

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A
INFORMATIKY



Scalable Multifunctional Indoor Scanning System

Diplomová práca

Bc. TOMÁŠ KOVAČOVSKÝ

2012

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A
INFORMATIKY

Scalable Multifunctional Indoor Scanning System

Diplomová práca

Študijný program: 9.1.1. Matematika

Študijný odbor: Počítačová grafika a geometria

Školiace pracovisko: Katedra algebry, geometrie a didaktiky matematiky

Školiteľ: Mgr. Ján Žižka

Kód: c213d0dc-4b52-48fb-8d46-3ab1554f52e1

Bratislava, 2012

Bc. Tomáš Kovačovský

PRIHLÁŠKA NA ZÁVEREČNÚ PRÁCU

Meno a priezvisko študenta: Bc. Tomáš Kovačovský
Študijný program: počítačová grafika a geometria (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: 9.1.1. matematika
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský

Názov: Scalable Multifunctional Indoor Scanning System

Cieľ: Práca bude nadväzovať na vynikajúce výsledky dosiahnuté v rovnomennej bakalárskej práci. Cieľom študenta je preskúmať možnosti rozšírenia a zdokonalenia systému: rýchlosť, presnosť, registrácia a triangulácia výstupu, skúmanie základných materiálových vlastností.

Vedúci: Mgr. Ján Žižka
Katedra: FMFI.KAGDM - Katedra algebry, geometrie a didaktiky matematiky

Dátum schválenia: 27.10.2010

podpis študenta

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne a uviedol som všetku použitú literatúru.

V Bratislave, 4. 5. 2012

.....
Tomáš Kovačovský

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať vedúcemu svojej práce, Mgr. Jánovi Žižkovi, ktorého cenné odborné rady, hardvérová podpora, ako aj ochota a nasadenie umožnili doviest' prácu do záverečného stavu. Rovnako chcem poďakovať aj svojej rodine, fakulte a spoločnosti ME-Inspection SK.

ABSTRAKT

KOVAČOVSKÝ, TOMÁŠ: SMISS – Scalable Multifunctional Indoor Scanning System. [Diplomová práca] – Univerzita Komenského v Bratislave. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky; Katedra algebry, geometrie a didaktiky matematiky. – Vedúci: Mgr. Ján Žižka. Bratislava: UK, 2012, 110 s.

Ťažiskom práce je pokračovanie na vývoji systému SMISS, ktorého základy boli postavené v bakalárskej práci s rovnakým názvom. SMISS je systém na automatickú 3D rekonštrukciu v metrickom priestore, ktorý pracuje na princípe triangulácie s využitím štruktúrovaného osvetlenia pomocou digitálneho projektoru. Na akvizíciu dát systém využíva digitálnu kameru.

V práci sme sa sústredili na rozšírenie funkcionality systému a na vylepšenie postupov a metód z predchádzajúcej práce. Poukazujeme na problém nedostatočného dynamického rozsahu podobných systémov. Vyvinuli sme inovatívne riešenie, prvé svojho druhu, s využitím jednoduchého pridaného hardvéru a navrhnutých algoritmov v rozšírení HDR SMISS. Ponúkané riešenie je taktiež silným a flexibilným nástrojom pre budúcu prácu. Ďalej uvádzame hlbší výklad problematiky skenovania s využitím štruktúrovaného svetla, ktorým kódujeme snímaný priestor. Zamýšľame sa nad využitím 3D rekonštrukcie v rôznych sférach života. V neposlednej rade sa v práci venujeme vizualizácii získaných dát, pomocou pohľadovo závislého stereo zobrazenia.

Pri riešení úloh dbáme na fyzikálnu korektnosť a problém riešime na úrovni hardvéru a softvéru. Preto v práci ponúkame informácie o implementovaných prototypoch postavených na špecifické účely, či propagácie riešenia doma i v zahraničí. Čitateľovi taktiež predkladáme budúce smerovanie práce a zamyslenie nad potenciálnym riešením budúcich úloh.

Kľúčové slová: 3D rekonštrukcia, kamera, projektor, kalibrácia, triangulácia, trojrozmerné mračno bodov, viac pohľadová geometria, počítačové videnie, výpočtová fotografia, pohľadovo závislé zobrazovanie, stereo zobrazovanie, vizualizácia 3D objektov, polarizácia, polopriesvitné zrkadlo, dynamický rozsah, HDR, kódovaná iluminácia

ABSTRACT

The main goal of this work is to continue in research on system SMISS, which was firstly introduced in our bachelor work with the same title. SMISS is scanning system for automatic 3D reconstruction in metric space. It works on a triangulation principle, using structured light from digital projector to spatially code the space. For the data acquisition, the system uses a digital camera.

We are focusing on increasing the functionality of the system and also on enhancing the approaches used in our previous work. We address the problem of low dynamic range of similar systems and propose a novel approach, first of its kind, to solve the problem using simple additional hardware and designed algorithms. Our solution, in form of extension HDR SMISS is also a powerful and flexible tool for future improvements. We also introduce a deeper study of methods, which use structured light for coding the scanning space. We contemplate the possible usage of 3D reconstruction in different fields of human life. Moreover, we offer a way to visualize the captured data in form of a view dependent stereo vision.

While solving the problems, we care about choosing physically correct approaches and we solve the problems using combination of hardware and software. Therefore we introduce descriptions of prototypes built for specific purposes and for propagation of our solution in the national and international field. To define the direction of our future research, we offer the description of our future work.

Keywords: 3D reconstruction, camera, projector, calibration, triangulation, 3D point cloud, multiple-view geometry, computer vision, computational photography, view dependent visualization, stereo visualization, visualization of 3D objects, polarization, beam splitter, dynamic range, HDR, structured illumination

PREDHOVOR

V súčasnej dobe sa stále častejšie stretávame s pojmom 3D. Hovoríme o 3D objektoch, 3D grafike, či 3D zobrazovaní. Možnosti vizualizácie 3D sveta a objektov sa v poslednej dobe posunuli do takej miery, že sme schopní zobrazovať virtuálny 3D svet takmer na nerozoznanie od skutočného a to aj v mobilných zariadeniach. Máme možnosť sledovať uberanie sa trhu smerom k moderným technológiám, ako napríklad aj stereo zobrazenie.

Všetky tieto skutočnosti, ako aj neustále sa zvyšujúci sa počet používateľov týchto technológií rozširuje trh s virtuálnym 3D svetom. Na vytvorenie digitálnych kópií abstraktných i reálnych priestorových objektov je k dispozícii množstvo manuálnych nástrojov. Využívanie takýchto nástrojov je však časovo náročné a vyžaduje si skúsených dizajnérov.

Z tohto dôvodu bolo vytvorených množstvo metód na získanie automatickej 3D rekonštrukcie. Vďaka takýmto metódam dokážeme zachytiť 3D podstatu objektu, často aj s aproximáciou materiálových vlastností. Tieto metódy môžu fungovať na mnohých princípoch a snímať rôzne parametre skenovaných predmetov.

Výsledky 3D rekonštrukcie je potom možné uplatniť takmer v každej sfére života. 3D modely sa priamo používajú v počítačových simuláciách, vo filmoch, v reklamách. Výsledky 3D rekonštrukcie sa však využívajú aj v medicíne na stanovenie diagnóz, prípravu operácií či špecifických náhrad končatín. V priemysle sa rekonštrukcia využíva na kontrolu kvality, hľadanie defektov, orientácií robotov, meranie rozmerov a riešenie priestorových úloh. Taktiež sa využíva pri mapovaní ulíc, digitalizácii kultúrneho dedičstva či múzejných exponátov, na skenovanie kostí, v kriminalistike na rekonštrukciu miesta činu. V poslednej dobe sme mohli vidieť uplatnenie aj v zábavnom priemysle v podobne konzolového ovládača rozpoznávajúceho ľudské pohyby.

Vidíme že uplatnenie 3D rekonštrukcie je už v súčasnosti veľmi široké a postupne sa dostáva do ďalších sfér priemyslu i života. Je to nástroj, ktorého potenciál je možno využiť pri riešení väčšiny problémov počítačového videnia.

Tak ako je v súčasnosti prirodzené mať vo vrecku zariadenie na fotografovanie obrázkov. V budúcnosti budeme zachytávať svet v jeho 3D podstate, a tak budeme vytvárať jeho virtuálnu kópiu.

OBSAH

Čestné vyhlásenie.....	I
PodĎakovanie	II
Abstrakt.....	III
Abstract	IV
Predhovor	V
Zoznam skratiek	IX
Zoznam ilustrácií.....	X
Úvod.....	1
1 Prehľad.....	3
1.1 Prehľad metód 3D rekonštrukcie	3
1.2 História zaužívaného pojmu 3D.....	4
1.3 Motivácia 3D rekonštrukcie.....	5
1.4 Aplikácie 3D rekonštrukcie	8
1.4.1 Priame aplikácie	9
1.4.2 Nepriame aplikácie	9
2 Teoretické východiská	12
2.1 Osvetlenie.....	12
2.1.1 Zdroje svetla.....	12
2.1.2 Kódovanie priestoru	14
2.1.3 Polarizácia.....	25
2.2 HDR snímanie.....	26
2.2.1 Dynamický rozsah.....	26
2.2.2 Problém vysokého dynamického rozsahu.....	27
2.2.3 Snímanie scény s vysokým dynamickým rozsahom.....	28
2.3 Vizualizácia.....	29
2.3.1 3D tlač	29

2.3.2	3D zobrazovanie	31
3	Podobné práce	34
4	Systém SMISS	37
4.1	Princíp práce systému	37
4.1.1	Limitácie systému	42
4.2	Rozšírenie HDR SMISS.....	43
4.3	Navrhnuté metódy	45
4.3.1	Kalibrácia systému SMISS	45
4.3.2	Kompenzovanie dopadu okolitého osvetlenia	46
4.3.3	Obraz priameho a nepriameho osvetlenia.....	46
4.3.4	Dekódovanie Grayových kódovaných obrazov	47
4.3.5	Dekódovanie obrazov založených na fázovom posune	51
4.3.6	Detekcia tieňov a reflexných povrchov	53
4.3.7	Kompozícia RGB.....	53
4.3.8	Zisťovanie 3D súradníc z korešpondencie.....	54
4.3.9	Získanie váhovej mapy pre obraz projektora.....	57
4.4	Vizualizácia – pohľadovo závislé stereo.....	64
4.4.1	Kalibrácia	64
4.4.2	Lokalizácia bodu v priestore	66
5	Implementácia.....	69
5.1	Systém SMISS	69
5.1.1	Softvér.....	69
5.1.2	Hardvér.....	74
5.2	Pohľadovo závislé stereo	81
5.2.1	Softvér.....	81
5.2.2	Hardvér.....	84
6	Výsledky a experimenty	86

6.1	Zistené zákonitosti	86
6.2	Testy systému SMISS	87
6.2.1	Test chybovosti	87
6.2.2	Priemerná chyba merania	88
6.3	Testy prototypu HDR SMISS	89
6.4	Výsledky	94
7	Budúca práca.....	103
8	Záver	105
9	Zoznam použitej literatúry	107

ZOZNAM SKRATIEK

BRDF	B idirectional r eflectance d istribution f unction
SVBRDF	S patially v arying b idirectional r eflectance d istribution function
CLI	C ommon l anguage i nfrastructure
DMD	D igital m icro-mirror d evice
DR	D ynamic r ange
HDR SMISS	H igh D ynamic R ange S calable M ultifunctional I ndoor S canning S ystem
HDR	H igh d ynamic r ange
ICP	I terative c losest p oint
LED	L ight-emitting d iode
MEMS	M icro-electro- m echanical s ystems
OCR	O ptical c haracter r ecognition
PCL	P oint c loud l ibrary
PSF	P oint s pread f unction
SMISS	S calable M ultifunctional I ndoor S canning S ystem
SNR	S ignal to n oise r atio
TOF	T ime o f f light

ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ

Obrázok 1: Základné rozdelenie prístupov pre automatickú rekonštrukciu.....	3
Obrázok 2: Základné rozdelenie optických systémov pre automatickú rekonštrukciu	4
Obrázok 3: Schematický popis zariadenia 3D rekonštrukcie.....	7
Obrázok 4: Schéma osvetlenia bodu jednotlivými zložkami svetla.....	13
Obrázok 5: Schematická ukážka 8 vertikálnych binárnych kódovaných obrazov.....	16
Obrázok 6: Ukážka 1, 2 a 3 bitových Grayových zrkadlových kódov.....	18
Obrázok 7: Schematická ukážka 8 vertikálnych Grayových zrkadlových kódovaných obrazov.....	18
Obrázok 8: Tvár osvetlená Grayovými obrazmi.....	19
Obrázok 9: Ukážka kódovania založeného na fázovom posune.....	21
Obrázok 10: Zrekonštruované hodnoty funkcie sínus.....	22
Obrázok 11: Nakalibrovaný prevod energie na obrazovú hodnotu projektora	24
Obrázok 12: Nasnímaný model tváre vyfrézovaný do tvrdého polystyrénu	30
Obrázok 13: Princíp korektného zobrazenia 3D	33
Obrázok 14: Princíp triangulácie v systéme SMISS	40
Obrázok 15: Schéma postupu systému k výslednému mračnu 3D bodov	42
Obrázok 16: HDR obrázok v logaritmickom mapovaní	43
Obrázok 17: 3D mračno bodov získané s použitím 5 kódovaných obrazov	52
Obrázok 18: Výsledok metódy kompozície RGB obrazov.....	54
Obrázok 19: Schematické optické usporiadanie systému HDR SMISS.....	58
Obrázok 20: Schematický popis algoritmu.....	61
Obrázok 21: Výsledok metódy získavania váhovej masky.....	62
Obrázok 22: Filtrácia spekulárnej zložky osvetlenia založená na polarizácii.....	63
Obrázok 23: Kalibračný predmet pre kalibráciu pohľadovo závislého stereo zobrazenia.....	65
Obrázok 24: Umiestnenie polohy očí	67
Obrázok 25: Ilustračné obrázky fungovania prototypu pohľadovo závislého stereo zobrazenia.....	68
Obrázok 26: Class diagram funkcionality projektu SMISS	69
Obrázok 27: Užívateľské rozhranie projektu SMISS	72
Obrázok 28: Obrázok z procesu skenovania.....	73
Obrázok 29: Užívateľské rozhranie. Panel pre nastavenia páru kamery s projektorom.....	73
Obrázok 30: Modul pre testovanie metód.....	74
Obrázok 31: Pôvodný prototyp systému SMISS	75
Obrázok 32: Nasnímané mračno bodov.....	75
Obrázok 33: Vyrenderovaný vizuálny návrh prototypu a realizovaný prototyp	76
Obrázok 34: Umiestnenie prototypu na výstave Virtuálny Svet 2012.....	77
Obrázok 35: Model pána doc. RNDr Milana Ftáčnika, CSc.....	77
Obrázok 36: Modul pre testovanie metód.....	78
Obrázok 37: Vizualizácia mračna bodov nasnímaných prototypom.....	78
Obrázok 38: Detail zachytávajúci vystúpenie vyrazenej podlaže.....	79

Obrázok 39: Koncept prototypu pre kompletnú 3D rekonštrukciu	79
Obrázok 40: Obrázok prototypu systému HDR SMISS.	80
Obrázok 41: Užívateľské rozhranie, 2D mód	82
Obrázok 42: Užívateľské rozhranie, 3D mód	83
Obrázok 43: Užívateľské rozhranie, kalibračné nastavenia	83
Obrázok 44: Senzory namontované na ráme	84
Obrázok 45: 3D monitor a okuliare	85
Obrázok 46: Projektované kódované obrazy	91
Obrázok 47: Dekódovaný binárny obraz štandardnou metódou.	92
Obrázok 48: Dekódovaný binárny obraz s využitím váhovej mapy projektora.....	93
Obrázok 49: Fotografie z výstavy Virtuálny Svet 2012.....	95
Obrázok 50: Fotografie z podujatia Skorý zber 2012 a Virtuálna realita bez hraníc 2012	96
Obrázok 51-67: Vizualizácie nasnímaných modelov	102

ÚVOD

Táto práca priamo vychádza z bakalárskej práce s rovnakým názvom, v ktorej sme vytvorili prehľad problematiky automatickej 3D rekonštrukcie, ako aj základy konkrétneho zariadenia s názvom SMISS, ktoré bolo schopné automatickej akvizície jednoduchej geometrie s využitím triangulácie s pomocou kódovaného osvetlenia.

V tejto práci sa budeme venovať širšiemu nadhľadu nad problematikou snímania 3D geometrie s využitím štruktúrovaného svetla, definujeme si problémy, s ktorými sa budeme stretávať, ako aj metódy efektívneho riešenia. Cieľom bude zhrnutie a využitie poznatkov na rozšírenie funkcionality systému SMISS z pohľadu doladenia jednotlivých metód, zvýšenia robustnosti snímania, ako aj presnosti. Zameriame sa na problém nedostatočného dynamického rozsahu podobných zariadení a uvidíme netradičnú inovatívnu metódu na riešenie daného problému v podobe rozšírenia systému s názvom HDR SMISS.

Podobne ako v bakalárskej práci, budeme dbať na korektnosti použitých metód, stanovíme si jasné podmienky, ktoré ovplyvňujú stavový priestor problému a budeme sa snažiť postaviť jednotlivé metódy na fyzikálne korektných modeloch.

Taktiež sa budeme venovať zhotoveniu nových prototypov, ako aj propagácii systému na poli vedy aj komerčného sveta. Budeme hľadať rôzne využitia nášho riešenia a definujeme si abstraktnejší pohľad na jeho využitie pri riešení úloh bežného života. Z hľadiska propagácie systému sa budeme venovať tradičným, i netradičným metódam vizualizácie 3D informácie. Pre tento účel navrhne a zhotovíme prototyp zostavy určenej na pohľadovo závislé stereo zobrazenie.

Práce na systéme sú naplánované na dlhšie obdobie, preto sa budeme venovať aj náčrtu nášho budúceho smerovania, popíšeme si ciele a očakávané metódy implementácie.

Táto práca slúži ako zhrnutie poznatkov získaných počas štúdia a práce s podobnými systémami. Text práce by mal čitateľovi vytvoriť intuíciu potrebnú pri pohľade na problém ako na komplexné splynutie jednotlivých jeho častí. Budeme sa pohybovať v rovinách medzi matematikou, informatikou i fyzikou. Riešenie problému pozostáva z využitia optiky, svetla, geometrie, senzorov, konštrukcie, výpočtových prostriedkov, algoritmov a podobne. Modifikáciou jednotlivých častí ovplyvňujeme

system ako celok, čo nám môže napomôcť k jednoduchšiemu a robustnejšiemu vyriešeniu problému.

Text práce je členený do tematických celkov, v ktorých sa budeme snažiť ponúknuť chronologický výklad jednotlivých myšlienok a faktov. V kapitole Prehľad sa zameriame na problematiku 3D rekonštrukcie z nadhľadu. Budeme sa zamýšľať nad historickým vývojom chápania zaužívaného pojmu 3D. Zameriame sa na využiteľnosť 3D rekonštrukcie v mnohých sférach spoločnosti, čo poslúži ako motivácia na neustále napredovanie na poli automatickej akvizície trojrozmernej geometrie objektov. Definujeme si umiestnenie automatickej 3D rekonštrukcie medzi bežne využívanými pojmami a metódami.

V kapitole Teoretické východiská ponúkneme komplexnejší pohľad na problematiku kódovania priestoru s využitím štruktúrovaného zdroju svetla. Definujeme si problémy, s ktorými sa stretávajú jednotlivé systémy pracujúce s modulovaním toku svetla. Taktiež si predostrieme rôzne metódy zobrazenia 3D informácie.

Ďalej si zhrnieme podobné práce jednotlivých autorov publikujúcich v príbuznej oblasti, popíšeme vybrané práce, ktoré ovplyvnili riešenie problémov na systéme, ako aj práce s budúcim potenciálom pre rast efektivity a kvality nášho systému.

V kapitole Systém SMISS si potom predostrieme princípy fungovania systému, ako aj navrhnuté metódy vytvorené pre systém SMISS, i systém pohľadovo závislého stereo zobrazenia.

Neskôr v časti Implementácia sa budeme zaujímať o softvérové aj hardvérové vyhotovenie jednotlivých prototypov, kde si predostrieme aj jednotlivé špecifické poznatky získané pri práci na jednotlivých prototypoch a častiach systému.

Kapitola Výsledky a experimenty nám poslúži na prezentáciu zistených zákonitostí, jednoduchú validáciu jednotlivých metód, ako aj predstretie výsledkov, ktoré sme dosiahli počas práce na systéme. Na záver tejto kapitoly ponúkneme vizualizácie systémom nasnímaných objektov.

Ďalej potom definujeme smer budúcej práce na systéme, jeho rozšírení a využiti v budúcnosti.

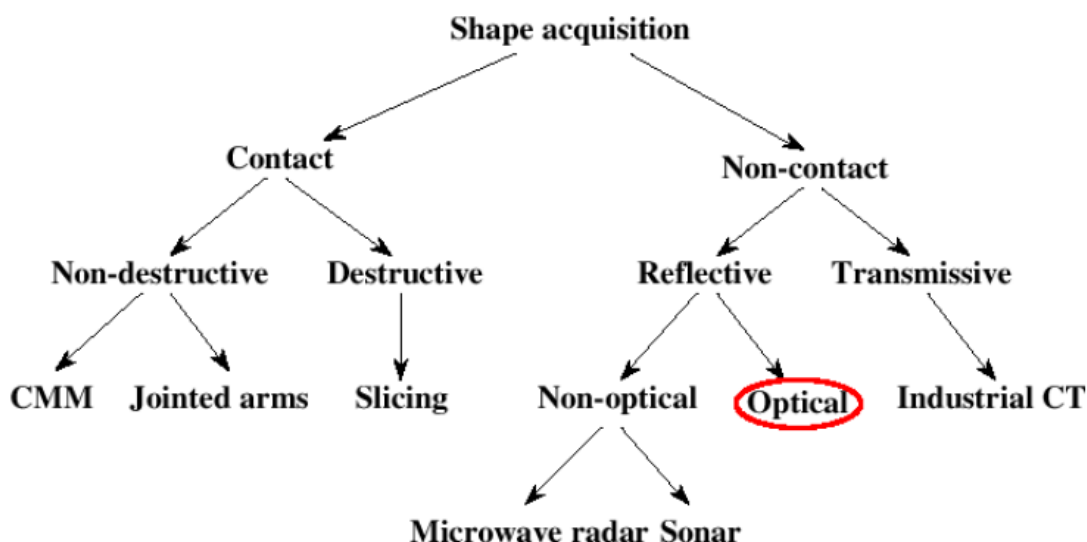
Na záver potom ponúkneme zhrnutie práce a zhodnotenie získaných poznatkov, výsledkov a smerovania autorov.

1 PREHLAD

V tejto kapitole si prednesieme prehľad na problematiku 3D skenovania z vyššej úrovne. Budeme sa zaoberať motiváciou a aplikáciami 3D rekonštrukcie ako takej, čím predostrieme aj motiváciu autorov k dokončeniu samotného projektu. V prvej podkapitole si zľahka popíšeme prehľad automatických metód pre 3D rekonštrukciu.

1.1 PREHLAD METÓD 3D REKONŠTRUKCIE

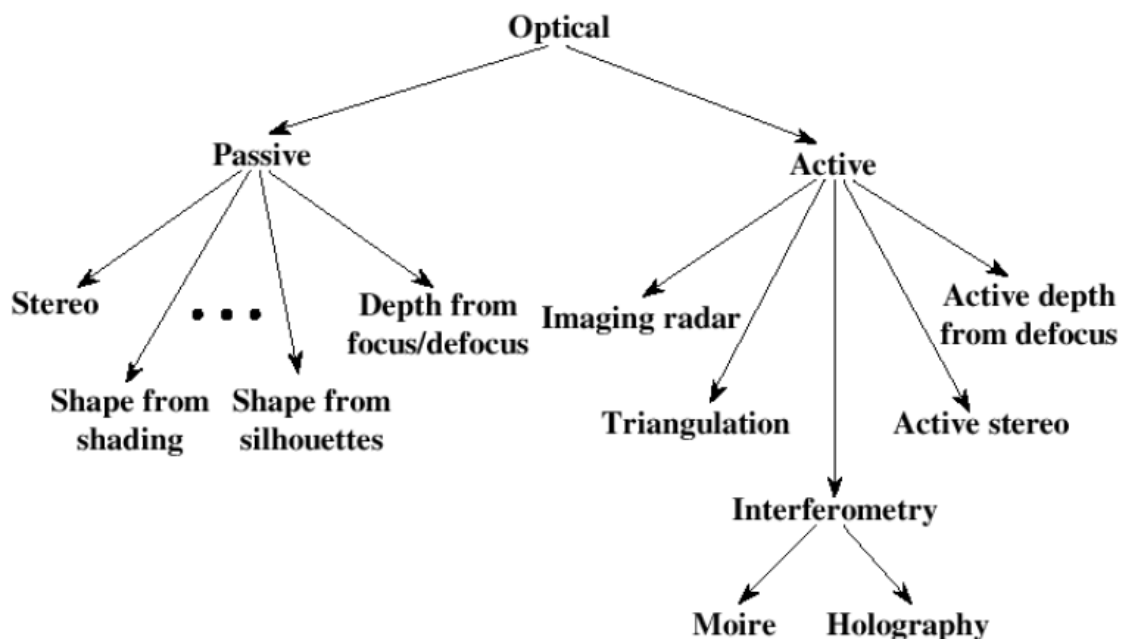
Výskumu a vývoju metód automatickej 3D rekonštrukcie sa venuje množstvo tímov a inštitúcií. Poznáme veľa postupov a metód využívajúcich pre snímanie geometrie rôzne fyzikálne zákonitosti. Mnoho metód pracuje na princípe dotyku, žiarenia, odrazivosti od povrchu, prechodom žiarenia cez povrch a následné snímanie. Poznáme metódy deštruktívne a nedeštruktívne. Pre jednoduchý prehľad ponúkame obrázok 1.



Obrázok 1: Základné rozdelenie prístupov pre automatickú rekonštrukciu

Zdroj: [4]

Pre podrobné informácie o jednotlivých metódach a postupoch ponúkame prehľad vypracovaný v bakalárskej práci SMISS [18]. V tejto práci sa nachádza aj podrobnejší prehľad optických systémov založených na využití žiarenia ktoré je modulované optikou. Zväčša sa jedná o svetelné žiarenie, alebo žiarenie v blízkosti viditeľného spektra (svetla), nakoľko v niektorých situáciách je výhodné oddeliť snímanie od ľudského vnímania. Stromový prehľad rozdelenia metód založených na optickom princípe ponúkame v obrázku 2.



Obrázok 2: Základné rozdelenie optických systémov pre automatickú rekonštrukciu

Zdroj: [4]

Ďalej si povieme niečo o abstraktnejšej motivácii pre snímanie hĺbky a taktiež rôzne aplikácie. V úvode sme si zľahka naznačili smerovanie trhu, rozmach počítačovej grafiky, herného priemyslu, ako aj digitalizáciu kultúrneho dedičstva a podobne. Teraz si povieme niečo o chronologickom vývoji chápania pojmu 3D a ďalej nazrieme na 3D rekonštrukciu ako na nástroj pre riešenie problémov, ktoré sú ťažko, alebo vôbec neriešiteľné s využitím iných dostupných senzorov a postupov.

1.2 HISTÓRIA ZAUŽÍVANÉHO POJMU 3D

V nedávnej minulosti sme sa stretali s pojmom 3D v súvislosti s počítačovou grafikou, a to s prechodom z 2D grafiky do 3D najmä v počítačových hrách, vizualizáciách, filmoch, či modelovacích nástrojoch. Takéto možnosti boli podporované postupným rastom výpočtového výkonu počítačov, ktorý umožnil rozdeliť vizualizačný priestor zobrazovacieho zariadenia a abstraktný priestor v ktorom sa nachádzali objekty. Kým v tomto abstraktnom priestore sa stretávame v mnohých aplikáciách so skutočným nárastom dimenzie, teda 3D svetom založeným na euklidovskom priestore, v rovine vizualizácie tohto priestoru sme ale často obmedzení nedostatočnými možnosťami výstupného zariadenia. Najčastejším, a pre človeka najprirodzenejším spôsobom vizualizácie je stredová projekcia daného abstraktného sveta do 2D obrazu monitora.

V súčasnosti sa stretávame s pojmom 3D najmä v ohľade na vizualizáciu. Hovorí sa o 3D monitoroch, kamerách a podobne. V drvivej väčšine sa jedná o stereoskopické zariadenia, zachytávajúce a reprodukujúce stereo vnem, teda projekciu z dvoch pohľadov. Nakoľko človek vníma hĺbku práve na princípe korešpondencie obrazov očí, stereoskopia je pre ľudské vnímanie veľmi prirodzená. Dôležitý je však fakt, že očakávaný 3D efekt sa tvorí za ľudským percepčným systémom, v ľudskom mozgu. Samotný stereo obraz teda kóduje hĺbku (tretiu dimenziu nad 2D obrazom) iba implicitne, teda nemožno hovoriť o 3D, ale skôr o dvakrát 2D.

Výsledkom 3D rekonštrukcie v našom ponímaní je meranie, ktoré explicitne kóduje všetky 3 osy euklidovského priestoru pre body na povrchu objektu. Výsledok rekonštrukcie je často mračno bodov (z angl. point cloud) euklidovského priestoru v dohodnutej metrike, avšak medzikrokom medzi snímaním a výsledným mračnom bodov býva hĺbková mapa (z angl. depth map). Hĺbková mapa je podobne ako kamerový obraz matica hodnôt, ktorej hodnoty kódujú hĺbku, teda vzdialenosť meraného bodu obrazu k senzoru (môže sa jednať o priamu, alebo aj kolmú vzdialenosť). Z tejto mapy sa potom s pomocou kalibračných hodnôt vypočíta spomínané mračno bodov. Výsledok merania je teda pohľadovo nezávislý a umožňuje nám pracovať s objektmi reálneho sveta v ich priamej abstraktnej reprezentácii v 3 dimenziách. Jedná sa teda o priame spojenie medzi reálnym 3D svetom a jeho abstraktnou virtuálnou podobou¹.

1.3 MOTIVÁCIA 3D REKONŠTRUKCIE

Znalosť geometrie sa dá využiť viacerými spôsobmi. Jednou z motivácií je priame využitie modelu pre účely počítačovej grafiky. Túto motiváciu sme si popísali už v predhovore a metódam vizualizácie sa budeme venovať v osobitnej podkapitole. Popíšeme si preto pohľad na 3D rekonštrukciu z vyššej úrovne abstrakcie.

Informácia o tvare objektu nám poskytuje robustný vstup pre rôzne aplikácie, ktorých výsledkom je riešenie špecifického problému. Môže sa jednať o orientáciu v priestore, segmentáciu, rozpoznávanie objektov a klasifikáciu, vizuálnu kontrolu, hľadanie defektov, autentifikáciu, či snímanie biometrických údajov. Aplikačná sféra využívajúca potenciál rekonštrukcie 3D povrchu je oveľa širšia ako samotné primárne

¹ Ak v texte nebude povedané inak, hovoríme o 3D rekonštrukcii povrchu. Rovnako pre jednoduchosť chápeme reálny a virtuálny 3D svet ako množinu bodov povrchu, nakoľko získať znalosť o vnútornej stavbe objektov je oveľa komplikovanejší problém.

využitie. O konkrétnejších aplikáciách si povieme v podkapitole aplikácie 3D rekonštrukcie.

V mnohých sférach výskumu sa stretáme s problémami, ktoré sa dajú klasifikovať ako ***n-rozmerné***. Tieto dimenzie môžu vychádzať z priestoru (umiestnenie, orientácia), času, vlnovej dĺžky, polarizácie a podobne. Budeme sa ďalej zaoberať najmä priestorovými rozmermi. Pre efektívne riešenie problémov ***n*** priestorových dimenzií potrebujeme senzor, ktorým sme schopní zachytiť potrebné vstupné parametre a vypočítať jednotlivé výstupné dáta.

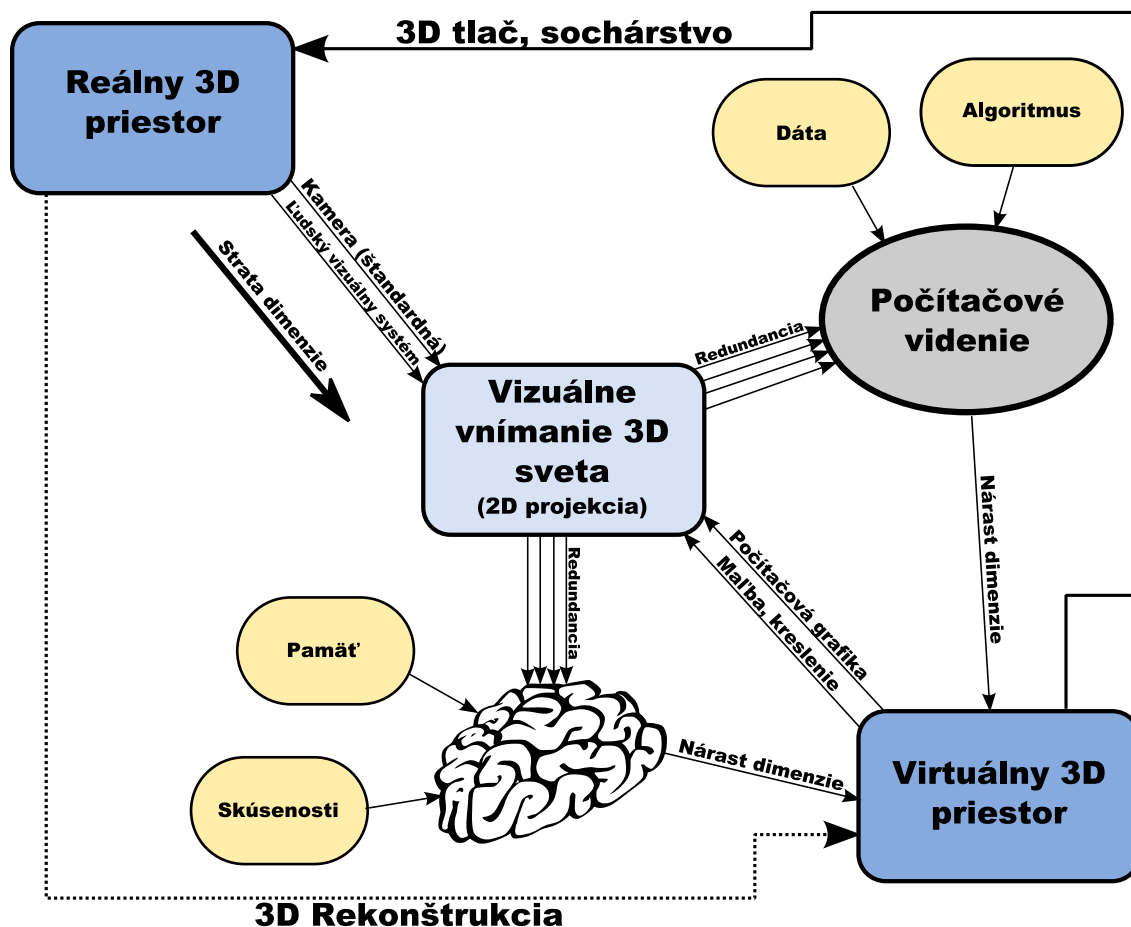
Klasickým príkladom **0-rozmerného** problému je zistenie prítomnosti dopadajúceho žiarenia (dostatočnej energie). Tento problém je efektívne riešený fotodiódou (s použitím jednoduchšej logiky), s ktorou sa denne stretávame napríklad vo výťahoch.

1-rozmerným problémom je napríklad nastavenie hlasitosti rádia pomocou otočného kolesa. Tento problém je možné riešiť napríklad potenciometrom a následným elektronickým obvodom schopným previesť meniaci sa odpor na výstupnú informáciu o hlasitosti.

Problémom s priestorovou **dimenziou 2** je napríklad rozpoznávanie písma na papieri. Jedná sa o klasický problém počítačového videnia riešený algoritmami **OCR**. Vstupom pre tieto problémy býva obrázok snímaný plošným skenerom, alebo fotoaparátom.

Väčšina problémov, s ktorými sa stretávame v bežnom živote má **3 priestorové dimenzie**. Z mnohých možno spomenúť problémy ako orientácia v priestore, uchopenie predmetov, meranie (objemu, rozmerov, vzdialeností, uhlov), snímanie pohybu a polohy, rozoznávanie objektov, inšpekcia kvality, hľadanie chýb, či samotná 3D rekonštrukcia. Na väčšinu problémov si ľudia vytvorili rôzne nástroje, aby boli schopní tieto problémy efektívne riešiť. Od vzniku počítačov sa však hľadajú metódy, ako jednotlivé problémy riešiť automaticky, strojovo. Ľudia na riešenie priestorových problémov využívajú najmä zrak (stereo), či dotyk. Syntetickým napodobením ľudského vizuálneho vnímania je počítačové videnie, ktoré je často chápané ako inverzný proces k počítačovej grafike. Ľudský vizuálny systém však, ako bolo spomenuté, sníma 2D projekciu sveta, čím 1 dimenziu stráca už pri vizuálnom snímaní. Túto potom znova dopĺňa z redundancie informácií a predchádzajúcich skúseností.

Vďaka tomu je potom schopný vyhodnocovať 3D problémy. Počítačové videnie môžeme chápať ako priame napodobenie tohto mechanizmu. Pre orientáciu ponúkame schematický obrázok 3.



Obrázok 3: Schematický popis zariadenia 3D rekonštrukcie

Ako môžeme pozorovať, pri samotnom snímaní pomocou zraku, či klasickej kamery dochádza k strate dimenzie, nakoľko oči, ako aj bežná kamera sú 2D senzory. Na riešenie mnohých 3D problémov je však potrebné získať predstavu o všetkých 3 rozmeroch, preto podobne ako pri ľudskom vnímaní, táto sa často dopočítava z redundancie vstupných informácií a externých dát pomocou špecifických algoritmov.

Táto koncepcia sa často používa pri riešení väčšiny problémov, mnoho krát sa však autori riešení stretávajú s limitáciami a obmedzenou funkčnosťou. Požadované výstupné údaje sa často vo vstupných obrazoch kamery nachádzajú len za určitých podmienok, a na ich nadobudnutie treba často veľmi komplikovaný algoritmus. Takto môže dôjsť k zníženiu robustnosti finálneho riešenia.

Ak však upustíme od simulácie ľudského vnímania, otvoria sa nám nové možnosti, ktoré nám umožňujú získať robustnejší vstup pre algoritmy, a tak v mnohom zjednodušiť výsledné spracovanie dát a vyhodnotenie. Jedným z najsilnejších a najrobustnejších vstupných dát pre priestorové problémy je samotná 3D rekonštrukcia, ktorá sníma povrch objektov. Tvar objektov je nezávislý na polohe pozorovateľa, či svetelných podmienok. Popis tvaru objektu v projekcii je veľmi komplikovaný a závislý na uhle pohľadu, avšak jeho 3D reprezentácia je často nemenná. Možno využiť topologické súvislosti, geometrickú spojitosť, krivosť, hrany, či priamo merať obsah a iné veličiny. Mnohé problémy počítačového videnia sú riešiteľné so znalosťou geometrie jednoduchými algoritmami, čo môže znamenať aj menšiu závislosť na nutných podmienkach a zvýšenie robustnosti získania informácie.

Bezdotyková 3D rekonštrukcia ako taká, je pre človeka neprirodzená. Človek nedisponuje senzormi schopnými priamej bezdotykovej akvizície 3D dát, čo je dobrým predpokladom pre zvýšenie univerza problémov, ktoré sa pomocou týchto dát dajú vyriešiť. Zovšeobecnením myšlienky využívať človeku neprirodzené prostriedky pre získavanie informácií a potrebných dát sa môžeme dostať k **výpočtovej fotografii (z angl. computational photography)**. Táto oblasť výskumu je pomerne mladá a rýchlo sa rozvíjajúca, medzi priekopníkov v tejto oblasti možno menovať mená ako Ramesh Raskar, Shree K. Nayar, Jack Tumblin, Marc Levoy a iný.

Mnohé problémy však vo svojej podstate prevyšujú možnosti 3D rekonštrukcie. Môžeme spomenúť napríklad snímanie 4D light field, alebo 6D SVBRDF a mnoho iných. Teda naša motivácia nekončí pri 3D rekonštrukciách, ale je potrebné neustále posúvať hranice možností.

