. Available: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/Exercise08/08_Pasivni_triangulace.pdf.
- [3] Wikipedia, „Bin picking,“ 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Bin_picking.
- [4] J. C. Rodrigues, „Improve a 3D distance measurement accuracy in stereo vision systems using optimization methods' approach,“ Květen 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1230340217300100>.
- [5] K. Horák, „Aktivní triangulace,“ 2010. [Online]. Available: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/Exercise02/02_Aktivni_triangulace.pdf.
- [6] J. Geng, „Structured-light 3D surface imaging: a tutorial,“ Prosinec 2010. [Online]. Available: http://www.rtbasics.com/Downloads/IEEE_structured_light.pdf.
- [7] S. Savarese, „Shape Reconstruction from Shadows and Reflections,“ 2005. [Online]. Available: https://thesis.library.caltech.edu/2002/1/savarese_thesis.pdf.
- [8] H. Lin, „A single-shot structured light means by encoding both color and geometrical features,“ Červen 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320315004720>.
- [9] M. B. Lilienblum Erik, „Optical 3D Surface Reconstruction by a Multi-Period Phase Shift Metho,“ Duben 2007. [Online]. Available: <http://www.jcomputers.us/vol2/jcp0202-08.pdf>.
- [10] M. Iwamoto, „Active pattern projection improves AOI 3D measurement accuracy,“ Únor 2018. [Online]. Available: <https://www.vision-systems.com/articles/print/volume-23/issue-2/features/active-pattern-projection-improves-aoi-3d-measurement-accuracy.html>. [Přístup získán Květen 2019].
- [11] J. M.J. Westoby, „'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications,“ 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217>.
- [12] D. G. Lowe, „Object Recognition from Local Scale-Invariant Features,“ 1999. [Online]. Available: <http://new.csd.uwo.ca/Courses/CS9840a/PossibleStudentPapers/iccv99.pdf>.

- [13] Renishaw, „Jak funguje interferometrický systém?“, [Online]. Available: <https://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612>.
- [14] L. W. Kheng, „Camera Models and Imaging,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.comp.nus.edu.sg/~cs4243/lecture/camera.pdf>.
- [15] DanielGAliaga, „Stereo and 3D Reconstruction,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.cs.purdue.edu/homes/aliaga/cs635-10/lec-stereo-3drecon.pdf>.
- [16] G. Bebis, „Department of Computer Science, University of Nevada - Computer vision, camera parameters,“ 2004. [Online]. Available: <https://www.cse.unr.edu/~bebis/CS791E/Notes/CameraParameters.pdf>.
- [17] J. Reichl, „Encyklopedie fyziky - Zobrazení tenkou čočkou,“ [Online]. Available: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/481-zobrazeni-tenkou-cockou>.
- [18] OpenCV, „Camera Calibration and 3D Reconstruction,“ 30 Březen 2019. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html.
- [19] K. Miroslav, „ZPRACOVÁNÍ A VIZUALIZACE STEREO SNÍMKŮ,“ 2012. [Online]. Available: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/17300/Diplomka.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- [20] U. CRCV, „Lecture 13 - Fundamental Matrix,“ 2015. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=1X93H_0_W5k.
- [21] Wikipedia, „Eight-point algorithm,“ 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Eight-point_algorithm.
- [22] R. I. Hartley, „In Defence of the 8-point Algorithm,“ [Online]. Available: http://www.cs.cmu.edu/afs/andrew/scs/cs/15-463/f07/proj_final/www/amichals/fundamental.pdf.
- [23] Z. Zhang, „A Flexible New Technique for Camera Calibration,“ 1999. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/tr98-71.pdf>.
- [24] F. B. Gianfranco Bianco, „A Comparative Analysis between Active and Passive Techniques for Underwater 3D Reconstruction of Close-Range Objects,“ [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/256072668_A_Comparative_Analysis_between_Active_and_Passive_Techniques_for_Underwater_3D_Reconstruction_of_Close-Range_Objects.
- [25] R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, 2010.