1.4 APLIKÁCIE 3D REKONŠTRUKCIE

V tejto podkapitole si rozoberieme niekoľko aplikácií 3D rekonštrukcie. Tieto príklady môžu byť chápané ako motivácia pre rozvoj tejto oblasti. Našu víziu postupu výskumu v tejto oblasti si rozoberieme v kapitole venovanej budúcej práci.

Pre jednoduchosť rozdelíme aplikácie podľa toho, či je cieľom získanie 3D modelu, alebo je 3D rekonštrukcia iba medzikrokom pre riešenie konkrétneho, alebo všeobecnejšieho problému.

1.4.1 Priame aplikácie

Pokiaľ je 3D rekonštrukcia dostatočne kvalitná, je možné použiť výsledný model v rôznej škále aplikácií pre počítačovú grafiku. Modely sa dajú použiť vo vizualizáciách, počítačových hrách či filmoch. Rovnako možno použiť nasnímané dáta v reklame, do ktorej môže byť interaktívne vložený predmet z reálneho sveta. Pre kvalitnú foto-realistickú vizualizáciu je však potrebné nasnímať objekt celý, spolu s materiálovými vlastnosťami, ktoré sú potrebné pre hodnoverné vykreslenie. Týmto vecami sa budeme zaoberať v kapitole výsledky a experimenty a v budúcej práci.

Výhodou 3D rekonštrukcie oproti zachytávaniu sterea je možnosť vizualizovať objekt z ľubovoľného bodu, čo umožňuje využívať modely pre interaktívne účely, ako napríklad aj pre pohľadovo závislé stereo (z angl. view dependent stereo), o ktorom si povieme neskôr.

Okrem počítačových hier a filmového priemyslu je možné využiť 3D skenovanie pre potreby 3D tlače, čo nám umožňuje získať paralelu kopírovania pre 3D. Rovnako je možné nasnímať a zdigitalizovať kultúrne dedičstvo, ktoré sa tak stane prístupné širokej verejnosti. Ďalšou aplikáciou je archeológia, kde je možné zdokumentovať a nasnímať náleziská, pre prípadnú analýzu po jeho znehodnotení. Podobne sa dá využiť 3D snímanie v kriminalistike pre dokumentáciu miesta činu a jednotlivých dôkazov. Antropológia môže využiť detailné modely pre hľadanie rýh a deformácií kostí, rovnako pre distribúciu dát cez internet k odborníkom z iných inštitúcií. Rekonštrukcie sa taktiež využívajú pre reverzné inžinierstvo, pre reprodukciu a následné zdokonalenie existujúceho riešenia. Dôležité vyžitie tejto technológií nachádzame aj v medicíne, kde si plastický chirurg môže pripraviť operáciu na virtuálnej podobizni, a predstaviť klientovi finálny stav.

Fotografia sa stala v súčasnosti dôležitým médiom, v ktorom dokážeme zachytiť emócie, spomienky, dokumenty, či umelecké výtvary. Otázka znie, kam možno fotografiu posunúť, a práve možnosť pridať novú dimenziu môže otvoriť cestu mnohým ďalším aplikáciám a využitiam.

1.4.2 Nepriame aplikácie

Ako už bolo spomínané, 3D rekonštrukciu možno použiť v rôznej škále aplikácií, ktorá môže využiť znalosť tvaru objektu. Množstvo problémov vyžaduje vysoko kvalitnú rekonštrukciu (najmä priemyselné aplikácie). Naopak, mnoho aplikácií

vyžaduje vysokú rýchlosť a takt získavania 3D mapy, pričom postačuje priemerná kvalita hĺbkovej informácie. Takéto vlastnosti dosahujú napríklad senzory na princípe TOF, alebo populárny senzor Microsoft Kinect, ktorý využíva hĺbkovú informáciu na sledovanie pohybu používateľa.

Presné 3D meranie sa využíva napríklad tam, kde je potrebné vytvoriť súčiastku, ktorá bude s meraným objektom dokonale kompatibilná. Toto je potrebné mimo iného aj v rôznych rekonštrukciách, ale aj pre vytvorenie anatomicky presných náhrad končatín a kĺbov, či vytvorenia vybavenia, ktoré sa prispôsobí telu nositeľa.

V priemysle sa využíva 3D rekonštrukcia pomocou laserovej čiary ako štandard pre vysokokvalitnú inšpekciu kvality. Vo výsledných dátach sa potom zisťuje, či sedia rozmery s receptom. Hľadájú sa nezrovnalosti, chyby, ryhy, zisťuje sa rovinnosť. Presnosti potrebné pri takýchto inšpekciách sa často pohybujú na úrovni desiatok mikrometrov. Rovnako sa 3D dáta používajú pre klasifikáciu objektov, nakoľko sú invariantné na polohu pozorovateľa.

Rekonštrukciu možno využiť aj v bezpečnostných systémoch, monitorovanie priestorov pomocou 3D snímačov môže jednoducho odhaliť a lokalizovať ľubovoľný pohyb. Rovnako možno snímať biometrické údaje z rôznych častí tela pre autentifikáciu.

Ďalšie uplatnenie možno nájsť v snímaní pohybu¹ (z angl. motion capture) a polohy objektov v priestore, prípadne pre orientáciu autonómnych systémov. Umožňuje nám pomocou robotických ramien správne uchopiť objekty a bezpečne ich prepraviť na požadované miesto.

Zaujímavé využitie tkvie v zistení polohy užívateľa vzhľadom na okolitý svet. Táto registrácia sa dá potom použiť pre aplikácie zmiešanej reality nevyužívajúcej špecifické značky (z angl. markerless augmented reality). Taktiež možno v hĺbkovej mape ľahko segmentovať objekty od pozadia, čo taktiež môže napomôcť lepšiemu pochopeniu vzťahov a súvislostí medzi objektmi.

Systémy pre automatickú rekonštrukciu môžu byť uplatnené takmer v akomkoľvek odvetví a priemysle. Ich dopad na zvýšenie efektivity práce, bezpečnosti a kvality života môže byť nepredstaviteľný. Systém Kinect okrem iného ukázal, že

¹ Možno analyzovať pohyb pre potreby interakcie, rozpoznávanie gest, teda ako možný počítačový vstup. Rovnako je možné snímať pohyb pre potreby prenosu pohybu na virtuálneho avatara.

technológia môže byť absolútne transparentná, cez to všetko použiteľná na splnenie veľkého množstva úloh.

2 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ

V tejto kapitole si popíšeme niektoré teoretické východiská, ktorých znalosť bude potrebná na správne porozumenie fungovania systému SMISS a jeho rozšírenia, systému HDR SMISS. Nakoľko práca vychádza a rozširuje bakalársku prácu SMISS, základné pojmy, ktoré boli v danej práci dostatočne vysvetlené nebudeme uvádzať. Uvedieme preto nové pojmy a potrebné vzťahy. Rovnako sa detailnejšie pozrieme na kľúčové prvky systému, ktoré boli rozobraté aj v predchádzajúcej práci.

Pre pochopenie modelu štrbinovej komory, skreslenia šošovky, kalibrácie a epipolárnej geometrie odporúčame kapitolu teoretické východiská práce [18].

V nasledujúcich podkapitolách si povieme niečo viac o osvetlení a inter-reflexiách, a o vzorových obrazcoch. Tieto podkapitoly budú rozširovať poznatky, ktoré boli uvedené v predchádzajúcej práci.

2.1 OSVETLENIE

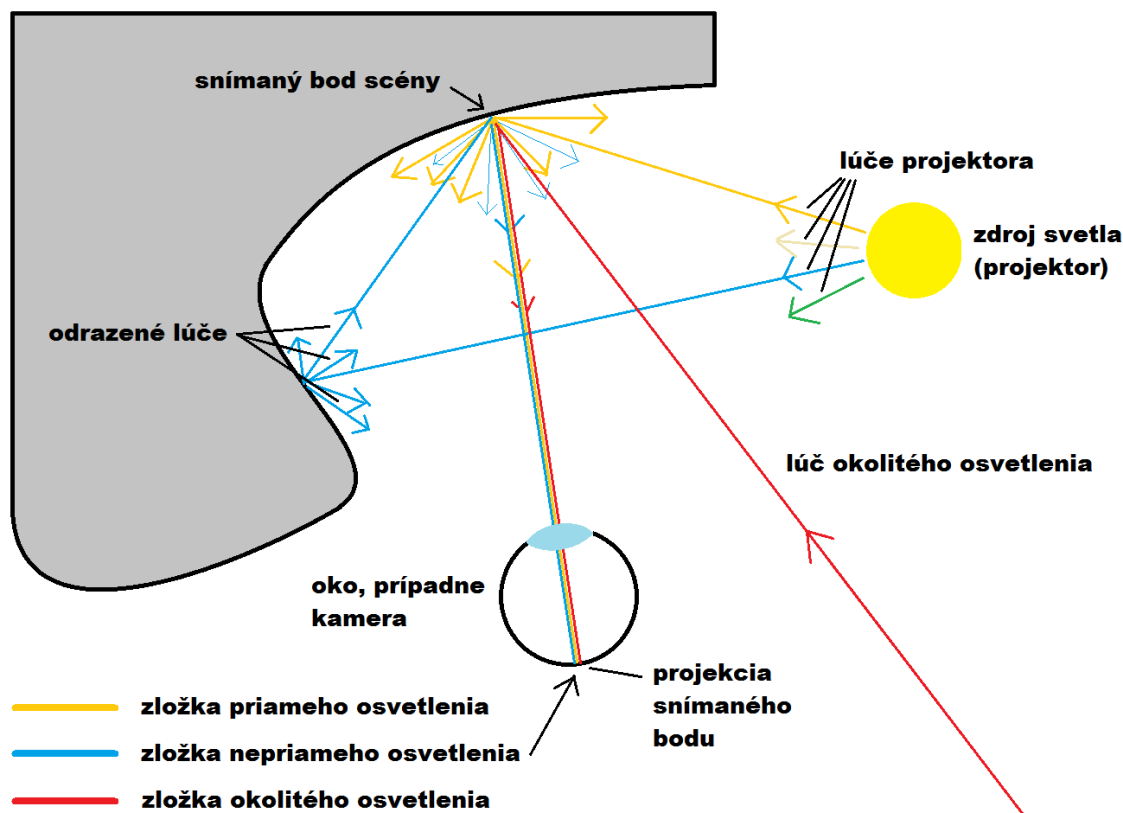
2.1.1 Zdroje svetla

Systém SMISS pracuje na báze kódovania priestoru pomocou modulovaného svetelného zdroja. Na tento účel používa digitálny projektor. Na správne a korektné fungovanie systému je potrebné vysielanú modulovanú informáciu správne dekodovať. Kamera sníma odrazené modulované žiarenie, ktoré sa však po scéne odráža a spôsobuje mimo signálu aj šum. Šumovú informáciu taktiež spôsobujú iné zdroje svetla nachádzajúce sa v priestore. Ponúkame schematický obrázok 4.

Snímajúci senzor kamery je rozdelený na jednotlivé pixle. Tieto zbierajú fotóny z určitej časti scény. V závislosti od nastavení optiky sa dá pre každý obrazový bod určiť časť povrchu objektu, spolu s váhovou distribúciou, z ktorej daný bod akumuluje svetelnú energiu. Teda jednotlivé fotóny dopadajúce na danú časť povrchu môžu byť odrazené smerom k senzoru a vyvolať uvoľnenie elektrónu. Počet elektrónov pri čítaní informácie určuje podľa špecifickej funkcie hodnotu energie dopadnutých fotónov. Ak daný povrch nie je zatienený, projektor ho priamo osvetľuje projekciou množiny svojich pixlov¹. Tieto modulujú dopadajúce žiarenie svojou intenzitou. Priame odrazené lúče do

¹ V praxi sa využívajú kamery s vyšším rozlíšením, ako je rozlíšenie projektoru, preto štatisticky s najväčšou pravdepodobnosťou daný povrch osvetľuje len malá množina blízkych bodov.

senzora nesú informáciu, ktorú je nutné dekodovať. Tieto lúče tvoria zložku priameho osvetlenia, a sú nositeľom signálu.



Obrázok 4: Schéma osvetlenia bodu jednotlivými zložkami svetla

Fotóny dopadajúce priamo na povrch sa však odrážajú a vytvárajú na ostatných častiach povrchu objektu systematický šum, ktorý je závislý na projektovanej informácii. Zložku zodpovedajúcu spomínanému šumu budeme nazývať nepriame osvetlenie¹.

V systéme sa môžu mimo projektora nachádzať aj iné zdroje svetelného žiarenia, ktoré taktiež spôsobujú šum na senzore. Danú zložku nazývame okolité osvetlenie. Dá sa predpokladať, že počas krátkého časového úseku, počas ktorého trvá snímanie, ostáva táto zložka nemenná². Teda je jej dopad spravidla možné anulovať pomocou nasnímania scény pod osvetlením iba okolitého osvetlenia. Táto informácia sa potom

¹ Nepriame osvetlenie je teda spôsobené lúčmi projektora, ktoré incidujú s niektorým objektom v scéne, a po aspoň 2 odrazoch dopadajú na senzor. Toto môže byť spôsobené odrazmi, ale aj prechodmi fotónov cez rôzne materiály, ako aj rozptylom lúča vnútri objektu (z angl. subsurface scattering).

² Syntetické zdroje svetla napájané striedavým prúdom môžu mať energiu vyžarovania modulovanú sinusom. Preto je vhodné mať expozíciu kamery v násobkoch dĺžky trvania jednej pol periódy funkcie. Pre 50Hz elektrický rozvod je teda vhodné mať expozíciu v násobkoch 10 ms (polovica periódy, na smere toku prúdu nezáleží). Energia vychádzajúca z daného zdroju je potom za daný čas konštantná (pre naše potreby).

odpočíta od ostatných nasnímaných záberov kamery. V bežnom prípade je však sila okolitého osvetlenia zanedbateľná oproti sile žiarenia projektora.

Obraz nasnímaný kamerou sa dá formálne zapísať ako súčet spomínaných zložiek žiarenia dopadajúceho na senzor¹. Dopad zložky okolitého osvetlenia sa dá takmer úplne potlačiť, avšak dopad nepriameho osvetlenia vytvára šum, ktorý je závislý na projektovanej informácii. Na separáciu zložky priameho a nepriameho osvetlenia v systéme využívame metódu z článku [23], ktorá je popísaná aj v bakalárskej práci. Túto separáciu však používame iba pre detegovanie osvetlených povrchov a povrchov ktorých príspevok nepriameho osvetlenia je výraznejší ako príspevok priameho².

Dopad šumu vznikajúceho zo zložky nepriameho osvetlenia budeme popisovať v nasledujúcej podkapitole. Pre viac informácií odporúčame však článok [8].

2.1.2 Kódovanie priestoru

Vyhodnocovanie 3D pozícií jednotlivých bodov meraných systémom SMISS je založené na triangulácii. Poloha ohnisk kamery a projektora je známa z kalibrácie. Na určenie polohy 3-tieho bodu trojuholníka v priestore³ je potrebné určenie vnútorných uhlov trojuholníka, ako aj uhol rotácie trojuholníka triangulácie okolo priamky definovanej spojnicami ohniskových bodov zariadení. Uhol rotácie epipolárnej roviny, ako aj jeden z vnútorných uhlov triangulácie, sú presne dané polohou bodu v obraze kamery. Na správnu určenie pozície bodu je teda potrebné poznať umiestnenie projekcie bodu do obrazu projektora. Nakoľko projekcia daného bodu leží na epipolárnej čiare, stačí nám poznať horizontálnu⁴ súradnicu projekcie daného bodu v obraze projektora.

Až do tejto situácie je princíp identický so štandardným prístupom rekonštrukcie pomocou páru kamier, kde sa hľadá poloha projekcie na epipolárnej čiare v obraze druhej kamery. Nakoľko projektor sa dá chápať ako inverzný model kamery, budeme postupovať opačne. Budeme pomocou projektora vysielat' špecifické kódované obrazy.

¹ Problém vzniká, keď jednotlivé pixle kamery saturujú, teda hodnota odozvy v danom bode nezodpovedá súčtu jednotlivých zložiek. Dopad takejto straty informácií bude preberaný v podkapitole kódovanie priestoru.

² Metóda totiž vyžaduje získanie obrazu scény pod množinou špecifických vysokofrekvenčných vzorov (projektovaných obrazov), ktoré sú priamo odvodené od konkrétneho projektovaného obrazu. Ak by sme metódu aplikovali pre každý projektovaný obraz, dĺžka snímania by sa niekoľkonásobne zvýšila.

³ Pre jedno meranie z výsledného mračna bodov.

⁴ Zariadenia sú umiestnené tak, že priesečky jednotlivých epipolárnych rovín sú blízke horizontálnym čiarom v obrazoch kamery a projektora. Toto nemusí byť podmienka pre správne fungovanie princípu, slúži iba pre jednoduchšie porozumenie.

Tieto budú charakterizované 1D funkciou, ktorá bude v horizontálnom smere udávať šedo-tónovú intenzitu¹ vysielaného obrazu. V smere vertikálnom sú obrazy konštantné. Princípom je teda kódovanie horizontálnej osi obrazu projektora pomocou toku svetla. Ľubovoľný bod kamerového obrazu je projekciou časti scény. Projekciou tejto oblasti scény do projektorového obrazu dostávame množinu vertikálnych pruhov projektora, ktoré danú časť scény osvetľujú².

Princíp je založený na projektovaní množiny takýchto kódovaných obrazov, ktoré jednoznačne kódujú jednotlivé vertikálne pruhy projektora (vzhľadom na obmedzené rozlíšenie, môžeme posielat' unikátne kódy iba na pixlovej úrovni). Pre jednotlivé body (pixle) kamerového obrazu sa budeme snažiť analyzovať a dekódovať informáciu zakódovanú v pruhoch ktoré daný bod osvetľujú. Z dekódovanej informácie potom určíme o ktoré pruhy³ sa jedná, čo nám určí korešpondenciu s obrazovým priestorom projektora, na základe ktorej vypočítame pozíciu bodu projekcie.

V nasledujúcich podkapitolách si popíšeme dve najpoužívanjšie kódovania obrazového priestoru projektora. Správne kódovanie má výrazný vplyv na správanie sa algoritmov a kvalitu rekonštrukcie. Rovnako má veľký vplyv na robustnosť merania a typ chyby, ku ktorej sa v meraní dopúšťame. Rôzne typy kódovania taktiež rôzne reagujú na šum, ktorý sme si popísali v predchádzajúcej podkapitole.

Grayove zrkadlové kódovanie

Jeden z možných princípov ako kódovať obrazový priestor projektora je využitím binárneho kódovania. Jednotlivé vertikálne⁴ pruhy projektora sú kódované binárnym vektorom (na pixel úrovni). Ak má projektor n vertikálnych pruhov, dajú sa očíslovať $0 \dots (n - 1)$. Teda, na binárne zakódovanie čísla pruhu potrebujeme $\lceil \log_2 n \rceil$ bitov. To znamená, že potrebujeme minimálne $\lceil \log_2 n \rceil$ kódovaných obrazov. V obraze projektora budeme pre jednotlivé pruhy používať buď plnú energiu, alebo minimálnu.

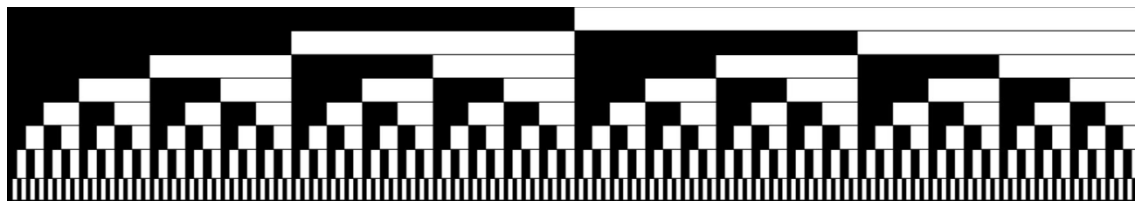
¹ Kontrolujeme tak množstvo svetelnej energie vyslanej na určité miesto.

² Uvažujme danú množinu bez ohľadu na rozlíšenie digitálneho projektora. Daná množina sa teda dá chápať ako množina intervalov na reálnej osi (Nespojitosť množiny môže byť spôsobená nespojitosťou geometrie objektu).

³ V praxi sa jedná väčšinou o jeden pruh projektora hrúbky jeden pixel. Nakoľko však pixle kamery nie sú dokonale malé, projekcia pixla do scény môže byť osvetlená viacerými pruhmi naraz (môže spôsobiť chybu merania).

⁴ Uvádzame vertikálne pruhové vzory iba pre jednoduchosť. Pruhové kódované obrazy môžu byť zložené z čiar rôznych tvarov (Je potrebná monotónnosť vzhľadom na jednu z osí kvôli unikátnosti prieniku epipolárnych čiar s pruhmi). Z praktického hľadiska sa ale využívajú vertikálne alebo horizontálne pruhy.

Teda pre obraz i bude každý pruh daného obrazu kódovať i – ty bit svojho čísla¹. Pre pochopenie uvádzame obrázok číslo 5, ktorý znázorňuje 8 kódovaných obrazov pre 256 pruhov projektora.



Obrázok 5: Schematická ukážka 8 vertikálnych binárnych kódovaných obrazov. Zdroj: [19]

Dané kódovanie teda rozdelí priestor na zóny osvetlené jednotlivými pruhmi projektora. Každý pixel kamery zbiera svetelnú energiu z určitej plochy scény². Ak je táto plocha osvetlená práve jedným pruhom projektora, dochádza k ideálnemu stavu. Odozva daného pixla je tak súčtom hodnoty priameho odrazu signálu projektora (kódujúceho 1 bit informácie) a šumom spôsobeným globálnym osvetlením³. Pokiaľ pre daný pixel chápeme P ako projektovaný bit projektora (0 alebo 1). Potom nech prienik⁴ plochy objektu zodpovedajúcej kamerovému pixlu s plochou objektu zodpovedajúcou pruhu projektora ktorý danú plochu osvetľuje je S . Nech odozva kamery spôsobená priamym odrazom energie projektora dopadajúcej na S pri plnej svetlosti projektora (akoby vysielal kódovanie pre bit 1) je malé s . Ďalej nech G je odozva spôsobená prínosom globálneho osvetlenia a N je akýkoľvek iný šum a šum senzora. Prínos okolitého osvetlenia vo vzťahu uvádzať nebudeme, nakoľko je možné ho efektívne anulovať. Nameranú odozvu, vzhľadom na aditívnu povahu svetla teda môžeme vyjadriť ako

$$\text{odozva} = P * s + G + N$$

V očakávanom prípade je hodnota $s \gg G + N$, teda odozva kamery pre daný bod je výrazne ovplyvnená projektovanou informáciou P , čo zabezpečuje dostatočný odstup signálu od šumu a bezpečné dekódovanie projektovanej informácie.

¹ 1 budeme kódovať plnou energiou, 0 budeme kódovať minimálnou energiou projektora (v 8 bitovom obraze 255 alebo 0).

² V prípade že projekcia daného pixla nemá prienik so žiadnou geometriou (smeruje do nekonečna), nebude sa vyhodnocovať.

³ Vplyv šumu spôsobeného spomínaným globálnym osvetlením si popíšeme neskôr.

⁴ Úvaha platí pre zaostrenú kameru a projektor. Ale daná abstrakcia je korektná aj pre všeobecný prípad, kde rozostrenie projektora má podobné efekt ako rozptyl svetla v štruktúre objektu, čo je jedným z efektov globálneho osvetlenia.

V prípade, že daný bod je osvetlený 2 pruhmi, pixel kamery integruje svoju hodnotu z oboch pruhov súčasne. Odozvu nameranú na pixle kamery teda môžeme vyjadriť ako

$$odozva = P_1 * s_1 + P_2 * s_2 + G + N$$

Ak platí $s_1 \gg s_2$ alebo $s_2 \gg s_1$, signifikantný vplyv na odozvu má jeden z pruhov, čo v praxi znamená že projekcia daného pruhu zaberá väčšinu pixla kamery. V tomto prípade máme stále dostatočný odstup signálu od šumu a výsledný binárny vektor bude dekódovaný podľa signifikantnejšieho pruhu projektora¹.

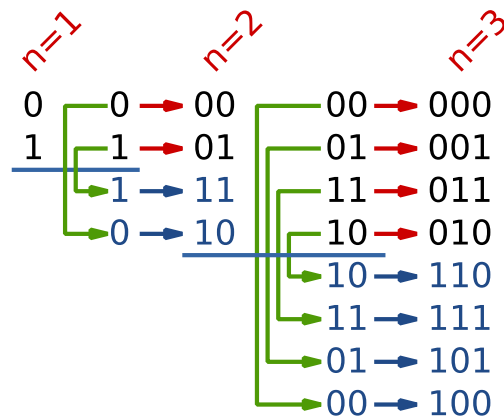
Problém nastane, ak $s_1 \sim s_2$. V tomto prípade nie je bezpečne možné odlišiť dominantný signál, čo môže mať za následok, že výsledný zrekonštruovaný vektor nebude odpovedať vektoru ani jedného z pruhov². Táto nejednoznačnosť rozhodovania nastáva ak pruh P_1 a P_2 majú v danej bitovej hĺbke rôznu hodnotu, teda medzi pruhmi je ostrá hrana prechodu v obrazovej funkcii. Pokiaľ je plocha projekcie kamerového pixla nespojitá, pruhy P_1 a P_2 nemusia byť susedné³. Vo väčšine prípadov je však povrch na tejto úrovni spojitý a dochádza k osvetleniu danej plochy dvoma susednými pruhmi projektora. Ako sme mohli vidieť na obrázku 5, k tejto situácii môže dochádzať často.

Vzhľadom na tento fakt je chybovosť pri využití binárneho kódovania vyššia, a spôsobená chyba má za následok aj vysokú geometrickú chybu. Pre odstránenie toho nedostatku si môžeme pomôcť teóriou kódovania a využiť kód, ktorý minimalizuje počet ostrých prechodov medzi susednými pruhmi. Optimálne kódovanie, ktoré spĺňa túto vlastnosť je Grayovo zrkadlové kódovanie. Pre toto kódovanie platí, že bitový zápis po sebe idúcich indexov sa líši práve v jednom bite. To znamená, že každé dva susedné pruhy projektora budú mať rôznu intenzitu práve v jednom obraze. Ukážku princípu tvorby Grayovho zrkadlového kódu ponúkame na obrázku 6. Výsledný schematický obrázok ôsmich vertikálnych pruhových obrazov ponúkame na obrázku 7.

¹ Dôjde len k malej geometrickej chybe pod úrovňou veľkosti projekcie pixla projektora v danej oblasti. Nemožnosť vyhodnotiť pod-pixlovú polohu v rámci jednotlivých pruhov projektora je zapríčinená digitálnou povahou kódovanej informácie s pevným vzorkovaním.

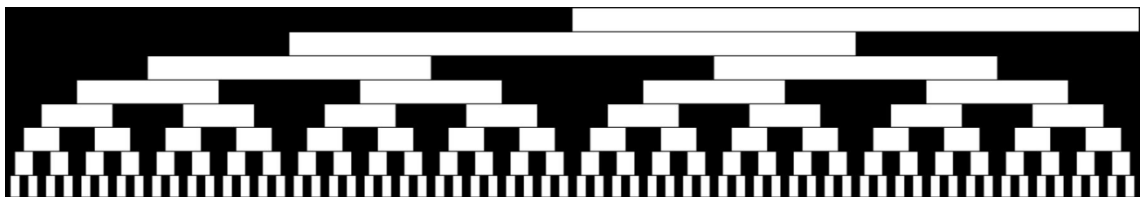
² V tomto prípade môže prísť aj k veľmi vysokej geometrickej chybe, najmä ak chyba nastala pri dominantných bitoch binárneho zápisu.

³ V tomto prípade danému kamerovému bodu zodpovedá viac hĺbkových hodnôt. Ak však výsledný zrekonštruovaný binárny vektor je zmiešaním vektorov jednotlivých pruhov, tak geometrické umiestnenie bodu bude nekorektné. Takýto bod je potom možné odfiltrovať z finálneho mračna bodov.



Obrázok 6: Ukážka 1, 2 a 3 bitových Grayových zrkadlových kódov. Zdroj: [38]

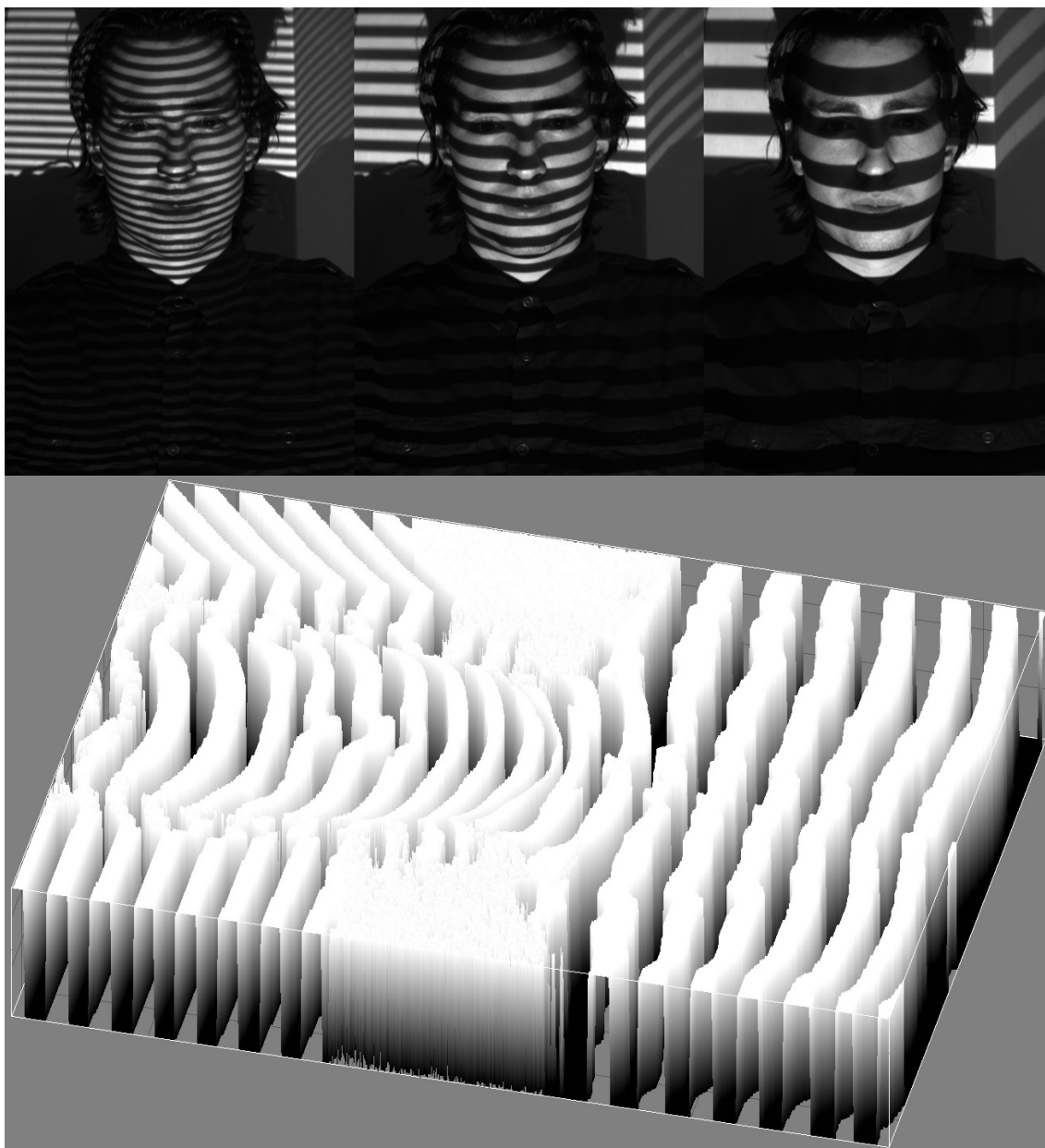
Vyššie rozoberaný prípad teda môže pre spojitú plochu zodpovedajúcu jednému pixlu kamery vzniknúť práve v prípade rozdielnosti susedných bitov daných pruhov. V tomto prípade však chyba rozhodnutia môže spôsobiť iba malú geometrickú chybu pod úrovňou veľkosti projekcie pixla projektora v danej oblasti.



Obrázok 7: Schematická ukážka 8 vertikálnych Grayových zrkadlových kódovaných obrazov. Zdroj: [19]

Ak sa na odozve pixla kamery priamo podieľajú viac ako 2 pruhy projektora, výsledná zrekonštruovaná hodnota môže byť taktiež chybná. Väčšinou však dochádza k prípadu, keď je chyba spôsobená na menej významných bitoch, nakoľko práve tu je signál vysokofrekvenčný. V takomto prípade však výsledok dekódovania leží v blízkosti alebo je priamo jedným z pruhov osvetľujúcich daný pixel. Nakoľko daná situácia môže vzniknúť najmä s vysokým uhlom medzi normálou povrchu a spojnicou s ohniskom kamery. V tomto prípade je výsledok dekódovania korektný.

Ponúkame obrázok 8 pre pochopenie aplikácie kódovania v praxi.



Obrázok 8: Tvár osvetlená 3 Grayovými obrazmi (Hore). Výsledok dekódovania stredného z nich (Dole)

Tento typ kódovania sa dá považovať za digitálny. Jeho výhodou je spravidla vysoký odstup signálu od šumu a skutočnosť, že z každého merania sa potrebujeme rozhodnúť iba medzi dvomi možnosťami. Ak sme v rozhodnutí neurobili chybu, nedochádza k žiadnej chybe spôsobenej prenosom dát. Vo výsledku to znamená vysoko robustné meranie. Podobne ako pri digitálnom prenose dát v sieťach je toto kódovanie pomerne nenáchylné na šum, ako napríklad šum kamery, projektora, či šum spôsobený globálnym osvetlením¹. Kým hodnota šumu nepresiahne medznú hodnotu, nespôsobí

¹ Pri niektorých, najmä lesklých povrchoch môže byť odozva kamery so svetelného žiarenia prichádzajúceho z okolitých objektov scény výraznejšia ako hodnota priameho odrazu. V takomto prípade bod vynechávame z rekonštrukcie.

žiadnu chybu merania. Kódovanie si dokáže poradiť aj s jemne rozostreným obrazom projektora¹. Toto má za následok zjemnenie hranice medzi pruhmi s rôznou projektovanou informáciou, čo spôsobuje zníženie odstupu signálu od šumu a zvyšuje pravdepodobnosť chyby. Ak sa na dekódovanie používa porovnávanie s negovaným signálom, tak prienik medzi pruhmi môže byť stále zrekonštruovaný s vysokou presnosťou. Vyššie rozostrenie však spravidla znamená nemožnosť korektne dekódovať informáciu z nižších bitov, čím sa spôsobuje geometrická chyba, ktorej veľkosť je závislá na rozsahu rozostrenia (vychádzajúceho z PSF pre optiku a clonu projektora. PSF má väčšinou charakter gausovského rozostrenia, ktorého štandardná odchýlka je závislá na vzdialenosti od roviny ostrosti, tak ako aj spomínaná geometrická chyba merania).

Výsledná vypočítaná súradnica bodu povrchu je zaťažená chybou, ktorá vzniká nenulovou veľkosťou pixlu kamery a projektora. Výsledný bod povrchu sa teda nachádza v objeme ktorý je daný prienikom objemu projekcie pixla s objemom projekcie dekódovaného pruhu. Touto technikou sa teda môžeme dostať iba na pixlovú presnosť výstupu a nedokážeme korektne odmerať zmeny geometrie nachádzajúce sa pod veľkosťou projekcie pixla oboch zariadení².

Presnosť merania teda rastie so zvýšením rozlíšenia oboch zariadení. Počet nameraných bodov je priamo úmerný rozlíšeniu kamery. Výhodou ostáva fakt, že dĺžka akvizície hĺbkovej mapy je závislá iba na rozlíšení projektora, a to v logaritmickej závislosti vzhľadom na jednu súradnicovú os.

2.1.2.1 Kódovanie založené na fázovom posune

Kódovanie priestoru uvedené v predchádzajúcej podkapitole bolo založené na digitálnom prístupe ku kódovaniu informácie. V tejto podkapitole si popíšeme kódovanie, ktoré je naopak analógové, čo nám prinesie možnosť získať podpixelovú presnosť a zvýšiť dátový prietok, avšak za cenu zníženia robustnosti merania. Výsledné kódovanie bude rovnako viac náchylné na šum senzora a šum spôsobený globálnym osvetlením. Výhodou však bude zníženie dopadu rozostrenia projektora na kvalitu

¹ Nakoľko obraz projektora je veľmi intenzívny, je možné uzavrieť clonu kamery do takej miery, že jej hĺbka ostrosti pokrýva celú scénu. Preto sa rozostrením kamery nebudeme zaoberať.

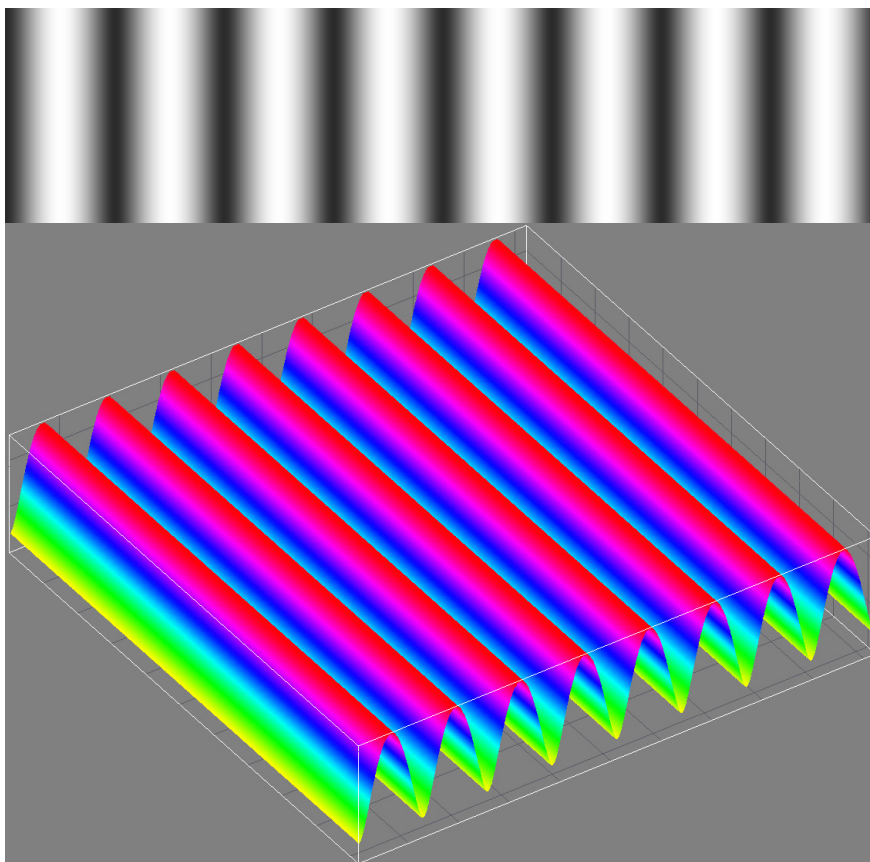
² Vzhľadom na projektívny charakter oboch zariadení je teda presnosť rekonštrukcie závislá na polohe zrekonštruovaného bodu, nakoľko objem prieniku projekcií pixlov jednotlivých zariadení sa líši.

výstupu. Charakter chyby spôsobenej jednotlivými typmi šumu v našom systéme si popíšeme na záver podkapitoly.

Kódovanie založené na fázovom posune využíva na kódovanie priestoru spojitú periodickú funkciu. Väčšinou sa jedná o funkciu sínus. Jednotlivé kódované obrazy budeme vytvárať tiež ako vertikálne pruhové obrazy, kde pre určenie hodnoty pruhu použijeme hodnotu funkcie sínus s určitou periódou. Uvažujme, že chceme vytvoriť kódovaný obraz projektora $P(x, y)$ s funkčnými hodnotami z intervalu $\langle 0,1 \rangle$ určujúcimi energiu vyžarovania pre jednotlivé pruhy projektora indexované hodnotami x a y z intervalu $\langle 0,1 \rangle$.

$$P(x, y) = \frac{\sin(2\pi x r + 2\pi s) + 1}{2} (max - min) + min$$

Daný predpis nám dáva možnosť vytvoriť vertikálny pruhový sínusový obraz s hodnotami z intervalu $\langle min, max \rangle$. Pričom r je počet periód funkcie v obraze a parameter s udáva posunutie začiatku funkcie. Ukážku vygenerovaného obrazu ponúkame na obrázku 9.

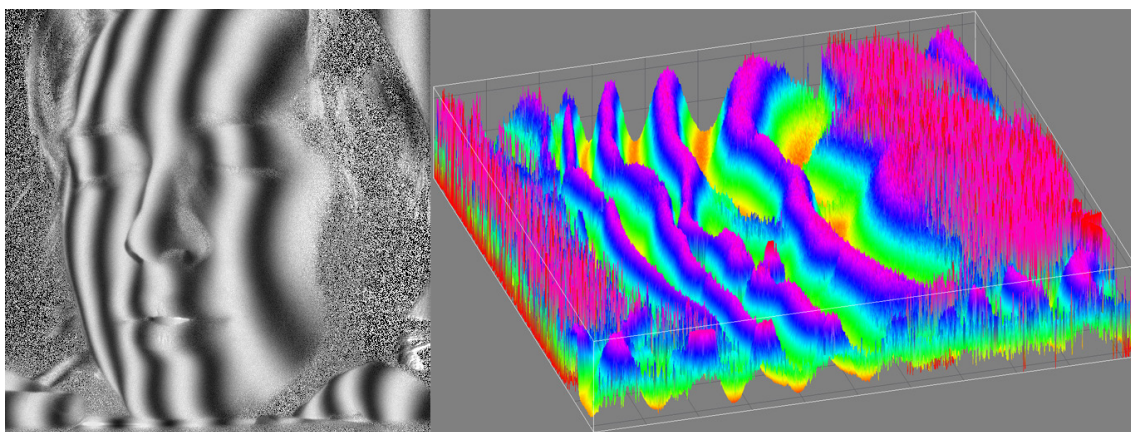


Obrázok 9: Ukážka kódovania založeného na fázovom posune

Na dekódovanie pozície pruhu projektora, ktorý osvetľuje plošku zodpovedajúcu jednotlivému kamerovému pixlu sa budeme snažiť získať hodnotu funkcie sínus, ktorá kodovala daný pruh. Na získanie tejto informácie budeme potrebovať pre kameru aj obraz pod maximálnym osvetlením projektora. Nech $I(x,y)$ je obraz scény pod osvetlením sínusovým vzorom. Potom nech $W(x,y)$ je obraz scény pod osvetlením plným výkonom projektora. Pre zrekonštruovanie sínusu použijeme vzťah

$$\sin = \frac{2 \left(\frac{I(x,y)}{W(x,y)} - \min \right)}{\max - \min} - 1$$

Obrázok kamery vzniknutý po aplikovaní vzťahu možno vidieť na obrázku 10.



Obrázok 10: Zrekonštruované hodnoty funkcie sínus

Z výsledného sínusu potom pomocou inverznej funkcie získame fázu¹. Na vypočítanie súradnice x ešte potrebujeme vedieť v ktorej pol-perióde sa nachádzame². Na získanie spomínaného je možné využiť viacero sínusových obrazov s rôznym počtom periód, ako aj rôznym posunutím fázy. Správna množina obrazov sa dá matematicky vypočítať, aby nedochádzalo k nejednoznačnosti³. V praxi však táto metóda z dôsledku meracej chyby a šumu zlyháva, preto sa využíva kombinácia Grayových zrkadlových obrazov a obrazov založených na fázovom posune.

¹ Nakoľko sínus je prostý iba na polovici periódy, výsledná fáza je nejednoznačná.

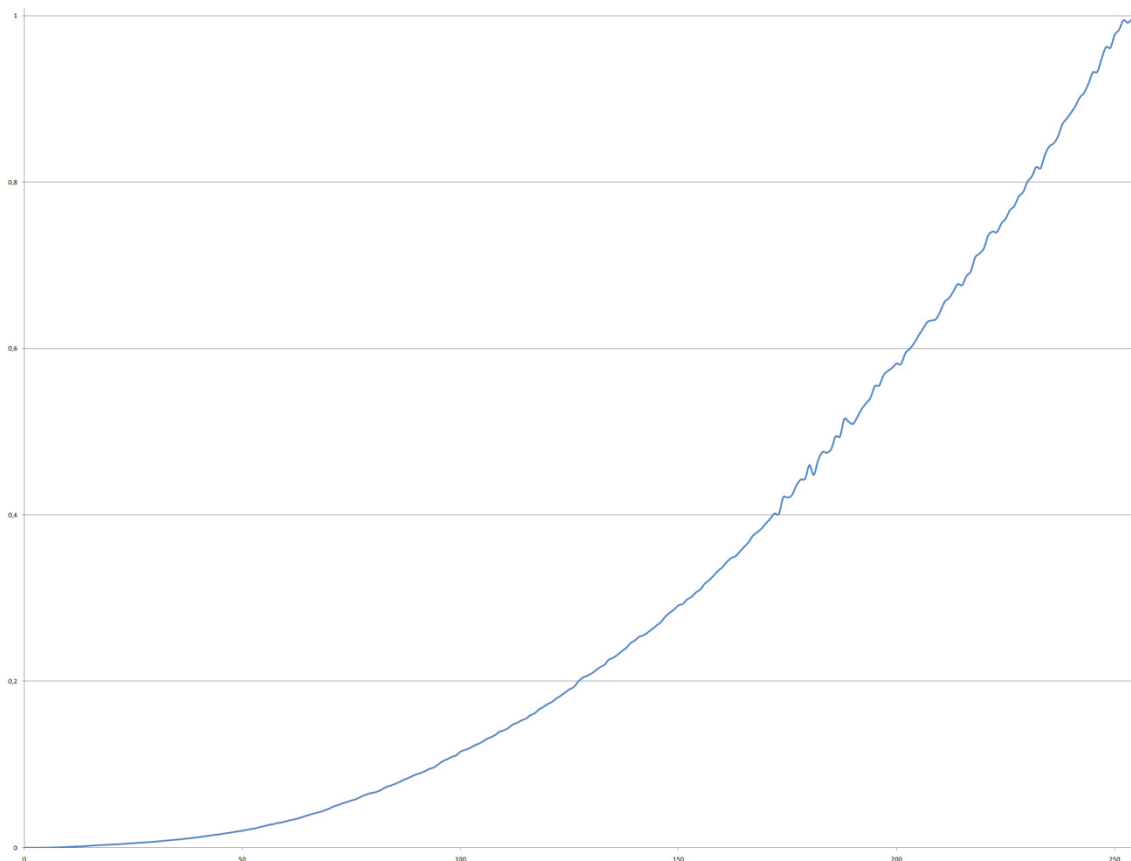
² Nakoľko okolo extrémov funkcie nie je funkcia prostá v ľubovoľne malom okolí. Preto budeme potrebovať aj obraz objektu pod osvetlením fázovo posunutým sínusom (napríklad funkciou kosínus).

³ Princíp je podobný hľadaniu nesúdeliteľných čísel, ktorých najmenší spoločný násobok je väčší ako stanovená hodnota. Výsledky z jednotlivých obrazov nám poskytnú nové informácie a zvýšia periódu nášho systému kódovaných obrazov. Pokiaľ bude perióda väčšia ako definičný obor, množina vzorov je matematicky dostatočná.

Hodnota sínusu ktorú dostaneme z vyššie uvedeného vzťahu je ovplyvnená šumom senzora, aj globálnym osvetlením. Nakoľko všetky možné získané hodnoty sú korektné, nemožno šum od signálu oddeliť. Z toho dôvodu sa využíva viacero obrazov s posunutou fázou. Z jednotlivých získaných hodnôt sa potom matematicky upresňuje výpočet pozície pruhu projektora¹ a znižuje sa tak dopad šumov pôsobiacich na systém.

Doteraz sme v úvahe počítali s dokonalým projektorom. Digitálny projektor však nie je schopný poskytnúť takýto typ projekcie. Osvetlenie vytvorenie projektorom je kvantované priestorovo aj hodnotou vyžarovania. Nakoľko kódovanie je založené na vysielaní signálu určitej energie, je potrebné poznať mapovanie medzi hodnotou energie (na intervale $\langle 0,1 \rangle$) a obrazovou hodnotou projektora (s pravidla farebný 8 bitový obraz). V konvenčných digitálnych projektoroch sa často využíva mapovanie pomocou polynomickej funkcie, takzvané gama mapovanie. Toto mapovanie vychádza z faktu, že ľudské oko nevníma rozdiely v svetelnej energii lineárne. Pre potreby rekonštrukcie je však potrebné túto funkciu presne nakalibrovať. V obrázku 11 čitateľom ponúkame graf prevodu energie na obrazovú hodnotu pre projektor použitý v prototypu. Kalibrácia bola uskutočnená pomocou kamery, pričom sa projektoval vždy konštantný obraz, ktorému sa postupne zvyšovala obrazová funkcia (o 1 v šedo tónovom 8 bitovom obraze). Každé meranie bolo pritom zopakované 5 krát a hodnoty sa priemerovali medzi jednotlivými meraniami a bodmi projektora.

¹ Ak by sme mali dokonalý projektor, ktorý scénu osvetľuje spojitou funkciou, kamerový bod by bol osvetlený podintervalom hodnôt x z definičného oboru obrazu. Hodnota zrekonštruovaná z kamerového bodu je tak priemernou hodnotou funkcie na danom podintervale. Pokiaľ je perióda funkcie dostatočne veľká, funkcia sínus na spomínanom podintervale sa blíži k lineárnej funkcii, teda spomínaný priemer sa nachádza blízko stredu krajných bodov podintervalu.



Obrázok 11: Nakalibrovaný prevod energie (vertikálna os) na obrazovú hodnotu projektora (horizontálna os)

Keď uskutočníme spomínanú kalibráciu projektora, môžeme vytvoriť jednotlivé sínusové obrazy. Obrazy sú však stále kvantované v poli intenzity, ako aj priestorovo (rasterizácia). Vzhľadom na toto obmedzenie nie sme schopní pri zaostrenej optike projektora dosiahnuť podpixlovú presnosť, nakoľko nedokážeme povedať nič o lokálnej geometrii, ktorá je osvetlená jedným pruhom projektora.

Ak však jemne rozostříme obraz projektora, projektovaná informácia sa rozmaže a zjemní, čím získame spojité mapovanie energie. Dané gausovské rozmazanie možno chápať ako priestorovú interpoláciu funkčných hodnôt. Výsledkom je teda aproximácia spojitej sínusovej funkcie.

Ak by sme však chceli byť korektní, musíme chápať rozostrenie projektora ako funkciu, ktorá je závislá na hĺbkovej mape scény z projekcie projektora. Charakter rozostrenia optickej sústavy projektora je možné nakalibrovať a potom matematicky namodelovať (získame PSF). Pomocou inej metódy môžeme získať predbežnú rekonštrukciu scény a hĺbkovú mapu projektora. Túto potom môžeme použiť ako vstup pre metódu, ktorá spolu s nakalibrovanou charakteristikou rozostrenia vypočíta

rozostrený projektovaný obraz. Môžeme použiť abstrakciu, pri ktorej môžeme chápať projekciu pôvodného obrazu projektora cez nedokonalú optiku ako projekciu analyticky vypočítaného nového obrazu cez dokonalú projekčnú sústavu. Vypočítaný obraz je totiž spojitý a nezávislý na rozlíšení. Takto môžeme pre pixel kamery vypočítať epipolárnu krivku, ktorá seká spomínaný abstraktný kódovaný obraz. Vďaka predbežnej rekonštrukcii môžeme vypočítať predbežnú lokalizáciu projekcie bodu na epipolárnu krivku. Ak je predbežná rekonštrukcia dostatočne presná, bude výsek analyticky vypočítanej obrazovej funkcie definovaný časťou epipolárnej krivky (vďaka predčasnej lokalizácii) prostý¹, a tak bude možné nájsť vertikálny pruh kódujúci daný pixel.

Ani vyššie spomínanou metódou použitia viacerých vzoriek fázovo posunutých kódov nemožno anulovať efekty šumu. Nestabilita intenzity vyžarovania projektora, ako aj šum senzora kamery spôsobuje nepresnosť dekódovania informácie, ktorá sa premietne do geometrickej chyby². Veľkosť vplyvu globálneho osvetlenia je ťažké predpokladať a môže spôsobiť aj veľkú geometrickú chybu rekonštrukcie³. Pre metódu je rovnako potrebné, aby obraz nebol prepálený.

Metóda však teoreticky umožňuje získať rekonštrukciu s použitím aspoň 3 snímok pre ľubovoľné rozlíšenie projektora⁴.

O možnosti využitia metódy na určenie podpíxlovej presnosti pre skenovanie s využitím Grayových zrkadlových obrazov si popíšeme v kapitole Systém SMISS.

2.1.3 Polarizácia

Polarizácia je vlastnosťou vlnenia, ktorá určuje orientáciu jeho oscilácie. Správanie sa svetla, ako aj podrobné vlastnosti polarizácie popisuje optika. Pre znalosti fyzikálneho pozadia polarizácie, odporúčame [1].

Pre potreby tejto práce však nie je potrebná komplexná štúdia tohto javu. Dôležitou vlastnosťou, ktorá je použitá v článkoch [37] a [22], je skutočnosť, že priamy odraz svetla od povrchu je čiastočne polarizovaný. V tejto práci vychádzame zo

¹ Toto tvrdenie nemusí platiť, v praxi je však očakávateľné. Neplatí pri extrémoch funkcie sínus, používame však viacero fázovo posunutých kódov, z ktorých aspoň jeden musí podmienku spĺňať.

² Veľkosť chyby je závislá na mnohých faktoroch, ako veľkosť šumu, rozostrenia, šírka zvolenej periódy (ovplyvňuje deriváciu obrazovej funkcie v okolí bodu projekcie).

³ Vo väčšine situácií je však odozva jednotlivých nasnímaných plôšok kamerových bodov ovplyvnená najmä príspevkom priameho odrazu energie z projektora, a teda metóda poskytuje prínosné informácie, najmä na zvýšenie kvality skenovania pomocou Grayových zrkadlových obrazov.

⁴ Pri spojitých povrchoch je teoreticky možné získať číslo periódy v ktorej sa obrazový bod nachádza postupným počítaním maxím obrazovej funkcie kamery na epipolárnej krivke.

zachovania polarizácie pri priamom odraze¹, keď je materiál osvetlený polarizovaným zdrojom. Väčšina lúčov vychádzajúcich z lineárne polarizovaného zdroja si po priamom odraze zachová uhol svojej polarizácie. Táto skutočnosť sa dá využiť pre odfiltrovanie takýchto lúčov pomocou lineárneho polarizačného filtra s rovinou polarizácie kolmou na rovinu polarizácie svetla vychádzajúceho z emitora. Takto dokáže odfiltrovať glosy odrazy, pričom cez filter bude prechádzať výrazná časť lúčov pochádzajúcich z difúzných odrazov. Difúzny, alebo Lambertovský odraz, je tvorený mnohonásobnými odrazmi a prechodmi lúčov v mikroštruktúre materiálu. Vďaka tomu je táto zložka svetla dopadajúca na senzor nepolarizovaná.

2.2 HDR SNÍMANIE

S pojmom HDR snímania sa možno stretnúť v súčasnosti najmä pri digitálnej fotografii. Pre správne pochopenie snímania scén s vysokým dynamickým rozsahom si najskôr uvedieme základné pojmy.

2.2.1 Dynamický rozsah

Keď rozprávame o dynamickom rozsahu, záleží od prívlastku. Môžeme teda hovoriť o dynamickom rozsahu scény, zariadenia, obrázku. My si bližšie popíšeme dynamický rozsah scény (z pohľadu kamery pre svetelné spektrum) a dynamický rozsah zariadenia, presnejšie kamery.

Dynamický rozsah je dôležitým parametrom meracích senzorov, a popisuje schopnosť senzoru zaznamenať určitý rozsah meranej fyzikálnej veličiny.

2.2.1.1 Dynamický rozsah scény

Dynamický rozsah scény je z pohľadu kamery pomer medzi najsvetlejším a najtmavším miestom v scéne.

Definujme si mieru $\tau[x, y]$, a nech je to svetelná energia odchádzajúca z výseku scény definovaného zovšeobecneným ihlanom vychádzajúcim z ohniska sekajúc priemetňu kamery² práve v pixli $[x, y]$, ktorá dopadá na objektív kamery, a je efektívne zaostrená na pixel $[x, y]$. Potom nech $\tau_{max} = \max_{[x, y]}$ je obrazový bod kamery $\{\tau[x, y]\}$,

¹ Myslí sa tým odrazy z povrchu, ktoré sa označujú ako lesklé.

² Uvažujeme matematický model využívajúci priemetňu umiestnenú medzi ohniskom a snímaným objektom, pričom dovoľujeme rozostrenie a deformáciu.

a rovnako τ_{min} je minimálny taký. Potom Dynamickým rozsahom myslíme podiel $\frac{\tau_{max}}{\tau_{min}}$, teda jedná sa o reálne číslo bez fyzikálnej jednotky.

2.2.1.2 Dynamický rozsah kamery

Dynamický rozsah kamery je pomer medzi nasýtením a šumom. Teda pomer energie potrebnej k nasýteniu senzorového bodu, k energií spôsobujúcej odozvu na úrovni elektromagnetického šumu.

Nakoľko v poslednej dobe bol dosiahnutý výrazný pokrok v CMOS obrazových senzoch, ponúkame odkaz na literatúru ponúkajúcu detailný pohľad na túto technológiu a aktuálne aplikácie [25].

2.2.2 Problém vysokého dynamického rozsahu

Keď rozprávame o dynamickom rozsahu scény pri fotografovaní. Scéna je osvetlená externými zdrojmi svetla, ktoré vo všeobecnosti nemožno ovplyvniť. Teda odozva vyvolaná na čipe kamery pre jednotlivé povrchy scény je závislá na materiálových vlastnostiach povrchov v scéne, svetelných zdrojov, ich umiestnenia, intenzity a podobne.

V prípade systému SMISS je dynamickým rozsahom taktiež pomer „najsvetlejšieho“ a „najtmavšieho“ miesta v scéne. Avšak máme možnosť modulovať svetelný zdroj (digitálny projektor), teda iníciaľna hodnota odozvy jednotlivých bodov je závislá na odrazivosti materiálov. Teda na rozdiel od všeobecného prípadu, máme možnosť svetelný tok riadiť, o čom si povieme neskôr. Ďalej sa budeme zaoberať tými oblasťami v scéne, ktoré sú priamo osvetlené projektorom, nakoľko neosvetlené oblasti neobsahujú pre geometriu užitočné informácie a vieme ich odfiltrovať pomocou separácie obrazu na obraz priameho a nepriameho osvetlenia.

Pokiaľ je dynamický rozsah scény vyšší ako dynamický rozsah kamery, dochádza k problému, a to nemožnosti korektne nasnímať scénu. Pre systém SMISS táto skutočnosť znamená nemožnosť korektne nasnímať geometriu objektov, nakoľko je potrebné dekodovať informáciu zakódovanú do svetelnej energie vysielanej na jednotlivé povrchy. Ak je dynamický rozsah scény (pre osvetlené oblasti) vyšší ako dynamický rozsah zariadenia, existujú v scéne oblasti, ktorých odozva je na úrovni šumu. Teda nemožno správne dekodovať informáciu vysielanú projektorom, nakoľko je

šumová. Viac o motivácii rozšíriť dynamický rozsah systému SMISS si povieme v kapitole Systém SMISS – Princíp práce systému.

2.2.3 Snímanie scény s vysokým dynamickým rozsahom

Pokiaľ však chceme nasnímať scénu s dynamickým rozsahom vyšším ako je dynamický rozsah nášho zariadenia, je možné postupovať známym používaným postupom viacerých expozícií. Tento postup sa hojne využíva pre konvenčnú digitálnu fotografiu. Neskôr v texte si uvedieme nový inovatívny prístup k zvýšeniu dynamického rozsahu zariadení pracujúcich na báze štruktúrovaného svetla. V danom postupe budeme využívať aj štandardný postup, preto si v nasledujúcej podkapitole uvedieme ako získať HDR snímok pomocou metódy viacerých expozícií.

2.2.3.1 Snímanie metódou viacerých expozícií

Základ tejto metódy je nasnímanie statickej scény pri meniacej sa expozícií kamery. Tento postup bol uvedený v článku [29]. Expozíciu kamery ovplyvňujú faktory ako citlivosť snímacieho média, veľkosť clony a dĺžka uzávierky. Citlivosť snímacieho média je u digitálnej kamery konštantná a spravidla sa nedá nastaviť¹. Veľkosť uzávierky ovplyvňuje hĺbku ostrosti a môže spôsobiť difrakciu, preto je rovnako nevhodné ju pre tento účel meniť. Expozíciu teda budeme meniť pomocou dĺžky uzávierky, ktorá ponúka dostatočnú flexibilitu. Taktiež možno povedať, za predpokladu homogénneho osvetlenia², že n – násobné skrátenie doby uzávierky vpustí na svetlo-citlivé médium n krát menej fotónov³, teda n krát menej energie. Dynamický rozsah senzora je obmedzený, môžeme však menením expozície posúvať rozsah senzora tak, aby sme postupne pokryli celý rozsah snímanej scény.

Budeme teda snímať scénu s meniacimi sa dĺžkami expozície, a to tak, že každý pixel kamerového senzora v danom procese nasníma príslušnú časť scény korektne, teda daná odozva bude mať dostatočne vysoký pomer signálu k šumu (SNR). Ak poznáme funkciu prevodu medzi nasnímanou hodnotou kamery a energiou svetla, môžeme so

¹ Jednotlivé fotodiódy kamerového senzora zachytávajú fotóny, ktorých dopad uvoľňuje elektróny. Počet elektrónov sa neskôr premietne na napätie, ktoré sa prevádza na digitálnu informáciu. Pred digitalizáciou je možné informáciu zosilňovať, čím možno ovplyvňovať „citlivosť“ senzora. To má zmysel iba do stavu, kým je kvalita signálu vyššia ako bitová hĺbka získaného obrazu. Teda kým jednotlivé bity finálneho obrazu nesú užitočnú informáciu.

² V zmysle vyžarovanej svetelnej energie za čas.

³ Toto tvrdenie je iba aproximáciou, nakoľko pre naše potreby pri dostatočnom počte fotónov nehrá náhodná povaha svetla veľkú rolu (Tieto javy popisuje kvantová fyzika – shot noise).

znalosťou hodnoty dĺžok expozícií vystavať fyzikálne korektný HDR obraz, hovoriaci o energii.

2.3 VIZUALIZÁCIA

V tejto podkapitole si povieme niečo o vizualizácii 3D informácie. Človek dokáže vnímať informácie zo sveta pomocou zmyslov. Zo šiestich zmyslov sú dva chuť a čuch. Tieto zmysly merajú iné ako priestorové kvality, preto sú nevhodné pre vizualizáciu 3D informácie. Rovnováha pomáha človeku zisťovať orientáciu a pociťovať zmenu rýchlosti pohybu v priestore¹. Sluchom dokážeme vnímať zvukové vibrácie. Nakoľko sa jedná o vlnenie, ktoré má smer, zdroj, a môže sa odrážať od okolitých predmetov, dá sa sluch považovať za zmysel, ktorý nám môže napomôcť získať predstavu o 3D priestore. Priamejšiu predstavu o priestore, rozmeroch a podobne však získavame pomocou zraku a hmatu.

Pomocou hmatu získavame predstavu o 3D priestore explicitne. Pohybovať rukami môžeme priamo vo všetkých 3 rozmeroch, následne dotykom získavame predstavu o povrchu objektu, ktorá sa v mozgu pretvára na abstraktný model, v ktorom máme uložené aj údaje o jeho geometrii. Na počítačovú vizualizáciu pre hmatový vnem môžeme využiť 3D tlač, ktorá sa v súčasnosti rozmáha.

Najlepšiu predstavu o priestore však získavame zo zraku. Zrak človeka zabezpečuje dominantné médium vstupných informácií. Samotný ľudský zrakový orgán dosahuje doposiaľ neprekonanú kvalitu vstupnej informácie. Ľudská sietnica je stavbou podobná novodobým CMOS senzorom. Ľudským okom sme schopní získať projekciu 3D priestoru cez stredové premietanie. Samotná predstava o hĺbke, teda trojrozsomernej podstate sveta prichádza zo stereo videnia. Teda človek získava vizuálne predstavu o 3D implicitne. Vstupné informácie sú stereo obraz, ktorý je následne analyzovaný ľudským mozgom, na základe disparity dochádza k vyhodnoteniu hĺbky. Ľudský zrak teda funguje na podobných princípoch ako stereo videnie kamier.

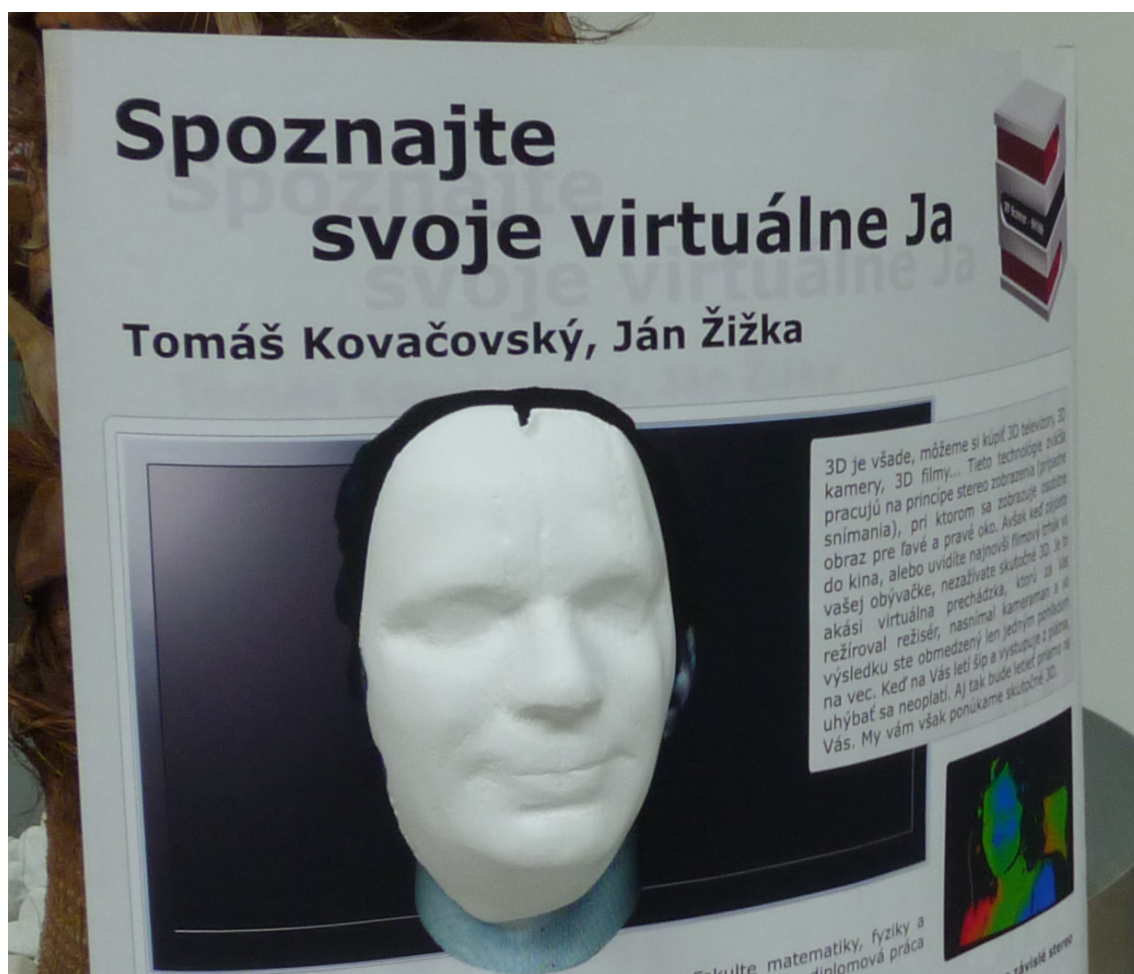
2.3.1 3D tlač

3D tlač poskytuje priamu možnosť vytvorenia fyzického 3D modelu z počítačovej predlohy. Namerané 3D súradnice systémom SMISS je možné

¹ Existujú niektoré zariadenia pre virtuálnu realitu, ktoré umožňujú simulovať preťaženie a rôzne pôsobenie síl.

prekonvertovať na natívny vstup 3D tlačiarne, ktorá je potom schopná nasnímaný objekt vyhotoviť¹. Výhodou 3D tlače je skutočnosť, že výsledný objekt je fyzický, a teda pozorovateľ získava priamu predstavu o objekte pomocou zraku aj hmatu.

Vyhotovenie 3D tlače je časovo, aj zdrojovo náročné. Výsledok je statický a nemusí vizuálne odpovedať predlohe, vzhľadom na nemožnosť zabezpečiť rovnaké materiály výroby.



Obrázok 12: Nasnímaný model tváre vyfrézovaný do tvrdého polystyrénu. Zdroj: Ján Žižka

3D tlač sa v súčasnosti využíva najmä na prototypovanie, vytváranie špecifických, aj nekonvenčných objektov alebo súčiastok. V spolupráci s kompletným 3D skenerom bude možné vyhotoviť 3D kopírovacie zariadenie, podobne ako tomu je v dnes už bežne dostupných 2D kopírovacích zariadeniach.

¹ Väčšina 3D tlačiarň využíva plasty. Avšak za 3D tlač možno považovať aj frézovanie do metalických, či drevených materiálov.

Ponúkame obrázok 12, na ktorom je možné vidieť obrázok modelu tváre nasnímanej systémom SMISS, ktorá bola následne vyfrézovaná do extrudovaného polystyrénu. Model bol vytvorený Mgr. Jánom Žižkom.

2.3.2 3D zobrazovanie

V predchádzajúcom prípade sa o konečnú vizualizáciu staralo skutočné svetlo, ktoré sa od vytlačeného objektu odrážalo. Ak však potrebujeme získať všeobecné zariadenie, ktoré dokáže vizualizovať 3D obsah, môžeme postupovať rôznymi spôsobmi.

Existujú rôzne technológie umožňujúce zobrazovať dáta priestorovo. Teda ak dokážeme príslušný 3D obsah zobrazit' zarovnaný do skutočného 3D sveta, pozorovateľ je schopný priamo vnímať 3D informáciu. V tomto prípade, sa podobne ako pri 3D tlači o výslednú vizualizáciu a projekciu stará svetlo a ľudský zrak. Takáto technológia je teda schopná vytvoriť korektný priestorový light field.

Volumetrické displeje sú však drahé a väčšinou umožňujú zobrazovať obsah v obmedzenej kvalite. Ďalej je priestor vizualizácie fyzicky obmedzený, teda neumožňuje zobrazenie väčších objektov. Zobrazovaný obsah je vykreslený v priestore pomocou emitovaného svetla, preto je nemožné simulovať reálne osvetlenie, ktoré je závislé na pozorovateľovi.

Iná možnosť, ako človeku sprostredkovať 3D informácie je priamo vytvárať stereo obrazy ktoré sú mu následne doručené do jednotlivých očí. Tento prístup je pre človeka veľmi prirodzený a využíva fakt, že človek vníma hĺbku implicitne. Vďaka tomu môžeme vizualizovať 3D informáciu bez jej samotnej rekonštrukcie. Na tomto princípe pracujú konvenčné 3D fotoaparáty, ktoré priamo nasnímajú stereo obraz. V tomto prípade sa však nejedná o skutočné 3D, nakoľko spracovanie a vyhodnotenie hĺbkovej informácie dochádza až v ľudskom mozgu¹. Takto dokážeme pozorovateľovi zobraziť objekt iba z jedného pohľadu.

Ak chceme dať možnosť pozorovateľovi meniť svoju pozíciu v scéne, potrebujeme poznať geometriu jednotlivých objektov². S takouto formou 3D zobrazenia

¹ Samotné použité médium ponúka iba 2D informácie, v ktorých je informácia o hĺbke implicitne zakódovaná.

² Nakoľko stavový priestor pozícií pozorovateľa je 3 rozmerný, pričom pre každú možnú pozíciu treba vo všeobecnosti poznať celú plenoptickú funkciu (dokopy 5D). Priame vzorkovanie a meranie takto rozsiahleho stavového priestoru by bolo časovo aj pamäťovo takmer nemožné.

sa môžeme stretnúť najmä v počítačových hrách. Nevýhodou však je, že daný obraz je nezávislý na skutočnej polohe pozorovateľa. Pohľad je korektný iba ak je pozorovateľ v stanovenej fixnej pozícii vzhľadom na zobrazovacie zariadenie. Pri zmene polohy pozorovateľa v reálnom svete dochádza v mozgu k očakávaniu, že vnímaná stereo projekcia sa prispôsobí novej pozícii¹. Pokiaľ sa tak nestane, vnímaný obraz sa stane nekorektným a mozog ho vníma ako pokrivený².

Pokiaľ chceme zabezpečiť prirodzenú reakciu obsahu na zmenu pozície pozorovateľa, musíme pozíciu jeho očí sledovať. Na tejto logike je postavené pohľadovo závislé 3D zobrazovanie, o ktorom si podrobnejšie popíšeme v ďalšej podkapitole.

2.3.2.1 Pohľadovo závislé stereo zobrazovanie

Pokiaľ poznáme pozíciu očí pozorovateľa v priestore, môžeme nastaviť pozície virtuálnych kamier, aby korešpondovali s pozíciou pozorovateľových očí. Ak ďalej poznáme fyzické rozmery a umiestnenie zobrazovacieho zariadenia, môžeme virtuálny a reálny priestor zarovnať. Zobrazovacie zariadenie sa tak stane akýmsi oknom do virtuálneho sveta³. Ukážeme si, ako správne projektovať obrazy virtuálnych objektov na štandardný stereo monitor. Na obrázku 13 môžeme vidieť schematický popis štandardnej situácie. Oči pozorovateľa, spolu s monitorom sa nachádzajú vo fyzickom priestore. Objekty A, B a C sa nachádzajú vo virtuálnom priestore. Ak umiestnenie monitoru chápeme ako priemetňu vo virtuálnom priestore, môžeme do jednotlivých očí umiestniť virtuálnu kameru. Ak premietneme A, B a C pre ľavé oko, získame body A_L , B_L a C_L . Podobne pre pravé oko získame A_P , B_P a C_P . Pokiaľ na monitor zobrazíme pre jednotlivé oči správne priemety, získame pocit správneho umiestnenia objektov v priestore.

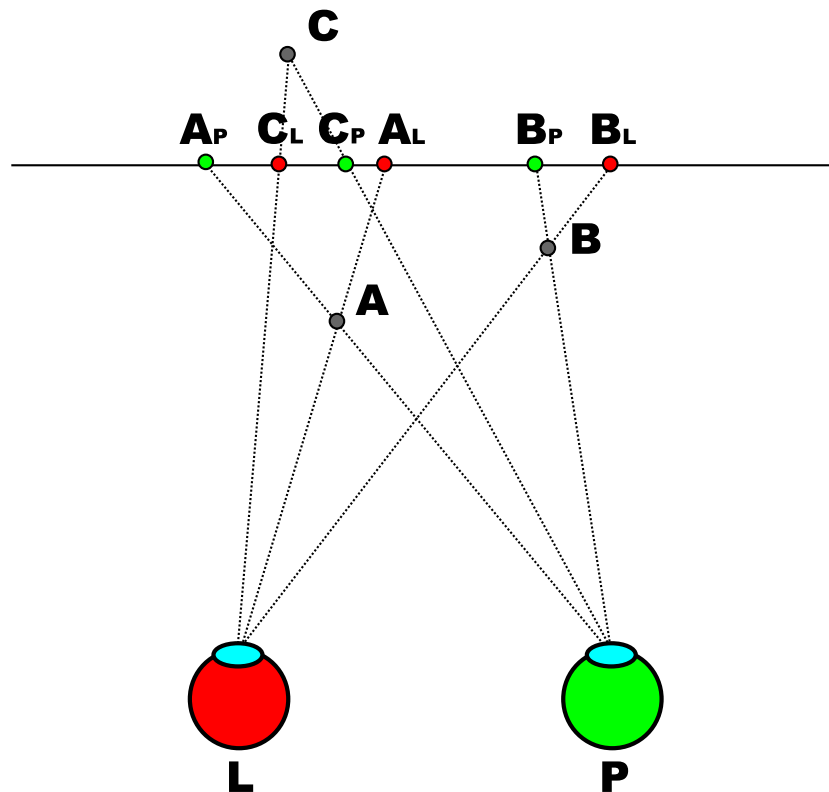
Výhodou pohľadovo závislého stereo zobrazovania je jednoduchá implementácia, ktorá nie je finančne náročná. V podkapitole Vizualizácia – Pohľadovo

¹ Nakoľko dochádza k desynchronizácii reálnej a virtuálnej polohy pozorovateľa.

² Človek je stále schopný vnímať 3D informáciu, avšak vnorenie pozorovateľa do virtuálneho priestoru je prerušené neočakávaným správaním.

³ Optimálnym výstupom by bolo simulovanie light field v danom zobrazovacom zariadení. To sa dá pomocou hologramu. Tento jav je fyzikálne zložitý a holografické displeje sú v súčasnosti veľmi obmedzené. Ďalším problémom je fakt, že je potrebné generovať 4D light field, čo je výpočtovo náročné. Kompromisom sú multiskopické displeje.

závislé stereo kapitoly Systém SMISS si popíšeme náš prototyp pre pohľadovo závislé stereo zobrazovanie.



Obrázok 13: Princíp korektného zobrazenia 3D

Metóda je teda schopná pozorovateľovi poskytnúť podobný zážitok, ako pri pohľade na skutočný objekt. Takto vykreslený objekt je pre pozorovateľa registrovaný s reálnym svetom a pôsobí veľmi prirodzene. Výhodou je tiež možnosť počítania pohľadovo závislého osvetlenia.

Nevýhodou metódy, ako aj samotného stereo zobrazovania je fakt, že všetky objekty sa vykresľujú v rovnakej rovine. Pozorovateľ teda vidí celú scénu ostro a nepociťuje efekt hĺbky ostrosti. Tento by sa však dal simulovať pomocou aplikovania rozostrenia, vzhľadom na pohľad pozorovateľa (angl. eye tracking).

3 PODOBNÉ PRÁCE

Táto práca priamo vychádza z práce [18], kde sme ponúkli prehľad problematiky a základ práce systému SMISS. V tejto práci sa venujeme problematike viac do hĺbky a uvádzame aj nové rozšírenie systému. V tejto kapitole sa teda zameriame na kľúčové práce, z ktorých sme čerpali pre zostrojenie systému. Rovnako ponúkame aj práce ktoré autorom slúžia ako inšpirácia pre budúce smerovanie. Uvádzame aj niekoľko state of the art prehľadových prác. Pre komplexnú množinu článkov zaoberajúcich sa danou tematikou teda odporúčame prečítať zoznam literatúry citovaných prác.

Automatickej rekonštrukcií sa venuje množstvo univerzít, ale najmä súkromných inštitúcií, vzhľadom na lukratívnosť oblasti. 3D rekonštrukcia je použiteľná takmer v každej oblasti priemyslu, výskumu, vedy, či bežného života. Vyčerpávajúci prehľad systémov, aj rôznych komerčných produktov možno nájsť v práci [34]. Prehľadová práca [12] zhŕňa poznatky a referencie na metódy zaoberajúce sa rekonštrukciou priesvitných a vysoko odrazivých objektov. Odkazy na webovské stránky mnohých výrobcov 3D skenovacích zariadení môžeme nájsť v zdroji [21]. Pre všeobecný prehľad metód počítačového videnia, výpočtovej fotografie, 3D rekonštrukcie, HDR snímania odporúčame knihu [35]. Nakoľko práca podstatou spadá pod výpočtovú fotografiu, odporúčame článok [24] s bohatým prehľadom literatúry v tejto oblasti.

Pre prehľad metód automatickej rekonštrukcie s využitím štruktúrovaného osvetlenia odporúčame [32] a prácu [33].