- [26] D. Lee, „StereoVision library,“ [Online]. Available: <https://github.com/erget/StereoVision>.
- [27] H. Hirschmuller, „Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information,“ Prosinec 2007. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/11134866.pdf>.
- [28] N. Havlíčková, „Vision Guided Robots,“ [Online]. Available: <http://www.fm.tul.cz/files/pages/other/MTI/obr18/ATEsystem-Havlickova.pdf>.
- [29] D. Mandát, „Optické bezkontaktní topografické metody,“ 2012. [Online]. Available: https://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Mandat-Opticke_bezkontaktni_topograficke_metody.pdf.
- [30] D. Page, „Methodologies and Techniques for Reverse Engineering—The Potential for Automation with 3-D Laser Scanners,“ Říjen 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/226177485_Methodologies_and_Techniques_for_Reverse_Engineering-The_Potential_for_Automation_with_3-D_Laser_Scanners.
- [31] P. Bourke, „Field of view and focal length,“ Duben 2003. [Online]. Available: <http://paulbourke.net/miscellaneous/lens/>.
- [32] Wikipedia, „Pinhole camera model,“ 2008. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Pinhole_camera_model.
- [33] A. V.-R. R. S. Daniel Scharstein, „Stereo datasets with ground truth,“ 2003 . [Online]. Available: <http://vision.middlebury.edu/stereo/data/scenes2003/>.
- [34] P. W. X. W. Y. K. Nera Nesic, „Stereo datasets with ground truth,“ 2014 . [Online]. Available: <http://vision.middlebury.edu/stereo/data/2014/>.

13 Seznam obrázků

- Obr. 1. - Schéma optického systému využívajícího pasivní triangulaci [4]
- Obr. 2. - Aktivní triangulace [3]
- Obr. 3. - Odraz známého vzoru na povrchu zkoumaného objektu [7]
- Obr. 4. - Vliv uspořádání prvků optického systému při aktivní triangulaci [8]
- Obr. 5. - Binární kódování [6]
- Obr. 6. - Kódování pomocí De Bruijnovy sekvence [6]
- Obr. 7. - Mřížkové kódování [6]
- Obr. 8. - Princip interferometru [1]
- Obr. 9. - Princip metody měření doby letu světla [13]
- Obr. 10. - Vztah mezi zorným polem, ohniskovou vzdáleností a velikostí senzoru kamery [14]
- Obr. 11. - Geometrie paralelního stereo setu [18]
- Obr. 12. - Geometrie optického systému při rotaci kamery kolem osy y
- Obr. 13. - vliv natočení kamery kolem osy y na velikost zorného pole a přesnost vyhodnocení polohy bodu [15]
- Obr. 14. - Kvalita mapy disparit vytvořená pomocí algoritmu SGM v závislosti na podobnosti páru snímků
- Obr. 15. - Transformace souřadnic při snímání objektu kamerou
- Obr. 16. - Schéma ortografické projekce [14]
- Obr. 17. - Schéma perspektivní projekce [14]
- Obr. 18. - Zobrazení tenkou čočkou [17]
- Obr. 19. - Dírkový model kamery [32]
- Obr. 20. - Pin hole Camera model [18]
- Obr. 21. - Snímek bez distorze a dva běžné typy radiální distorze snímků – pozitivní $k_1 > 0$ a negativní $k_1 < 0$ [18]
- Obr. 22. - Epipolární geometrie
- Obr. 23. - Detekce vnitřních rohů šachovnice na kalibračních snímcích [18]
- Obr. 24. - Příklad rektifikace [18]
- Obr. 25. - Stereo sestava pro 3D skenování

- Obr. 26. - Mapa disparit vytvořená za použití různých algoritmů
- Obr. 27. - Výsledky citlivostní analýzy pro různé parametry
- Obr. 28. - Vybrané testovací textury
- Obr. 29. - Vyhodnocovaná scéna se dvěma rovnoběžnými plochami
- Obr. 30. - Schéma skenované scény s plochami
- Obr. 31. - Mraky bodů vzniklé při skenování stejné scény s různou promítnutou texturou
- Obr. 32. - Čtyř-osý optický profilometr RedLux
- Obr. 33. - Mrak bodů získaný měřením na profilometru RedLux
- Obr. 34. - Mrak bodů získaný pomocí stereovize
- Obr. 35. - Výsledky porovnání skenu z optického profilometru a stereovize – pohled z jedné a druhé strany

14 Seznam tabulek

- Tabulka 1. - Parametry kamer testovaného optického systému
- Tabulka 2. - Parametry projektoru testovaného optického systému
- Tabulka 3. - Výsledky kalibrace optického systému
- Tabulka 4. - Výsledky citlivostní analýzy
- Tabulka 5. - Výsledek testu textur
- Tabulka 6. - Výsledek testu textur – rovina 1.
- Tabulka 7. - Výsledek testu textur – rovina 2.
- Tabulka 8. - Výsledky vyhodnocení vlivu promítnuté textury při skenování

15 Seznam použitého software

Microsoft Word 2016
Microsoft Excel 2016
JetBrains PyCharm
MeshLab
GOM Inspect
GNU Octave

16 Seznam příloh na CD

Diplomová práce:

- DP_Chvalova_2019.pdf

Programy vytvořené v rámci vypracování této diplomové práce:

- take_photos.py,
- calibrate_cameras.py,
- disparity_gui.py,
- create_pointcloud.py,
- calibration_sensitivity.m,
- cut_pointcloud.m,
- planarity_test.m.