Prvotnou inšpiráciou pre projekt SMISS bol článok [30], kde autori použili farebnú modifikáciu Grayových kódovaných obrazov. Ďalšie práce, v ktorých bolo implementované snímanie s použitím binárneho kódovania sú [20] a [19], kde sa autori venovali detailnému popisu ako vytvoriť jednoduchý 3D skener. Veľa práce bolo uskutočnenej na vytvorení špecifického, robustnejšieho kódovania. V práci [8] sa autori venujú analýze efektov globálnej iluminácie, ktoré delia do jednotlivých kategórií. Pre každú kategóriu navrhujú špecifické binárne kódovanie, ktoré je odolnejšie na daný typ globálnej iluminácie. V práci [17] autori využili opačné Grayovo kódovanie. Toto kódovanie má podobné vlastnosti ako Grayovo, avšak kódované obrazy majú vyrovnanjšiu frekvenciu na jednotlivých bitových hĺbkach¹. Minimálna

¹ Jedeno z kódovaní [8] optimalizuje práve túto vlastnosť.

hrúbka pruhu v obrazoch je vyššia ako pri konvenčných Grayových obrazoch¹. Autori riešenia v práci [39] využili iteratívny postup na skenovanie scén so silnými medziodrazmi. Autori popisujú metódu na určenie regiónov silne ovplyvnených globálnou ilumináciou². Tie sú vylúčené zo spracovania a následne nasnímané v ďalšej iterácii s adaptívne vypočítanou maskou projekcie.

Metódy využívajúce kódovanie priestoru pomocou fázového posunu sú taktiež využívané. Základný princíp metódy je dobre popísaný v prácach [28], [7]. V článku [3] autori uvádzajú metódu na úpravu obrazov založených na fázovom posune. Každý použitý kódovaný obraz je prenasobený niekoľkými vysokofrekvenčnými obrazmi. Algoritmus potom vyrobí z každého takéhoto setu separáciu na obraz priameho a nepriameho osvetlenia, vďaka čomu sa metóda stane odolnejšia voči efektom globálnej iluminácie. Práce [40], [6] sa zaoberajú rekonštrukciou v reálnom čase. Druhá zo spomínaných prác využíva upravený DLP³ projektor, vďaka ktorému sú schopný projektovať binárne obrazy s taktom 4kHz. Ďalej využívajú dostatočné rozostrenie šošovky, aby výsledný projektovaný vzor pripomínal sínusovú funkciu. Na kamerový obraz aplikujú pásmový filter vo Furiérovom spektre. Obraz po filtrácii následne analyzujú na výpočet fázy a následne kódového indexu.

V prácach [5], [27], [16], [31], [15] sa autori venujú rekonštrukciám zväčša dynamických scén v reálnom čase, k čomu vo väčšine prípadov využívajú kódovanie priestoru jedným vzorom. Na podobnom princípe pracuje aj Microsoft Kinect, ktorý vyvinula spoločnosť PrimeSense. Snímaný objekt je osvetlený laserom, ktorý je modulovaný špeciálnou difrakčnou mriežkou. Osvetlenie vytvára v priestore logické kódovanie, ktoré je potom dekódované v kamere.

Podobné optické usporiadanie⁴, aké bolo použité v rozšírení HDR SMISS použili aj autori v článkoch [9], [11], kde využili zostavu na snímanie geometrie a aproximáciu BRDF a v práci [26], kde bola kombinácia projektora a kamery využitá ako nástroj pre optické počítanie násobenia matíc v Krylovom podprieštore pre

¹ Cieľom práce bolo zvýšiť odstup signálu od šumu a zvýšiť robustnosť znížením chyby dekódovania. Pri rozostrení projektora však autori uvádzajú zvýšenie geometrickej chyby oproti konvenčnému kódovaniu (chybné dekódovaný pruh má náhodný výskyt v obraze).

² S vysokou pravdepodobnosťou chyby dekódovania.

³ DLP projektor využíva na modulovanie svetla DMD čip, ktorý je tvorený maticou MEMS zrkadiel schopných kmitať na frekvenciách 20kHz.

⁴ Kamera a projektor na jednej optickej osi (z angl. co-axial).

aproximáciu transportu¹ svetla. Tá bola potom použitá pri renderingu na fyzikálne korektné počítanie osvetlenia.

V článkoch [37], [22] autori využívajú polarizáciu na oddelenie spekulárnej a difúznej zložky svetla. Polarizácia bola taktiež využitá v práci [2], kde sa autori venovali snímaniu polopriesvitných povrchov.

Rozptyl svetla v optickej sústave kamery a jeho vplyv na snímanie HDR scén je analyzovaný v článku [36]. Autori taktiež uvádzajú metódu na potlačenie nežiaduceho javu, a to s použitím fyzickej mriežky, ktorá je postavená medzi scénou a kameru. Táto mriežka je postupne posúvaná a výsledný HDR obraz je nasnímaný zo série snímok.

¹ Jedná sa o 6D maticu (z angl. transport matrix).

4 SYSTÉM SMISS

V tejto kapitole si ozrejníme základný princíp práce systému SMISS. Rozoberieme si limitácie systémov založených na štruktúrovanom svetle a riešenie v podobe rozšírenia HDR SMISS. Podrobnejšie informácie o implementácii niektorých metód budú popísané v podkapitole Navrhnuté a použité metódy. Systém SMISS kóduje priestor s použitím Grayovho zrkadlového kódovania. Pre podpixelovú presnosť systém využíva vzory založené na fázovom posune. V tejto kapitole si popíšeme jednotlivé metódy a algoritmy na dekódovanie zakódovanej informácie. Pokiaľ budeme rozprávať o dekódovaní binárnych vzorov, budeme za pozíciu pixla uvažovať jeho stred, niekedy budeme využívať pojem bod kamery, prípadne projektora. Ďalej si popíšeme ako z výslednej korešpondencie získame 3D súradnice a povieme si niečo aj o možnosti vizualizácie s využitím pohľadovo závislého stereo zobrazenia.

4.1 PRINCÍP PRÁCE SYSTÉMU

V podkapitole Vizualizácia kapitoly Teoretické východiská sme si popísali ako človek vníma hĺbku a ako získava pojem o trojrozmernej priestorovej podstate objektov. Systémy založené na triangulácii využívajú podobný princíp.

Priamym napodobením ľudského zraku je stereovízia dvoch kamier. V tomto prípade sa vyhodnocuje hĺbka v obraze na základe hľadania korešpondencií v stereo obrazoch (s využitím epipolárnej geometrie). Tieto algoritmy však vyžadujú, aby obrazy nasnímané pomocou kamier obsahovali vysokofrekvenčné informácie¹. Problém môžu spôsobiť aj spekulárne odrazy, ktoré sú pohľadovo závislé. Algoritmy na hľadanie korešpondencie sú navyše náročné na výpočet.

Získaním možnosti riadiť tok svetla v scéne by sme sa mohli zbaviť predpokladu nehomogénnej textúry. Jednou z možností je naprojektovať na scénu vysokofrekvenčný obraz a využiť štandardné algoritmy a metódy 3D videnia. Samotný projektovaný obraz však vytvára akési kódovanie priestoru, ktoré sa dá priamo využiť.

Jednou z veľmi často používaných metód 3D rekonštrukcie s využitím kódovania priestoru pomocou iluminácie je laserové skenovanie. Laserová čiara definuje v priestore rovinu, ktorá seká snímaný objekt. Miesto styku je krivka, ktorá sa

¹ Rozlíšenie nameranej 3D informácie je teda nehomogénne a sústreďuje sa do oblastí s dostatočnými fotometrickými zmenami. Naopak v oblastiach obrazu, ktoré sú homogénne je takmer nemožné nájsť body korešpondencie.

v kamerovom obraze javí pokrivená. V kamerovom obraze sa hľadajú maximá obrazovej funkcie v jednotlivých riadkoch senzora, na základe čoho sa vyhodnotí hĺbka.

Laserové skenovanie dokáže byť veľmi presné¹ vďaka možnosti využitia Scheimpflugovho princípu², ako aj možnosti využitia interpolácie³. Nevýhodou je však fakt, že na vyhotovenie jedného profilu⁴ je potrebné získať 2D obraz z kamery⁵. Na vyhotovenie n profilov je teda potreba lineárneho počtu snímok kamery.

Ak zvýšime dimenziu svetelného modulátora, dokážeme zvýšiť aj rýchlosť snímania. Jeden z najbežnejších modulovaných zdrojov svetla umožňujúcich 2D moduláciu je digitálny projektor. Vďaka vysokej využiteľnosti digitálnych projektorov bola zvýšená ich dostupnosť aj kvalita. Tato napomáha aj metódam 3D rekonštrukcie založených na štruktúrovanom (kódovanom) osvetlení⁶. Na tomto princípe pracuje aj systém SMISS.

SMISS na získavanie trojrozmerného modelu scény používa kombináciu kamery a projektoru. Rekonštrukcia je založená na triangulácii, ktorá je vyhotovená na princípe korešpondencie medzi obrazovými priestormi kamery a projektoru. Ako získame spomínanú korešpondenciu si popíšeme neskôr.

Aby však mohol systém správne fungovať, musia byť jednotlivé zariadenia nakalibrované. Kalibrácia pozostáva z dvoch krokov. Najskôr nakalibrujeme zvlášť kameru a projektor, čím získame atribúty matice vnútorných parametrov a atribúty radiálneho a tangenciálneho skreslenia⁷. V ďalšom kroku potom kalibrujeme kameru a projektor ako pár, táto kalibrácia nám dáva možnosť získania matice vonkajších parametrov na prevod medzi sústavami súradníc kamery a projektoru⁸.

¹ Presnosť na úrovni 15 mikrometrov.

² Senzor nie je umiestnený rovnobežne s optikou, ale pod špecifickým uhlom. Dá sa tak doceliť, aby rovina ostrosti snímača bola rovina definovaná laserovou čiarou.

³ Táto metóda využíva jemne rozostrený laser. Profil projekcie má potom v priereze obrazu tvar daný PSF optiky laseru (väčšinou gausovská distribúcia). Nameraným dátam sa preloží analyticky vypočítaný gausián. Takto všetky body prierezu profilu prispievajú k presnejšej lokalizácii maxima. Metóda však berie za predpoklad homogénne materiálové vlastnosti objektu na ploche danej rozsahom rozostrenia, tak ako aj že povrch je v danej oblasti lineárny (Mikroštruktúra materiálu môže výrazne ovplyvniť nasnímané dáta a posunúť hodnotu maxima dokonca o viac ako pixel senzora).

⁴ 3D body nachádzajúce sa na krivke v priestore.

⁵ Z každého riadku kamery je pri tom výsledkom spravidla len jedno reálne číslo. Dochádza teda k vysokým stratám dátovej priepustnosti.

⁶ Podrobný popis kódovania priestoru bol popísaný v kapitole Teoretické východiská.

⁷ Tieto parametre sú za predpokladu nezmenenia optickej sústavy konštantné.

⁸ Sústava súradníc projektoru je považovaná za svetovú sústavu súradníc. Pričom táto kalibrácia je viazaná na vzájomnú polohu kamery a projektoru. Pokiaľ je konštantná, je kalibrácia aktuálna.

Ak máme systém nakalibrovaný, môžeme spustiť skenovací program. Ten automaticky pripraví kameru a projektor na skenovanie. Užívateľ si potom môže nastaviť typ skenovania, použité metódy a interné prahy systému.

Nastavenia systému sú rozdelené do niekoľkých skupín. V prvej si užívateľ môže nastaviť, ktoré kódované obrazy chce použiť. Má na výber z vertikálnych a horizontálnych Grayových zrkadlových obrazov, šachovnicových vzorov, bieleho a čierneho snímku, rovnako si môže zvoliť aj negácie Grayových zrkadlových obrazov.

Taktiež si má možnosť navoliť použitie vzorov založených na fázovom posune, pre pod-pixlovú presnosť výstupného mračna¹.

V ďalšej skupine parametrov si užívateľ zvolí, akým spôsobom bude systém dekódovať kódované obrazy projektora z bodov kamerového obrazu. Na výber má viacero algoritmov pre dekódovanie Grayových zrkadlových obrazov ako „Direct vs. Global Matching“, „Adaptive Threshold Matching“ a „Mirror Images Matching“. Metódy bližšie popisujeme v nasledujúcej podkapitole. Rovnako je možné zvoliť si parametre ako kompenzácia okolitého osvetlenia a detekcia tieňov a reflexívnych povrchov.

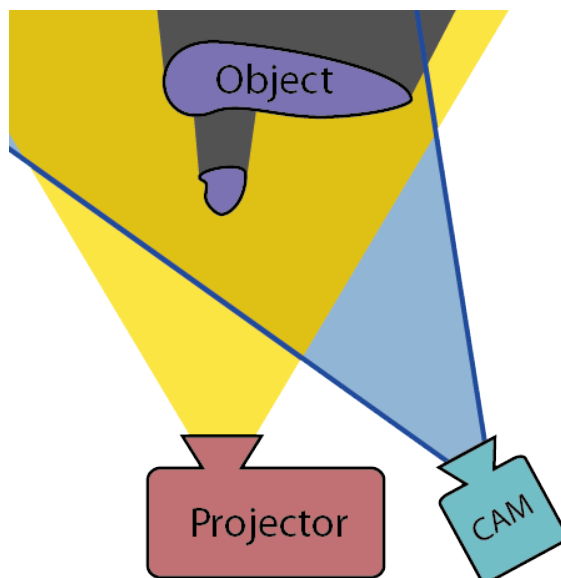
Ďalej je možné nastaviť metódu triangulácie, kde sa dajú navoliť dve možnosti. „Iterative intersection finding algorithm“ a „Direct Approach (No Projector Distortion)“, pričom druhá možnosť neráta so skreslením projektora.

Posledná časť nastavení pojednáva o vnútorných prahoch, ktoré budú použité v jednotlivých algoritmoch.

Len čo si užívateľ navolí všetky parametre², môže začať skenovací proces. Projektor v stave medzi skenovaniami projektuje biely obraz s krížom, ktorý slúži na lepšiu orientáciu umiestnenia stredu projekčného obrazu. Vďaka flexibilnej montáži je jednoduché systém nasmerovať na skenovaný objekt. Potom si je možno pozrieť viditeľnosť scény kamerou, ktorá neustále proces sníma a užívateľ má tak aktuálny prehľad. Schematický náčrt systému ponúkame na obrázku 14.

¹ Túto podpixlovú presnosť je možné dosiahnuť pri jemne rozostrenom obraze projektora. Obrazový bod kamery sa berie ako atomický prvok. Akákoľvek metóda, ktorá umožňuje podpixlovú presnosť so zaostreným projektorom, alebo podpixlovú presnosť vzhľadom na obraz kamery vyžaduje splnenie špecifických podmienok. Preto sa snažíme využívať iba korektné kroky, ktoré nepredpokladajú špecifické vlastnosti skenovaného objektu.

² Základné nastavenie je však zvolené tak, aby bolo možné snímať takmer ľubovoľnú scénu v čo možno najvyššej kvalite.



Obrázok 14: Princíp triangulácie v systéme SMISS

Po odštartovaní skenovacieho procesu prejde kamera automaticky do synchronizovaného módu s projektorom. Projektor postupne premieta jednotlivé kódované obrazy¹. Kým sa nenasníma celá sekvencia, systém, ako aj scéna musia zostať statické. Pohyby v scéne počas skenovacieho procesu vyvrcholia ku geometrickým artefaktom.

Po nasnímaní má systém k dispozícii obrázky scény nasnímanej pod jednotlivým kódovaným osvetlením, vzápätí prichádza na radu fáza predspracovania kamerových dát. V nej sa získa obraz priameho a globálneho osvetlenia², mapa zatienených a reflexívnych povrchov. Od jednotlivých snímok sa odčíta obraz okolitého osvetlenia tak ako bolo popísané v kapitole Teoretické východiská.

Po fáze predspracovania systém začína spracovávať jednotlivé body. Pre každý bod kamery, ktorý nebol vyhodnotený ako zatienený, prípadne reflexný, systém dekoduje informáciu o pruhu pixla ktorý bod osvetľuje. Na to sa využívajú Grayove zrkadlové obrazy, ktoré nám však poskytujú pri najlepšom určiť súradnicu pruhu (prípadne bodu) projektora na pixel úrovni. Ak bolo aktivované aj podpixelové skenovanie, systém analyzuje a počíta fázu obrazov kódovaných funkciou sínus. Pričom

¹ Obrazy pre kódovanie priestoru, ako aj šachovnicové obrazy na separácie obrazu priameho a nepriameho osvetlenia. Taktiež, ak si užívateľ navolil, projektuje sa aj obraz s vypnutým a plne zapnutým projektorom (čierny a biely).

² Podľa metódy z článku [23].

periódu systém získava z lokalizácie pomocou Grayových zrkadlových obrazov¹. Ak si užívateľ zvolil projektovanie vertikálnych aj horizontálnych pruhových obrazov, budeme mať k dispozícii bodovú korešpondenciu medzi obrazom kamery a projektora. V prípade zvolenia len vertikálnych, prípadne horizontálnych pruhov získame korešpondenciu bodov kamery s jednotlivými pruhmi projektora.

Z danej korešpondencie potom vieme zistiť pozíciu bodov nasnímaných kamerou nasledovne.

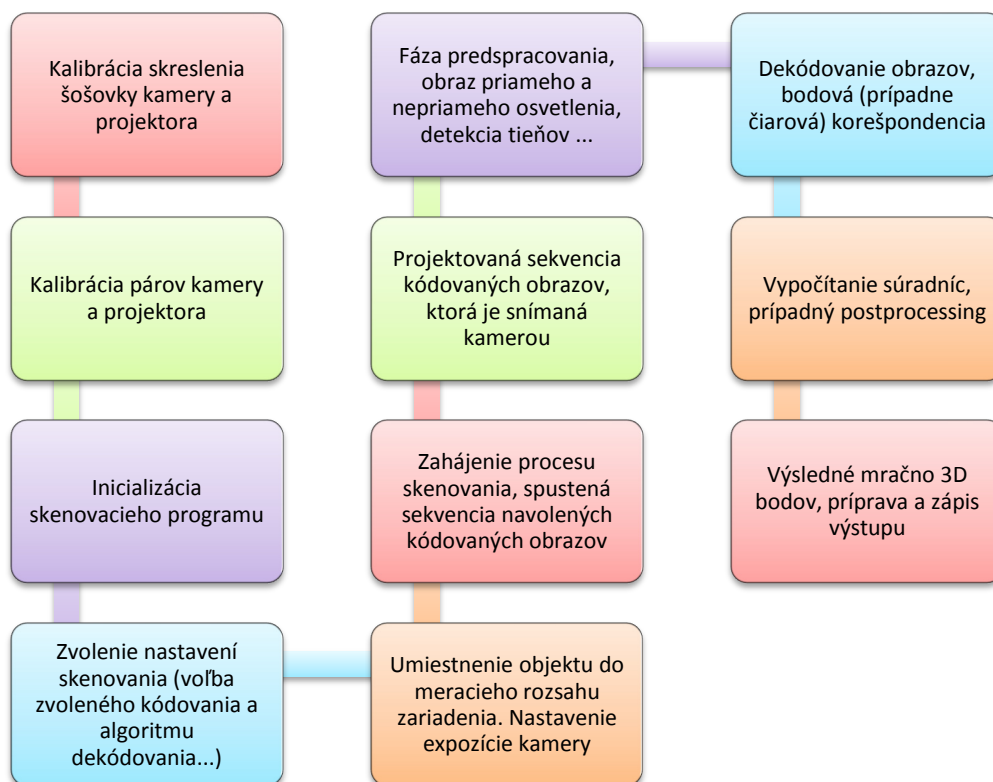
Ak máme k dispozícii bodovú korešpondenciu medzi obrazovým priestorom kamery a projektora, môžeme využiť hľadanie najbližších bodov dvoch mimobežiek. Bod kamery, rovnako ako bod projektora, nám totižto dávajú možnosť definovať polpriamky vychádzajúce zo stredu zariadení a smerujúce do korešpondujúceho bodu scény. Tieto polpriamky by sa mali pretnúť, avšak vzhľadom na diskkrétne dátové typy a drobné odchýlky možno tento prípad klasifikovať ako hľadanie najbližších bodov dvoch mimobežiek. Vypočítaním týchto bodov môžeme získať aj veľkosť odchýlky a prípadne filtrovať body, ktorých odchýlka už nie je vyhovujúca presnosti merania. Nájdene body potom spriemerujeme, a tak získame 3D súradnice korešpondujúceho bodu.

Ak máme k dispozícii korešpondenciu medzi bodmi kamery a pruhmi projektora, systém zisťuje prienik medzi polpriamkou a časťou zakrivenej roviny. Bod kamery nám, ako v predchádzajúcom prípade, definuje polpriamku v priestore. Pruh projektora sa vzhľadom na optické skreslenie šošovky premietne do scény ako projekcia krivky zo stredovej projekcie, a teda množina všetkých bodov priestoru, ktorá môže byť týmto pruhom osvetlená, leží na časti zakrivenej roviny. Stačí nám teda vypočítať prienik týchto geometrických útvarov a získame pozíciu daného bodu v priestore.

Po získaní pozície všetkých relevantných bodov systém pripraví priamy výstup do binárneho súboru. Výsledkom skenovania je teda mračno 3D bodov, s ktorým možno ďalej pracovať.

Schematický popis potrebných úkonov od nenakalibrovaných zariadení, po 3D mračno bodov možno vidieť na obrázku 15.

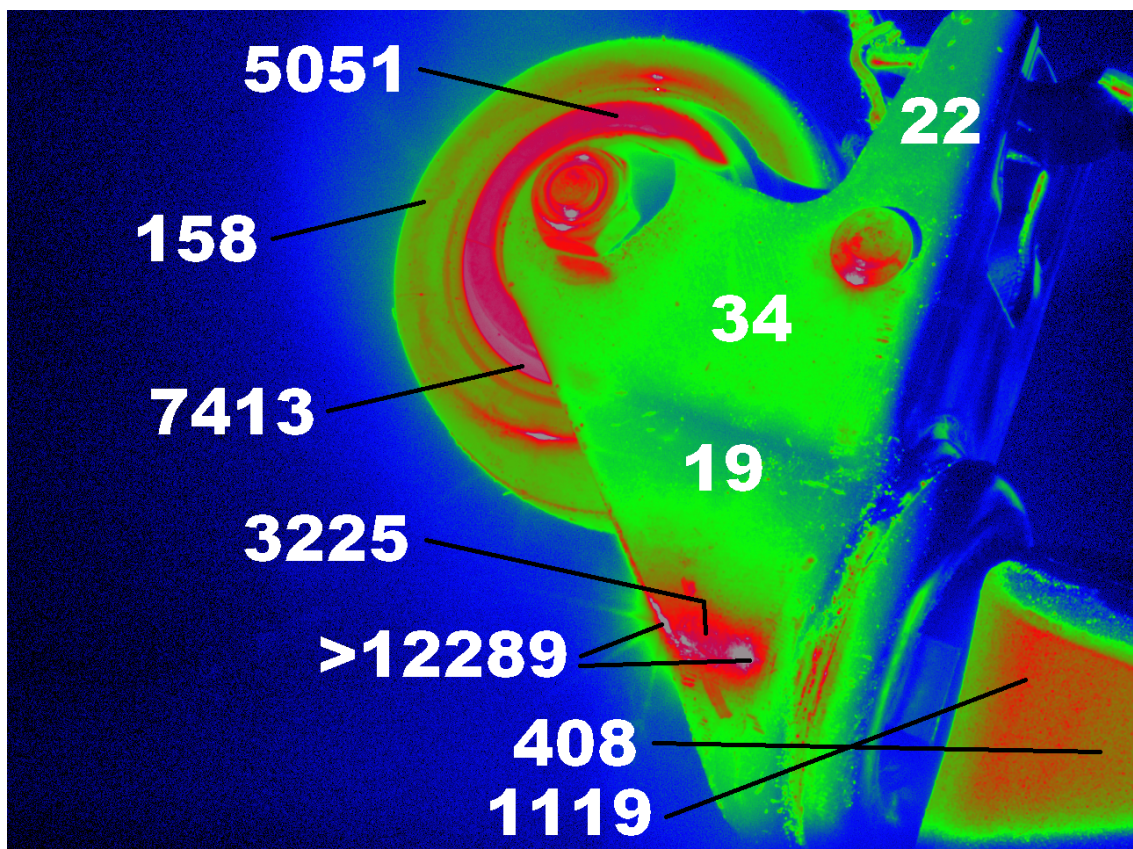
¹ Teoreticky je možné vynechať niekoľko posledných bitov Grayovho kódu, ak vzniknutá neurčitost' lokalizácie neprevyšuje veľkosť periódy použitých sínusových vzorov.



Obrázok 15: Schéma postupu systému k výslednému mračnu 3D bodov

4.1.1 Limitácie systému

Na korektnú prácu dekódovacích algoritmov, ako aj ostatných algoritmov v systéme je potrebné, aby nasnímaná informácia kamerového obrazu bola korektná. Ak by sa v obraze kamery nachádzali preexponované oblasti, jednotlivé algoritmy by počítali s nekorektnými hodnotami, čo by mohlo mať za následok vznik vysokej chyby merania. Toto nás núti nastaviť expozíciu kamery na takú úroveň, aby sa v scéne nenachádzali preexponované časti. Nakoľko senzor kamery má obmedzený dynamický rozsah, regióny zodpovedajúce málo reflexným povrchom, prípadne povrchom, ktorých normála zvierá so spojnicou ku projektoru vysoký uhol, by mohli mať odozvu na úrovni šumu. Problém s dynamickým rozsahom ovplyvňuje všetky zariadenia pracujúce na báze štruktúrovaného svetla. Nedostatočný dynamický rozsah teda môže spôsobiť neschopnosť nasnímať povrchy v scéne, ale vo všeobecnosti môže znížiť SNR v jednotlivých častiach scény, čím môže dôjsť k chybe merania. Na obrázku 16 ponúkame HDR obraz scény nasnímaný systémom SMISS. Obrázok je zobrazený pomocou logaritmického mapovania. Na obrázku je možné vidieť odozvy v jednotlivých jeho častiach. Najvyššie odozvy sú spôsobené priamym spekulárnym odrazom. Takéto odrazy taktiež značne zvyšujú dynamický rozsah scény.



Obrázok 16: HDR obrázok v logaritmickom mapovaní. Čísla kódujú jasové hodnoty obrázku v jednotlivých častiach.

Ďalšiu limitáciu spôsobujú inter-reflexie. Systém je schopný detegovať vysoko reflexné (zrkadlové alebo glosy) povrchy a následne pixle kamery prislúchajúce daným povrchom odstrániť zo skenovacieho procesu¹. Projektor však bude tieto povrchy pri skenovaní osvetľovať. Odrazené svetlo z týchto povrchov môže výrazne ovplyvňovať ostatné povrchy v scéne, nakoľko môže byť zaostrené².

4.2 ROZŠÍRENIE HDR SMISS

Na riešenie problému vysokého dynamického rozsahu scén by sme mohli použiť štandardnú metódu viacerých expozícií, tak ako je uvedené v kapitole Teoretické východiská.

Táto metóda však uvažuje nasnímanie scény pri viacerých expozíčných časoch, a teda vyžaduje viacej snímku. Pre systém SMISS by to teda znamenalo n -násobný nárast v dĺžke snímania (pričom n je závislé na dynamickom rozsahu scény). Navyše

¹ Odozva priameho odrazu svetla od týchto povrchov býva často slabšia, ako odozva spôsobená lúčmi z ostatných častí scény (viac ako 2 odrazy).

² Energia odrazeného žiarenia môže spôsobiť výrazný vplyv na odozve ostatných povrchov.

v dôsledku nedokonalosti kamier, dochádza k javu zvanému blooming¹, ktorý môže byť spôsobený rozptylom svetla v nedokonalkej optike alebo ovplyvňovaní okolitých pixlov v mriežke senzoru. Pokiaľ sa v scéne nachádza veľmi svetlá oblasť, ktorá je priamo susedná s veľmi tmavou oblasťou, môže sa stať, že pri expozičnom čase potrebnom na korektné nasnímanie tmavej oblasti budú susedné body dostávať príliš veľké množstvo energie, ktorá bude ovplyvňovať aj susedné body v mriežke senzoru. Teda za žiadnych okolností takto nedokážeme nasnímať správnu hodnotu pre tieto body. Ďalšou nevýhodou je v našom prípade fakt, že silne odrazivé povrchy, získavajúce svetelnú energiu z projektora, môžu odraziť veľkú časť energie na ostatné povrchy.

Aby sme sa zbavili týchto nevýhod štandardnej metódy, navrhujeme inovatívne riešenie, ktoré využíva dynamický rozsah kamery a projektora.

Počas skenovacieho procesu každý pixel kamery zberá svetelnú energiu z určitého výseku povrchu, ktorý je po celú dobu skenovania rovnaký. Nech je tento povrch osvetlený množinou pixlov projektora.

Uvažujme ďalej pre spomínaný pixel integrál SVBRDF cez spomínaný výsek povrchu, množinu odchádzajúcich smerov idúcich k senzoru a množinu prichádzajúcich smerov z projektora. Tento integrál je počas skenovacieho procesu konštantný, označme ho γ . Namiesto modifikovania dynamického rozsahu kamery, budeme modifikovať svetelnú energiu vychádzajúcu z projektora. Na povrchy s vyšším γ (vysoko odrazivé materiály) pošleme menej svetelnej energie a naopak na povrchy s nižším γ (tmavé, malo odrazivé materiály) pošleme viac svetelnej energie. To znamená, že výsledný dynamický rozsah nášho systému bude súčinom dynamického rozsahu kamery a projektora. Pomocou danej metódy teda znížime dynamický rozsah scény tak, aby sa zmestil do dynamického rozsahu kamery. Pre modifikovanie energie vyžarovania budeme obraz projektora modulovať váhovou mapou. Metódu na získanie spomínanej váhovej mapy popíšeme v nasledujúcej podkapitole.

Výhodou tejto metódy je iba konštantný nárast v čase snímania potrebný na vytvorenie váhovej mapy obrazu projektora, ďalej navrhnutá metóda nezdiera problémy globálnej akvizície HDR obrazu v dôsledku prebývania napätia. Rovnako výhodné vlastnosti nám ponúka aj pri znížení efektu globálneho osvetlenia (tzv. inter-reflexií),

¹ Eliminácie tohto problému pre bežné HDR snímanie bolo riešené v článku [36].

a to tak, že vysoko odrazivé materiály budú osvetlené nižšou svetelnou energiou, a teda rovnako svetlo od nich odrazené bude mať nižší dopad na ostatné povrchy¹.

4.3 NAVRHNUTÉ METÓDY

V tejto podkapitole si popíšeme navrhnuté metódy použité v systéme SMISS a ku koncu podkapitoly metódy na získanie váhovej mapy pre prototyp systému HDR SMISS.

4.3.1 Kalibrácia systému SMISS

Kalibračná metóda použitá v systéme SMISS je založená na článku [41]. Táto metóda počíta vnútorné aj vonkajšie parametre systému kamier na základe korešpondencie bodov kalibračného predmetu. Ako kalibračný predmet využívame planárny šachovnicový vzor.

Systém umožňuje súčasne kalibrovať všetky potrebné parametre, ako spomínané matice vnútorných parametrov a skreslenia pre kameru a projektor. Rovnako aj maticu vonkajších parametrov, teda maticu prevodu medzi súradnicovými sústavami kamery a projektoru, ktorá udáva aj jednotku vzdialenosti².

Pri kalibrácii je potrebné umiestniť kalibračný predmet na fixnú pozíciu tak, aby bol viditeľný z kamery a projektoru. Kamera následne nasníma snímok šachovnice. Na nej sú nájdené vnútorné vrcholy. Následne je spustená sekvencia horizontálnych a vertikálnych Grayových zrkadlových obrazov. Pixle kamery korešpondujúce s nájdenými vrcholmi šachovnice sú využité na dekódovanie informácie. Tak získame súradnice vrcholov šachovnice v súradnicovom priestore projektoru. Na záver sú potom na vypočítané súradnice naprojektované krížiky, pre potvrdenie korektnosti.

Pre úplnú kalibráciu treba tento proces opakovať s rôznym umiestnením kalibračného telesa³.

¹ Neskôr si ukážeme, že budeme schopný zrkadlové, prípadne vysoko lesklé povrchy nielen vylúčiť zo zapracovania, ale taktiež nevysielať na dané povrchy žiadnu informáciu, čím sa zníži dopad na ostatné povrchy.

² Ak systému udáme veľkosť kalibračného predmetu v milimetroch, výsledná rekonštrukcia bude metrická, tak ako aj všetky súradnice.

³ Viac meraní zvyšuje presnosť, nakoľko vytvára redundanciu vstupných informácií pre riešenie sústavy rovníc. Minimálny počet je závislý od počtu vrcholov šachovnice (zväčša 2). Odporúčame okolo 10 rôznych umiestnení kalibračného objektu (optimálne je nedávať šachovnicu do roviny, v ktorej sa už niekedy nachádzala).

Pokiaľ je kalibrácia ukončená, systém vyráta príslušné parametre, ktoré sú následne zapísané do kalibračných súborov pre jednotlivé zariadenia.

V systéme je implementovaná aj metóda na kalibráciu funkcie prevodu medzi obrazovými hodnotami projektoru a mierou kódujúcou energiu žiarenia. Graf získaného zobrazenia mal čitateľ možnosť vidieť v kapitole Teoretické východiská.

4.3.2 Kompenzovanie dopadu okolitého osvetlenia

Táto metóda využíva jednoduché odčítanie čierneho snímku (snímku pri nulovom osvetlení projektorom) od všetkých nasnímaných kamerových snímok, vrátane snímku pod čiernym osvetlením.

Táto metóda vyžaduje pridanie čierneho snímku do skenovacieho procesu. Uvedené metódy budú buď vyžadovať, aby bola zložka okolitého osvetlenia nulová, alebo budú pracovať aj bez použitia tejto metódy. Táto metóda však výrazne vplýva na kvalitu merania. V praxi je ju možno vypustiť iba v prípade, keď dopad okolitého svetla na scénu je minimálny.

4.3.3 Obraz priameho a nepriameho osvetlenia

Získanie obrazu priameho a nepriameho osvetlenia pomocou šachovnicových vzorov bolo popísané v spomínanej bakalárskej práci. V systéme SMISS sú implementované aj metódy, ktoré umožňujú získať separáciu z iných snímok.

Ak systém nemá k dispozícii šachovnicové vzory, zistí obraz priameho a nepriameho osvetlenia pomocou posledných k Grayových zrkadlových obrazov *bieleho* a *čierneho*¹ snímku. Pričom k je prepočítané z nastaviteľného parametra skenovania. Nasledujúca metóda bola navrhnutá autorom.

1. Najskôr zistíme obrazové *maximum* a *minimum* z k kamerových snímok osvetlených poslednými k Grayovými zrkadlovými obrazmi.
2. Pokiaľ k je menej ako počet Grayových zrkadlových obrazov, posledných k bitov Grayového zrkadlového obrazu pre dané pruhy nebude stačiť na to, aby odlišil indexy všetkých pruhov. Preto budú niektoré pruhy v posledných k vzoroch vždy biele a niektoré vždy čierne. Obraz *minima* a *maxima* teda bude obsahovať nekorektné pruhy.

¹ Pod bielym a čiernym snímkom sa myslí obraz scény nasnímaní pod plným a nulovým výkonom projektoru.

3. V ďalšom kroku sa budeme snažiť kompenzovať výskyt nekorektných pruhov. Čisto biele a čisto čierne pruhy posledných k vzorov sú na rozdielnych miestach, teda nekorektné hodnoty *maxima* a *minima* budú vždy zodpovedať iným miestam obrazu, teda množiny nekorektných bodov obrazu *maxima* a *minima* budú disjunktné. Hodnotu *maxima* možno však vypočítať z hodnoty *minima* a hodnotu *bieleho* a *čierneho* snímku nasledovne. $maximum = biely - minimum + čierny$. Analogicky možno vypočítať hodnotu *minima*. Keďže množiny nekorektné získaných hodnôt *maxima* a *minima* sú disjunktné, máme zaručené, že pre nekorektné získaný bod *maxima* bude bod *minima* získaný korektne, a teda je možné vyššie uvedeným spôsobom hodnotu *maxima* opraviť. Pre nekorektné získané hodnoty *minima* je postup analogický. Na to, aby sme však tieto body mohli opraviť, musíme ich vedieť odlíšiť od ostatných bodov obrazu. Táto selekcia je založená na splnení nerovnosti $maximum < biely - minimum + čierny - prah$. Pričom hodnota prahu je nastaviteľná užívateľom. Pre body *minima* bude selekcia fungovať analogicky.

S takto upravenými obrazmi *maxima* a *minima* postupujeme rovnako ako v prípade, že algoritmus vypočítal maximálne a minimálne obrazy z množiny snímok pod osvetleným šachovnicovými vzormi.

Ak systém nemá k dispozícii obrazy scény osvetlenej potrebnými vzorovými (kódovanými) obrazmi, nie je schopný vyhotoviť obraz priameho a nepriameho osvetlenia.

4.3.4 Dekódovanie Grayových kódovaných obrazov

Tu sa budeme venovať použitým metódam na dekodovanie Grayových zrkadlových obrazov. Teda akým spôsobom budeme dekodovať jednotlivé bity zakódované do pruhu projektora, ktorý dominantne vplýva na kamerový pixel¹.

4.3.4.1 Porovnávanie s priamym a nepriamym osvetlením

Pri tejto metóde sme využili prácu [23] na získanie obrazu priameho a nepriameho osvetlenia. Vďaka možnosti kompenzácie okolitého osvetlenia si môžeme

¹ Možné chyby dekodovania, ako aj stavy keď je projekcia kamerového pixla osvetlená viacerými pruhmi projektora sú rozoberané v kapitole Teoretické východiská.

dovoliť predpokladať, že scéna nie je osvetlená okolitým svetlom. Ak systém nemá k dispozícii obrazy priameho a nepriameho osvetlenia, metóda nemôže byť použitá.

Táto metóda bola navrhnutá autorom.

Pri tejto metóde budeme určovať, či je intenzita jednotlivých nasnímaných bodov bližšie k **hodnote priameho osvetlenia**, alebo k **hodnote nepriameho osvetlenia**. Podotýkame, že pod pojmom hodnota priameho osvetlenia, prípadne hodnota nepriameho osvetlenia, budeme chápať hodnotu príslušného bodu z obrazu priameho a nepriameho osvetlenia. **Zložkou priameho a nepriameho osvetlenia** budeme naopak nazývať časť intenzity skúmaného bodu z kamerového obrazu nasnímaného pri osvetlení scény Grayovým zrkadlovým obrazmi.

Ďalej budeme pracovať s osvetlenými bodmi, ktoré sú videné kamerou. Toto si môžeme dovoliť vzhľadom na implementovanú metódu na detekciu tieňov. Rovnako budeme pracovať iba s bodmi, u ktorých je hodnota priameho osvetlenia vyššia ako hodnota nepriameho osvetlenia. Body, ktorých hodnota nepriameho svetla je väčšia ako hodnota priameho svetla sú viac ovplyvnené okolitým svetelným žiarením a teda by sme pre ne nezískali presnú hodnotu umiestnenia. Z predchádzajúceho vyplýva, že budeme teda určovať, či je daný bod väčší ako priemer hodnoty priameho a nepriameho osvetlenia, alebo menší.

$$Prah = \frac{1}{2} \text{Hodnoty priameho osvetlenia} + \frac{1}{2} \text{Hodnoty nepriameho osvetlenia}$$

Aby sme sa presvedčili o korektnosti prístupu, rozoberieme si prípady ktoré môžu nastať.

1. Bod je osvetlený projektorom¹ a nachádza sa vo vnútri osvetlenej oblasti. V tomto prípade je bod osvetlený priamym svetlom projektora, jeho zložka priameho osvetlenia bude teda rovná hodnote priameho osvetlenia. Rovnako je osvetlený nepriamym svetlom. Vzhľadom na fakt, že hodnotu nepriameho osvetlenia ovplyvňujú najmä povrchy v blízkosti bodu, ktoré sú v tomto prípade osvetlené, bude sa zložka nepriameho osvetlenia v danom bode podobat' na hodnotu nepriameho osvetlenia. Hodnota príslušného pixla je teda približne rovná hodnote priameho osvetlenia + hodnote nepriameho osvetlenia. V tomto prípade bude teda odozva bodu vyššia ako prah.

¹ Budeme chápať tak, že projekcia daného pixla je osvetlená pruhom s bitovým ohodnotením 1.

2. Bod je osvetlený projektorom a nachádza sa na rozhraní medzi osvetlenou a neosvetlenou oblasťou. V tomto prípade je v okolí skúmaného bodu rozsvietená polovica bodov. Jeho zložka priameho osvetlenia bude rovná hodnote priameho osvetlenia. Pritom zložka nepriameho osvetlenia sa bude blížiť polovici hodnoty nepriameho osvetlenia. Hodnota daného pixla bude teda približne hodnota priameho osvetlenia + $\frac{1}{2}$ hodnoty nepriameho osvetlenia, čo je viac ako stanovený prah.
3. Bod nie je osvetlený projektorom a nachádza sa v neosvetlenej oblasti. Tento prípad je opačný ako prípad číslo 1. V tomto prípade je bod osvetlený len nepriamym svetlom. Zložka priameho svetla je teda nulová. Vzhľadom na to že v blízkom okolí sú jednotlivé body nerozsvietené, jeho zložka nepriameho svetla sa blíži k nule. Odozva tohto bodu sa teda blíži k nule a bod sa teda nachádza pod prahom.
4. Bod nie je osvetlený projektorom a nachádza sa na rozhraní medzi osvetlenou a neosvetlenou oblasťou. Tento prípad je z hľadiska zložky nepriameho osvetlenia podobný ako prípad číslo 2. Zložka priameho svetla je nulová rovnako ako v prípade číslo 3. Celková hodnota bude teda približne rovná polovici hodnoty nepriameho osvetlenia, čo je hodnota pod prahom.

Jednotlivé prípady svedčia od korektnosti riešenia. V praxi však pixle kamery získavajú svetelnú informáciu z oblasti, ktorá by sa dala špecifikovať ako štvorboký ihlan¹. Teda môže sa stať že zachytáva lúče z dvoch rôznych pruhov, a teda raz nastane prípad, že pruhy budú osvetlené rôzne. Chyba v tomto prípade však spôsobí iba zvolenie jedného z dvoch pruhov, z ktorých svetelné lúče daný pixel zachytáva.

Ďalej sa ukázalo, že prah získaný pevným priemerovaním hodnoty priameho a nepriameho osvetlenia bol v posledných vzoroch nedostatočný. Toto môže byť spôsobené vlastnosťami farebnej kamery a procesu „debayeringu“, rovnako aj nedokonalosti získaného obrazu priameho a nepriameho osvetlenia. Skúmaním sme zistili, že hodnota odozvy na posledných Grayových zrkadlových obrazoch² bola nižšia ako stanovený prah. Chyba teda nemá náhodný charakter, preto sme sa rozhodli využiť

¹ V prípade rozostrenej kamery uvažujeme o distribučnej funkcii, táto úvaha je však pre potreby pochopenia princípu komplikovaná.

² Tieto vzory sa vyznačujú vysokým počtom prechodov medzi čiernymi a bielymi oblasťami.

vážený priemer. Do vzťahu sme teda pridali konštantu α . Hodnota prahu sa teda stanoví nasledovne.

$$Prah = \alpha * Hod. priameho osvetlenia + (1 - \alpha) * Hod. nepriameho osvetlenia$$

Systém má taktiež implementovanú metódu na automatické zisťovanie optimálnej konštanty α pre konkrétne skenovanie. Táto metóda zisťuje priemerný výskyt hodnôt medzi hodnotou priameho a nepriameho osvetlenia.

Vážený priemer s automatickým zisťovaním optimálnej konštanty α sa ukázal byť efektívny a zvýšil presnosť dekódovania.

4.3.4.2 Adaptívne prahovanie

Metóda adaptívneho prahovania pre dekódovanie Grayových zrkadlových obrazov bola navrhnutá tak, aby bola schopná pracovať aj v prípade že nemá k dispozícii iné snímky scény ako tie, ktoré boli nasnímané pri osvetlení scény Grayovými zrkadlovými obrazmi. Pokiaľ však má k dispozícii aj iné obrazy, použije ich pre dosiahnutie presnejšieho výsledku.

V prípade ak máme k dispozícii obrazy scény pri bielom a čiernom osvetlení, budeme používať techniku popísanú v nasledujúcej podkapitole. V tomto prípade však nemáme k dispozícii obrazy scény osvetlenej negovanými vzormi, tieto obrazy si však môžeme dopočítať pomocou obrazov scény osvetlenej bielym a čiernym obrazom¹.

$$negovaný\ snímok = biely - snímok + čierny$$

Pričom pod snímkou rozumieme kamerový snímok nasnímaný pri osvetlení scény Grayovým zrkadlovým obrazom.

Použitá rovnosť bola odvodená z vlastností zložiek priameho, nepriameho a okolitého svetla jednotlivých osvetlených a neosvetlených oblastí. Porovnávanie teda bude ekvivalentné s podmienkou, či je intenzita daného bodu väčšia ako priemer hodnoty bodu osvetleným bielym a čiernym obrazom projektora.

Ak systém nemá k dispozícii žiadne dodatočné obrazy, zhotoví obraz minima a maxima z obrázkov scény osvetlených poslednými n Grayovými zrkadlovými obrazmi. Kde n je konštanta nastaviteľná užívateľom. Systém sa potom pre každý bod

¹ Nasledujúca metóda vyžaduje, aby nasnímané obrazy kamery boli korektné a aby sa v obraze nenachádzali prepálené miesta.

každého snímku kamery rozhodne, či je hodnota bodu väčšia ako priemer hodnoty maxima a minima. Ak áno, bod sa prehlási ako osvetlený, ak nie, bod sa prehlási za neosvetlený.

4.3.4.3 Porovnávanie voči negovaným obrazom

Porovnávanie voči negovaným vzorom je postup používaný v podobných zariadeniach. Táto metóda je z uvedených metód najrobustnejšia, avšak vyžaduje dvojnásobný počet použitých kódovaných obrazov, čím predlžuje dĺžku merania.

Princíp tejto metódy spočíva v tom, že sa na scénu každý Grayov zrkadlový obraz projektuje aj v negovanej verzii, kde sa čierne pruhy vymenia za biele a naopak. Pri detekcii sa potom porovnáva, či je odozva pre konkrétny bod vyššia v pôvodnom snímku ako v snímku negovanom¹. Ak áno, tento bod sa vyhodnotí ako osvetlený, v opačnom prípade sa vyhodnotí ako neosvetlený².

Táto metóda poskytuje aj dostatočnú robustnosť pri rozostrení obrazu projektora³.

4.3.5 Dekódovanie obrazov založených na fázovom posune

V súčasnosti systém využíva obraz sínusu a kosínusu projektovaného na objekt. Funkčná hodnota funkcie v danom bode projekcie sa počíta podľa vzťahu definovaného v podkapitole Kódovanie založené na fázovom posune kapitoly Teoretické východiská. Zo získaných funkčných hodnôt systém vypočíta podiel, ktorý je funkčnou hodnotou funkcie tangens. Následne sa využije inverzná funkcia na vypočítanie fázy. Nakoľko funkcia projektovaná na objekt je periodická, na získanie korektného pruhu projektora je potrebné zistiť v ktorej perióde sa bod nachádza. Z dekódovaných Grayových obrazov máme určený pruh projektora na pixlovú presnosť. Nájďme teda koreň, ktorý je od daného indexu vzdialený najmenej.

Na korektné fungovanie je potrebné použiť jemne rozostrený projektor. Taktiež pre minimalizáciu efektu globálneho osvetlenia treba použiť funkciu s úzkou periódou. Týmto získame vysokú deriváciu funkčných hodnôt, teda absolútna chyba pri rekonštrukcii funkčnej hodnoty bude znamenať nižší rozptyl v možných vstupných hodnotách funkcie.

¹ Metóda založená na prechode nulou (z angl. zero-crossing)

² Bity 1, 0.

³ Možné chyby v takomto prípade sú rozoberané v kapitole Teoretické východiská.

Nakoľko kódovanie priestoru na princípe fázového posunu je založené na analógovej báze, matematicky je možné kódovať celý priestor projektora¹ jedným kódovým obrazom. V praxi je však kvalita získanej informácie závislá na mnohých faktoroch, ktoré sme si popísali v kapitole Teoretické východiská. Teoreticky je však možné plynulo prechádzať medzi výhradným kódovaním priestoru pomocou tejto metódy ku čistému digitálnemu kódovaniu pomocou Grayových zrkadlových kódov. Tak možno adaptívne prelievať potenciál jednotlivých metód medzi rýchlosťou, presnosťou a robustnosťou získanej informácie.

Pre ilustráciu pripájame obrázok 17, v ktorom možno vidieť model získaný s použitím iba 5 kódovaných obrazov. Obrazy použité pre toto skenovanie boli obraz scény pod plným výkonom projektora, potom obraz pod osvetlením sínusovým a kosínusovým obrazom. Nakoniec sme použili 2 Grayové kódované obrazy, pričom v každom sme kodovali naraz 2-bity informácie. Z dekódovania daných Grayových obrazov sme boli schopní identifikovať 16 unikátnych oblastí, ktoré nám zabezpečili určenie korektnej periódy, a tak následné získanie celkovej fázy. Podotýkame, že v skenovaní neboli odstránené zatienené povrchy. Pozícia týchto bodov je tak náhodná. Tieto body sa dajú geometricky odstrániť vhodným filtrovaním.



Obrázok 17: 3D mračno bodov získané s použitím 5 kódovaných obrazov

¹ V zmysle jednej z obrazových dimenzií.

Zdokonalenie tejto metódy je časťou budúcej práce, nakoľko systém je pod neustálym vývojom.

4.3.6 Detekcia tieňov a reflexných povrchov

Metóda bola navrhnutá autorom.

Ak má metóda k dispozícii obraz priameho a nepriameho osvetlenia, pracuje nasledovne.

Pre každý obrazový bod zistí, či je obraz priameho osvetlenia nižší ako určený prah. Pokiaľ áno, daný bod sa prehlási za zatienený. Neosvetlené body sú totiž osvetlené iba okolitým a nepriamym svetlom, teda odozva neosvetlených bodov v obraze priameho osvetlenia má len šumovú hodnotu. Ak je ďalej hodnota nepriameho osvetlenia v bode vyššia ako hodnota priameho osvetlenia, znamená to, že odozva bodu je tvorená najmä svetlom odrazeným od okolitých povrchov. Takýto bod sa vyhodnotí ako reflexný a nebude uvažovaný v ďalšom postupe.

Pokiaľ však metóda nemá k dispozícii obraz priameho a nepriameho osvetlenia, zhotoví obraz maxima a minima z posledných n Grayových zrkadlových obrazov, pričom n je atribút z nastavení. Následne potom zisťuje, či je rozdiel hodnoty maxima a minima v bode menší ako nastaviteľný prah. V tom prípade sa bod prehlási za zatienený.

4.3.7 Kompozícia RGB

Systém SMISS bol rozšírený o možnosť snímania RGB textúry povrchu objektov pomocou jednoduchšej metódy kompozície RGB obrazu z jednotlivých zložiek. Systém SMISS na prácu využíva zväčša šedotónovú kameru, s ktorou nie je priamo možné zachytiť RGB obraz. Pridali sme teda možnosť použitia troch jednokanálových osvetlení (červená, modrá a zelená) pomocou projektora. Objekt je postupne nasnímaný šedotónovou kamerou pod osvetlením jednotlivými farebnými obrazmi. Z výsledných obrazov je potom vytvorená RGB textúra povrchu. Scénu nasnímanú touto technikou ponúkame na obrázku 18.



Obrázok 18: 3D model s textúrou získanou pomocou navrhnutej metódy kompozície RGB obrazov

4.3.8 Zisťovanie 3D súradníc z korešpondencie

V nasledovnej podkapitole si ozrejníme ako z výslednej korešpondencie získame 3D súradnice bodov. Danú korešpondenciu získanú z vyššie uvedených metód chápeme ako presnú a nemennú. Ďalšie metódy sú totiž nezávislé na rozlíšení zariadení a pracujú v analytickom priestore. Ďalej teda chápeme obrazový priestor projektora a kamery ako euklidovskú rovinu nad reálnymi číslami.

4.3.8.1 Z bodovej korešpondencie

Ak máme k dispozícii bodovú korešpondenciu, môžeme pomocou matíc vnútorných parametrov zariadení získať súradnice bodov v súradnicovom priestore priemetne kamery a projektora.

Následne použijeme inverzný algoritmus matematického modelu skreslenia šošovky. Ten nám vypočíta rektifikované súradnice.

Výsledné súradnice sú body na rovine, do ktorých sa premietne korešpondujúci bod. Teda korešpondujúci bod, bod priemetu a začiatok súradnicovej sústavy by mali ležať na jednej priamke. Keďže sú tieto súradnice v súčasnosti v lokálnej sústave súradníc každého zariadenia, dajú sa súradnice bodov na priemetni považovať za súradnice smerových vektorov polpriamok smerujúcich ku korešpondujúcemu bodu. Rovnako začiatky sústavy súradníc sa dajú chápať ako začiatkové body každej z polpriamok.

Ďalej otočíme a posunieme polpriamku vychádzajúcu z centra kamery pomocou matice vonkajších parametrov do sústavy súradníc projektora, ktorá sa považuje v systéme za svetovú.

Teraz máme k dispozícii parametrické vyjadrenie dvoch polpriamok v priestore. Vzhľadom na možné nepresnosti a diskrétné dátové typy budeme tieto priamky považovať za mimobežky. Použijeme algoritmus na získanie bodov polpriamok v mieste ich najbližšieho styku. Ak sú tieto body vzdialené viac ako definovaný prah, meranie sa prehlási za chybné a zahodí sa. Ak sú body dostatočne blízko, výsledný bod sa získa ako bod ležiaci v strede medzi nájdenými bodmi. Výsledné súradnice sa potom pošlú na výstup.

4.3.8.2 Z korešpondencie medzi bodmi kamery a pruhmi projektora

4.3.8.2.1 Priamy prístup

V tomto prípade nebudeme počítat' so skreslením projektora. Toto si môžeme dovoliť ak náš projektor nemá skreslenie šošovky.

Budeme postupovať podobne ako v predchádzajúcim prípade. Avšak polpriamka vychádzajúca z centra kamery nám definuje epipolárnu čiaru v priemetni projektora. Na získanie tejto čiary sa dá použiť fundamentálna matica alebo iná geometrická metóda.

Teraz zistíme prienik epipolárnej čiary s daným pruhom projektora. Ak je prienik v obrazovom priestore projektora, získali sme konkrétny bod na obrazovom priestore projektora a máme teda k dispozícii bodovú korešpondenciu. Teraz budeme pokračovať podobne ako v predchádzajúcej podkapitole, avšak nebudeme počítat' so skreslením šošovky projektora.

4.3.8.2.2 Iteratívny algoritmus na hľadanie prieniku

Metóda bola navrhnutá autorom.

Ak uvažujeme skreslenie projektora, máme situáciu zložitejšiu. Pruh projektora sa po skreslení premieta na priemetni ako krivka, a teda množina všetkých bodov, ktoré by mohli byť svetlom z pruhu priamo osvetlené, tvorí časť zakrivenej roviny.

Na získanie korektnej pozície bodu v priestore teda musíme vyrátať prienik polpriamky definovanej bodom v obrazovom priestore kamery s časťou zakrivenej roviny definovanej pruhom projektora.

Budeme postupovať tak, že sa budeme snažiť nájsť taký bod ležiaci na polpriamke vychádzajúcej z centra kamery, ktorý sa po projekcii do obrazu projektora premietne na konkrétny pruh¹. Teda budeme hľadať prienik projekcie polpriamky do obrazového priestoru projektora, ktorá sa premietne na krivku, s úsečkou definujúcou daný pruh projektora.

Tento prienik budeme hľadať konvergujúcim iteratívnym procesom.

Zvolíme si abstrakciu, pri ktorej budeme predpokladať, že existuje taký index pruhu projektora², ktorý ak zvolíme za korešpondujúci pruh a vypočítame prienik bez ohľadu na skreslenie šošovky, dostaneme sa do bodu, ktorý sa pri dbaní na skreslenie šošovky premietne do indexu pruhu získaného zo skenovacieho procesu.

V ďalšom priebehu metódy budeme uvažovať indexy jednotlivých pruhov a priemetov na rovine priemetne projektora. Teda nebudeme uvažovať v pixloch, ale v súradnicovej sústave priemetne. Bod optickej osi tu má teda súradnice 0,0.

Budeme teda hľadať index imaginárneho pruhu v súradnicovom priestore priemetne projektora. Najskôr si za aproximáciu tohto indexu zvolíme prepočet indexu pruhu zisteného z korešpondencie do sústavy súradníc priemetne. Následne budeme v cykle robiť nasledovné.

1. Pomocou súčasnej aproximácie zistíme prienik bez ohľadu na skreslenie projektora. Tým dostaneme bod na polpriamke.
2. Tento bod premietneme do priemetne projektora a zistíme, ako ďaleko je bod od pruhu získaného zo skenovacieho procesu. Bez ujmy na všeobecnosti uvažujme vertikálne pruhy. Nech je index súčasnej aproximácie α a index pruhu získaného zo skenovacieho procesu β . Ďalej písmenom γ označme x-ovú súradnicu projekcie vypočítaného bodu z aproximácie α . Ako novú aproximáciu α zvolíme index $\alpha - (\gamma - \beta)$. Pričom ak budú mať α a β rôzne znamienka, položíme za číslo 0. Všimnime si, že $(\gamma - \beta)$ vyjadruje odchýlku od optimálnej hodnoty.
3. Celý proces opakujeme, až kým vzdialenosť dvoch po sebe idúcich aproximácií bodu nebude menšia ako nastaviteľný prah. Ak cyklus prekročí počet iterácií nastaviteľný v systéme, cyklus skončí a bod sa zahodí.

¹ V tomto prípade chápeme túto projekciu za imaginárnu. Keďže projektor je v skutočnosti inverzný model kamery, rovnaké zákonitosti ako pri kamere fungujú opačným smerom.

² Budeme pracovať s reálnymi číslami. Pruh projektora považujeme za úsečku.

Ak cyklus skončil úspešne, nájdený bod sa pošle na výstup.

Daný algoritmus vďaka povahe modelu skreslenia konverguje rýchlo. V aplikácií, v ktorej sme algoritmus testovali, sme pre všetky relevantné body dostali výsledný bod na maximálne 4 iterácie, pričom ako prah bola zvolená tisícina milimetra. Počet potrebných iterácií sa však môže meniť od nastavení a konkrétneho hardvéru.

4.3.9 Získanie váhovej mapy pre obraz projektora

V podkapitole Limitácie systému sme si popísali problém vysokého dynamického rozsahu scény, ktorý má vo všeobecnosti za následok nekorektné nasnímanie jednotlivých oblastí snímaného objektu, čo môže mať za následok chyby v geometrií, turbulenciu a iné nepresnosti. Pre finálnu verziu snímacieho zariadenia je takýto problém nežiaduci.

Náš prístup riešenia problému nedostatočného dynamického rozsahu zariadení pracujúcich na báze štruktúrovaného svetla je využitím dynamického rozsahu projektora, vďaka ktorému dokážeme znížiť dynamický rozsah snímanej scény, a tak zabezpečiť korektné snímanie. Toto implementujeme pomocou aplikovania váhovej mapy pre obraz projektora, ktorá adaptívne znižuje energiu určitých oblastí. V tejto podkapitole si popíšeme ako danú mapu získať.

4.3.9.1 Váhová mapa projektora

Pod váhovou mapou projektora W rozumieme rastrový šedo-tónový obraz veľkosti obrazu projektora, ktorý pre každý obrazový bod určuje škálu¹, ktorou budeme násobiť príslušný bod ľubovoľného projektovaného obrazu. Táto škála ale určuje násobok hodnoty plnej energie, teda dané škálovanie nebude aplikované na obrazové body (z obrazovej funkcie I), ale najskôr hodnotu obrazového bodu prevedieme na mieru, ktorá je v lineárnej závislosti od vyžarovanej energie. Výslednú hodnotu prenásobíme škálovacím faktorom a následne prevedieme naspäť do obrazového bodu, čím získame váhovaný obraz I^* .

$$I^* = g^{-1}[g(I) * W]$$

¹ Reálne číslo z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$

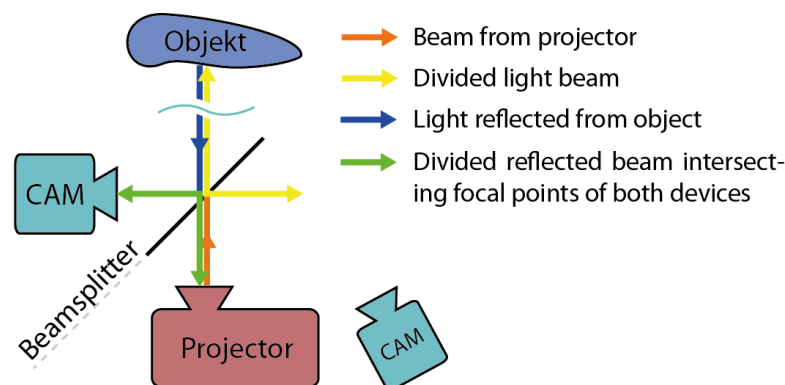
Príslušná hodnota sa potom použije vo finálnom obraze. Funkcia prevodu¹ medzi hodnotou projektorového obrazu a mierou lineárne závislou od energie $g(X)$ je získaná meraním pre jednotlivé obrazové hodnoty počas kalibrácie, teda ju vieme získať pre ľubovoľný projektor.

Aplikovaním správnej váhovej mapy môžeme znížiť dynamický rozsah snímanej scény.

4.3.9.2 Získanie Váhovej mapy projektora

Obraz snímaný kamerou vieme ľahko segmentovať na oblasti pre a pod exponované. Avšak aby sme zistili, ktoré oblasti projektorového obrazu treba upraviť, potrebovali by sme poznať korešpondenciu medzi obrazovým priestorom kamery a projektora. Táto korešpondencia je však vo všeobecnosti ekvivalentná rekonštrukcií. Teda na korektné vytvorenie Váhovej mapy by sme potrebovali najskôr zrekonštruovať scénu. Takýto postup je samozrejme nežiaduci.

Ak by sme však dokázali umiestniť kameru tak, že ohnisko kamery a projektora by ležali v rovnakom bode, daná korešpondencia by nezávisela na geometrii, a teda by bola konštantná. Toto ale fyzicky nie je možné docieľiť, avšak dá sa daný efekt docieľiť opticky. Pridáme teda do systému novú kameru a polopriesvitné zrkadlo (angl. beamsplitter). Časť lúčov z projektora prechádza cez polopriesvitné zrkadlo a naráža do scény. Odrazené svetlo prechádza naspäť a jeho časť sa odráža od pridaného zrkadla do pridanej kamery, tak ako je na obrázku 19. O presnej realizácii budeme hovoriť v kapitole Implementácia.



Obrázok 19: Schematické optické usporiadanie systému HDR SMISS

¹ U komerčne dostupných projektorov sa jedná vo všeobecnosti o takzvanú gama krivku. V bežnom prípade sa používa gama krivka s faktorom 2.2. Nakoľko ale nie je zaručená korektná implementácia tohto matematického modelu, danú funkciu treba nakalibrovať.

Zložku svetla vychádzajúcu z projektora, ktorá je odrazená od zrkadla je potrebné utlmiť, nakoľko by mohla spôsobiť šum¹ (žltá šípka smerujúca doprava).

Týmto postupom sme získali nové možnosti. Pridaná kamera je ohniskom zarovnaná s projektorom. Teda korešpondencia medzi obrazovými priestormi je konštantná a možno ju získať z kalibrácie.

Kalibrácia danej korešpondencia by teoreticky mohla byť vyhotovená na ľubovoľnej scéne, avšak pre minimalizáciu šumu a chýb je odporúčane využiť bielu plochú tabuľu s difúznym materiálom. Na tabuľu sú následne projektované horizontálne aj vertikálne Grayové zrkadlové obrazy, teda každý pixel projektora je kódovaný unikátnym binárnym vektorom. Nakoľko je scéna ideálna, rovnako ako aj SNR, dynamický rozsah takejto scény sa blíži k hodnote 1, teda nebude dochádzať ku chybám rekonštrukcie. Jednotlivé binárne vektory sú potom dekódované pixlami kamery. Takto získame zobrazenie z kamerového obrazového priestoru do obrazového priestoru projektora. Toho zobrazenie je všeobecne neinjektívne (z dôvodu aliasingu). Toto však nie je problém nakoľko inverzné zobrazenie nepotrebujeme. Následne vypočítame pre každý obrazový bod projektora, koľko kamerových bodov na neho smeruje. Podľa tohto počtu potom nastavíme váhu vstupnej informácie² (ak na neho smerujú napríklad 3 pixle kamery, váha každého spojenia bude $\frac{1}{3}$). Pixle projektora na ktoré nesmeruje žiadny pixel kamery budú potom dorátané z okolia³. Táto kalibrácia musí byť uskutočnená iba raz za predpokladu nezmenenia umiestnenia zariadení a zachovania konštantných parametrov optiky.

Algoritmus na získanie váhovej mapy sa uskutoční pred samotným skenovaním. Jednotlivé snímky vystupujúce v algoritme sú šedotónové a využívajú reálne čísla⁴. Dôležitým potrebným krokom je nastavenie správnej expozície kamery, ktorá bude použitá neskôr pri skenovaní. Táto expozícia musí byť dostatočná, aby sme boli schopní

¹ Vo finálnom riešení je vhodné použiť polarizačné polopriesvitné zrkadlo. Pokiaľ pred takýto optický komponent predradíme lineárny polarizačný filter, vieme doceliť aby svetlo smerujúce z projektora prechádzalo priamo na scénu (odrazi sa tak len zanedbateľná časť energie). Polopriesvitné zrkadlo musí byť ďalej umiestnené v blízkosti optiky, aby boli prípadne čiastočky prachu v obraze neostre. Ďalej je možné postaviť dané polopriesvitné zrkadlo až za optiku projektora. V tomto prípade by pridaná kamera pozostávala iba zo senzora a spolu s projektorom by zdieľala rovnakú optiku.

² K tomuto dochádza z dôvodu rozdielnosti v rozlíšení. Pre tento prípad by bolo optimálne využiť kameru s identickou optikou a absolútne zarovnaným senzorom na pixel úrovni. To by však bolo konštrukčne takmer nemožné zostrojiť, na správne fungovanie algoritmu to však nie je potrebné.

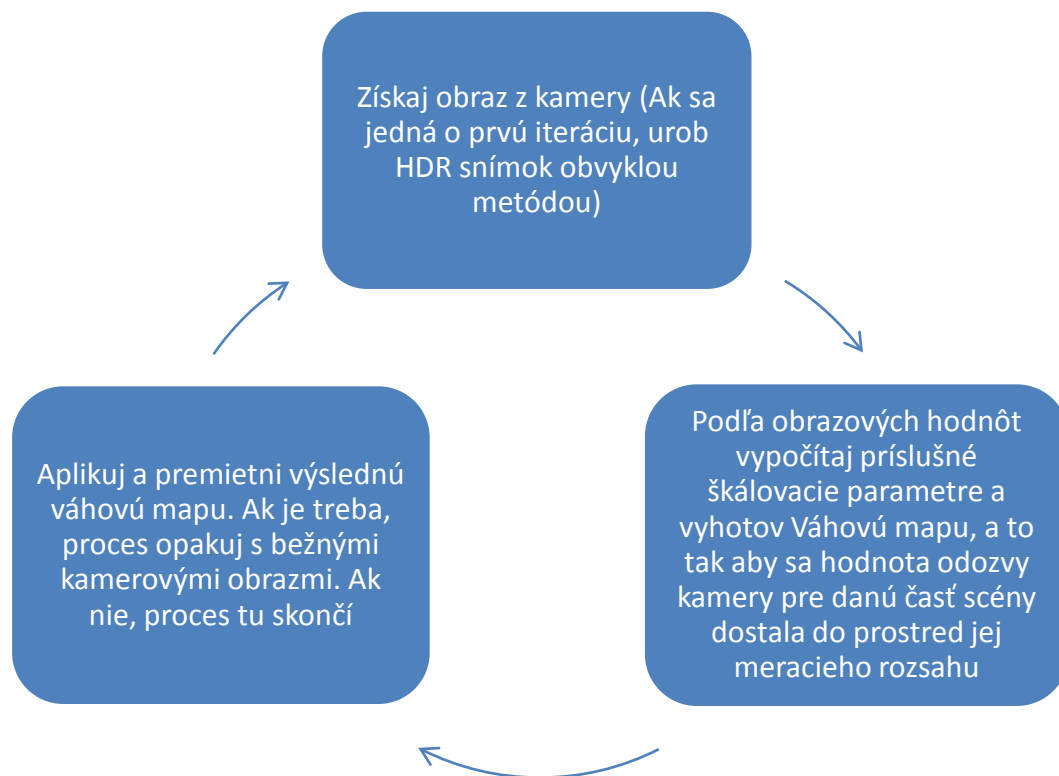
³ Takéto pixle môžu vzniknúť taktiež kvôli aliasingu.

⁴ Ak pracujeme s 8-bitovými obrázkami, hodnote 255 prislúcha hodnota 1. V algoritme sa bude vyskytovať aj HDR obraz kamery, ktorého obrazové body môžu prevyšovať hodnotu 1.

nasnímať aj nízko odrazivé povrchy, nakoľko váhovou mapou projektora sme schopní energiu vyžarovania iba znížiť, nie však zvýšiť. Odozvy kamerových bodov budú uvádzané pre zvolenú expozíciu (pri HDR akvizícií obrazu kamery sa bude expozícia dočasne meniť. Hodnoty však budú zodpovedať hodnotám pri zvolenej expozícií).

```
W <- 1 //váhová mapa projektora
I <- 1 //obrázok projektora s plnou energiou
Projector.Project(g'(g(I) * W))
P = Camera.CaptureHDR
  //Použi konvenčnú metódu HDR akvizície viacerými expozíciami
do
  W' <- 0 //nová váhová mapa projektora
  foreach pixel in P do
    s <- 0.5 / pixel.value
    //naškáľuj energiu doprostred dynamického rozsahu
    W'[pixel.correspondence] <-
      W'[pixel.correspondence] + s * pixel.correspondence.weight
    //pokiaľ existujú napríklad 3 prepojenia na
    //pixel.correspondence, pixel.correspondence.weight bude
    //1/3
  //End foreach
  Vypočítaj váhy pre neadresované body v W' s okolitých pixlov
  Gauss(W')
  //Aplikuj Gausov filter na W' z konstantným sigma
  //na kompenzovanie aliasingu
  W <- W * W'
  Projector.Project(g'(g(I) * W))
  P = Camera.Capture
  //Použi bežné snímanie
until P neobsahuje preexponované body
or bolo dosiahnuté maximum počtu iterácií
```

Pre jednoduchosť ponúkame aj schematický zápis na obrázku 20.



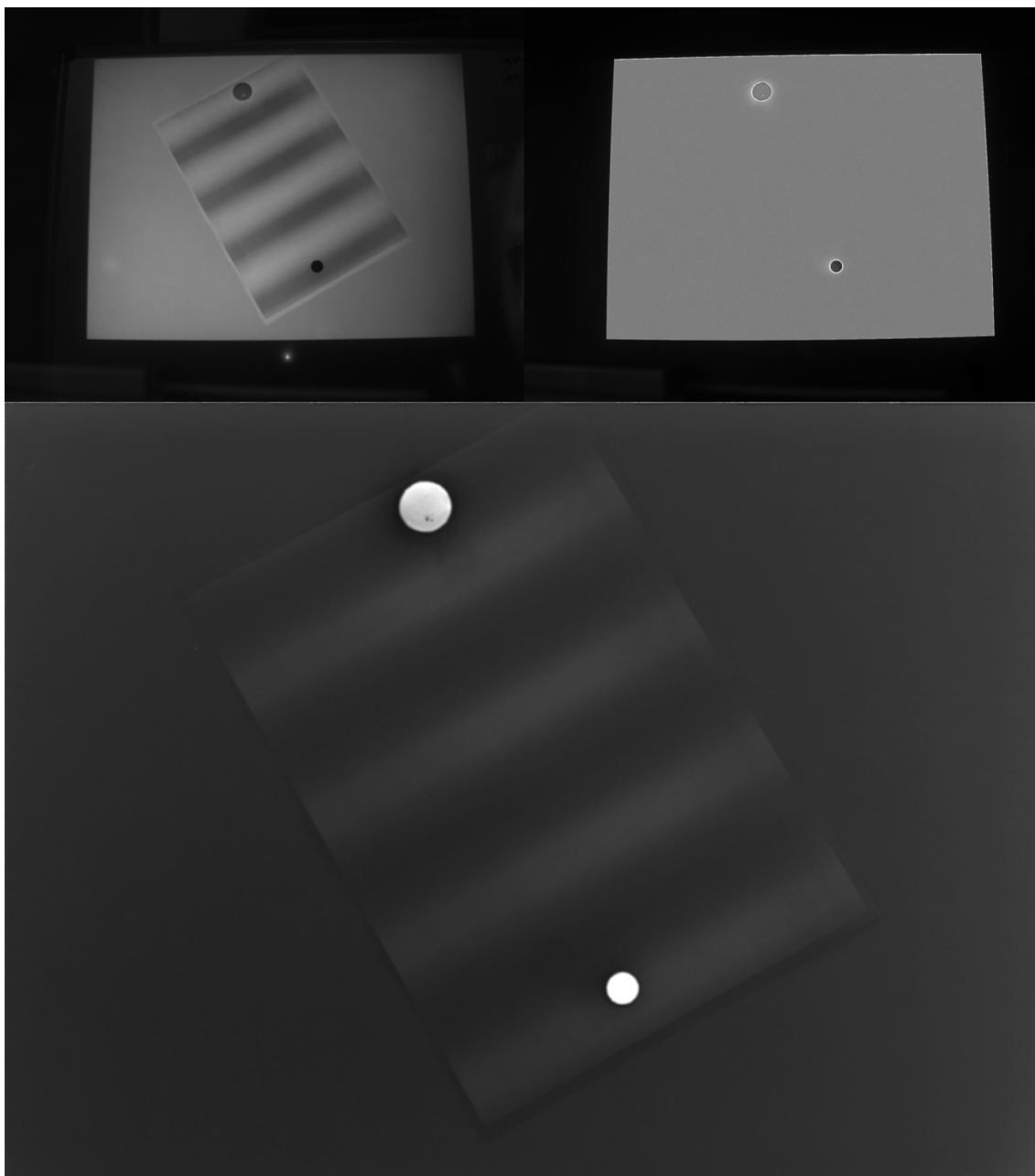
Obrázok 20: Schematický popis algoritmu

V našej implementácii sme použili 3 iterácie, pri ktorých sme znížili dynamický rozsah scény tak, že sa blížil hodnote 1.

Výsledok algoritmu na scéne s vytlačeným sínusovým vzorom ponúkame na obrázku 21.

Tento proces treba uskutočniť iba raz, a to pred zahájením snímania, výsledná váhová mapa sa potom dá použiť pri projektovaní ľubovoľného štruktúrovaného obrazu. Teda metóda potrebuje iba konštantný nárast pre čas skenovania¹, nakoľko nezávisí na počte obrazcov potrebných pre akvizíciu geometrie.

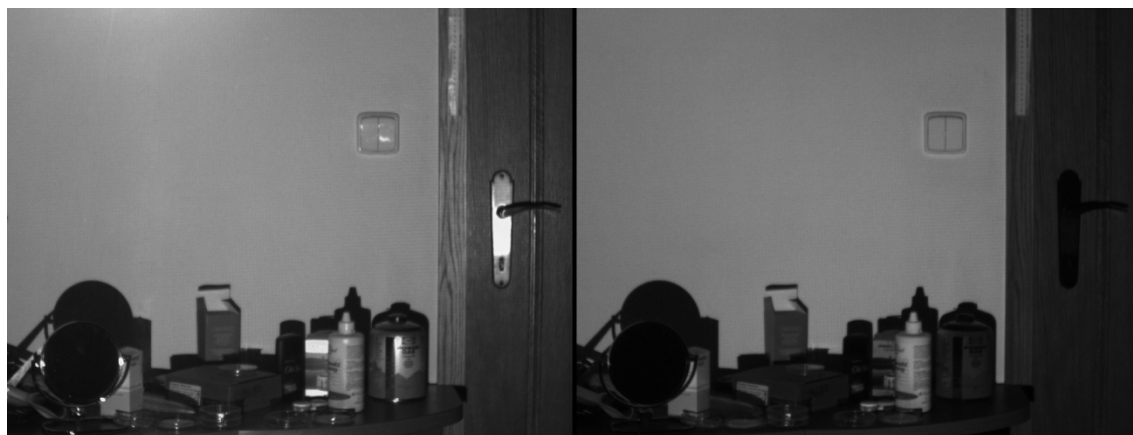
¹ Pokiaľ by sme uvažovali napríklad šumovú hodnotu 8-bitovej kamery z lineárnou odozvou za 5, jej dynamický rozsah by bol približne 50:1. Uvažujme scénu s dynamickým rozsahom 400:1. Pri využití štandardnej metódy HDR akvizície by sme potrebovali minimálne $3 = \log_2 \left(\frac{400}{50} \right)$ krát viac snímok kamery. S našim riešením pridáme potrebu iba šiestich prídavných snímok. Pri využití 30 kódovaných obrazoch tak získame 250 percentný nárast rýchlosti $\left(\frac{90}{36} \right)$. Ak by sme chceli zabezpečiť rovnomernú distribúciu SNR po obraze, zrýchlenie by bolo ešte výraznejšie.



Obrázok 21: Obraz kamery pod konštantným biely osvetlením (Vľavo hore). Obraz kamery pod osvetlením s aplikovanou váhovou maskou (Vpravo hore). Výsledná použitá váhová maska (dole)

Nakoľko sme ale umiestnili novú kameru priamo do ohniska projektora, nie je možné s touto kamerou uskutočniť geometrickú rekonštrukciu. Teda potrebujeme efekt Váhovej mapy projektorového obrazu pre obraz pôvodnej (geometrickej) kamery. Táto kamera však leží na odlišnom mieste, teda jej snímaný obraz sa od novo pridanej kamery môže líšiť. Potrebujeme teda zabezpečiť, aby sa materiály v našej scéne správali Lambertovsky. Toto zabezpečíme metódou separácie obrazu na spekulárnu a difúznú zložku s využitím polarizácie. Svetlo vychádzajúce z projektora polarizujeme pomocou lineárnej polarizácie. Rovnako pridáme polarizačné filtre aj na kamery, avšak rovina

polarizácie bude kolmá na rovinu polarizácie filtra projektora. Jednou z vlastností spekulárnej zložky odrazeného svetla je vysoká miera zachovania polarizácie. Toto svetlo bude teda na kamerách odfiltrované. Naopak pre difúznu (Lambertovskú) zložku platí, že vzniká náhodnými odrazmi v mikroštruktúre materiálu a svetlo sa depolarizuje, teda do kamier prenikne časť intenzity¹. Takto teda bude rekonštrukcia založená na difúznej zložke odrazeného žiarenia. Materiály, ktoré sa blížia zrkadlu teda danou metódou nebude možné snímať, avšak takéto materiály sú problémom ľubovoľného optického snímania, ako aj laserových senzorov založených na triangulácii. Spomínaná nevýhoda teda nepribudla pridaním nového hardvéru. Získame dokonca možnosť detegovania takýchto materiálov a možnosť blokovať príslušné časti projektorového obrazu, čím sa výrazne zníži efekt inter-reflexií. Ukážku fungovania použitej metódy ponúkame na obrázku 22.



Obrázok 22: Obrázok scény pod osvetlením projektora konštantným svetlom bez filtrácie (Vľavo).
Obrázok scény pod rovnakým osvetlením s použitím filtrácie pomocou polarizácie (Vpravo)

Nevýhodou je však skutočnosť, že priamo odrazené svetlo, ktoré je lineárne polarizované môže ovplyvňovať ostatné časti scény, kde sa po ďalšom odraze už nemusí vyfiltrovať na polarizačných filtroch kamery.

Výhodou metódy je mimo iného možnosť maskovať obraz projektora, a tak vylúčiť niektoré časti scény zo spracovania. Viac o týchto myšlienkach si predostrieme v kapitole Budúca práca.

¹ Tento pomer je závislý na použitom polarizačnom filtri. Kvalitné filtre prepustia okolo 40% nepolarizovaného svetla.

4.4 VIZUALIZÁCIA – POHĽADOVO ZÁVISLÉ STEREO

V tejto podkapitole si popíšeme princíp konkrétneho prototypu, ktorý sme zostrojili pre prezentáciu nasnímaných dát systémom SMISS. Tak, ako bolo písané v podkapitole Vizualizácia kapitoly Teoretické východiská, pod pohľadovo závislým stereo zobrazením chápeme stereo zobrazenie, ktorého obsah je závislý na polohe očí pozorovateľa. Výsledkom je teda pocit, že objekt zobrazený na stereo monitore skutočne vystupuje a lieta v priestore pred, prípadne za monitorom. Model bude teda zaregistrovaný v skutočnom 3D priestore. Pozorovateľ si tak má možnosť objekt poobzerať zo strán.

Na zistenie polohy očí pozorovateľa sme použili sledovanie infračervených diód, ktoré boli namontované na stereo okuliarech (zároveň slúžili na oddelenie jednotlivých obrazov zobrazených na monitore). Tieto diódy sme sledovali pomocou páru stereo kamier.

Vypočítanie 3D polohy diódy v priestore pomocou 2 kamier pracuje na identickom princípe ako klasické stereo videnie.

Na sledovanie IR diód v 3D priestore sme vytvorili knižnicu, ktorá obsahuje funkčnú časť zastrešujúcu všetko spracovanie a geometriu. Rovnako bolo vytvorené užívateľské rozhranie na vizualizáciu sledovania a na zabezpečenie kalibrácie.

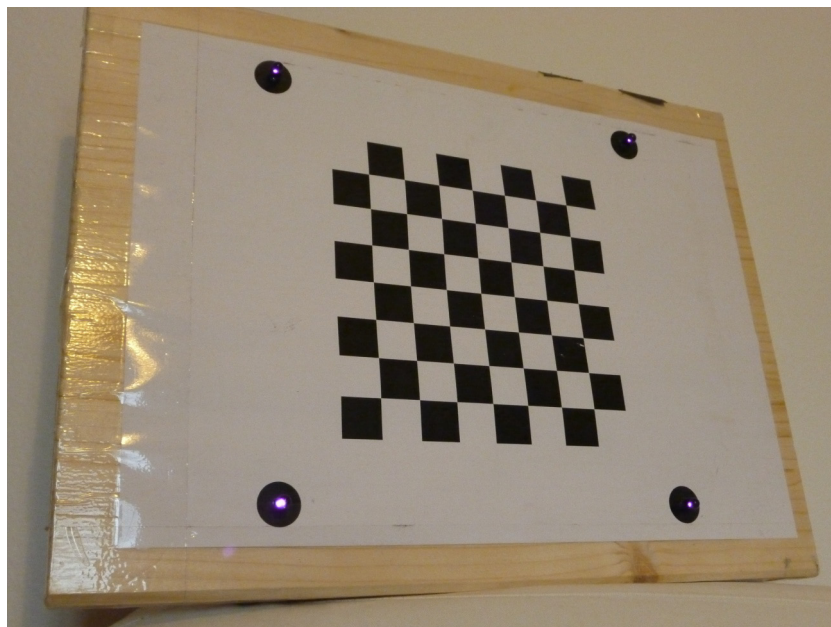
4.4.1 Kalibrácia

Na kalibráciu bola použitá identická metóda, ako na kalibráciu systému SMISS. Bol vytvorený kalibračný predmet, ktorý zahŕňa 4 infračervené diódy umiestnené v rohoch štvorca s presne stanovenou dĺžkou strany. Kalibračný predmet môžete vidieť na obrázku 23.

Počas kalibrácie dodávajú kamery nepretržite pozície nájdených bodov v obraze. Tieto body sú usporiadané podľa polárnych súradníc okolo ťažiska, následne sú ohodnotené niekoľkými príznakmi, na základe ktorých sú body v jednotlivých obrazoch popárované¹. Užívateľ si môže zvoliť časovač, ktorý v cykle odoberá korešpondujúce pary bodov. Takto systém urobí, iba ak na oboch obrazoch boli nájdené všetky 4 body.

¹ Nakoľko pri kalibrácii nepoznáme umiestnenie kamier, nemožno na získanie korešpondencie využiť epipolárnu geometriu.

Nakoľko sú na kalibráciu v každej polohe kalibračného telesa použité iba 4 vrcholy, je potrebné zhotoviť viac snímok. Po skončení procedúry¹ je kalibrácia ukončená a systém vypočíta vnútorné aj vonkajšie parametre kamier, ktoré sú následne uložené do kalibračných súborov.



Obrázok 23: Kalibračný predmet použitý pre kalibráciu prototypu pohľadovo závislého stereo zobrazenia

Daný pár je potom klasifikovaný ako kalibrovaný, a pri opätovnom použití sa automaticky kalibračné dáta načítajú zo súboru a stereo pár je možné okamžite použiť.

Po kalibrácii je knižnica schopná lokalizovať jednotlivé infračervené diódy v priestore v metrických súradniciach. Výsledné 3D súradnice sú však v súradnicovej sústave definovanej jednou z kamier. Na jednoduchú implementáciu pohľadovo závislého stereo zobrazenia potrebujeme súradnice v súradnicovom priestore monitora².

Aby sme mohli previesť súradnice zo súradnicového priestoru kamery na súradnicový priestor monitora, je potrebné poznať súradnice bodov na rovine monitora v súradnicovom priestore kamery. Tieto body musia byť také, aby sa z nich dali odvodiť súradnicové vektory, a stred súradnicovej sústavy.

Vytvorili sme metódu, ktorá získa maticu prechodu. Nakoľko pozorovateľ je upriamený na monitor, určenie jeho polohy je možné najlepšie ak je systém umiestnený

¹ Procedúra skončí, keď užívateľ potvrdí koniec kalibrácie v užívateľskom rozhraní.

² Súradnicový priestor monitora budeme chápať ako 3D metrický euklidovský priestor so stredom v strede obrazu monitora, pričom jeho osi sú určené prirodzene (dve osi obrazu a tretia os smerujúca za monitor – kolmá na rovinu obrazovky).

pred používateľom. Takto systém ale nie je schopný priamo pozorovať plochu monitora. Systém budeme teda kalibrovať pomocou zrkadla.

V prvom kroku umiestnime zrkadlo tak, aby stereo kamerový systém bol v obraze schopný pozorovať celú plochu monitora. Následne užívateľ aktivuje kalibráciu plochy zrkadla. V tejto fáze užívateľ pohybuje infračervenú diódu po ploche zrkadla, čím vytvára mračno 3D bodov. Pokiaľ je bodov dostatok¹, užívateľ aktivuje kalibráciu plochy monitora. V tomto kroku musí najskôr priložiť IR diódy postupne k jednotlivým rohom obrazovky². Následne môže užívateľ pohybovať diódou po ploche monitora, čím sa vytvára ďalšie mračno bodov.

Po skončení kalibrácie prichádza k vyhodnoteniu. Najskôr sa mračnu bodov definujúcich rovinu zrkadla preloží rovina pomocou metódy najmenších štvorcov. Následne sa nasnímané 3D pozície mračna bodov definujúcich plochu monitora transformujú pomocou rovinnej súmernosti definovanej rovinou zrkadla. Podobne sa transformujú aj súradnice definujúce rohy obrazovky.

Mračnom, ktoré definuje rovinu monitora sa taktiež analyticky preloží rovina. Na túto rovinu sú potom naprojektované kolmou projekciou jednotlivé 3D súradnice rohov monitora³.

Modifikované súradnice rohov monitora sú následne použité na vypočítanie stredu obrazovky, ako aj šírky a výšky obrazu monitora v milimetroch. Pomocou daných bodov potom vypočítame základné súradnicové osi, tak aby na seba boli kolmé⁴.

Z vypočítaných hodnôt potom zostrojíme maticu prechodu medzi priestormi súradníc.

4.4.2 Lokalizácia bodu v priestore

Pri lokalizácii sa používateľ pozerá na monitor. Infračervené diódy na okuliaroch vyžarujú žiarenie, ktoré je zachytené stereo párom kamier. Daný pár vyhodnotí 3D pozíciu jednotlivých diód a prevedie ich do súradnicového priestoru monitora. Nájdene pozície však nezodpovedajú pozície očí. Preto sa nájde ťažisko

¹ Pre kalibráciu sme využívali niekoľko stoviek vzoriek. Tento krok trvá asi minútu.

² Akvizícia pozície bodu je uskutočnená po zapnutí danej diódy v danej pozícii.

³ Zvyšujeme tým presnosť a zabezpečujeme, aby všetky body ležali na tej istej rovine.

⁴ Body nasnímané ako rohové nemusia vytvárať obdĺžnik vzhľadom na možné nedostatky určenia polohy. Jednotlivé osi sú vypočítané tak, aby čo najlepšie odpovedali nameraným vrcholom.

medzi získanými bodmi. Následne sa vypočítajú body na úsečke definovanej nasnímanými súradnicami, ktoré sú vo vzdialenosti $\frac{\text{vzdialenosť očí}}{2}$ od ťažiska. Výsledok môžeme vidieť znázornený na obrázku 24.

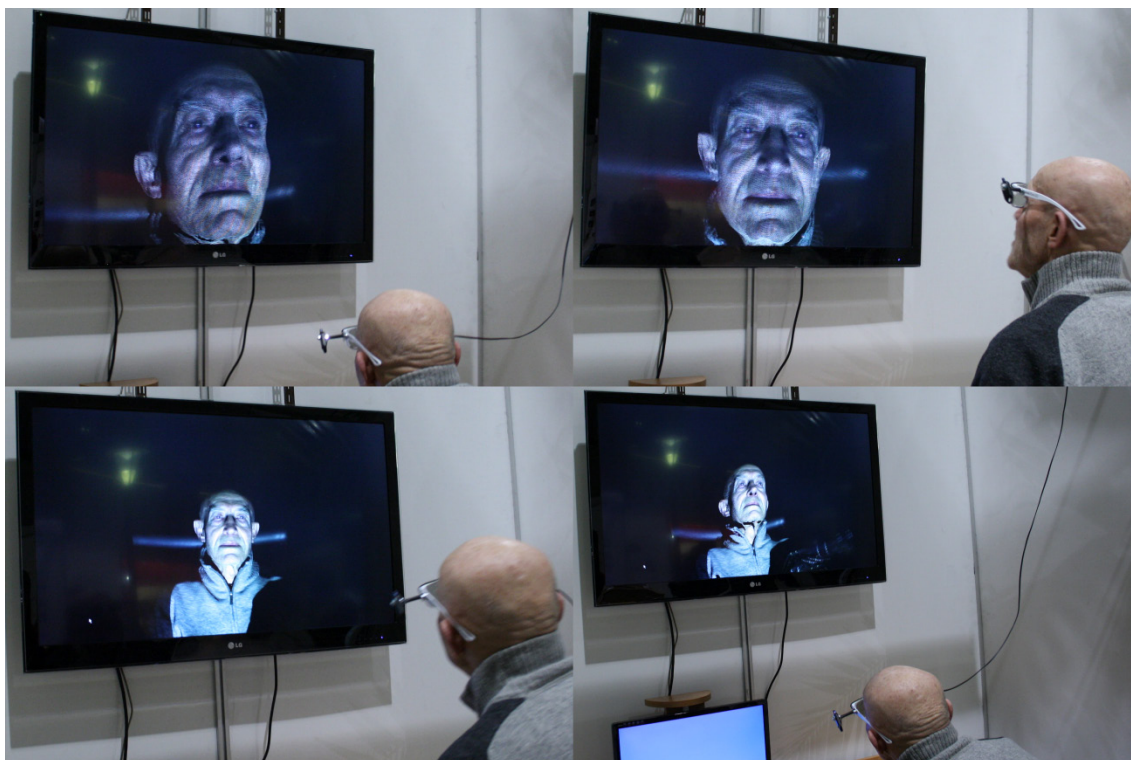


Obrázok 24: Umiestnenie polohy očí

Vzdialenosť očí je tak možné nastaviť pre zvýšenie alebo zníženie stereo efektu. Pre realistické vnímanie zobrazeného objektu je však potrebné použiť vzdialenosť očí pozorovateľa, ktorá sa medzi ľuďmi líši pomerne málo. Podotýkame, že pre úplne korektné správanie by bolo optimálne rozostaviť diódy tak, aby sa výsledné polohy virtuálnych bodov skutočne nachádzali v očiach pozorovateľa. Malá odchýlka má však len zanedbateľný vplyv pri reálnom použití.

Následne sa použije získaná súradnica každého oka spolu s súradnicami rohov obrazovky a vypočíta sa matica projekcie¹. Následne potom pre každú pozíciu oka vyrenderujeme korektný obraz, ktorý potom zobrazíme na monitore. Ponúkame množinu obrázkov 25 pre pochopenie princípu.

¹ Umiestnime virtuálne projekčné plátno do pozície reálneho (monitoru).



Obrázok 25: Ilustračné obrázky fungovania prototypu pohľadovo závislého stereo zobrazenia

5 IMPLEMENTÁCIA

V tejto kapitole si povieme o niekoľkých implementačných detailoch týkajúcich sa systému SMISS a HDR SMISS. Povieme si niečo o jednotlivých vybudovaných prototypoch a na záver si popíšeme aj implementáciu prototypu pohľadovo závislého stereo zobrazenia.

5.1 SYSTÉM SMISS

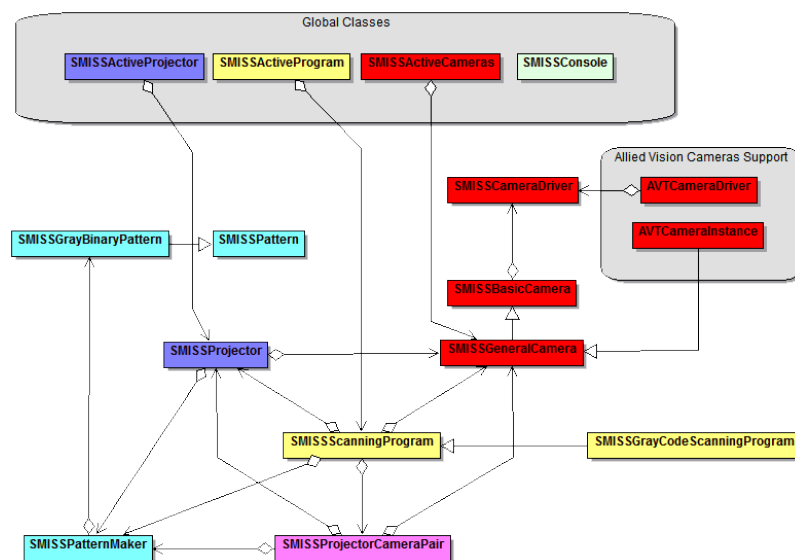
5.1.1 Softvér

Ako nástroj na implementáciu systému SMISS slúžilo Microsoft Visual Studio 2008. Ako základ funkcionality bolo použité natívne C++. Užívateľské rozhranie bolo implementované v C++/CLI, teda v manažovanej forme C++ fungujúcej pod Microsoft .NET platformou.

Na prácu s obrázkami a kalibráciu zariadenia používame knižnicu OpenCV.

5.1.1.1 Funkcionalita

Systém je rozčlenený do niekoľkých modulov. Rozčlenenie základných tried si môžeme všimnúť na obrázku 26 v class diagrame.



Obrázok 26: Class diagram funkcionality projektu SMISS. Vyhotovené programom UML Studio 8.0.

Samotný skenovací proces je v réžii SMISSGrayCodeScanningProgram, ktorá je synom všeobecnej triedy SMISSScanningProgram. Na svoju prácu potrebuje mať asociovaný projektor a neprázdnu množinu kamier. Taktiež pre každú dvojicu

medzi projektorom a kamerou potrebuje informácie o ich vzájomnej polohe. Na vytváranie vzorových kódovaných obrazov používa triedu `SMISSPatternMaker`.

`SMISSProjector` je trieda, ktorá sa stará o projekciu obrázkov, kalibráciu projektora¹, kalibračné parametre, prácu s projektorom a iné. Rovnako vie vypočítať projekcie bodov priestoru do obrazu projektora, ako aj inverznú transformáciu zo súradníc obrazového priestoru projektora do súradníc priemetne.

Abstraktná trieda `SMISSGeneralCamera` slúži na prácu s kamerami. Ponúka pokročilé metódy ako kalibrácia kamery, prepočítavanie projekcie a mnoho iných. Umožňuje snímať scénu v rôznych módoch. Základnú funkcionálnu zdedila od abstraktnej triedy `SMISSBasicCamera`. O implementáciu konkrétnych metód priamo súvisiacich z ovládaním kamery sa stará trieda `AVTCameraInstance`.

`AVTCameraInstance` je potomkom `SMISSGeneralCamera` a implementuje základné operácie s konkrétnou kamerou. Táto trieda je určená na prácu s kamerami od spoločnosti Allied Vision Technologies. Pri vytváraní inštancie tejto triedy sa vytvorí, ak už vytvorená nie je, konkrétna inštancia triedy `AVTCameraDriver`, ktorá inicializuje potrebné ovládače pre danú kameru.

Trieda `SMISSProjectorCameraPair` sa stará o vzájomné pôsobenie kamery a projektora. Zahŕňa geometrické operácie, ako rátanie prienikov, počítanie epipolárnych čiar. Ďalej kalibráciu projektora a kamery ako páru, teda zistenie matice vonkajších parametrov pre prechod medzi sústavou súradníc kamery a projektora a naopak.

Triedy `SMISSPatternMaker` a `SMISSGrayBinaryPattern` zahŕňajú konštrukciu vzorových obrazov. `SMISSPattern` je abstraktná trieda definujúca rozhranie tried pre vytváranie vzorových obrazov.

`SMISSConsole` je globálna trieda, ktorá spravuje výpis na konzolu programu pre všetky časti aplikácie. Slúži na komunikáciu s užívateľom, informuje ho o priebehu metód, a ich úspešných zakončeníach, alebo o chybách v priebehu. Inštancia triedy `SMISSConsole` musí byť inicializovaná pre konkrétne použitie v užívateľskom rozhraní, ktoré sa stará o realizáciu metód na vypísanie reťazca znakov a podobne.

¹ Ku kalibrácii projektora je potrebná kamera a trieda `SMISSPatternMaker`.

`Triedy` `SMISSActiveProjector`, `SMISSActiveProgram`

a `SMISSActiveCameras` sú globálne triedy, ktoré zjednodušujú prácu s jednotlivými triedami a metódami. Ponúkajú metódy na manažovanie inicializovaných kamier, ako aj inicializovaného projektora a skenovacieho programu. Pomáhajú pri implementácii užívateľského rozhrania, ktoré komunikuje najmä s týmito triedami.

Podrobnejší popis jednotlivých tried, ako aj ostatných pomocných tried neuvádzame vzhľadom na mohutnú funkcionálnosť jednotlivých objektov. Dodávame len, že celková funkcionálnosť projektu SMISS bola implementovaná v jazyku C++ a zaberala viac ako 10 000 riadkov kódu. Užívateľské rozhranie bolo implementované v C++/CLI a vyžiadalo si taktiež viac ako 10 000 riadkov.

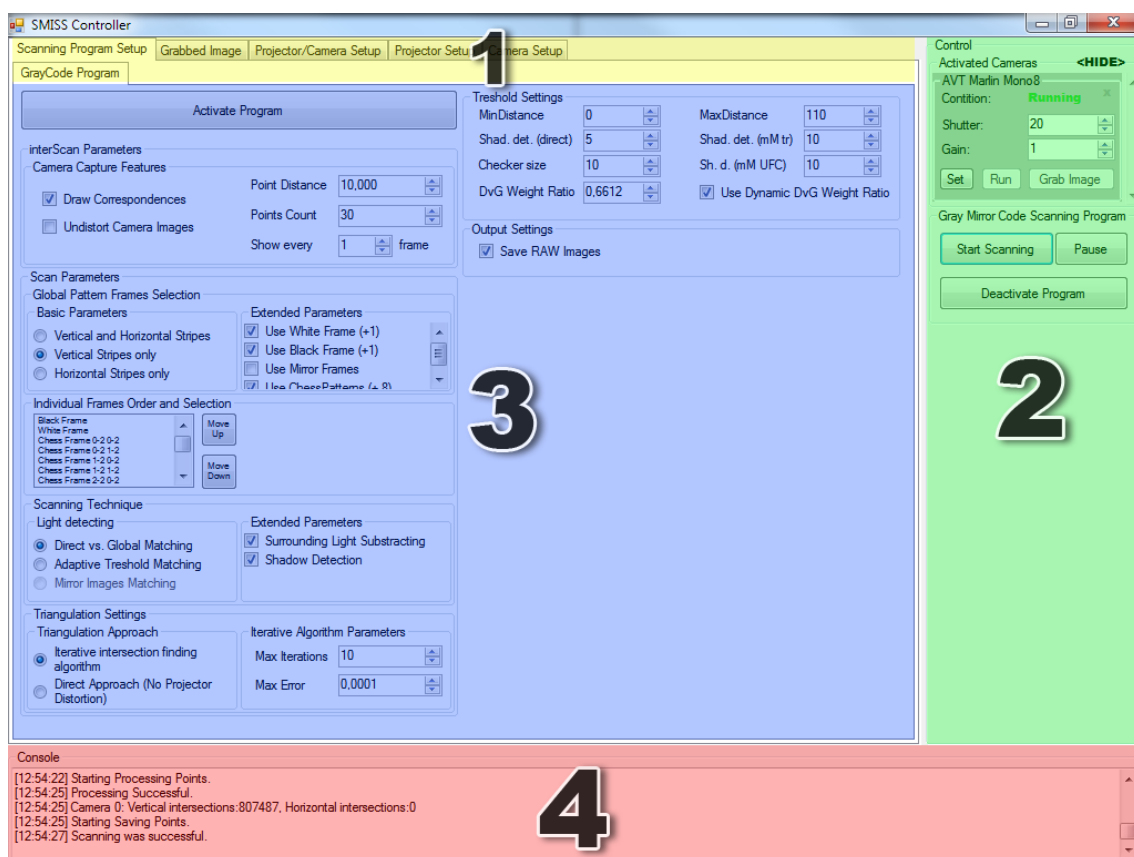
5.1.1.2 HDR SMISS

Rozšírenie HDR SMISS ja v súčasnosti vyvíjané samostatne a finálna syntéza so systémom SMISS ešte nebola ukončená. Metódy implementujúce v práci popísané algoritmy sú implementované do triedy `SMISSGrayCodeScanningProgram`. V terajšom stave sú však stále pod testovaním a nebolo k nim ešte vytvorené užívateľské rozhranie. Detaily o prototypu HDR SMISS si popíšeme časti Hardvér.

5.1.1.3 Užívateľské rozhranie

Užívateľské rozhranie bolo implementované v jazyku C++/CLI. Pri vývoji sa dbalo na jednoduchosť používania. Rovnako sme sa snažili automatizovať čo možno najviac úkonov tak, aby užívateľ musel vykonať len nevyhnutné.

Rozhranie pozostáva z niekoľkých častí, a to časti pre správu a prácu so skenovacími programami, časťou pre zobrazovanie obrazu kamier. Ďalej obsahuje moduly pre nastavenia párov medzi kamerou a projektorom, nastavenia projektora, rovnako ako nastavenia kamier. Pridali sme aj záložku pre nástroj na prototypovanie o ktorom povieme neskôr. Medzi týmito modulmi možno prepínať pomocou záložiek v časti 1 (viz. Obrázok 27).



Obrázok 27: Uživatelské rozhranie projektu SMISS

Každý z modulov má osobitnú stránku, ktorá sa zobrazí v časti 3.

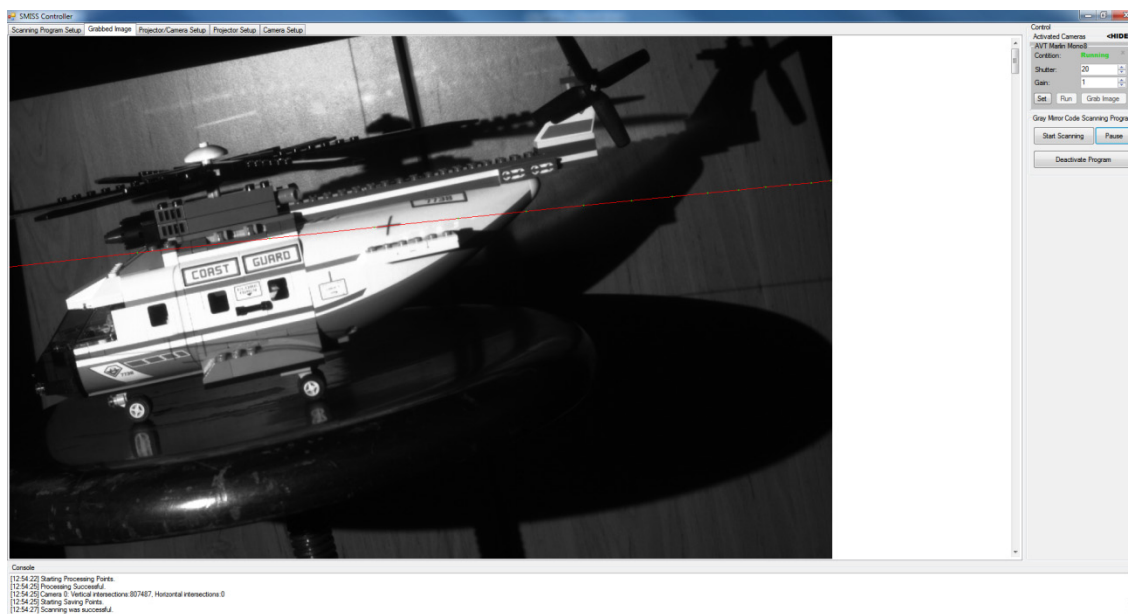
Časť 2 obsahuje aktuálne kontrolné nastavenia kamier¹, prípadne procesu, ktorý je aktivovaný. V súčasnej dobe môže byť aktivovaný iba jeden proces, a to buď skenovací, alebo kalibračný proces jedného zo zariadení, prípadne páru kamery a projektora.

Výpisy z konzoly sa vykresľujú v časti 4.

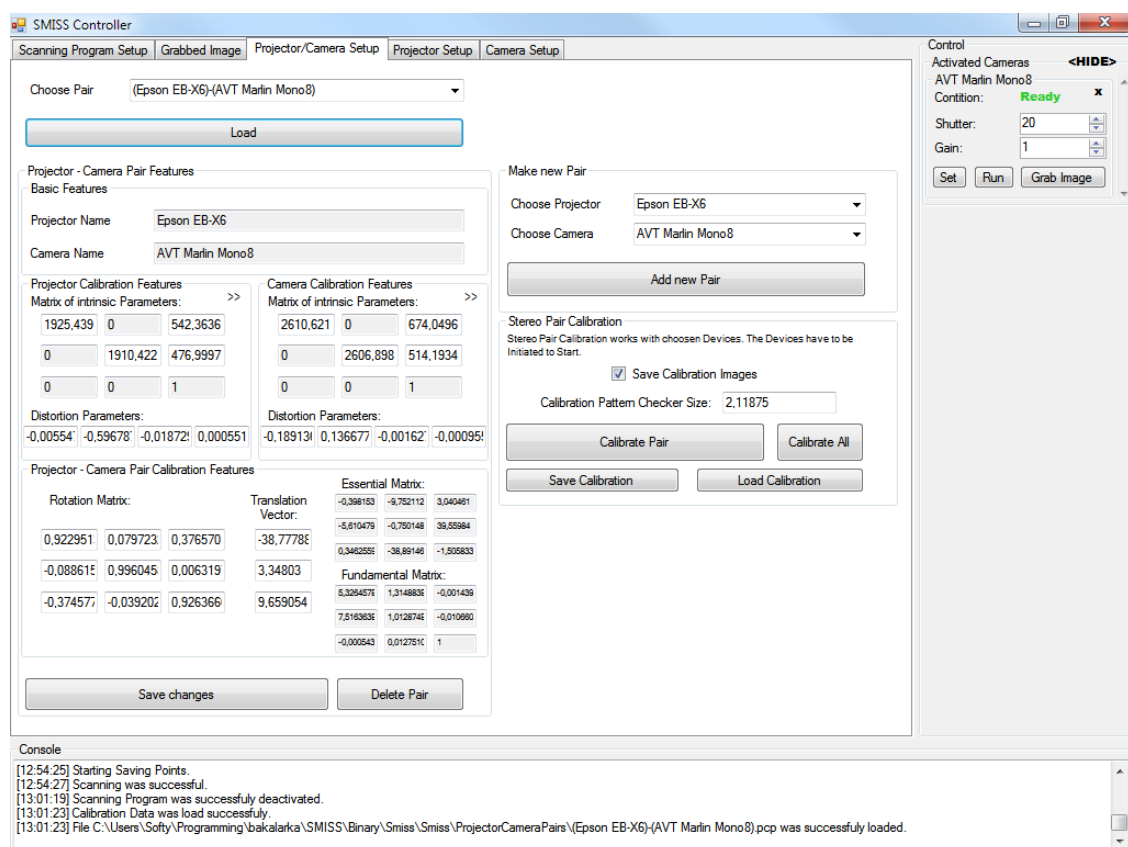
Každý z častí sa dá meniť veľkosť podľa potreby používateľa.

Na obrázku 28 možno vidieť panel Grabbed Image ukazujúci aktuálny obraz kamery. Obrázok bol získaný medzi jednotlivými skenovaniami, červená čiara prechádzajúca čiernym krížikom je vykreslená krivka symbolizujúca, kde sa premietne do kamerového obrazu priamka, určená aktuálnym umiestnením kurzora na obraze projektora.

¹ Systém podporuje neobmedzený počet inicializovaných kamier, pričom s každou z nich sa dá súčasne pracovať, snímať a ukladať obrázky a podobne. V časti 2 sú pod sebou vykreslené ovládacie panely pre všetky aktuálne inicializované kamery, uložené v globálnej triede `SMISSActiveCameras`.



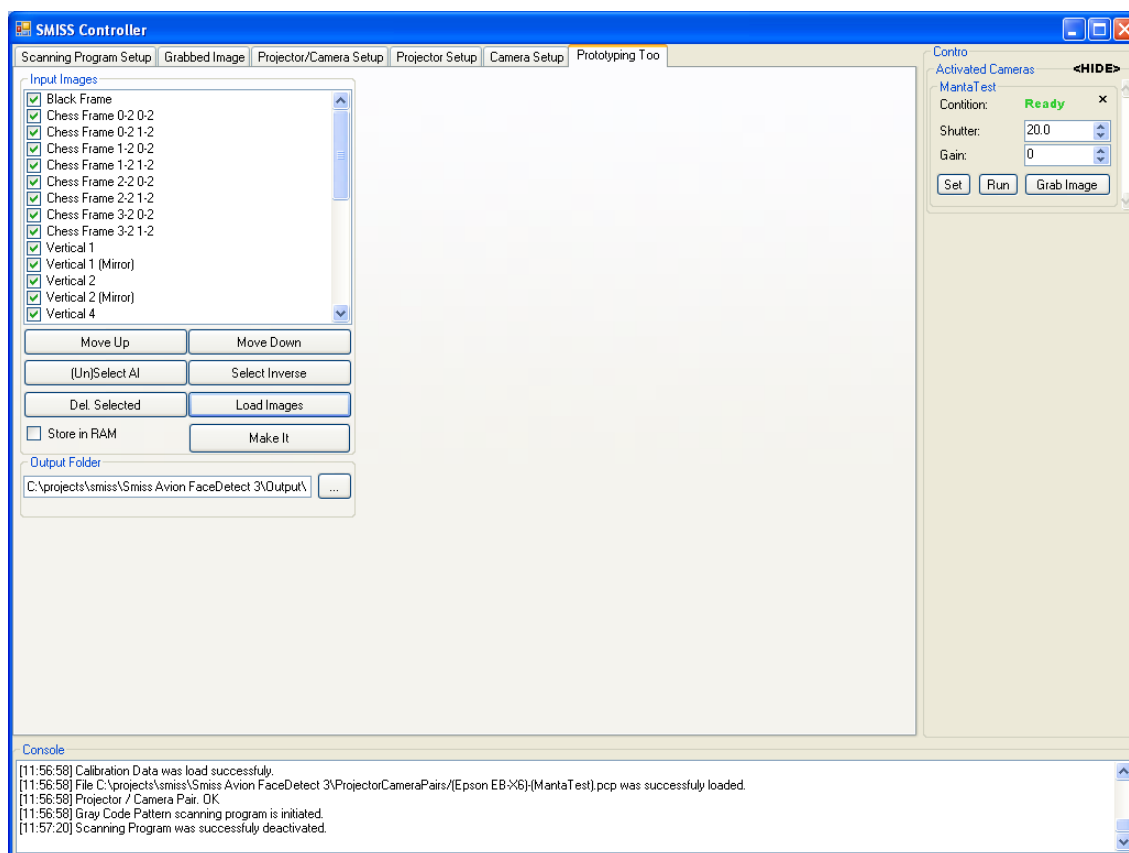
Obrázok 28: Obrázok z procesu skenovania



Obrázok 29: Užívateľské rozhranie. Panel pre nastavenia páru kamery s projektorom

Popísaná funkcionálna bola od bakalárskej práce výrazne zlepšená. Bolo uskutočnených množstvo úprav zvyšujúcich robustnosť systému, boli doladené chyby a nedostatky a boli implementované časti starajúce sa rozšírenie HDR SMISS. Pre rýchly nástroj na vytváranie prototypov metód využívajúcich štruktúrované osvetlenie

sme vytvorili modul PrototypingTool. Užívateľské rozhranie prislúchajúce tomuto modulu možno vidieť na obrázku 30.



Obrázok 30: Modul pre testovanie metód

Daný modul umožňuje načítať sadu obrázkov z disku, ktorým je potom možné zadať poradie. Funkcionalita modulu je jednoduchá, po odštartovaní prejdú kamery do synchronizovaného režimu a postupne sú projektorom projektované jednotlivé obrázky a pre každý z nich získajú aktívne kamery obrázok. Tieto obrázky sa uložia na nastavenú adresu a sú pripravené pre ďalšie spracovanie.

5.1.2 Hardvér

V tejto podkapitole si popíšeme jednotlivé prototypy systému, ktoré boli zhotovené za rozličnými účelmi. Popíšeme si ich stavbu ako aj špecifickú funkcionality.

5.1.2.1 Pôvodný prototyp systému SMISS

Pôvodná hardvérová montáž systému SMISS bola zostavená z hliníkového profilu, na ktorom je umiestnený projektor a kamera. Hliníkový rám zabezpečuje fixnú polohu zariadení a je namontovaný na video statíve. Kamera je upevnená na zostrojenej montáži umožňujúcej pohyb v dvoch stupňoch voľnosti, teda systém je možné

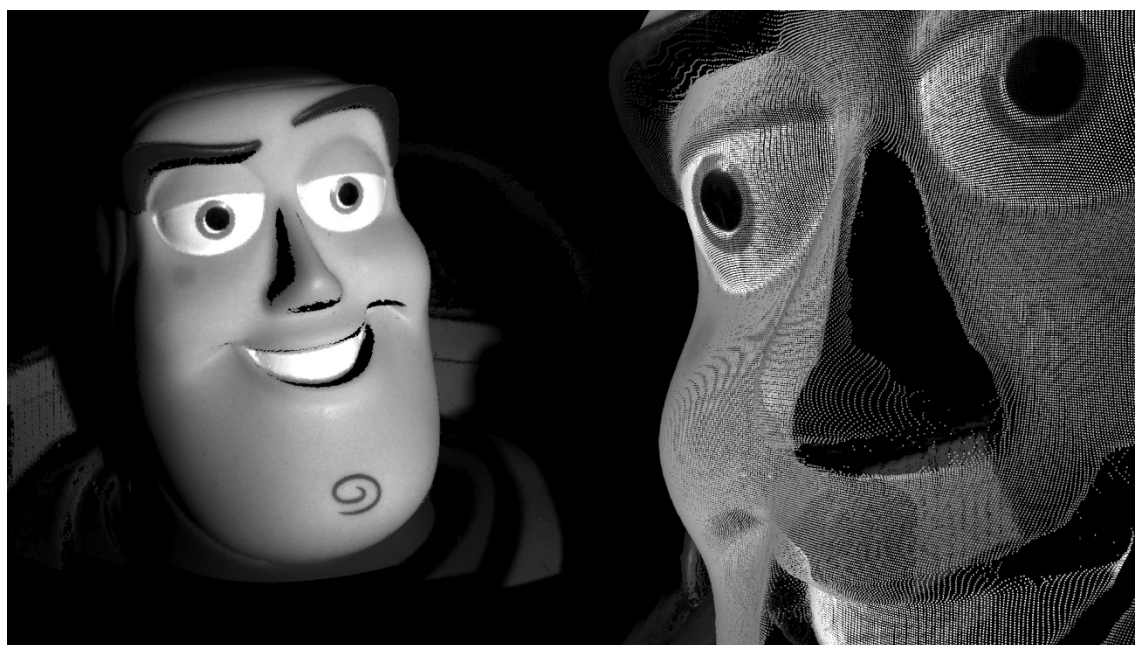
nakonfigurovať na snímanie malých aj veľkých objektov. Fotografia prototypu možno vidieť na obrázku 31.



Obrázok 31: Pôvodný prototyp systému SMISS

S prototypom bolo urobené množstvo testov. V jednom z testovaní sme pred objektív projektora predradili šošovku, vďaka ktorej sme obraz projektora dokázali zaostriť na veľkosť 8x6 cm. Na snímanie sme použili objektív s vysokým ohniskovým číslom. Systém sme nakalibrovali pomocou zmenšenej verzie šachovnicového vzoru. Vo výsledku sme dokázali snímať malé objekty s vysokým rozlíšením¹. Pre ukážku ponúkame vyrenderované mračno 3D bodov nasnímanej figúrky Buzz Lightyear na obrázku 32. Tvár figúrky má veľkosť 3,5x5 cm.

Na ľavej strane môžete vidieť surové nasnímané dáta. Mračno napravo bolo po nasnímaní ešte spracované našim algoritmom.



Obrázok 32: Nasnímané mračno bodov

¹ S rozlíšením systému sme sa dostali na úroveň 50 mikrometrov.

5.1.2.2 Prototyp pre výstavu Virtuálny Svet 2012

Táto zostava bola vytvorená pre potreby výstavy Virtuálny Svet 2012 v nákupnom stredisku Avion. Prototyp bol vytvorený ako plne automatický, tak aby nebol pre jeho obsluhu potrebný žiadny zásah operátora. Systém je optimalizovaný na rekonštrukciu tváre a je uzavretý do skrine vybavenej projektorom, kamerou, počítačom, reproduktormi, chladením, tak ako aj všetkou potrebnou kabelážou a zdrojmi. Projektor a kamera sú umiestnené vo vertikálnej polohe.

Po spustení systém odoberá obrázky, a akonáhle zaregistruje tvár osoby v skenovanom rozsahu, prepne sa do režimu snímania. Integrované reproduktory spustia sekvenciu inštrukcií a následne je odštartovaný skenovací proces. Po ukončení sú skenovanej osobe oznámené ďalšie inštrukcie a finálny model sa odošle do vizualizačného počítača pomocou káblového, alebo bezkáblového spojenia.

Ponúkame obrázok konceptu a finálnej realizácie na obrázku 33.



Obrázok 33: Vyrenderovaný vizuálny návrh prototypu (Vľavo). Realizovaný prototyp (Vpravo)

Pre získanie prehľadu o prototypu spolu s prototypom pohľadovo závislého stereo zobrazovania ponúkame obrázok 34.



Obrázok 34: Umiestnenie prototypu na výstave Virtuálny Svet 2012

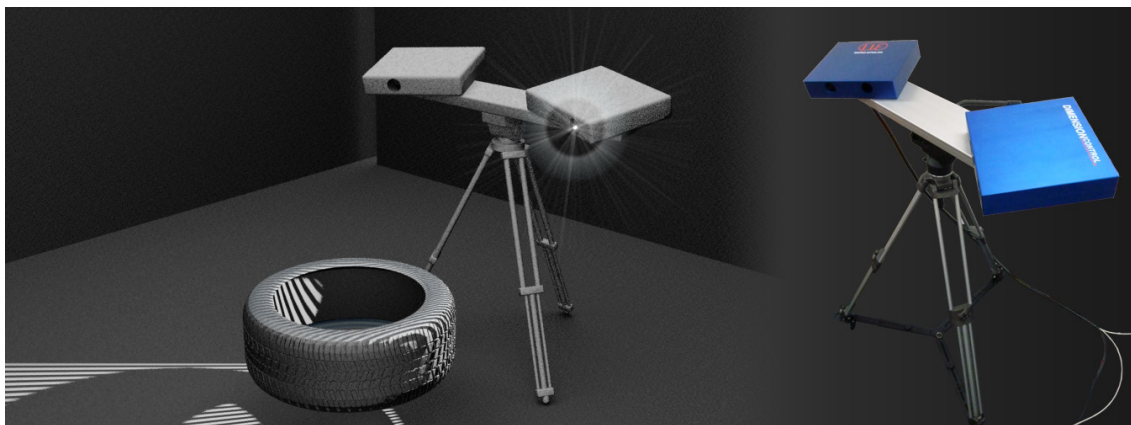
Pre kompletnosť ponúkame na obrázku 35 vyrendrovanú vizualizáciu pána Doc. RNDr. Milana Ftáčnika, CSc. Viacero obrázkov nasnímaných osôb a predmetov uvedieme v kapitole Výsledky a experimenty.



Obrázok 35: Doc. RNDr Milan Ftáčnik, CSc

5.1.2.3 Prototyp pre výstavu Tire Technology Expo 2012 v Nemecku

Tento prototyp bol optimalizovaný na skenovanie výseku pneumatiky. Po hardvérovej stránke bol vyhotovený spoločnosťou ME-Inspection a bol prezentovaný na výstave Tire Technology Expo 2012 v Nemecku. Bola použitá modifikovaná verzia softvéru pre potrebu následnej vizualizácie výsledkov na monitore počítača. Koncept prototypu ako aj výslednú realizáciu ponúkame na obrázku 36.



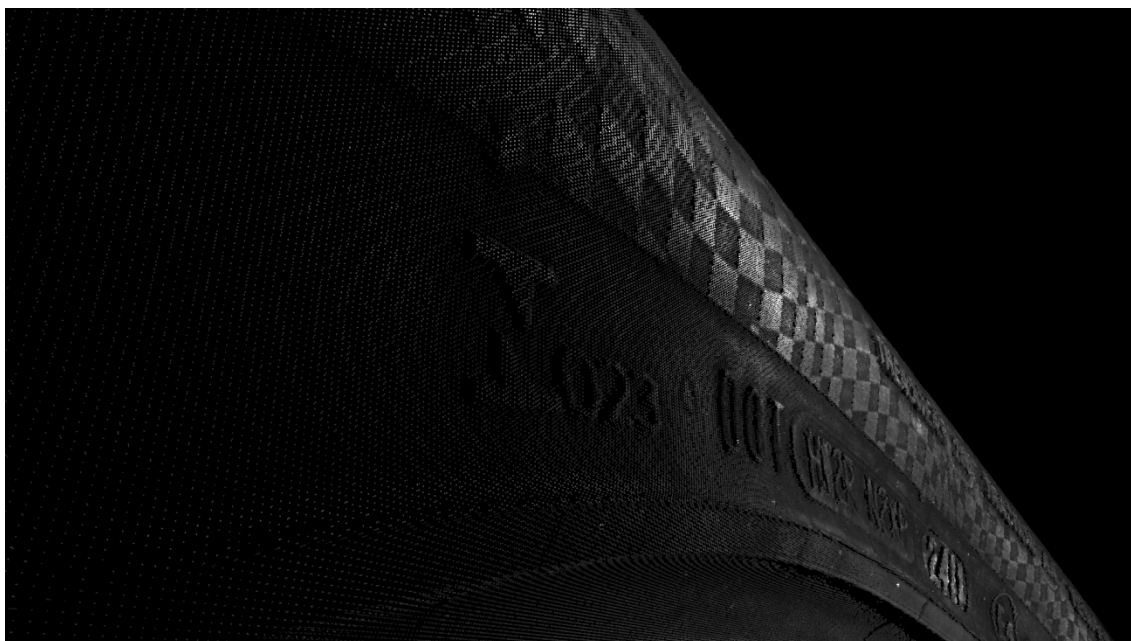
Obrázok 36: Modul pre testovanie metód. Zdroj: Ján Žižka

Prototyp je vyhotovený z hliníku. Dva hliníkové boxy sú fixne namontované na hliníkovom profile. Celý systém je potom namontovaný na štúdiomom statíve. Kabeláž, spolu s elektronikou a vetraním je vstavaná do profilov. V jednom z boxov je zapuzdrený projektor, v druhom kamera a zdroj. Zo systému vedie napájací, sieťový a VGA kábel.

Na nasledujúcich obrázkoch má čitateľ možno vidieť niekoľko vyrenderovaných mračien bodov výseku pneumatiky nasnímaných týmto prototypom.



Obrázok 37: Vizualizácia mračna bodov nasnímaných prototypom



Obrázok 38: Detail zachytávajúci vystúpenie vyrazenej podlače

5.1.2.4 Plánovaný prototyp pre kompletnú rekonštrukciu

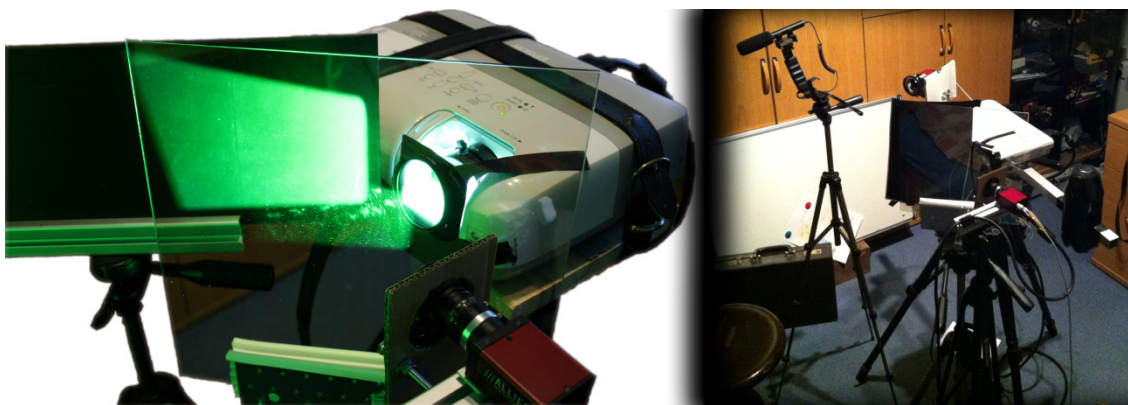
Na tento rok ja naplánované zahájenie vytvorenia prototypu na kompletnú 3D rekonštrukciu. Tento projekt je zastrešený grantom organizácie TATRA BANKA z názvom TATRA BANKA E-Talent. Projekt má názov Virtualizer: 3D Scanner for Complete Reconstruction. Prototyp bude pozostávať z rotačného stolu na umiestnenie objektu a polohovacej konštrukcie na umiestnenie senzorov. Budeme snímať geometriu a textúru objektu s kamerou s vysokým rozlíšením. Pre plošné modulovanie svetla boli zakúpené priesvitné LCD monitory s pomocou ktorých sa budeme snímať aj ďalšie fyzikálne vlastnosti objektu. Výsledok potom bude zlepený z viacerých snímaní do jedného celistvého modelu. Koncept systému ponúkame na obrázku 39.



Obrázok 39: Koncept prototypu pre kompletnú 3D rekonštrukciu. Zdroj: Ján Žižka

5.1.2.5 Prototyp systému HDR SMISS

Nakoľko správne zostavenie spomínaného systému si vyžaduje vysokú mieru presnosti konštrukcie, je riešenie v štádiu prototypu. Výsledná symbióza riešenia so systémom SMISS je naplánovaná s podporou grantu E-Talent na rok 2012. V súčasnom prototypu bola novo pridaná kamera umiestnená na separátny statív, ako aj polopriesvitné zrkadlo. Polohovanie bolo zabezpečené ručne pomocou spätnej väzby. Pred projektor, ako aj pred kameru boli predradené polarizačné filtre podľa popisu v podkapitole Rozšírenie HDR SMISS kapitoly Systém SMISS. Svetlo projektoru odrazené v priamom odraze od polopriesvitného zrkadla bolo tlmené tmavým materiálom, pričom odrazené svetlo zachovávalo polarizáciu, teda bolo úbytkové svetlo odfiltrované polarizačným filtrom kamery.



Obrázok 40: Obrázok prototypu systému HDR SMISS

Tento koncept sa dá zmenšiť a zjednodušiť použitím kvalitnejších zariadení. Namiesto klasického polopriesvitného zrkadla sa plánuje použiť vo finálnej verzii polarizačné polopriesvitné zrkadlo, ktoré jednu rovinu polarizácie prepúšťa a druhú odráža. Takéto optické médium by niekoľko násobne zvýšilo optickú efektivitu riešenia.

Rovnako je potrebné zariadenia pevne zomknúť nehybnou konštrukciou umožňujúcou hardvérovú kalibráciu polohy kamery a optické cesty treba uzavrieť pre získanie bezprašného prostredia. Rovnako je žiaduce minimalizovať vzdialenosť a veľkosť polopriesvitného zrkadla od projektoru a kamery, nakoľko vyššia vzdialenosť dostáva prachové častice na zrkadle do hĺbky ostrosti kamery, čo môže mať za následok nepresnosti pri získaní váhovej mapy.

Druhým navrhovaným konceptom, je zasadenie kamerového modulu a polarizačného polopriesvitného zrkadla za šošovku projektoru. Pridávali by sme potom iba kamerový čip, ktorý by zdieľal s projektorom rovnaký optický systém.

Takéto riešenie si však vyžaduje laboratórny návrh, nakoľko môže byť v dôsledku silného optického výkonu vnútri optickej sústavy projektora problém s kontrastom. Realizácia toho riešenia by znamenala výrazný pokrok aj v iných odvetviach, ako interakcia človeka s počítačom, priemysel, beztieňové snímanie a podobne.

5.2 POHLADOVO ZÁVISLÉ STEREO

V tejto podkapitole si v skratke popíšeme implementáciu prototypu pohľadovo závislého stereo zobrazenia. Na lokalizáciu infračervených LED diód sme využili ovládače ku konzole Nintendo Wii. O dôvode takéhoto výberu si povieme v podkapitole Hardvér.

5.2.1 Softvér

Prototyp bol naprogramovaný v jazyku C++. Riešenie pozostáva z 2 separátnych aplikácií, ktoré zdieľajú rovnakú knižnicu.

Spomínaná knižnica je autormi zostavená, ktorá zapuzdruje prácu s dvojicou Nintendo Wii Remote ovládačov a ponúka metódy na kalibráciu zariadení, vyhodnocovanie 3D pozície sledovaných bodov a iné.

Knižnica je implementovaná v natívnom C++ a využíva knižnicu OpenCV na kalibráciu a knižnicu WiiYourself na komunikáciu s ovládačmi. Pozostáva z okolo 1500 riadkov kódu.

Knižnica je rozdelená na niekoľko tried.

Trieda `WiiRemote` zapuzdruje komunikáciu s ovládačom, umožňuje inicializáciu a taktiež vyčítavanie dát. Drží taktiež kalibračné dáta o senzore a má metódu na kalibráciu vnútorných parametrov kamery.

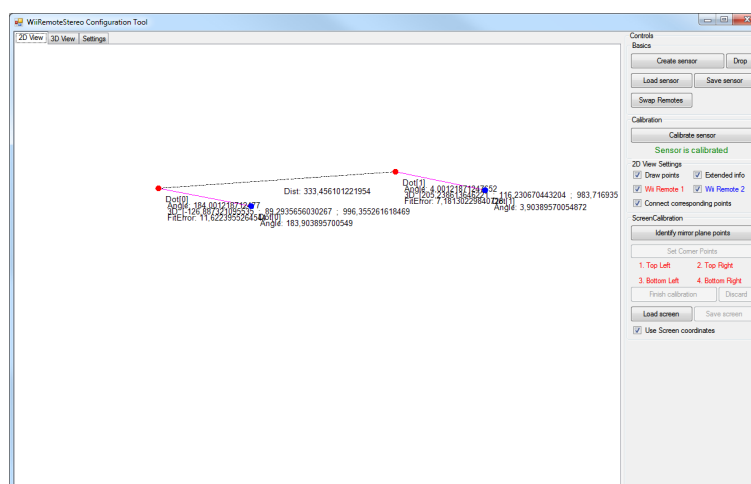
Trieda `WiiRemotePair` má na starosti hlavnú prácu senzora. Vlastní dve inštancie objektu `WiiRemote` a obsahuje metódy na kalibráciu, ktorá zabezpečí získanie matice vonkajších parametrov. Rovnako umožňuje uloženie a načítanie všetkých informácií o vytvorenom senzore, ako aj následnú inicializáciu. Hlavnú časť funkcionality však tvoria metódy na získanie korešpondencie medzi pozíciami nájdených bodov v jednotlivých kamerách. Zo získanej korešpondencie potom vypočíta 3D pozície bodov v priestore.

Trieda `ScreenCoordinates` zahŕňa metódy na kalibráciu pozície zobrazovacej obrazovky, ako aj metódu na prevod súradníc zo súradnicového priestoru senzoru do súradnicového priestoru obrazovky. Taktiež má implementované metódy na načítanie a uloženie dát.

Celá knižnica pracuje veľmi jednoducho, používateľ iba vytvorí inštanciu `WiiRemotePair` zo súboru. Knižnica automaticky jednotlivé senzory inicializuje. Potom je už iba potrebné zadať povelenie na aktualizáciu dát, ktorá aktualizuje dáta senzorov. Potom stačí zavolať metódu na vypočítanie 3D pozícií bodov a výsledok je možné vyčítať z komunikačnej štruktúry. Senzor je možné obnoviť s taktom 100Hz a je možné sledovať až 4 infračervené diódy¹. Ak má používateľ vytvorenú aj nakalibrovanú inštanciu triedy `ScreenCoordinates`, môže pomocou nej prekonvertovať súradnice do súradnicového priestoru obrazovky.

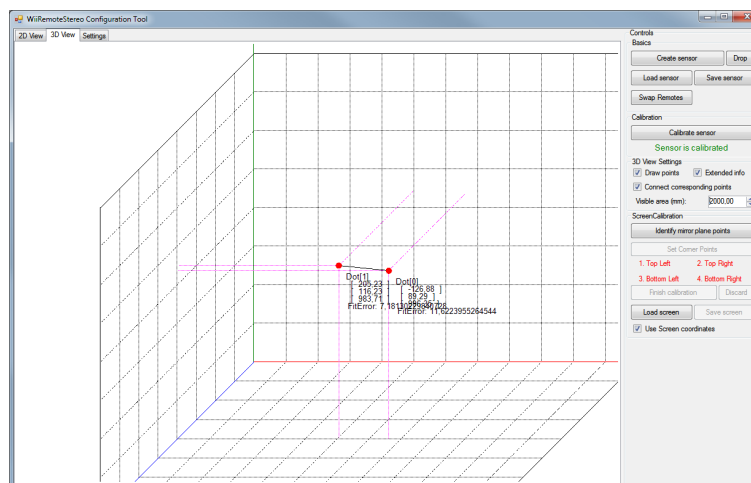
Na vytvorenie a správu senzorov je naprogramovaná aplikácia implementovaná v Microsoft Visual Studio 2008 s využitím .NET. Aplikácia má jednoduché užívateľské rozhranie a umožňuje vytvárať a kalibrovať senzory. Umožňuje aj kalibráciu polohy obrazovky, ako aj ponúka vizuálnu odozvu senzora. Užívateľ si môže navoliť medzi 2D, alebo 3D režimom. V 2D režime vidí pozície jednotlivých bodov v obrazových súradnicových zariadení. Korešpondujúce body sú spojené čiarou a je vyznačená 3D pozícia a vzdialenosť medzi nájdenými bodmi. V 3D režime si môže používateľ pozrieť výsledné 3D súradnice naprojektované v rovnobežnej projekcii do obrázku.

Užívateľské rozhranie možno vidieť na nasledovných obrázkoch.

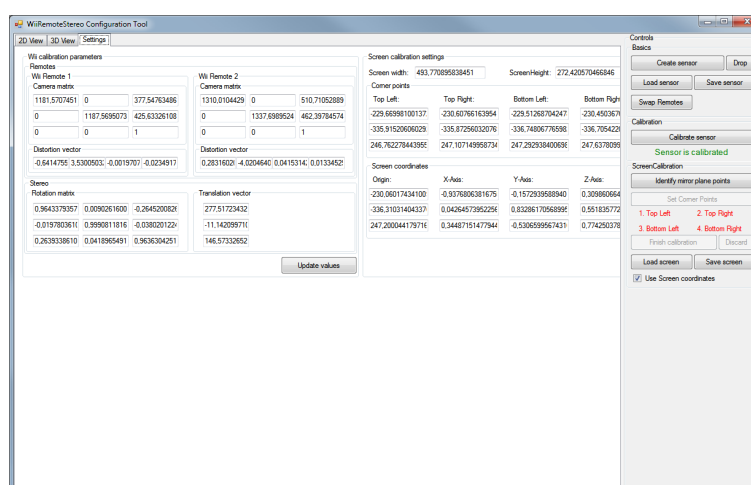


Obrázok 41: Užívateľské rozhranie, 2D mód

¹ Ovládače Wii Remote poskytujú pozíciu najviac 4 bodov.



Obrázok 42: Užívateľské rozhranie, 3D mód



Obrázok 43: Užívateľské rozhranie, kalibračné nastavenia

Aplikácia na prezeranie modelov s využitím pohľadovo závislého stereo zobrazenia je implementovaná z väčšiny v natívnom C++ v prostredí Visual Studio 2008 s využitím knižníc OpenGL a OpenCV. Aplikácia je určená v tejto verzii výhradne na prezeranie modelov nasnímaných systémom SMISS, a to tak, že nasnímaný model je prenesený po sieti do adresára. Na danom adresári sedí vlákno ktoré zisťuje či neprišiel nový súbor. Ak áno, postupne stmaví aktuálne prezeraný model a rozžiari nový.

Mračná bodov nasnímané systémom SMISS sú spolu s textúrou spracované a vykreslené triangulované. V aplikácii je taktiež možnosť využiť pre vizualizáciu autormi navrhnuté metódy na interpoláciu dier ako aj zjemnenie povrchu.

Prehliadač má frontu na n posledných modelov, medzi ktorými sa dá prepínať. Ak užívateľ neurobí počas minúty žiadnu interakciu, aplikácia prejde do demo módu, kde sa postupne ukazujú modely vo fronte pomocou virtuálneho preletu. Akonáhle si

užívateľ nasadí 3D okuliare, senzor zaznamená infračervené diódy a prejde do režimu pohľadovo závislého sterea¹. 3D pozície očí sú pritom ešte filtrované aby sa odstránil jemný pozičný šum.

Užívateľské rozhranie umožňuje pozorovateľovi otáčať a približovať model pomocou počítačovej myši. Aplikácia má k dispozícii aj rozšírenú funkcionality, ako rôzne nastavenia, načítanie modelu z disku či renderovanie videa. Tieto sú však pred používateľom skryté.

Výsledné obrázky aplikácie je možné vidieť inde v texte v rôznych kapitolách.

5.2.2 Hardvér

Hardvér prototypu pozostáva z dvoch ovládačov Nintendo Wii Remote. Tieto sú s počítačom spojené pomocou Bluetooth rozhrania a sú schopné doručiť pozície maximálne 4 infračervených bodov s rozlíšením² 1024 na 768. Spracovanie obrazu a nájdenie bodov sa deje priamo v senzore a teda vrátené informácie sú iba spomínané súradnice. Aktualizovať tieto súradnice dokážeme s taktom 100Hz, čo zabezpečuje možnosť fungovania v reálnom čase.

Oba senzory sú fixne namontované na oceľovom ráme, tak ako je na obrázku 44.



Obrázok 44: Sensory namontované na ráme

¹ Automaticky sa prepne z režimu mono obrazu na stereo obraz. V aplikácii je implementovaný prekladaný stereo obraz pre pasívne prekladané 3D monitory alebo anaglyph (červeno azúrový alebo magnetovo zelený) obraz pre bežné monitory.

² Natívne rozlíšenie senzora ovládačov je 128x96. Senzor však využíva rozostrenej optiky a v obraze sa hľadajú bloby. Výsledná súradnica je získaná ako ťažisko a teda je získaná z podpíxlovou presnosťou, a následne naškálovaná na rozlíšenie 1024x768.

Oceľový rám taktiež spája senzory s obrazovkou LG Cinema 3D. Táto bola zapožičaná z projektu VEGA No. 1/1106/11. Monitor aj Sensory sú pripojené na obsluhujúci počítač. Priložené 3D okuliare sú napájané z adaptéru. Ponúkame obrázok 45 pre spodnú časť hardvérového zostavenia.



Obrázok 45: 3D monitor a okuliare

6 VÝSLEDKY A EXPERIMENTY

V tejto kapitole si stručne popíšeme zistené skutočnosti, zhodnotíme kvalitu použitých metód a taktiež si predstavíme výsledky. Keďže na kvalitu samotného merania vplýva kalibrácia a použitá metóda na rozpoznávanie kódovaných obrazov, budeme predpokladať pri všetkých testoch použitie najrobustnejšej metódy na detekciu tieňov a reflexívnych povrchov, rovnako budeme používať iteratívny algoritmus na zisťovanie prienikov, aby sme zahrnuli aj kompenzáciu skreslenia šošovky projektora. Doložené testy sú staršieho dát a nezohľadňujú metódy a algoritmy pre podpixlovú presnosť. Nakoľko projekt je neustále v štádiu výskumu, komplexnú analýzu presnosti a kvality výstupu budeme uskutočňovať po dokončení ostatných častí systému¹. O budúcom smerovaní si popíšeme v kapitole Budúca práca. Kvalitu výstupu môže čitateľ posúdiť aj podľa množstva obrázkov v texte.

6.1 ZISTENÉ ZÁKONITOSTI

Vzhľadom na diskretnú štruktúru pixlov projektora a kamery veľmi záleží na vzájomnom postavení kamery a projektora. Body kamery definujú projekčnú krivku v obrazovom priestore projektora symbolizujúcu, kde sa reálny bod scény zachytený daným pixlom kamery môže premietnuť. Uhol pruhu projektora (vertikálny, alebo horizontálny) s deriváciou projekčnej krivky kamery v bode prieniku s daným pruhom je dôležitým parametrom. Pri dostatočnej vzdialenosti kamery a projektora sú spomínané projekčné krivky kamery v obrazovom priestore projektora podobne orientované. Uhly, ktoré zvierajú s pruhmi projektora vo vertikálnom smere sú podobné, rovnako aj uhly ktoré zvierajú s horizontálnymi pruhmi. Ak sú uhly s niektorým typom pruhov blízko 90tým stupňom, bude prienik úsečiek 1 až 2 pixle. Uhly k druhému typu pruhov budú však blízke nulovému uhlu, čo nám vzhľadom na rastrové typy obrazov dáva veľkosť prieniku zhora neobmedzeným počtom pixlov. Vzhľadom na túto skutočnosť sú v našom systéme používané kódované obrazy s vertikálnymi, prípadne s oboma pruhmi. V druhej možnosti máme totižto k dispozícii bodovú korešpondenciu, ktorá danou zákonitosťou nie je ovplyvnená.

¹ V súčasnosti nepovažujeme komplexné testovanie metód za dôležité. Problémom je aj fakt, že k dispozícii nemáme žiadny z konkurenčných skenerov pracujúcich na podobnej báze. Cena takýchto zariadení sa v priemere pohybuje okolo 15 000 eur.

Rovnako kvalita kalibrácie výrazne vplýva na zakrivenie a skreslenie výsledného modelu. Kalibrácia preto musí byť precízna. V ďalších testoch sme použili kalibráciu pomocou 14-tich obrazov šachovnice umiestnenej na statíve v rôznych polohách, vzdialenostiach a natočeniach. Doladenie kalibračných údajov pomocou kalibračného telesa je predmetom budúcej práce.

6.2 TESTY SYSTÉMU SMISS

Ďalej uvádzame tabuľku dvoch testov, v ktorých budeme skúmať kvalitu metód na dekodovanie Grayových zrkadlových vzorov. V prvom z nich, budeme porovnávať rozdielne vyhodnotenia dekodovania jednotlivých bitov oproti metóde porovnávania voči negovaným vzorom¹. Pritom pre meranie budeme uvažovať len body, ktoré boli poslané na výstup. Druhý test pozostáva z nasnímania plochého objektu, v našom prípade bola použitá keramická platňa umiestnená v kolmej vzdialenosti 77 centimetrov od skenovacieho systému. Pričom platňa nebola umiestnená kolmo na optickú os ani jedného zo zariadení. Pre výsledné mračná bodov, získané jednotlivými metódami bola vypočítaná optimálna rovina, ktorá body najlepšie aproximuje. Pre túto rovinu bola spočítaná celková chyba pre všetky body (súčet vzdialeností bodov od roviny) a tá bola následne predelená počtom bodov, čím sme získali priemernú chybu merania.

Uvádzame, že všetky testy boli vyhotovené s použitím farebného 3LCD digitálneho projektora s rozlíšením 1024x768 a farebnej digitálnej kamery s rozlíšením 1392x1040. Ďalej podotýkame, že ako kamera bola zvolená priemyselná kamera, ktorá dodáva snímky bez kompresie vo vysokej kvalite.

6.2.1 Test chybovosti

Predkladáme tabuľku vyhotovenú priemerovaním cez 10 rôznych meraní rozdielnych objektov. V tabuľke je porovnanie metód adaptívneho prahovania a metódy porovnávania priameho a nepriameho svetla, oproti metóde porovnávania voči negovaným snímkam.

¹ Táto metóda je pre väčšinu situácií najspoľahlivejšia, pretože určuje prah pre každý pixel každého snímku samostatne.

MDS	Bodov	Vrstva 0		Vrstva 1		Vrstva 2		Vrstva 3		Vrstva 4		CP
		Vrstva 5	%	Vrstva 6	%	Vrstva 7	%	Vrstva 8	%	Vrstva 9	%	
DvG1	258131	69	99,97	69	99,97	193	99,93	248	99,90	433	99,83	87,03%
		799	99,69	1514	99,41	2951	98,86	6561	97,46	21938	91,50	
DvG2	246510	88	99,96	63	99,97	181	99,93	316	99,87	595	99,76	79,92%
		1141	99,54	2089	99,15	5147	97,91	10476	95,75	32521	86,81	
AT1	258131	169	99,93	119	99,95	283	99,89	608	99,76	1155	99,55	63,31%
		2341	99,09	4705	98,18	9818	96,20	22534	91,27	65062	74,80	
AT2	244409	165	99,93	115	99,95	281	99,89	609	99,75	1136	99,54	63,37%
		2308	99,06	4501	98,16	9199	96,24	20915	91,44	61691	74,76	

Tabuľka 1: Vyhodnotenie testu číslo jedna

DvG označuje metódu porovnávania s priamym a nepriamym svetlom. Pričom číslo 1 označuje použitie šachovnicových vzorov, číslo dva používa navyše len čierny a biely vzor.

AT označuje metódu adaptívneho prahovania. Vo verzii 1 používa daná metóda navyše ešte biely a čierny vzorový obraz. AT2 ukazuje výsledok metódy pri skenovaní bez použitia akéhokoľvek iného vzorového snímku.

Počet bodov ukazuje priemerný počet relevantných bodov pre jednotlivé skenovania. Čísla pre jednotlivé vrstvy¹ určujú koľko z relevantných pixlov kamery bolo určených inak ako v metóde porovnávania voči negovaným snímkam. Percentá určujú úspešnosť, teda pravdepodobnosť s akou bol daný bod vyhodnotený rovnako. CP označuje celkovú pravdepodobnosť, ktorá je rovná súčinu jednotlivých pravdepodobností na rôznych vrstvách.

Môžeme si povšimnúť že rast chybných rozhodnutí má exponenciálny charakter. Táto skutočnosť je zapríčinená tým, že medzi jednotlivými vrstvami sa zdvojnásobuje počet prechodov medzi bielymi a čiernymi oblasťami. Teda je viditeľné, že najviac odlišných rozhodnutí je sústredených najmä v prechodoch medzi oblasťami, čo môže byť spôsobené faktom, že daný pixel kamery prijíma svetlo z dvoch rôznych oblastí. Vtedy sú však obe voľby korektné².

6.2.2 Priemerná chyba merania

Na priemernú chybu merania v našom prípade, teda pri snímaní rovinného objektu, vplýva kvalita kalibrácie, rovnosť povrchu, rozlíšenie kamery a projektora a v neposlednom rade kvalita metódy na rozpoznávanie šachovnicových vzorov.

¹ Vrstva v tomto prípade označuje Grayov zrkadlový vzor. Pričom Vrstva číslo 0 obsahuje len dve rôzne oblasti. Vrstva 9 naopak korešponduje s najdetailnejším Grayovým zrkadlovým vzorom.

² Pre algoritmy pracujúce s pixlovou úrovňou presnosti.

Predkladáme tabuľku priemernej odchýlky (kolmej vzdialenosti bodu od roviny), pre jednotlivé metódy a použitie horizontálnych a vertikálnych vzorov, prípadne len vertikálnych vzorových obrazov. Podotýkame, že priemerná chyba je vzhľadom na trianguláciu závislá od vzdialenosti k objektu.

	Použité vzory	Počet Bodov	Súčet chýb v cm	Priemerná chyba v cm
MI	Vertikálne+ Horizontálne	1044364	42 591,10	0,040781854
	Vertikálne	1044035	43 069,20	0,041252640
DvG1	Vertikálne+ Horizontálne	1044225	44 069,90	0,042203452
	Vertikálne	1043747	51 230,30	0,049083063
DvG2	Vertikálne+ Horizontálne	1044587	43 598,20	0,041737261
	Vertikálne	1044210	45 611,80	0,043680677
AT1	Vertikálne+ Horizontálne	1043905	51 795,50	0,049617063
	Vertikálne	1044063	51 139,60	0,048981335
AT2	Vertikálne+ Horizontálne	1044298	52 464,10	0,050238629
	Vertikálne	1044212	50 887,90	0,048733303
Orientácia Roviny		Súradnice	Stred mračna	Normála
		x:	3,1289600	0,0666971
		y:	-8,9507900	-0,2290400
		z:	77,1213000	0,9711290

Tabuľka 2: Vyhodnotenie testu číslo dva

Označenie MI označuje metódu porovnávania voči negovaným vzorom. Ostatné skratky sú rovnaké ako v Tabuľke číslo 1.

Predkladáme aj tabuľku ďalšieho merania na bežnej bielej stene, v kolmej vzdialenosti 153 centimetrov od systému.

	Použité vzory	Počet Bodov	Súčet chýb v cm	Priemerná chyba v cm
MI	Vertikálne+ Horizontálne	1034436	143 477,00	0,138700703
	Vertikálne	1034530	138 837,00	0,134202971
DvG1	Vertikálne+ Horizontálne	1034397	150 530,00	0,145524397
	Vertikálne	1034290	147 204,00	0,142323720
DvG2	Vertikálne+ Horizontálne	1034623	150 332,00	0,145301235
	Vertikálne	1034006	153 855,00	0,148795075
Orientácia Roviny		Súradnice	Stred mračna	Normála
		x:	-9,5812500	-0,0266226
		y:	-18,7438000	0,1651300
		z:	153,3500000	0,9859120

Tabuľka 3: Vyhodnotenie testu číslo dva, druhé meranie

6.3 TESTY PROTOTYPU HDR SMISS

Nakoľko finálna verzia prototypu HDR SMISS vyžaduje špecifickú konštrukciu a hardvér, spojenie systému SMISS a HDR SMISS do jedného celku nebolo uskutočnené. Pri testovaní sme pozorovali dopad prachových častí nachádzajúcich sa v blízkosti hĺbky ostrosti kamery¹.

¹ Tieto čiastočky môžu byť zaostrené na úrovni niekoľkých pixlov, čo výrazne zvyšuje ich dopad. Finálne riešenie musí byť preto minimalizované.

Ďalší problém spôsobovalo svetlo odrazené z projektora, ktoré je potreba absorbovať. Toto nechcené žiarenie sme absorbovali pomocou čierneho atramentu laserovej tlačiarne, ktoré sa ukázalo byť vhodné, nakoľko časť odrazeného svetla si z veľkej časti zachovala polarizáciu. Aj cez tieto kroky bola však odrazená energia nezanedbateľná a v súčasnom prototypu znemožňovala snímanie povrchov, z ktorých sa odráža menej svetelného žiarenia ako z nášho absorpčného materiálu¹.

Nasadenie riešenia priamo do komplexného systému je časťou budúcej práce.

Pre validáciu našej metódy sme vytvorili nasledovný test. Najskôr sme vyhotovili potrebné kalibrácie korešpondencie obrazových priestorov, ako aj kalibráciu funkcie odozvy projektora. Následne sme metódu aplikovali na scénu s čiernym zamatovým klobúkom na ktorý sme položili papierový vreckovku, aby sme zvýšili dynamický rozsah scény. Následne sme projektovali na scénu posledný bit Grayových zrkadlových obrazov a vytvorili sme pre kamerový obraz s dekodovanou informáciou. Pričom raz sme projektovali príslušný kódovaný obraz s použitím získanej váhovej mapy a raz bez použitia. Tento test potvrdil zvýšenie počtu dobre dekodovaných vzorov. Komplexnejšie testy však budú vyhodnotené až pri plnej konfigurácii systému.

Na obrázku 46 ponúkame projektované kódované obrazy. Hore je možno vidieť obraz bez aplikácie váhovej mapy², naspodku obraz po aplikácii váhovej mapy projektora.

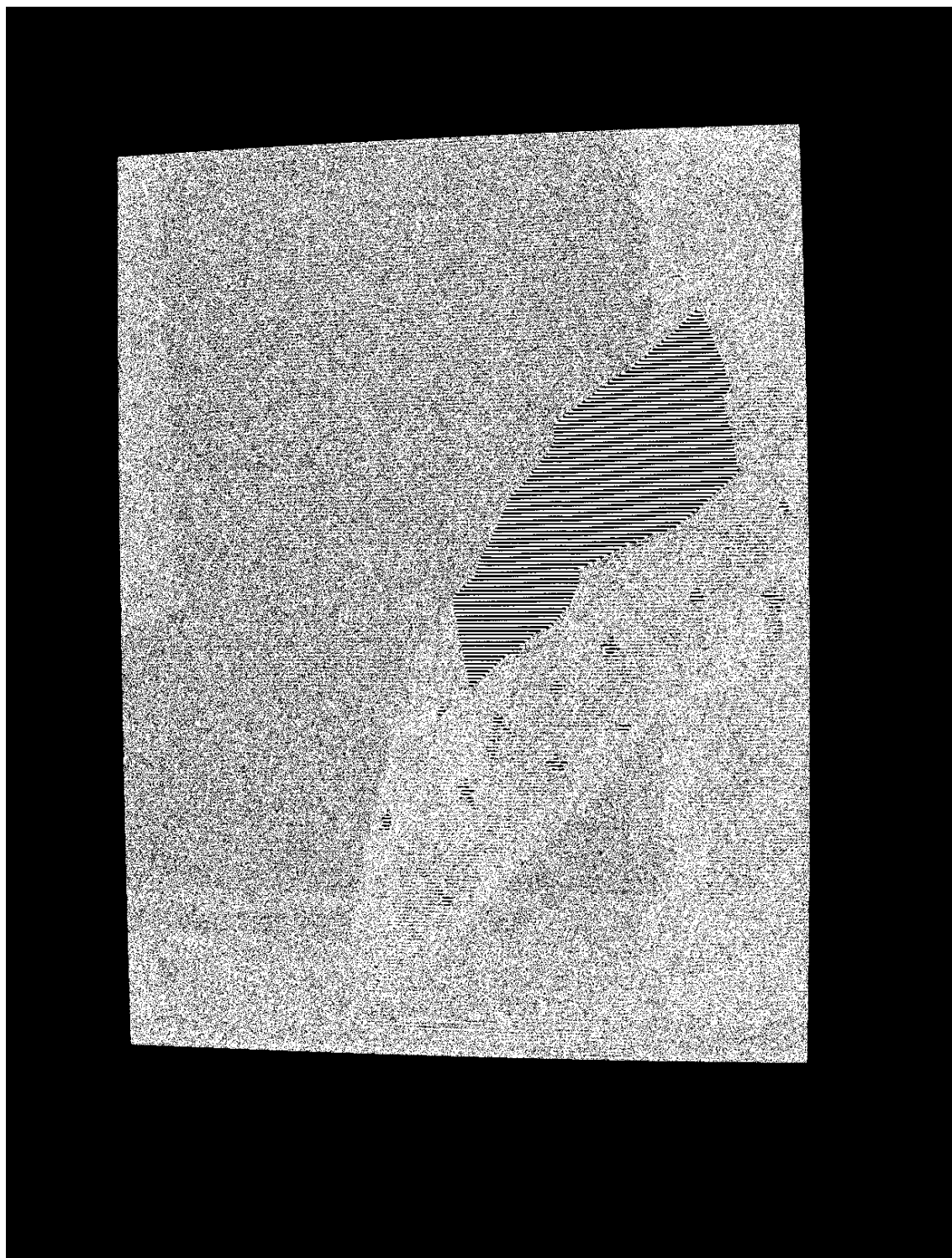
¹ Táto skutočnosť sa dá riešiť použitím absorpčných materiálov na to určených, ako aj použitia polarizačných polopriesvitných zrkadiel, ktoré sú pre naše použitie optimálne.

² Z dôvodu konštantnosti v jednom smere sme obraz urezali.

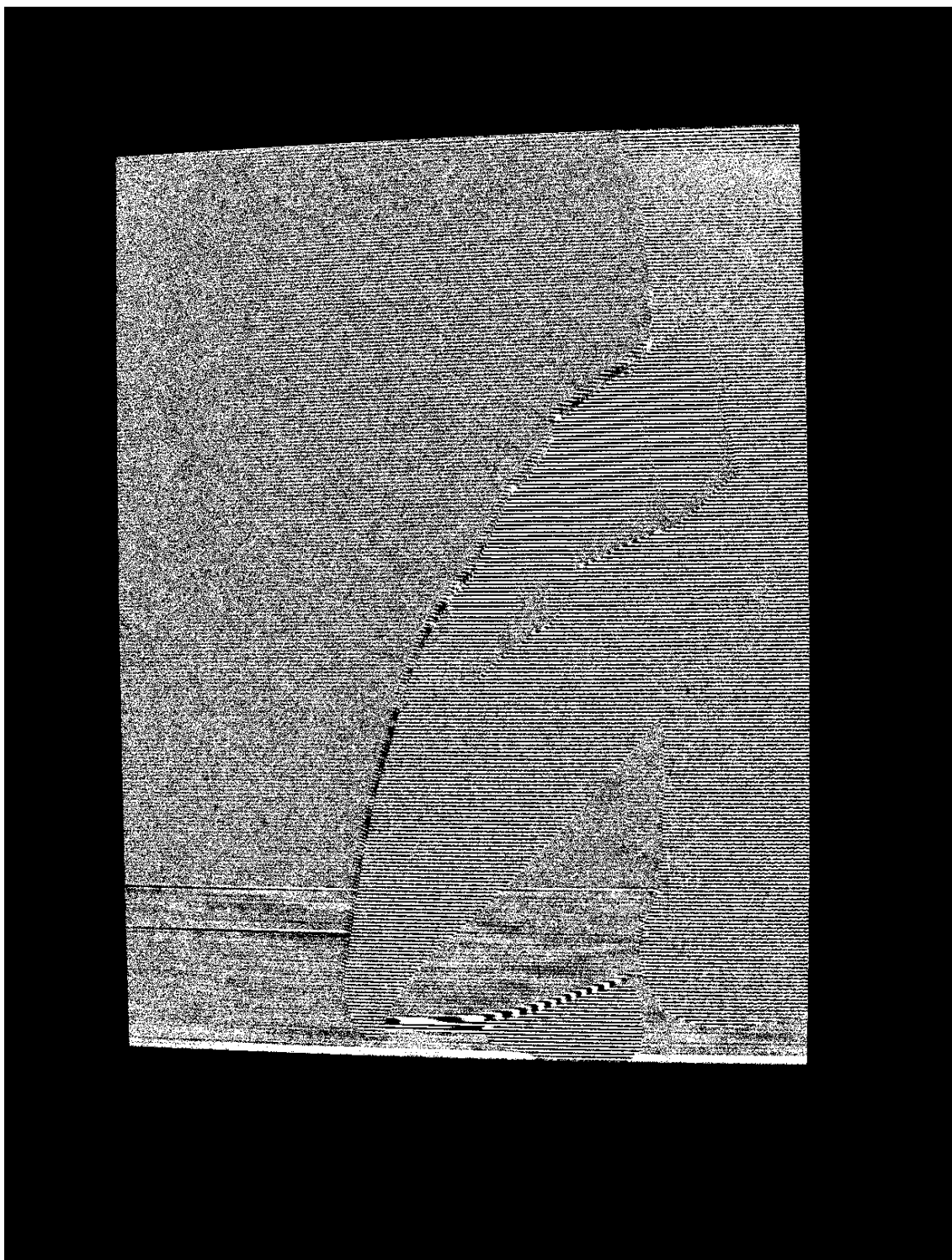


Obrázok 46: Projektované kódované obrazy. Bez aplikácie váhovej mapy (hore). S aplikáciou váhovej mapy (dole)

Obrázky boli naprojektované na objekt a následne dekódované. Binárne obrázky 47 a 48 (natočené doľava) hovoria o dekódovanom bite. Podotýkame, že obrázky boli dekódované co-axial kamerou, teda by mal vzor pozorovateľný na obrázkoch zodpovedať vysielanému kódovanému obrazu. Taktiež chceme podotknúť, že daná kamera je zaťažená vyšším šumom ako kamera určená na geometrickú rekonštrukciu.



Obrázok 47: Dekódovaný binárny obraz štandardnou metódou



Obrázok 48: Dekódovaný binárny obraz s využitím váhovej mapy projektora

Z obrázkov je vidieť nárast počtu dobre dekodovaných bitov. Podotýkame, že sa jedná o kódovaný obraz kódujúci najmenej výrazný bit. V dekodovaní týchto kódov prichádza z dôsledku častej zmeny obrazovej funkcie k najfrekventovanejšiemu výskytu dekodovacích chýb.

6.4 VÝSLEDKY

V tejto kapitole sa budeme venovať dosiahnutým výsledkom počas doby trvania projektu. Na záver potom ponúkneme sadu obrázkov rôznych nasnímaných objektov.

Začiatok práce na systéme bol zahájený v roku 2009 ako bakalárska práca v obore Informatika na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave. Od roku 2010 bola odštartovaná aj spolupráca so spoločnosťou ME-Inspection vo forme podpory. V rovnakom roku bola práca prezentovaná na študentskej vedeckej konferencii na fakulte a získala cenu dekana a titul víťaz vedeckej konferencie. Ďalej bola práca úspešne obhájená na štátnej skúške bakalárskeho oboru Informatika pod vedením Mgr. Jána Žižku. Práca ďalej pokračovala ako diplomová. Autori s prácou taktiež vystúpili na seminári numerickej matematiky.

V roku 2011 sa práca pod názvom HDR – SMISS (High Dynamic Range Scalable Multifunctional Indoor Scanning System) umiestnila na študentskej vedeckej konferencii na stupňoch víťazov, obdržala cenu dekana a cenu literárneho fondu. Postúpila na Československé kolo súťaže ŠVOČ, ktoré sa toho roku konalo v Ústí nad Labem. V tomto kole získala 1. miesto v sekcii aplikovaná informatika. Autor práce bol potom pozvaný do rozhlasovej relácie Večerná Pyramída kde autor pôsobil ako hosť. Epizóda bola zameraná na študentskú vedeckú činnosť.

Dáta nasnímané systémom SMISS boli použité v práci Mgr. Zuzany Haladovej a práca bola citovaná na ŠVK a na posterii na konferencii EUROGRAPHICS v práci [10], v súčasnosti sú robené aj experimenty so systémom pre diplomovú prácu študentky Bc. Barbory Janečkovej, ktorá je vedená Mgr. Jánom Žižkom. V tejto práci sa študentka venuje zachyteniu architektonických objektov. Systém SMISS bol namontovaný na strechu auta.

Autori sa zúčastnili na organizácii výstavy Virtuálny Svet 2012, ktorá sa uskutočnila v Bratislavskom obchodnom stredisku Avion Shopping Park s exponátom Spoznajte svoje virtuálne Ja. Tento exponát je popísaný detailnejšie v publikáciách [14] a [13]. Na túto výstavu bol vyhotovený prototyp, ktorý je popísaný v podkapitole Prototyp pre výstavu Virtuálny Svet 2012. Výstava bola odštartovaná pánom Doc. RNDr. Milanom Ftáčnikom, CSc. Symbolickým prenesením jeho tváre z reálneho do digitálneho sveta. Exponát bol k dispozícii širokej verejnosti počas trvania výstavy. Ponúkame niekoľko obrázkov z výstavy na obrázku 49.



Obrázok 49: Fotografie z výstavy Virtuálny Svet 2012

Článok HDR SMISS – Fast High Dynamic Range 3D Scanner bol prijatý na konferenciu CESC2012, kde obdržal ocenenie Best Presentation a 2nd Best Paper.

V roku 2012 bol vyhotovený aj prototyp systému optimalizovaný na snímanie bočnicovej časti pneumatiky. Toto prototyp bol vystavený na výstave Tire Technology Expo 2012 v Nemecku pod spoločnosťou ME-Inspection a spoločnosťou Micro-Epsilon.

Autori sa v roku 2011 zapojili do grantovej súťaže TATRA BANKA E-Talent, v ktorej predložili projekt na rok 2012. Tento projekt bol schválený a je dotovaný maximálnou možnou sumou.

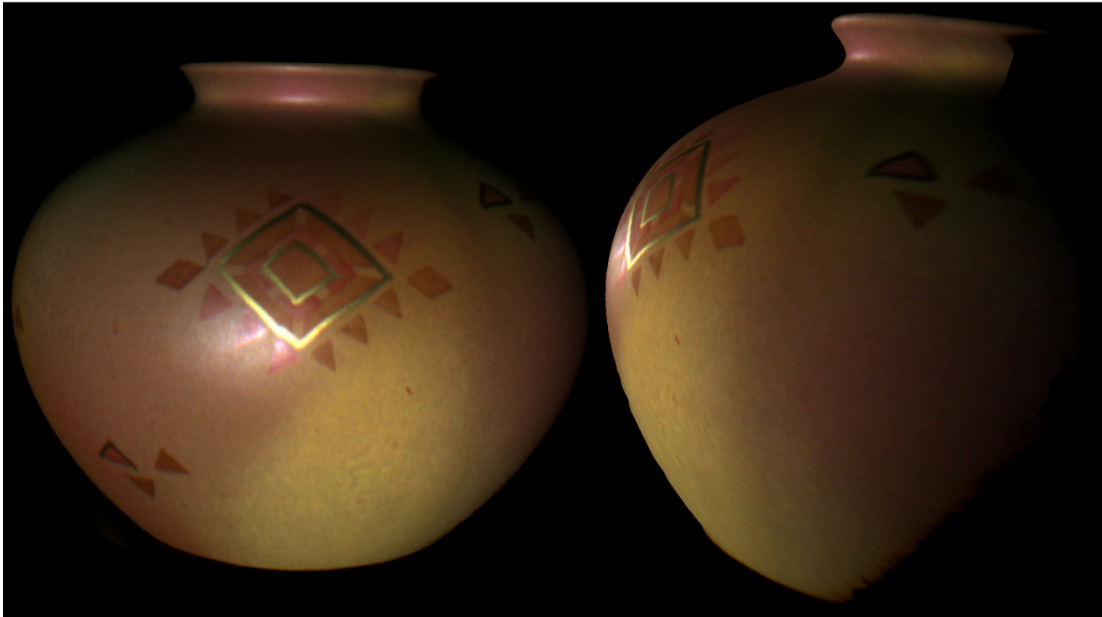
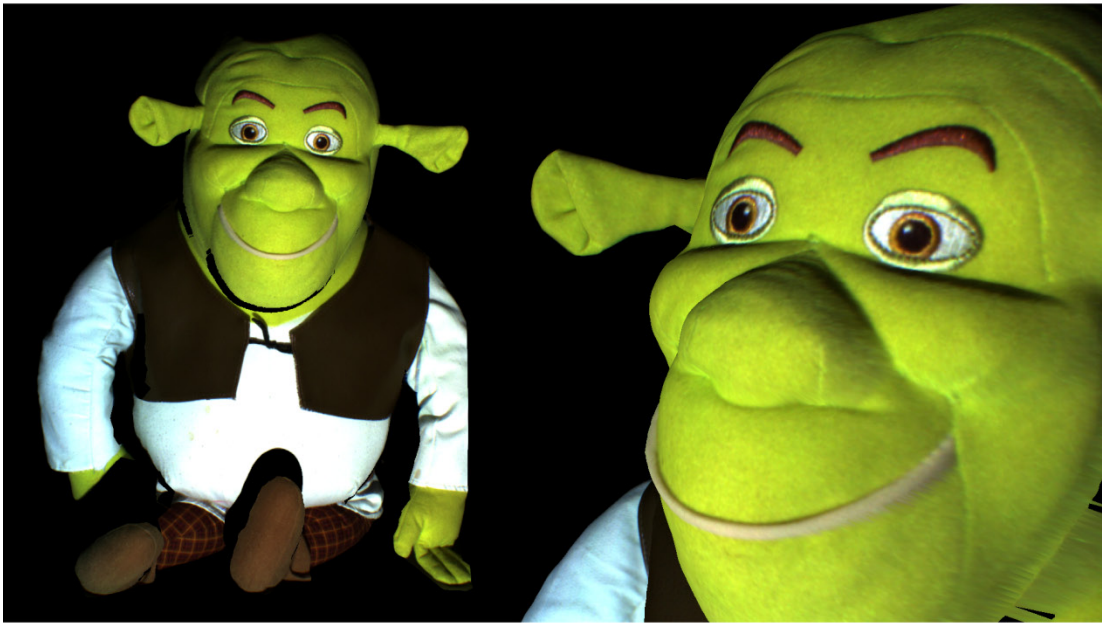
System bol ďalej na iných podujatiach. Na exkurzií pre Fakultu elektrotechniky a informatiky Slovenskej Technickej Univerzity, taktiež aj pre strednú priemyselnú školu na Adlerovej ulici. Rovnako boli autori pozvaný prednášať na podujatie RoboCup, Virtuálna realita bez hraníc či Skorý zber. Fotografie z posledných dvoch menovaných ponúkame na obrázku 50.

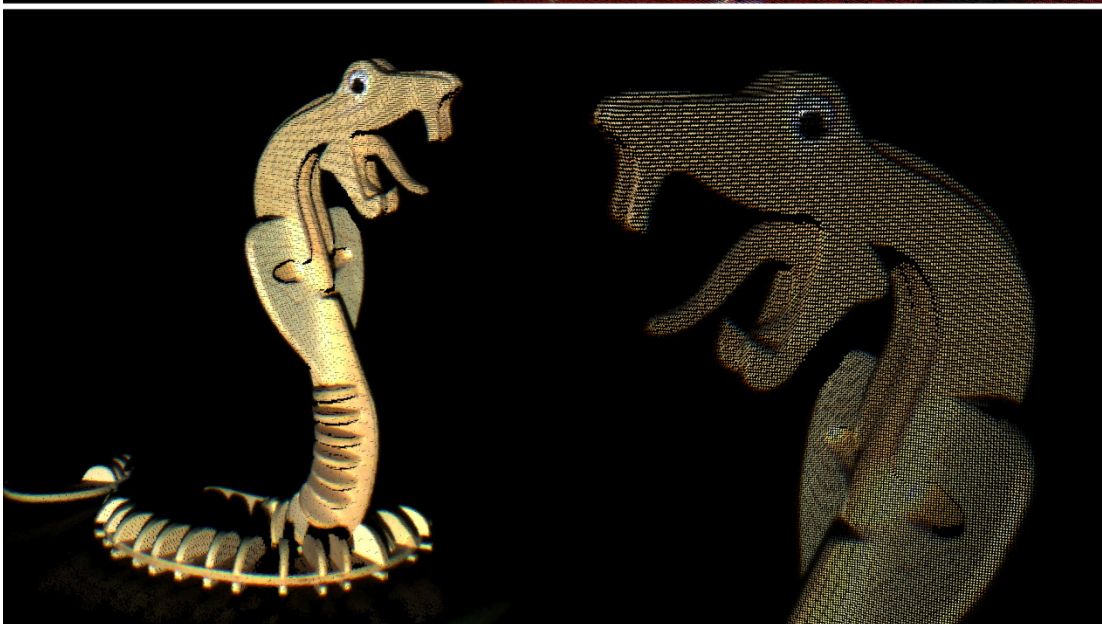
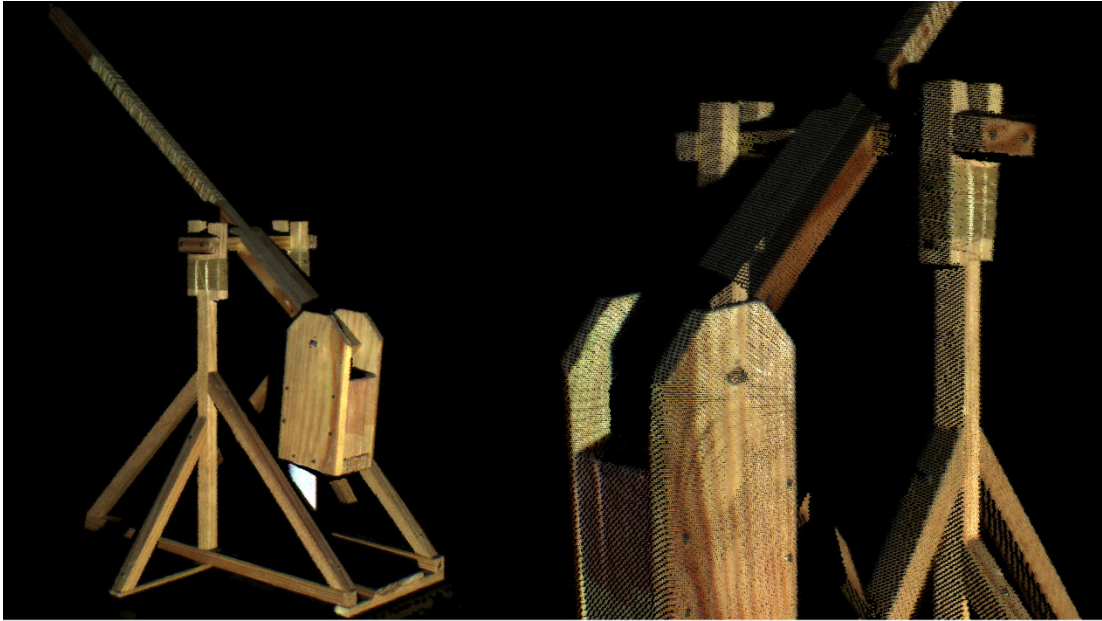


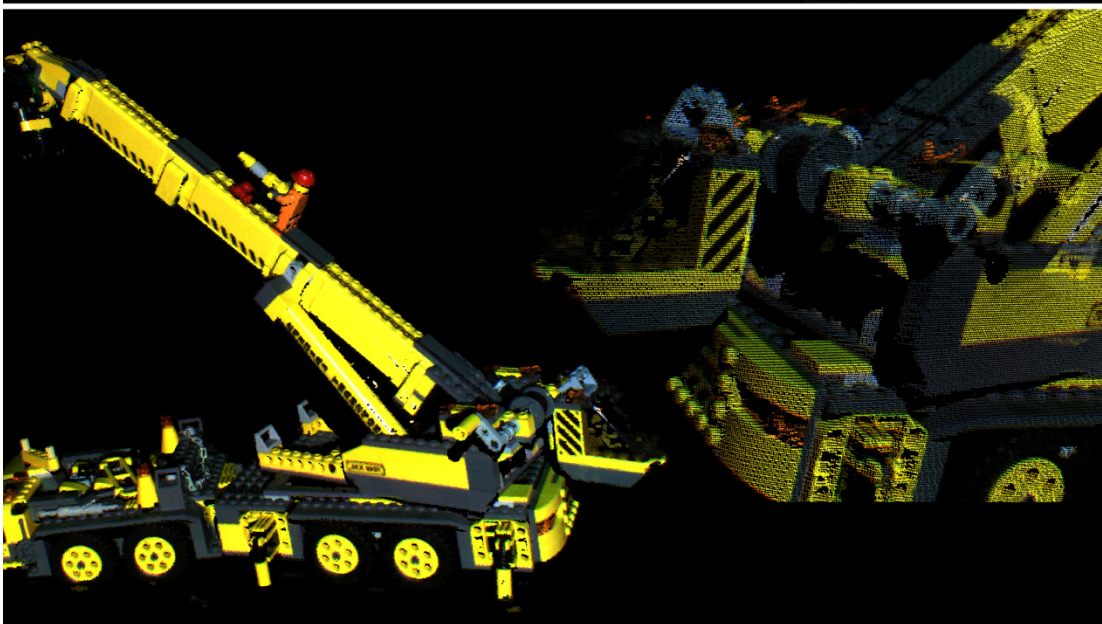
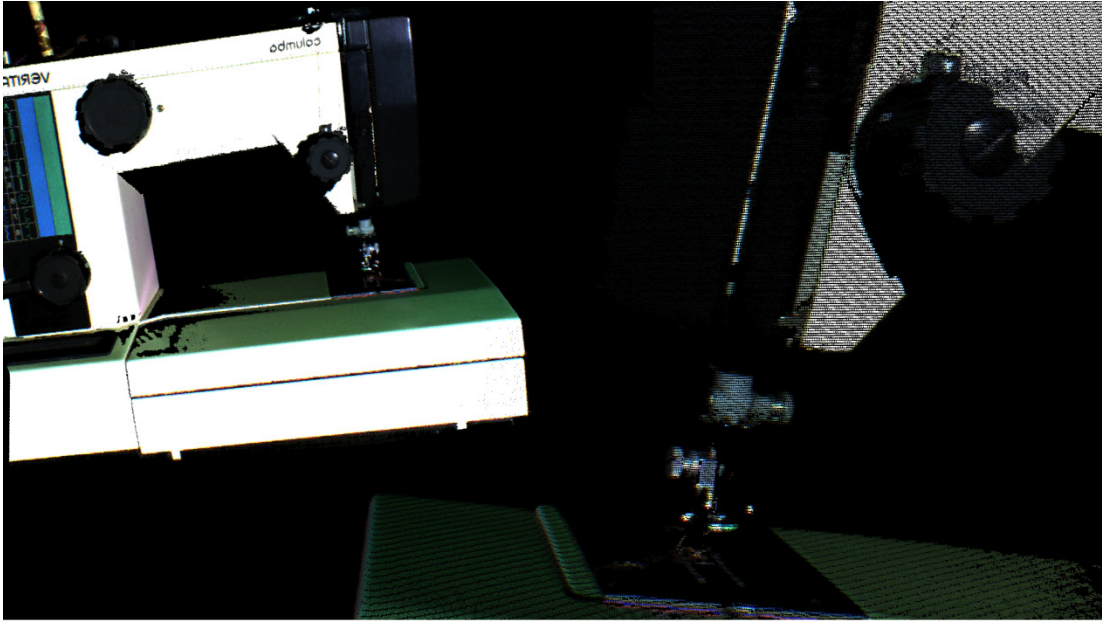
Obrázok 50: Fotografie z podujatia Skorý zber 2012 a Virtuálna realita bez hraníc 2012. Zdroj: Skorý zber, Virtuálna realita bez hraníc

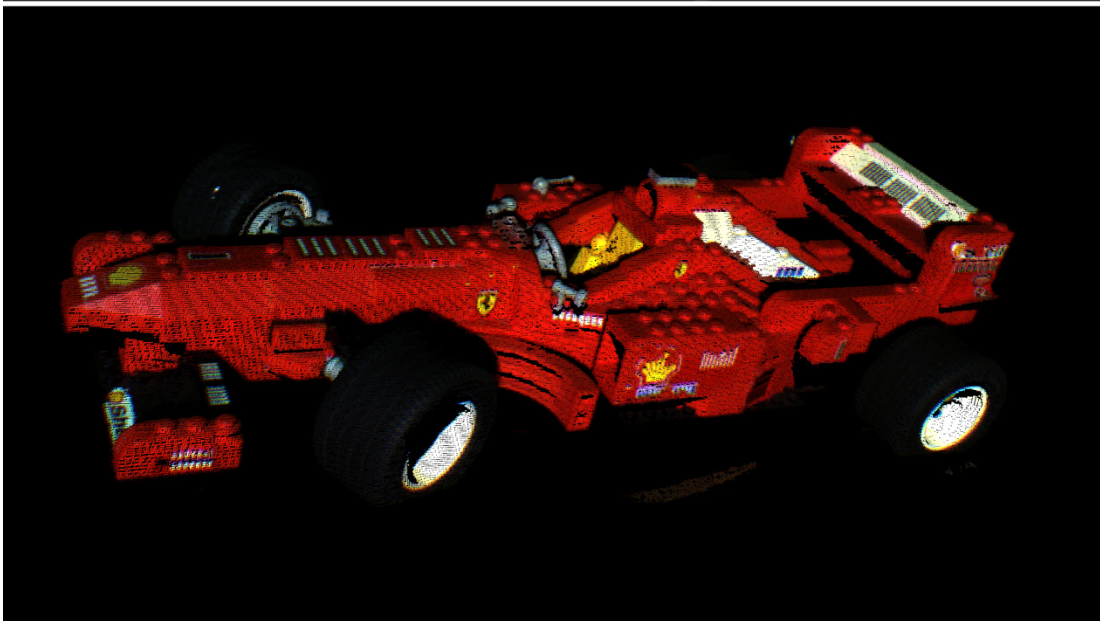
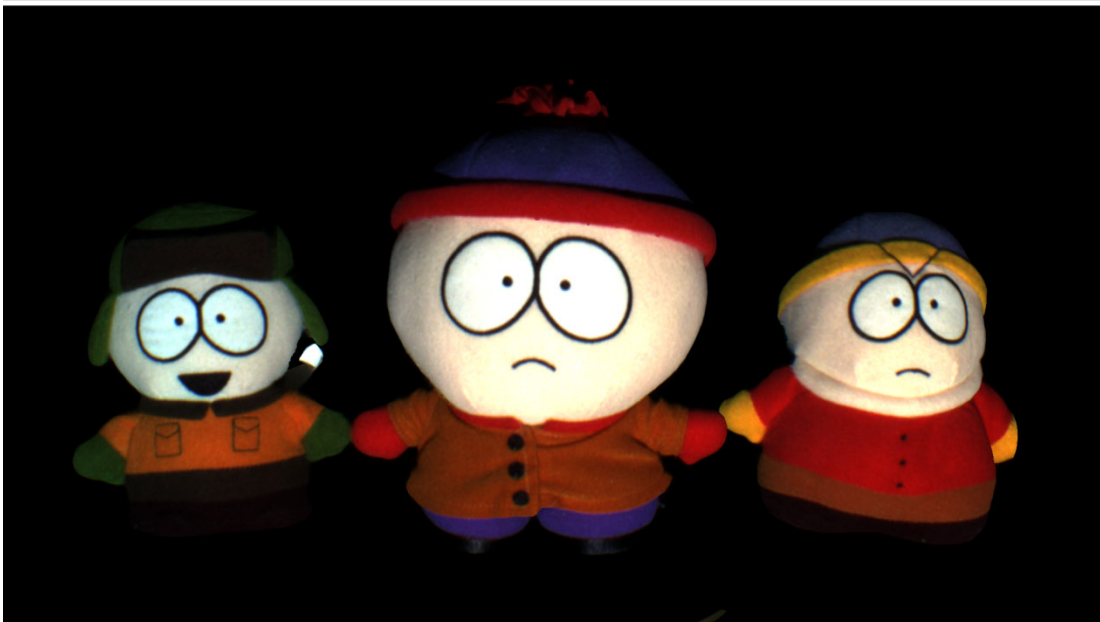
Na ďalších stránkach ponúkame niekoľko prezentačných obrázkov nasnímaných modelov.













Obrázok 51-67: Vizualizácie nasnímaných modelov. Zdroj: Autor

7 BUDÚCA PRÁCA

Ako sme načrtli v kapitole implementácia, budeme pracovať na zostrojení systému na kompletnú rekonštrukciu objektu s využitím štruktúrovaného svetla. Objekt bude automaticky snímaný z viacerých polôh a výsledné dáta budú zošité do finálneho geometrického modelu. Metódu plánujeme rozšíriť o nové možnosti zberu dát z plošného kódovaného svetelného zdroju. Na moduláciu svetla plánujeme využiť aj technológiu transparentného LCD.

Z novej možnosti zberu dát plánujeme vyhotoviť normálovú mapu. Pomocou tejto duálnej informácie, ktorá ukrýva detailný popis vzťahov geometrie na lokálnej úrovni, avšak popisuje tvar iba relatívne. V symbióze s absolútnym skenovaním systému SMISS môžeme získať presnejšie snímanie, a to tak, že budeme relaxovať pozície nasnímaných bodov v imaginárnych guľach s polomerom chyby merania tak, aby spĺňali vzťahy namerané metódou získavania normálovej mapy. Takto budem tlačiť presnosť zdola nahor aj zhora nadol. Veríme, že vo výsledku získame o niekoľko rádov presnejšie meranie. Principiálna výhoda duálnej metódy je i v možnosti nasnímania normálovej mapy zrkadlivých, či glosy povrchoch, na ktorých metóda dosahuje presnejšie výsledky z dôvodu úzkeho laloku v BRDF. Pomocou integrácie potom môžeme získať aj absolútnu rekonštrukciu¹, ktorú môžeme nalepiť na povrchy ktoré s týmito povrchmi susedia.

Rovnako plánujeme snímať aproximáciu materiálových vlastností, pre model ktorý bude najlepšie odrážať možnosti skenovania. Potrebujeme totižto vyvinúť metódu, ktorá zúži stavový priestor možnosti všeobecného priestoru SVBRDF. Aj z tohto dôvodu je naplánovaná kúpa kamery s vysokým rozlíšením².

Taktiež plánujeme do systému zakomponovať prototyp HDR SMISS a to z niekoľkých dôvodov. Možnosť využitia váhovej mapy nám umožní zvýšiť dynamický rozsah zariadenia, a tak minimalizovať celkový čas snímania potrebného pre kompletné nasnímanie scény. Co-axiálna zostava nám však ponúka silnú platformu na aplikáciu ďalších metód. V kapitole Podobné práce sme spomínali články, v ktorých sa autori zaoberali riešením problému globálneho osvetlenia s využitím špecifického kódovania,

¹ Táto rekonštrukcia je zaťažená kumulatívnou chybou, preto sa bude dať použiť iba pre menšie časti objektov ohraničené materiálmi ktoré je možno naskenovať (na aproximáciu hranice regiónu).

² Plánujeme zakúpiť zrkadlovku s rozlíšením nad 15 megapixelov. Táto bude použitá aj na zvýšenie presnosti geometrickej akvizície.

prípadne rozdelením scény na segmenty. Tieto práce však nemali k dispozícii kamerový obraz s konštantnou korešpondenciou obrazového priestoru s obrazom projektora. V našom prípade môžeme analyzovať scénu pred samotným skenovaním a navrhnúť optimálne kódovanie pre rôzne časti scény zaťažené iným typom globálneho osvetlenia. V neriešiteľných prípadoch môžeme pred skenovaním automaticky rozdeliť scénu na regióny, ktoré sa navzájom ovplyvňujú a tie tak snímať osobitne.

Získané dáta z jednotlivých snímání je potrebné registrovať v priestore. Na to plánujeme využiť získanie polohy snímacej hlavy a rotačnej platne¹ pomocou technológie Speckle Sense [42]. Vďaka tomu získame dobré zarovnanie, ktoré plánujeme dorovnať algoritmami ako ICP, ktorý je implementovaný v knižnici PCL.

Výsledné namerané dáta potom plánujeme spracovať pre vytvorenie presnej reprezentácie s rovnomernou hustotou vzoriek. Po tomto procese bude objekt so všetkými ostatnými dátami uložený v surovom stave.

Nakoniec plánujeme export dát do rôznych formátov. Modely v plnom detaile pre fotorealistickú grafiku, ako aj zjednodušené modely z vytvorenou textúrou, displacement a normálovou mapou pre grafiku v reálnom čase. Rovnako dáta možno použiť pre rôzne iné spracovanie.

Tento proces je odhadovaný na niekoľko rokov a môže sa výrazne zmeniť príchodom nových technológií. Výsledkom by malo byť zariadenie schopné automatickej kompletnej rekonštrukcie bez zásahu operátora.

Podotýkame, že pracujeme taktiež na metóde 3D rekonštrukciu v reálnom čase. Pre ktorú sme vyvinuli hybridnú metódu rekonštrukcie využívajúce kódované osvetlenie z jedného snímku s kvalitou výstupu porovnateľnou so systémom SMISS.

¹ Platňu plánujeme vyrobiť z priehľadného materiálu, pričom pod rotačnou platňou plánujeme umiestniť zrkadlo. Vďaka tomuto budeme schopný zrekonštruovať aj podstavu objektu.

8 ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo ponúknuť abstraktnejší pohľad na tematiku automatickej 3D rekonštrukcie, ako aj pokračovanie práce na vývoji systému SMISS. Zadaním práce bolo preskúmať nové možnosti rozšírenia a zdokonalenia systému v poli rýchlosti, presnosti, registrácie a triangulácie výstupu, skúmanie základných materiálových vlastností.

Zvýšenie presnosti systému sme dosiahli použitím kódovania priestoru na princípe fázového posunu, uviedli sme metódu ako získať súvislé spojité kódovanie s využitím bežného digitálneho projektora. Dané kódovanie sme využili na zvýšenie presnosti štandardnej metódy založenej na Grayových zrkadlových kódoch. Pridané kódovanie je založené na analógovom prístupe prenosu informácie a tak je možné zvýšiť dátový prietok pri kódovaní priestoru a znížiť celkový počet potrebných kódovaných vzorov¹. Takto sme dokázali rekonštruovať scénu s využitím iba 5-tich kódovaných obrazov, čím sa dosiahlo 100 percentné zrýchlenie oproti predchádzajúcej najrýchlejšej metóde uvedenej v bakalárskej práci.

Ďalej sme sa v práci zamerali na zvýšenie robustnosti snímania. Definovali sme si problém nedostatočného dynamického rozsahu reálnej scény a jeho riešenie pomocou inovatívneho prístupu rozšírením HDR SMISS. Vďaka novo pridanému hardvéru a softvéru sme boli schopní adaptívne riadiť vyžarovací výkon projektora a tým znížiť dynamický rozsah scény. Vďaka tomu sme rozšírili dynamický rozsah systému na súčin dynamického rozsahu použitej kamery a projektora. Predstavená metóda pritom počíta iba s konštantným nárastom skenovacieho času, čím výrazne zvyšuje rýchlosť oproti triviálnej metóde.

Hardvérové zostavenie prototypu pre systém HDR SMISS rovnako ponúka silný nástroj na budúcu implementáciu metód, ktoré môžu využiť získanú konštantnú korešpondenciu obrazového priestoru projektora s novo pridanou kamerou, a to najmä pre zníženie dopadu globálneho osvetlenia.

Pre vytvorenie systému pre kompletnú rekonštrukciu nám bol udelený grant, vďaka ktorému bude zakúpený potrebný hardvér na ďalšie rozšírenie systému, v ktorom bude implementovaná registrácia jednotlivých meraní a následné zošívanie do finálneho

¹ Takéto zvýšenie rýchlosti, však vzhľadom na nižšiu robustnosť spomínaného analógového kódovania môže zvýšiť chybu výsledného merania.

kompletného modelu. Zakúpený hardvér nám taktiež pomôže pre získanie aproximácie materiálových vlastností snímaného objektu. V tomto smere sme systém rozšírili o možnosť zachytiť textúru objektu v RGB farebnom priestore.

Mimo zadaním ustanovených cieľov sme sa venovali možnosti využitia a propagácie systému, ako aj vizualizácii nasnímanej 3D informácie. Pre tieto účely bolo vytvorených niekoľko ďalších špecifických prototypov, ktoré boli vystavované na národnej aj medzinárodnej pôde. Pre potreby vizualizácie 3D informácie bol vytvorený prototyp pohľadovo závislého stereo zobrazenia, v ktorom boli mimo iného implementované metódy pre trianguláciu získaného mračna, ako aj zjemnenie modelu a rýchly algoritmus na plátanie dier.

Vzhľadom na mieru dosiahnutých výsledkov považujeme splnenie stanovených cieľov za nadmieru úspešné, čo nás motivuje pri ďalšom výskume, ako aj vytváraní dobrého mena Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského.

Prácu pokladáme za prínos z pohľadu navrhnutých riešení a inovatívnych prístupoch. Textom práce sme sa snažili ponúknuť základný princíp systému ako aj nadhľad nad metodikou a využitím automatického 3D skenovania.

Chceme taktiež zdôrazniť mieru získaných skúseností, ktoré sme nadobudli pri implementácii jednotlivých častí systému. Získané skúsenosti na poli výpočtovej fotografie nám pomohli získať nadhľad nad problematikou, ktorý nám umožnil chápať a riešiť problémy ako kombináciu rôznych navzájom prepojených častí.

9 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] M. Born, E. Wolf, and A.B. Bhatia. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge University Press, 1999.
- [2] Tongbo Chen, Hendrik P. A. Lensch, Christian Fuchs, Hans-Peter Seidel, and Mpi Informatik. Polarization and PhaseShifting for 3D Scanning of Translucent Objects. In *Proc. CVPR*, pages 1–8, 2007.
- [3] Tongbo Chen, H.-P. Seidel, and H. Lensch. Modulated phase-shifting for 3D scanning. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on*, pages 1 –8, june 2008.
- [4] Brian Curless and Steven Seitz. 3D Photography. ACM Siggraph '00 Course Notes, August 2000.
- [5] R. Furukawa, H. Kawasaki, R. Sagawa, and Y. Yagi. 3D Scanning Method for Fast Motion using Single Grid Pattern with Coarse-to-fine Technique. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, pages 67.1–67.10. BMVA Press, 2008. doi:10.5244/C.22.67.
- [6] Yuanzheng Gong and Song Zhang. Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the-shelf DLP projector. *Optics Express*, 18(19):19743–19754, 2010.
- [7] Sai Siva Gorthi and Pramod Rastogi. Fringe Projection Techniques: Whither we are? *Optics and Lasers in EngieringOptics and Lasers in Engiering*, 48(2):133–140, 2010.
- [8] Mohit Gupta, Amit Agrawal, Ashok Veeraraghavan, and Srinivasa G. Narasimhan. Structured light 3D scanning in the presence of global illumination. In *CVPR'11*, pages 713–720, 2011.
- [9] Mohit Gupta, Yuandong Tian, SrinivasaG. Narasimhan, and Li Zhang. A Combined Theory of Defocused Illumination and Global Light Transport. *International Journal of Computer Vision*, 98:146–167, 2012.

- [10] Zuzana Haladova. Reconstruction of Cultural Heritage Object Utilizing its Paper Model for Augmented Reality. pages 7–8.
- [11] Michael Holroyd, Jason Lawrence, and Todd Zickler. A coaxial optical scanner for synchronous acquisition of 3D geometry and surface reflectance. *ACM Trans. Graph.*, 29:99:1–99:12, July 2010.
- [12] Ivo Ihrke, Kyros Kutulakos, Hendrik Lensch, Marcus Magnor, and Wolfgang Heidrich. State of the Art in Transparent and Specular Object Reconstruction. In *EUROGRAPHICS Star Proceedings*, pages 87–108, Crete, Greece, 2008. EG.
- [13] J. Žižka, P. Borovský, and T. Kovačovský. Pohľadovo závislé stereovidenie. Virtuálny svet 2012: Myšlienky, kontext, tvorivé dielne a postery pre vedeckú výstavu (DVD), 2011.
- [14] J. Žižka and T. Kovačovský. Spoznajte svoje virtuálne ja. Virtuálny svet 2012: Myšlienky, kontext, tvorivé dielne a postery pre vedeckú výstavu (DVD), 2011.
- [15] Hiroshi Kawasaki, Inose Kenji, Toshihiro Kawasaki, Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, and Yasushi Yagi. Projector camera system for realtime 3D scanning. In *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Workshop on Projector camera systems*, PROCAMS '08, pages 9:1–9:2, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [16] Aleksei Kazantsev and Emil M Petriu. *Robust pseudo-random coded colored structured light technique for 3D object model recovery*, pages 150–155. Number October. IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, 2008.
- [17] Daesik Kim, Moonwook Ryu, and Sukhan Lee. Antipodal gray codes for structured light. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 3016 –3021, may 2008.
- [18] Tomáš Kovačovský. SMISS - Scalable Multifunctional Indoor Scanning System. Bachelor's thesis, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Bratislava / Slovakia, 2010.
- [19] Douglas Lanman and Gabriel Taubin. Build your own 3D scanner: 3D photography for beginners. In *ACM SIGGRAPH 2009 Courses*, SIGGRAPH '09, pages 8:1–8:94, New York, NY, USA, 2009. ACM.

- [20] Masakazu Morimoto and Kensaku Fujii. *A portable 3D scanner based on structured light and stereo camera*, volume II, pages 550–553. Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2005.
- [21] Christopher Nafis. 3D Scanners, Digitizers, and Software for making 3D Models and Measurements, 2012. [Online; accessed 2-May-2012].
- [22] Shree K. Nayar, Xi-Sheng Fang, and Terrance Boult. Separation of Reflection Components Using Color and Polarization. *Int. J. Comput. Vision*, 21(3):163–186, February 1997.
- [23] Shree K. Nayar, Gurunandan Krishnan, Michael D. Grossberg, and Ramesh Raskar. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):935–944, July 2006.
- [24] S.K. Nayar. Computational Cameras: Approaches, Benefits and Limits. Technical report, Jan 2011.
- [25] J. Ohta. *Smart CMOS Image Sensors And Applications*. Optical Science and Engineering. CRC Press, 2008.
- [26] Matthew O’Toole and Kiriakos N. Kutulakos. Optical computing for fast light transport analysis. *ACM Trans. Graph.*, 29(6):164:1–164:12, December 2010.
- [27] J. Pages, J. Salvi, and C. Matabosch. Implementation of a robust coded structured light technique for dynamic 3D measurements. In *Image Processing, 2003. ICIP 2003. Proceedings. 2003 International Conference on*, volume 3, pages III – 1073–6 vol.2, sept. 2003.
- [28] Tao Peng and Satyandra K. Gupta. Model and Algorithms for Point Cloud Construction Using Digital Projection Patterns. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 7(4):372–381, 2007.
- [29] Erik Reinhard, Greg Ward, Sumanta N. Pattanaik, Paul E. Debevec, and Wolfgang Heidrich. *High Dynamic Range Imaging - Acquisition, Display, and Image-Based Lighting (2. ed.)*. Academic Press, 2010.
- [30] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, and R. Scopigno. A low cost 3D scanner based on structured light, 2001.

- [31] Furukawa Ryo, Kawasaki Hiroshi, Sagawa Ryusuke, and Yagi Yasushi. Shape from Grid Pattern Based on Coplanarity Constraints for One-shot Scanning. *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, 1:139–157, 2009.
- [32] Joaquim Salvi, Sergio Fernandez, Tomislav Pribanic, and Xavier Llado. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recogn.*, 43(8):2666–2680, August 2010.
- [33] Joaquim Salvi, Jordi Pages, and Joan Batlle. Pattern Codification Strategies in Structured Light Systems. *PATTERN RECOGNITION*, 37:827–849, 2004.
- [34] Giovanna Sansoni, Marco Trebeschi, and Franco Docchio. State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation. *Sensors*, 9(1):568–601, 2009.
- [35] Richard Szeliski. Computer Vision : Algorithms and Applications. *Computer*, 5(3):832, 2010.
- [36] Eino-Ville Talvala, Andrew Adams, Mark Horowitz, and Marc Levoy. Veiling glare in high dynamic range imaging. *ACM Trans. Graph.*, 26(3), July 2007.
- [37] Shinji Umeyama and Guy Godin. Separation of Diffuse and Specular Components of Surface Reflection by Use of Polarization and Statistical Analysis of Images. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 26(5):639–647, May 2004.
- [38] Wikipedia. Gray code — Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2012. [Online; accessed 26-April-2012].
- [39] Yi Xu and D.G. Aliaga. An Adaptive Correspondence Algorithm for Modeling Scenes with Strong Interreflections. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 15(3):465–480, may-june 2009.
- [40] Song Zhang, Dale Royer, and Shing-Tung Yau. GPU-assisted high-resolution, real-time 3-D shape measurement. *Optics Express*, 14(20):9120–9129, 2006.
- [41] Zhengyou Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 22(11):1330–1334, November 2000.
- [42] Jan Zizka, Alex Olwal, and Ramesh Raskar. SpeckleSense: fast, precise, low-cost and compact motion sensing using laser speckle. In *UIST*, pages 489–498, 2011.